

ECONOMIA DE BAIXO CARBONO

Impactos de Novos Marcos Regulatórios e Tecnologias Sobre a Economia Brasileira

Organizadores

Rudinei Toneto Junior

Marcelo Pinho



Realização



**ECONOMIA DE BAIXO CARBONO:
Impactos de Novos Marcos Regulatórios e
Tecnologias Sobre a Economia Brasileira**

ECONOMIA DE BAIXO CARBONO:
Impactos de Novos Marcos Regulatórios e
Tecnologias Sobre a Economia Brasileira

Organizadores

Rudinei Toneto Junior

Marcelo Pinho

São Paulo
Ribeirão Preto
2015



FUNPEC-Editora

ECONOMIA DE BAIXO CARBONO:
Impactos de Novos Marcos Regulatórios e
Tecnologias Sobre a Economia Brasileira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Economia de baixo carbono : impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a
economia brasileira : / Rudinei Toneto Jr., Marcelo Pinho (coordenadores).

-- Ribeirão Preto, SP : FUNPEC Editora, 2014.

ISBN 978-85-7747-103-4

Bibliografia.

1. Economia ambiental
2. Emissões de gases de carbono
3. Mudanças climáticas
4. Política ambiental
5. Tecnologia I

14-13501

CDD-333.7

Índices para catálogo sistemático:

1. Economia ambiental 333.7

Editor Chefe

Prof. Dr. Francisco A. Moura Duarte

Editor Associado

Prof. Dr. David De Jong

Coordenador de Produção Gráfica,

Capa e Diagramação

Edmundo Cruz Canado

Ilustração da Capa

Dumara Piantino Jacintho

Todos os direitos reservados à Fundação de Pesquisas Científicas de Ribeirão Preto

A revisão final é de responsabilidade do autor.

Proibida a reprodução dos textos originais, mesmo parcial e por
qualquer processo, sem autorização da editora.



FUNPEC-Editora

R. Floriano Peixoto, 2444 – Alto da Boa Vista – 14025-220 Ribeirão Preto, SP
Tel.: (16) 3620-1251 · Fax: (16) 3621-1991
www.funpecrp.com.br – www.livrariafunpecrp.com.br – livros@funpecrp.com.br

Sumário

Prefácio	vii
Equipe do Projeto Economia de Baixo Carbono	xi
Sobre os Autores	xiii
Introdução	xvii
Impactos de Restrições Ambientais e Mudanças Tecnológicas Rumo a uma Economia de Baixo Carbono Sobre a Economia Brasileira: Uma Análise de Equilíbrio Geral	1
Análise das Rotas Tecnológicas com Base no Levantamento dos Grupos de Patentes Verdes	59
Indústria do Cimento	93
Indústria do Alumínio	127
Siderurgia	153
Petróleo e Petroquímica	183
Indústria Aeronáutica	215
Indústria Automobilística	243
Uso da Terra, Grãos e Pecuária	273
Biocombustíveis	297
Bioenergia e Biorefinarias	349
Indústria da Cal	371
Produção Independente de Ferro-Gusa (“Guseiros”)	401
Indústria do Vidro	431

Prefácio

Este livro é um dos resultados de pesquisa desenvolvida a partir da Chamada Pública 01/2010 intitulada **Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas**, promovida pelo BNDES no âmbito do Fundo de Estruturação de Projetos (FEP).

Esta pesquisa se insere no quadro de preocupações sobre a possibilidade de mudanças climáticas decorrentes do aumento da concentração na atmosfera dos chamados gases de efeito estufa, que decorreria de atividades humanas, sobretudo do consumo de energia gerada a partir de combustíveis de origem fóssil. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), responsável por avaliar e sintetizar os principais trabalhos científicos sobre mudanças climáticas, afirma que as temperaturas médias na superfície do globo terrestre devem apresentar um aumento de 1,1 a 6,4 °C entre 1990 e 2100 (IPCC, 2007). As conclusões do IPCC vêm sendo aceitas pela maioria das sociedades e comunidades científicas.

Governos, sociedade civil e organizações não-governamentais de diversos países vêm demonstrando grande preocupação com os prováveis impactos negativos das mudanças climáticas. Políticas e medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa vêm sendo implementadas, com destaque para metas de redução de emissões, introdução de mercados de créditos de carbono, o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) e impostos sobre as emissões. Outras políticas e medidas dizem respeito a investimentos em tecnologias de produção de energia com menor impacto em termos de emissões, como a produção de energia com captura e armazenagem de emissões de carbono, o aumento de eficiência no uso de energia em veículos, construções urbanas e plantas industriais, o uso mandatório de biocombustíveis, adoção de mecanismos de incentivo à redução das emissões advindos do desflorestamento e da degradação dos ecossistemas florestais nos países em desenvolvimento, como o programa REDD (Reduction in Emissions from Deforestation and Forest Degradation).

Diante desse quadro de esforços internacionais e regionais para redução das emissões de gases de efeito estufa e mitigação dos impactos negativos das mudanças climáticas, vários desafios e oportunidades são postos às nações e aos organismos internacionais. A implementação de mercados de créditos de carbono e impostos à emissão de gases deve afetar os preços dos combustíveis fósseis, mudar a estrutura das matrizes energéticas, alterar a dinâmica do comércio internacional, bem como aumentar a pressão para que países em desenvolvimento adotem políticas similares de redução de emissões. As responsabilidades e capacidades de contribuir para a redução dos gases de efeito estufa diferem entre os países, que também estão sujeitos a diferentes níveis de risco e exposição aos impactos negativos do aquecimento global.

Por outro lado, os impactos dessas diferentes medidas que vêm sendo propostas e adotadas tendem a ser muito diferenciados entre os setores econômicos e entre os países. Os setores mais intensivos em carbono e as tecnologias menos eficientes em termos energéticos tendem a ser as mais penalizadas e os países com maior dependência desses setores deverão ser mais afetados.

O Brasil tem um papel relevante nas discussões sobre o aquecimento global, tanto pela contribuição como grande emissor de gases de efeito estufa devido ao desflorestamento como pelo potencial para exportar créditos de carbono através dos programas de MDL e por contar com um dos exemplos mais consolidados e bem sucedidos de produção de biocombustível. A matriz energética brasileira é uma das mais limpas do planeta, com grande importância da biomassa, da hidroeletricidade e, mais recentemente, de outras fontes de energia limpa como a eólica. Com isso, as origens das emissões de gases efeito estufa no país são completamente diferentes do resto do mundo. Enquanto em escala internacional o principal responsável por essas emissões é o uso de energia, com 61,4% das emissões mundiais e nada menos que 86,3% no caso dos EUA, no Brasil este fator responde por apenas 16%. A mudança no uso da terra e o desflorestamento dela decorrente são responsáveis por 58% do total. Além disso, destaca-se a emissão das atividades agrícolas, com destaque para a pecuária (fermentação entérica), que responde pela maior parcela da emissão de metano.

Diante da disparidade na estrutura de emissões entre o Brasil e o resto do mundo, o país tem oportunidade de diminuir sensivelmente seu nível atual de emissões a um custo relativamente baixo, apenas com base em políticas de redução do desmatamento e de uso mais racional da terra. É justamente nesses setores que se concentra a maior parte das metas apresentadas pelo País para a redução de suas emissões na COP de Copenhague. Essa oportunidade que se apresenta ao Brasil é única entre os principais países emissores.

Isso não significa, porém, que setores importantes da economia brasileira não estão sujeitos aos efeitos das políticas e medidas para redução de emissões em nível internacional e nacional: restrições ao uso da terra afetam a competitividade dos complexos agroindustriais produtores de carnes, soja, açúcar e álcool; políticas mandatórias de uso de biocombustíveis influenciam positivamente o etanol brasileiro; restrições às emissões devem ampliar os preços de combustíveis fósseis e de bens intensivos em energia; e o custo dos transportes baseados em combustíveis fósseis tende a se elevar, impactando a demanda de automóveis e aeronaves.

Este contexto tem motivado, além de alterações nas políticas e nas regulações, um grande esforço de desenvolvimento tecnológico voltado à redução de emissões. Modificações nos processos de produção e a introdução de novos produtos podem colocar em risco atividades baseadas em processos e produtos intensivos em carbono. Neste âmbito, cabe verificar tanto o impacto das inovações sobre os setores econômicos do País quanto a possibilidade de participar do desenvolvimento dessas novas tecnologias e tirar proveito das oportunidades daí decorrentes.

Foi dentro deste cenário que se insere a Chamada Pública 01/2010, apresentada pelo Programa BNDES/FEP e cujo objetivo era precisamente avaliar os ***Impactos sobre a Economia Brasileira de Restrições Ambientais e Mudanças Tecnológicas Rumo a uma Economia de Baixo Carbono*** não apenas em termos macroeconômicos mas também em setores específicos.

Para responder essa questão, a pesquisa foi estruturada com os seguintes componentes: (i) adaptação de um modelo de equilíbrio geral à estrutura da economia brasileira e aos objetivos do trabalho para verificar como diferentes políticas ambientais e a evolução tecnológica afetariam a eco-

nomia brasileira em termos macroeconômicos e setoriais; (ii) estudo de rotas tecnológicas verdes a partir da análise de bancos de dados de patentes; (iii) um conjunto de estudos setoriais para analisar, dentro dos contextos de dinâmica competitiva e tecnológica específicos a cada setor, os efeitos das restrições ambientais e das perspectivas tecnológicas. Foram analisados setores especialmente sensíveis à temática do projeto, incluindo indústrias intensivas em energia e emissões – cimento, alumínio e siderurgia e petroquímica –, setores afetados pela eventual imposição de restrições ao uso de combustíveis fósseis – petróleo, automobilístico e aeronáutico –, e setores nos quais o País dispõe de vantagens competitivas ligadas ao agronegócio, mas que poderiam ser afetados por imposições de restrições ao uso do solo – biocombustíveis, grãos e pecuária. Esta fase da pesquisa foi encerrada no início do segundo semestre de 2013 quando foi solicitado pelo BNDES que a mesma fosse complementada com três novos setores bastante relevantes no que tange a emissão de gases do efeito estufa: cal, vidro e ferro gusa. Para esses novos setores, foram solicitados estudos com escopo reduzido, focando nas definições de cenários e propostas para a transição para uma economia de baixo carbono.

Esses novos estudos incorporados ao projeto foram desenvolvidos ao longo do segundo semestre de 2014 e finalizados em dezembro de 2014. Assim, apesar de fazerem parte da pesquisa, o estudo desses setores difere dos demais tanto pelo escopo como pelo período em que foram desenvolvidos, o que justifica a periodicidade diferente das informações disponíveis.

Este livro apresenta uma síntese dos trabalhos desenvolvidos e dos resultados alcançados pela pesquisa, incluindo os três novos setores desenvolvidos posteriormente. Cada capítulo, exceto a introdução, é uma versão resumida dos relatórios apresentados, que podem ser acessados no site www.ebc.fearp.usp.br. Esperamos que os estudos realizados e os resultados aqui apresentados contribuam para o debate sobre o posicionamento da economia brasileira frente ao cenário de mudanças climáticas, os riscos e oportunidades colocados pelas políticas de redução de emissões e pela dinâmica tecnológica associada a transição para uma Economia de Baixo Carbono.

A pesquisa foi desenvolvida pelo Núcleo de Apoio à Pesquisa em Economia de Baixo Carbono da FEARP-USP (Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo) e contou com pesquisadores de outras unidades da USP (EESC-USP, FEA-USP e FFCLRP-USP) além de outras universidades nacionais (Universidade Federal de São Carlos, Universidade Federal de Uberlândia e EESP-FGV) e internacionais (MIT).

Além disso, a pesquisa se beneficiou da possibilidade de contar com a experiência de diversos especialistas setoriais, seja da academia seja do setor empresarial, que foram entrevistados e responderam questionários para que pudéssemos compreender melhor as dinâmicas setoriais, em especial suas peculiaridades no tocante às questões ambientais, restrições institucionais e mudanças tecnológicas. Ao longo dos cinco *workshops* realizados para discutir os relatórios parciais e final da pesquisa, pudemos também contar com leitores e debatedores atentos, que apresentaram sugestões de extrema importância para o refinamento da pesquisa. A todos aqueles que nos receberam para entrevistas, que responderam a questionários eletrônicos ou debateram os resultados da pesquisa, os nossos mais sinceros agradecimentos.

Por fim, registramos agradecimentos especiais ao BNDES, que apoiou este projeto por meio do FEP (Fundo de Estruturação de Projetos), e a toda a equipe do banco. Técnicos das áreas de Pesquisa e Acompanhamento Econômico, Meio Ambiente, Industrial, Insumos Básicos e Planejamento acompanharam a execução da pesquisa e nos proporcionaram uma interlocução de valor inestimável. Somo muito gratos a todos eles.

Não é ocioso, contudo, frisar que o conteúdo deste livro e dos relatórios da pesquisa é de exclusiva responsabilidade dos autores, não refletindo necessariamente a opinião do BNDES. Os erros e omissões, em particular, são de inteira responsabilidade dos participantes da pesquisa.

Rudinei Toneto Junior

Marcelo Pinho

Coordenadores

Equipe do Projeto Economia de Baixo Carbono

Coordenação Geral:

- Rudinei Toneto Junior
- Marcelo Pinho

Modelo de Equilíbrio Geral:

- Angelo Costa Gurgel
- Sergey Paltsev
- Franklin Pedro França
- Caroline de Souza Rodrigues Cabral
- Maria Juliana Iorio

Rotas Tecnológicas –

Levantamento de Patentes Verdes:

- Geciane Silveira Porto
- Sérgio Kannebley Jr.
- João Paulo Martins Terra Baroni
- Angélica C. Romano

Estudos Setoriais:

Uso do Solo, Pecuária e Grãos

- Geraldo Bueno Martha Junior e Elísio Contini

Biocombustíveis

- André Luis Squarize Chagas

Siderurgia

- Germano Mendes de Paula

Alumínio

- Clésio Lourenço Xavier

Cimento

- Marcelo Pinho e Lourenço Diniz Faria

Petróleo e Petroquímico

- Eduardo Luiz Machado

Automobilístico e Aeronáutica

- Cláudio Ribeiro de Lucinda e Rodrigo Mantaut Leifert

Vidro

- Mauro Akerman

Ferro gusa

- Germano Mendes de Paula

Cal

- Vanderley M. John, Katia R. Garcia Punhagui e Maria Alba Cincotto

Consultores Temáticos: Energia,

Eficiência Energética e

Tecnologias Verdes

- Paulo Seleglim Junior
- Oswaldo Baffa

Auxiliares de Coordenação

- Beatriz Selan
- Gabriela Eusébio

Estagiários

- Gabriela Santos dos Reis
- Lucas Nobrega Augusto
- Luciana Yokoi Milhomens
- Luigi Campos Cordaro
- Regiane Lopes

Este projeto foi realizado com recursos do Fundo de Estruturação de Projetos (FEP) do BNDES. O conteúdo é de exclusiva responsabilidade dos autores, não refletindo, necessariamente, a opinião do BNDES. Informações sobre o FEP encontram-se em <http://www.bndes.gov.br>.

Sobre os Autores

ANDRÉ LUIS SQUARIZE CHAGAS

É professor doutor do Departamento de Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo (FEA/USP). Economista, mestre e doutor em Economia.

ANGELO COSTA GURGEL

É professor adjunto da Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas (EESP/FGV) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Agrônomo e doutor em Economia Aplicada.

BEATRIZ SELAN

É professora do curso de Administração da Estácio Uniseb/RP. Economista, mestre em Economia e doutoranda em Engenharia de Produção.

CAROLINE DE SOUZA RODRIGUES CABRAL

É economista e mestre em Economia.

CLÁUDIO RIBEIRO DE LUCINDA

É professor associado do Departamento de Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FEARP/USP) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Economista e doutor em Economia de Empresas.

CLÉSIO LOURENÇO XAVIER

É professor associado do Instituto de Economia de Uberlândia (IE/UFU) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Economista, mestre e doutor em Economia.

EDUARDO LUIZ MACHADO

É professor adjunto da Universidade Federal de São Paulo (Unifesp) e pesquisador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Economista, engenheiro civil e doutor em Economia.

ELÍSIO CONTINI

É pesquisador da unidade de Estudos Estratégicos e Capacitação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Mestre em Administração Pública e doutor em Planejamento Regional.

FRANKLIN PEDRO FRANÇA

É economista e mestrando em Economia Aplicada.

GABRIELA DOS SANTOS EUSÉBIO

É economista, mestre e doutoranda em Economia.

GECIANE SILVEIRA PORTO

É professora livre-docente do Departamento de Administração da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FEARP/USP) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Administradora, mestre e doutora em Administração.

GERALDO BUENO MARTHA JUNIOR

É pesquisador unidade de Estudos Estratégicos e Capacitação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e professor credenciado no curso de pós-graduação em Ciências Animais da Universidade Brasília (UnB). Agrônomo, mestre e doutor em Agronomia.

GERMANO MENDES DE PAULA

É professor titular do Instituto de Economia da Universidade Federal de Uberlândia (IE/UFU). Economista, mestre e doutor em Economia Industrial e da Tecnologia.

JOÃO PAULO MARTINS TERRA BARONI

É economista e mestre em Economia Aplicada.

KATIA REGINA GARCIA PUNHAGUI

É professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina (UEL). Arquiteta, mestre em Arquitetura e doutora em Arquitetura e Engenharia da Construção Civil.

LOURENÇO GALVÃO DINIZ FARIA

É economista, mestre em economia e doutorando em gestão da tecnologia e da inovação.

MARCELO PINHO

É professor associado do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos (DEP/UFSCar). Economista, mestre e doutor em Economia.

MÁRCIA REGINA OSAKI

É engenheira de produção, mestre e doutora em Engenharia Mecânica.

MARIA ALBA CINCOTTO

É pesquisadora convidada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Graduada em Química, mestre e doutora em Engenharia Química.

MARIA JULIANA IORIO DE MORAES

É graduada em engenharia de computação e mestre em Economia Aplicada.

MAURO AKERMAN

É consultor especialista em vidros e coordenador da Escola de Vidro. Engenheiro metalurgista e doutor em Engenharia Metalúrgica.

PAULO SELEGHIM JÚNIOR

É professor titular do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Engenheiro mecânico, mestre e doutor em Mecânica dos Fluidos.

RODRIGO MANTAUT LEIFERT

É mestre em Ecologia Aplicada.

RUDINEI TONETO JUNIOR

É professor titular do Departamento de Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FEARP/USP) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Economista, mestre e doutor em Economia.

SERGEY PALTSEV

É pesquisador científico sênior do Massachusetts Institute of Technology (MIT) e vice-diretor do MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Economista, mestre e PhD em Economia.

SÉRGIO KANNEBLEY JÚNIOR

É professor titular do Departamento de Economia da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo (FEARP/USP) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Economista, mestre e doutor em Economia.

VANDERLEY MOACYR JOHN é professor associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP) e bolsista de produtividade em pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Engenheiro civil, mestre e doutor em Engenharia Civil.

Introdução

Rudinei Toneto Jr.
Marcelo Silva Pinho
Beatriz Selan

O tema das mudanças climáticas tem se colocado como uma das maiores preocupações tanto no meio acadêmico como para os governos e empresários. Apesar de não ser um consenso, a maior parte dos pesquisadores considera que este é um risco relevante e que as temperaturas na superfície da terra podem ter acréscimos significativos com a maior concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera (IPCC, 2007)¹.

O aquecimento tende a gerar uma série de mudanças nas condições de vida no planeta. Destaca-se o aumento do risco de ocorrência de eventos extremos: furacões; alteração do regime de chuvas (por exemplo, maior intensidade em menor espaço de tempo), ampliando problemas relacionados a enchentes ou secas; elevação do nível dos oceanos, colocando em risco a vida das populações costeiras, entre outras possibilidades; diversos ecossistemas serão afetados, alterando as condições atuais e suas respectivas capacidades produtivas; a disponibilidade e qualidade de diversos recursos naturais poderão se alterar, com destaque para a água.

A agropecuária tende a ser a atividade econômica mais impactada em função de mudanças climáticas, maior exposição a fatores climáticos extremos e a mudança dos regimes de chuvas. Determinadas regiões terão maiores problemas de secas, enquanto outras ampliarão a disponibilidade hídrica. Cabe ressaltar que os impactos serão diferenciados entre os países de acordo com a localização, as condições climáticas, o tipo de vegetação e de recursos naturais. Deve-se esperar um impacto mais acentuado nas economias de menor renda, mais dependentes de atividades primárias.

Vários países têm adotado políticas para desestimular as emissões por meio de restrições quantitativas e introdução de impostos sobre as emissões, além de incentivar o uso de energias alternativas (renováveis) e maior eficiência energética. Busca-se tanto penalizar as emissões, o que tende a gerar impactos negativos sobre o crescimento econômico, como estimular mudanças tecnológicas que possibilitem a geração de produto com menores emissões².

Apesar de as políticas serem nacionais, a preocupação com as mudanças climáticas e a emissão de GEE é global. Como a concentração de GEE na atmosfera afeta todo o planeta, independente do país emissor, deve-se buscar acordos globais. A chamada Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (CQNUMC ou UNFCC – United Nations Framework Convention on Climate Change) criada em 1992, por exemplo, é um acordo de 192 países que estabeleceu objetivos de redução de emissões e algumas regras. As bases da Convenção resultaram no Protocolo de Quioto (PQ) de 1997 no qual os países desenvolvidos se comprometeram com metas de redução, sem a

1 De acordo com Stern (2009) baseado no Hadley Centre Climatic Model, se a concentração de CO₂-eq se estabilizar em torno de 450ppm, existe uma probabilidade de 78% do aquecimento da superfície da terra ficar em torno de 2oC em relação ao nível de 1850; se o grau de concentração atingir 550ppm, há uma probabilidade de 70% do aquecimento alcançar 3oC.

2 Ver United Nations (2011) “The Great Green Technological Transformation” World Economic and Social Survey 2011; Department of Economic and Social Affairs.

inclusão dos países em desenvolvimento. Foram criados mecanismos para facilitar o alcance das metas como os projetos de implementação conjunta entre países desenvolvidos e os mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL), que permitem aos países em desenvolvimento desenvolver projetos de redução de emissões em seus territórios e vender créditos de carbono aos países desenvolvidos. Note-se que a lógica do PQ é a do “*cap and trade*”: são estabelecidos limites para as emissões, mas se permite a negociação de permissões para que se alcance a redução de emissões com as alternativas mais eficientes³.

O PQ foi importante, mas se mostrou insuficiente. As metas estabelecidas foram pouco significativas e várias delas não foram alcançadas. Alguns países, como os EUA, não assinaram o protocolo e constatou-se que não é possível pensar em um acordo sem a participação dos países em desenvolvimento, tendo em vista a importância que já alcançaram na emissão de GEE, superando os países de renda alta, com destaque para a China. Vários encontros ocorreram sem sucesso no alcance de um acordo global. Um dos mais importantes foi o 15º COP em Copenhague em 2009. Havia grandes expectativas de metas mais ambiciosas de redução de emissões, inclusive com contribuições voluntárias dos PED financiadas em parte pelos PD, mas não se chegou a um acordo. Em Copenhague apenas foram firmados os compromissos de limitar o aumento global da temperatura em 2°C e de cada país apresentar seus comunicados de emissões a cada dois anos. Alguns PED apresentaram propostas na forma de desvios de tendência em relação às emissões projetadas ou metas de redução definidas em termos de maior eficiência energética, com a diminuição de consumo de energia por unidade de produto.

Estes encontros revelam a grande dificuldade de se alcançar um acordo global em relação à questão climática. As dificuldades decorrem de vários aspectos: (i) desconhecimento e incertezas sobre o assunto – não existe consenso completo entre os cientistas nem sobre a existência do fenômeno nem sobre suas causas e consequências e sobre quem incidirão os maiores ônus, mas a concordância é cada vez maior; (ii) os benefícios da preservação da atmosfera e da redução da concentração dos GEE são comuns a todos os países, porém os custos são individuais - como são desconhecidos os reais benefícios para cada país, torna-se difícil distribuir os custos; (iii) a responsabilidade é diferenciada em termos de contribuição para a situação atual; (iv) os países possuem capacidades e facilidades diferenciadas para alcançar a redução de emissões; (v) como o benefício é global e diferenciado entre os países e a contribuição individual pode ser ineficaz sem a adesão de todos, cria-se um estímulo ao “efeito carona”. Com isso, gera-se uma tendência a não-ação e agravam-se os riscos para todos, a chamada “Tragédia dos Comuns”⁴. Além disso deve-se destacar as dificuldades impostas pelas negociações políticas internas aos países, uma vez que os impactos tendem a ser diferenciados entre os setores e grupos sociais, gerando diversas resistências e pressões políticas, com destaque para os lobbies de setores intensivos em carbono.

3 O Brasil foi um dos primeiros países a negociar créditos de carbono. O primeiro projeto decorreu da geração de energia a partir da queima do metano gerado em aterros sanitários. Outros projetos referem-se à cogeração de energia em usinas de açúcar e álcool, entre outros. O maior montante de créditos negociados via MDL tem origem na China.

4 Ver Fernandes e Sampaio (2009) e HARDIN, Garrett. “*The Tragedy of the Commons*”. *Science*, vol. 162, No. 3859 (13 de dezembro de 1968), pp. 1243-1248.

Mas, independentemente de acordos globais, vários compromissos individuais têm sido assumidos por países, estados e setor privado com vistas a reduzir as emissões. O impacto das restrições às emissões de gases do efeito estufa é bastante diferenciado entre os setores dependendo da intensidade energética, do tipo de energia e de insumo utilizados. Os países tendem a ser mais ou menos afetados conforme sua estrutura setorial, matriz energética e eficiência energética dos processos produtivos e do consumo. O tipo de política adotada, limites quantitativos ou impostos sobre emissões, pode afetar de forma diferente o preço relativo entre os setores e, portanto, a demanda. O potencial de inovações tecnológicas, seja em termos de maior eficiência energética ou de substituição de fontes energéticas, também difere. Assim, tanto as políticas como o desenvolvimento tecnológico em direção a uma economia de baixo carbono terão impactos diferentes entre os setores econômicos e entre os países. É dentro deste contexto que se insere esta pesquisa apoiada pelo BNDES: analisar os impactos que restrições ambientais e mudanças tecnológicas podem exercer sobre setores econômicos selecionados da economia brasileira.

A pesquisa se estruturou em três componentes principais, que interagiram fornecendo elementos e recebendo insumos uns dos outros. Em primeiro lugar, desenvolveu-se um modelo de equilíbrio geral adaptado aos objetivos da pesquisa com o propósito de identificar como diferentes cenários de políticas e tecnologia impactariam a economia brasileira, não apenas de forma agregada, mas também em setores específicos. Em segundo lugar, realizou-se um amplo levantamento de patentes relacionadas às chamadas tecnologias verdes para identificar os principais setores inovadores, os países com maior atividade inovadora e eventualmente caracterizar rotas tecnológicas para as patentes verdes. Em terceiro lugar, desenvolveu-se um conjunto de estudos setoriais que procuraram delimitar tanto os principais fatores de competitividades desses setores no Brasil, como as principais restrições ambientais e perspectivas tecnológicas que poderiam afetar sua performance. Os setores foram divididos em setores intensivos em energia (alumínio, siderurgia e cimento), setores diretamente afetados por restrições ao uso de combustíveis fósseis (petróleo e química, automobilístico e aeronáutico) e setores em que o Brasil apresenta fortes vantagens competitivas, mas cuja expansão está diretamente relacionada ao perfil das emissões brasileiras decorrentes de mudanças do uso do solo (biocombustíveis – etanol e biodiesel – e grãos e pecuária) e práticas agropecuárias. Este capítulo inicial busca apresentar alguns dos temas que foram discutidos ao longo da pesquisa e sintetizar seus principais resultados. Os capítulos seguintes resumem as pesquisas realizadas, seja nos dois estudos transversais – modelo de equilíbrio geral e bases de dados de patentes – seja nos estudos setoriais⁵.

1. Evolução das Emissões de Gases Efeito Estufa

A preocupação com o acúmulo de GEE decorre da possibilidade do aquecimento global em função do acúmulo desses gases na atmosfera. Na realidade, existem diferentes gases do efeito

5 Os relatórios completos de cada estudo encontram-se disponíveis no site do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Economia de Baixo Carbono da Universidade de São Paulo – www.ebc.fearp.usp.br.

estufa, que são emitidos tanto por processos naturais como pela atividade humana. Os principais GEE estão relacionados no Quadro 1.

Quadro 1 - Lista de Gases de Efeito Estufa (pós-COP17)

GEE	Principais fontes de emissão
CO ₂	Uso de combustíveis fósseis, desflorestamento e alteração dos usos do solo.
CH ₄	Produção e consumo de energia (incluindo biomassa), atividades agrícolas, aterros sanitários e águas residuais.
N ₂ O	Uso de fertilizantes, produção de ácidos e queima de biomassa e combustíveis fósseis.
Halogenados (HFCs, PFCs e SF ₆)	Indústria, refrigeração, aerossóis, propulsores, espumas expandidas e solventes.
NF ₃	Indústria de semicondutores e fotovoltaica

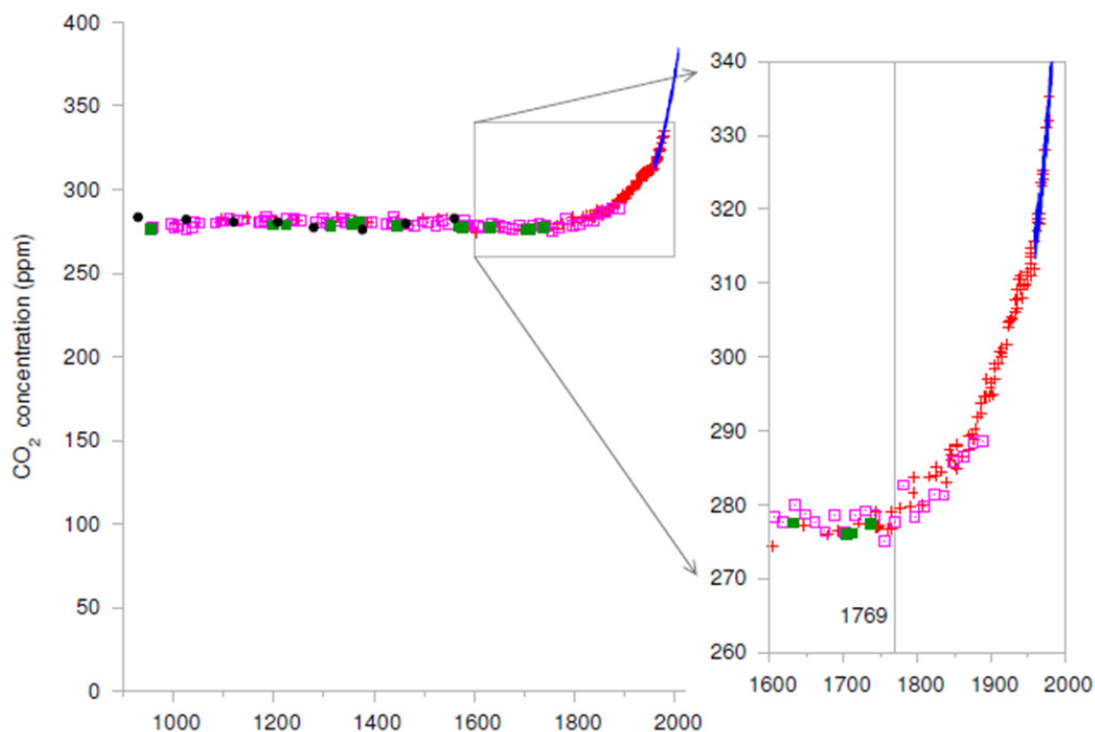
Fonte: Albuquerque (2012).

O dióxido de carbono (CO₂) representa mais de 75% das emissões globais. Sua principal origem é o uso de combustíveis fósseis, seguido do desflorestamento. O metano (CH₄) representa menos de 15% e o óxido nitroso (N₂O) menos de 10%. O metano decorre essencialmente das atividades agropecuárias e do manejo de resíduos sólidos e o óxido nitroso, principalmente, do uso de fertilizantes. Apesar do CO₂ representar a maior quantidade das emissões de GEE, sua contribuição para o aquecimento é significativamente menor. O efeito potencial de um gás depende da sua capacidade de absorção de energia e do tempo em que ele permanece na atmosfera. Apesar de sujeita a várias críticas, a medida mais utilizada para comparar o efeito potencial dos gases é o GWP (Potencial Global de Aquecimento – Global Warming Potential), que estabelece, por exemplo, que o efeito potencial do metano é 21 vezes maior que o do CO₂ e o do óxido nitroso, mais de 300 vezes superior. Os halogenados são considerados gases de elevado GWP pela ampla quantidade de calor que absorvem e alguns por permanecerem na atmosfera por milênios. Em última análise, os diferentes GEE são medidos em termos de CO₂-equivalentes.

As emissões podem decorrer de processos naturais relacionados à incidência da energia solar sobre a terra, a refletividade, a erupção de vulcões, a troca entre o oceano e a atmosfera, a respiração de animais e plantas, entre outros; ou da atividade humana. Mesmo que a maior parte das emissões decorra da própria natureza, o grande crescimento da concentração no período recente parece estar associado à atuação humana e fortemente relacionado ao consumo de energia e aos processos industriais, além de mudanças no uso do solo e atividades agropecuárias.

Desde a Revolução Industrial aumentaram as emissões de GEE. Deve-se destacar o forte aumento ao longo do século XX, em especial nas últimas décadas, a partir da Segunda Guerra Mundial. Mesmo que a concentração de CO₂ tenha tido fortes oscilações no passado, jamais atingiram os níveis atuais (Figura 1).

Figura 1 - Variação da concentração de CO₂ nos últimos 1.100 anos.



Fonte: MacKay (2009).

De acordo com o IPCC, para que o aumento da temperatura da superfície da terra fique limitado a 2°C até o final do século, a concentração de CO₂ deveria se situar entre 450 e 550 ppm. Este valor já se encontra totalmente comprometido com a dinâmica das emissões atuais: em maio de 2013 já foram medidos níveis superiores a 400 ppm. O aumento das emissões está claramente relacionado ao crescimento econômico e do consumo de energia. Pode-se observar uma forte relação entre o aumento do PIB per capita mundial e o nível de concentração de CO₂ na atmosfera. Como a aceleração do crescimento do PIB ocorreu a partir da revolução industrial, que provocou significativos ganhos de produtividade apoiados em consumo cada vez maior de energia, verificou-se a partir daí um forte aumento das emissões e da concentração de gases do efeito estufa associados à atividade humana.

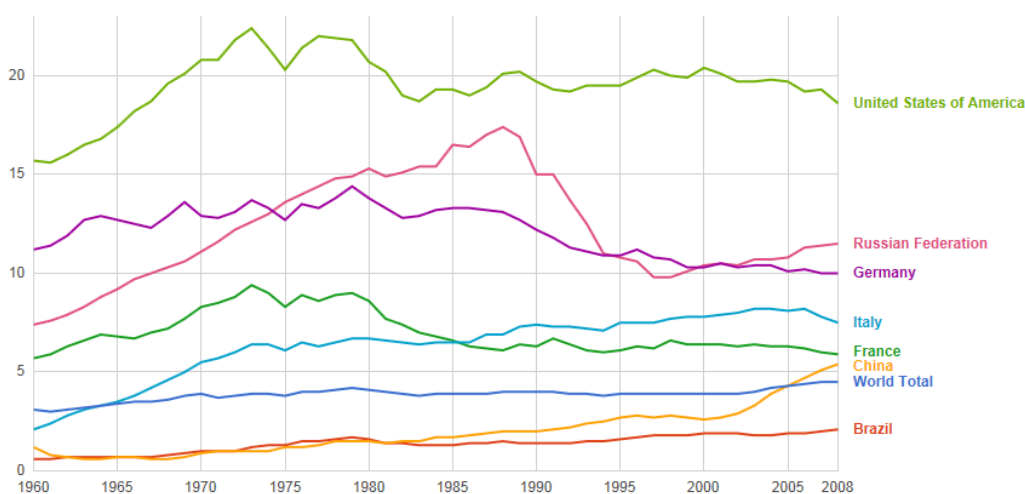
Um ponto que merece destaque a partir da Revolução Industrial é que o crescimento econômico passa a ser um processo quase contínuo, ainda que bastante diferenciado entre os países, levando a amplas diferenças nos níveis de renda, padrões de consumo e bem-estar, consumo de energia e

emissões. Assim, os países desenvolvidos, que foram os primeiros a se industrializar, apresentam níveis de consumo de energia e emissões significativamente maiores do que os países em desenvolvimento e os de baixa renda e são os principais responsáveis pela atual concentração de GEE.

Os países com maiores níveis de emissões per capita são aqueles que baseiam sua economia no petróleo (Qatar, Kuwait, Emirados Árabes Unidos e Arábia Saudita, por exemplo) e países desenvolvidos com maior dependência de combustíveis fósseis (EUA, Canadá e Austrália). Pode-se destacar que diversos países europeus, com níveis de renda semelhantes ao dos EUA, apresentam menores níveis de emissões per capita por terem tido um maior esforço no desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa e em processos de maior eficiência energética relacionados ao menor consumo de materiais, reaproveitamento de resíduos, reciclagem, etc.

A preocupação recente com a concentração dos GEE tem levado a uma ligeira tendência de queda nas emissões per capita em diversos países desenvolvidos, como pode ser visto pelos casos da Alemanha e da França, no gráfico a seguir. Forte tendência de queda nas emissões foi observada também nos países em transição do Leste Europeu, exemplificado no gráfico a seguir, pelo caso da Rússia. Este processo decorre da forte retração da atividade econômica (queda da renda per capita), da desindustrialização e atualização tecnológica em diversos setores, da adoção de padrões de regulação compatíveis com os países mais desenvolvidos e da modernização econômica, entre outros fatores. E, por fim, cabe destacar o forte crescimento das emissões per capita na China, que está relacionado ao acelerado crescimento econômico, urbanização, industrialização e significativa expansão no consumo de energia. O Brasil apresentou elevação ao longo das últimas décadas, mas as emissões per capita são bastante inferiores à média mundial.

Gráfico 1 - Emissões per capita de GEE – CO₂eq (1960-2008)

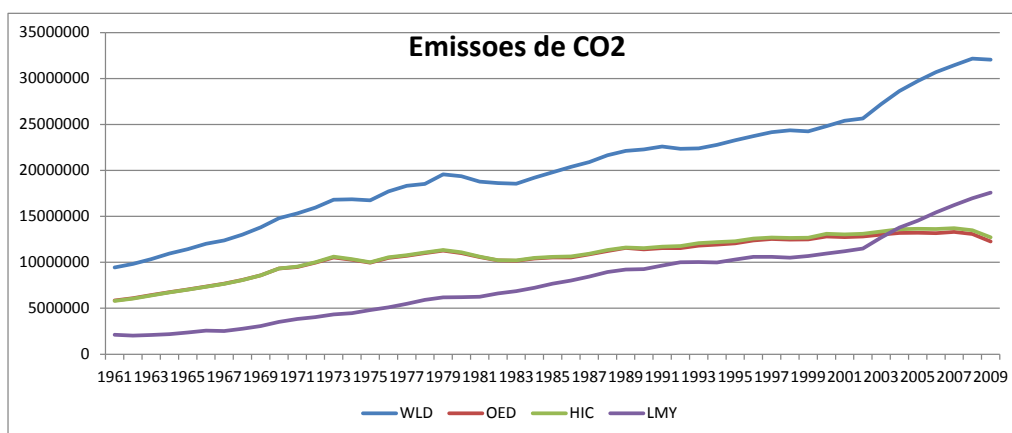


Fonte: Data from World Resources Institute. Last updated: Nov 9, 2012

O maior crescimento das economias emergentes, que contam com alguns dos maiores contingentes populacionais do planeta, tem levado a melhoras significativas nos padrões de vida mundial,

que se refletem no aumento do PIB per capita, redução da pobreza, maiores níveis de consumo e, como consequência, o crescimento das emissões. A aceleração das emissões no início deste século é totalmente explicada pelo crescimento nos países de renda média e baixa. As emissões nos países de renda alta (HIC) e dos países da OCDE (OED) cresceram, mas em ritmo bem lento, enquanto nos países de renda baixa e média (LMY) as emissões totais se expandiram tão acentuadamente que passaram a superar a dos países ricos. Em torno de 90% do aumento das emissões mundiais na última década é explicado pelo aumento das emissões nos países de renda baixa e média (Gráfico 2).

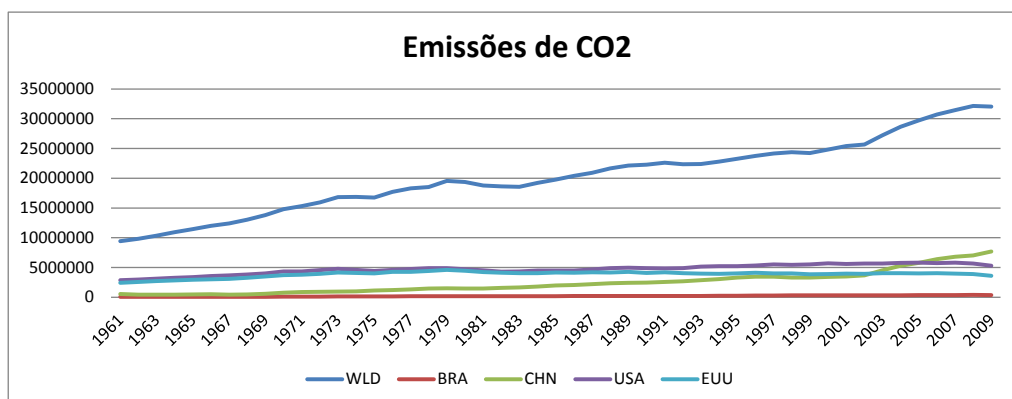
Gráfico 2 – Emissões de CO₂ por grupo de países



Fonte: Banco Mundial

A China se tornou, recentemente, o maior emissor mundial de GEE, superando os EUA. Como possui a maior população mundial, o forte crescimento econômico do país impulsionou o consumo de energia e o montante de emissões. Deve-se destacar que a transformação da China no maior poluente mundial se fez com níveis de renda per capita significativamente menores do que o dos países desenvolvidos, ou seja, caso persista o processo de convergência de renda tornar-se-á difícil pensar em controle das emissões globais, caso seja mantida a estrutura produtiva atual (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Emissões de CO₂ por países

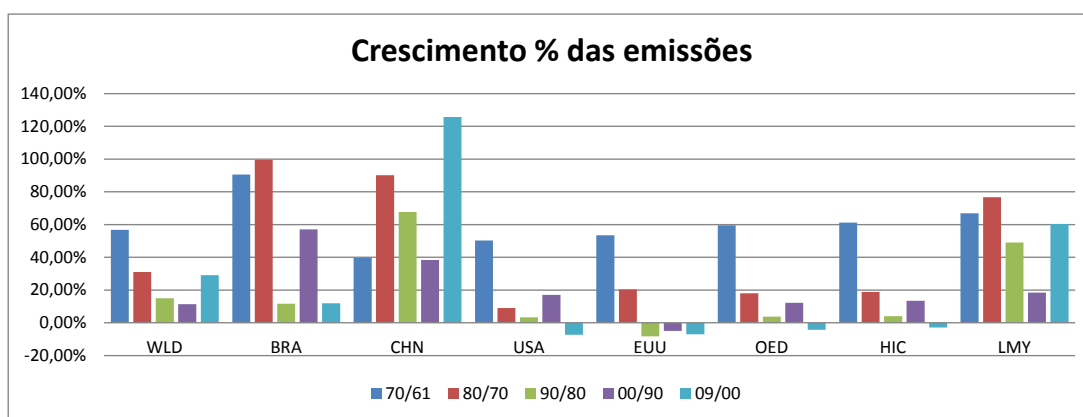


Fonte: Banco Mundial

O gráfico 4 a seguir apresenta as taxas de crescimento das emissões de CO₂ ao longo das últimas décadas. O primeiro ponto a ser destacado é que as taxas de crescimento das emissões mundiais estavam se reduzindo de forma sistemática desde a década de 70, voltando a apresentar elevação na última década. Ao analisar os grupos de países verifica-se uma forte retração nas taxas de crescimento das emissões nos países de renda alta, com destaque para a União Europeia que apresentou taxas de crescimento negativas nas três últimas décadas. Este processo decorre de uma série de aspectos: esforços deliberados em direção a uma economia mais limpa; mudança na estrutura econômica com retração na participação da indústria e crescimento do setor serviços, entre outros. Este fenômeno é captado pela chamada Curva Ambiental de Kuznets⁶.

Os países de renda média e baixa apresentaram ao longo de todo o período taxas de crescimento das emissões superiores, mas deve-se destacar que entre 1980 e 2000 estas estavam se reduzindo, voltando a se expandir na última década. Este comportamento é praticamente determinado pela economia chinesa que apresentou, nesta última década, a maior taxa de expansão das emissões em todo o período analisado. O Brasil apresentou taxas elevadas de expansão ao longo dos anos 60 e 70, refletindo o grande crescimento de renda acoplado ao processo de urbanização e industrialização, e taxas menores de expansão nas décadas seguintes, com exceção dos anos 90 em que o aumento das emissões foi acentuado.

Gráfico 4 – Crescimento percentual das emissões



Fonte: Banco Mundial

Esses dados confirmam que, apesar dos países desenvolvidos serem os principais responsáveis pela concentração de GEE e possuírem níveis de emissão per capita significativamente superiores aos dos países em desenvolvimento, a não participação destes últimos no esforço de contenção das emissões de GEE inviabilizará qualquer tentativa de controle. Mesmo que se assuma a tese de responsabilidade comum, porém, diferenciada, não será possível aos países em desenvolvimento

⁶ Ver Grossman, G e Krueger, A. B. (1995)

trilharem o mesmo caminho de emissões dos países desenvolvidos. Não será possível um acordo, como o do Protocolo de Quioto, em que apenas os países desenvolvidos tenham metas de redução de emissão, deixando de lado os países de renda média e baixa; mesmo que estes tenham responsabilidades diferenciadas e possam se beneficiar de financiamento e apoio dos países desenvolvidos.

A questão que se coloca é que se, por um lado, o elevado crescimento econômico da China, Índia e outros países em desenvolvimento traz uma ampla melhora nas condições de vida de milhões de pessoas (redução da pobreza absoluta, aumento na expectativa de vida, queda da mortalidade, entre outros) com aumento na possibilidade de se alcançar as MDG (Metas de Desenvolvimento do Milênio), por outro lado transfere a preocupação para a questão ambiental. Se os dois objetivos são necessários e se do ponto de vista da justiça social não se pode barrar o desenvolvimento econômico e social para a maior parcela da população mundial, quando um grupo menor de países desenvolvidos já o alcançou, deve-se buscar mecanismos que possibilitem a sua compatibilização.

O conceito de crescimento verde busca compatibilizar o crescimento econômico com as preocupações ambientais. Para tal são necessários um amplo processo de desenvolvimento tecnológico e maior eficiência na gestão de recursos que possibilitem o crescimento do produto sem o aumento das emissões. Podem-se buscar soluções que reduzam o consumo de recursos, utilizem fontes energéticas não poluentes e mecanismos que removam os poluentes antes de entrarem no meio ambiente. Ou seja, devem-se buscar maior eficiência energética, melhorar a qualidade das matrizes energéticas com maior presença de fontes limpas (renováveis), maior reaproveitamento de materiais, tecnologias de captura e sequestro de carbono, entre outras.

A incorporação de tecnologias verdes poderia gerar o chamado descolamento: aumento do produto sem aumento das emissões. O descolamento pode ser absoluto, quando o aumento do produto se faz com redução das emissões, ou relativo, quando o aumento das emissões se dá em um montante inferior ao do produto. Nas discussões recentes sobre as metas de emissões, os países desenvolvidos têm assumido metas de redução absoluta nos níveis de emissão em relação a um dado período no passado, por exemplo, níveis verificados em 1990. Já a maior parte dos países em desenvolvimento tem apresentado propostas de desvio de tendência em suas emissões, isto é, redução em relação ao nível que se observaria no futuro em função das taxas de crescimento do produto esperadas. Note-se que ao apresentar metas em relação à tendência esperada esses países assumem o descolamento relativo no qual ocorre aumento das emissões. O investimento no desenvolvimento e difusão de tecnologias torna-se fundamental para que se consiga obter os objetivos de desenvolvimento econômico e social combinado com restrições às emissões de GEE.

2. Uma Análise de Decomposição das Emissões de Gases Efeito Estufa: A Necessidade de Medidas Globais

As emissões estão fortemente relacionadas à renda per capita, uma vez que quanto mais se produz, maior tende a ser o consumo de energia e, portanto, de emissões. Esta relação pode ser

atenuada por diferentes graus de eficiência energética ou por fontes energéticas mais limpas. Assim, o chamado descolamento decorre de ampliações da renda per capita que sejam compensadas por reduções no consumo de energia por unidade de produto ou nas emissões por consumo de energia.

KOJIMA e BACON (2009) analisaram para o período 1994/96 a 2004/06 como se deu a compensação de emissões entre os países em resposta ao crescimento do produto (PIB per capita e população)⁷. Dentro dos conceitos de descolamento absoluto e relativo, os autores classificaram os países nos seguintes grupos: aqueles em que a compensação foi negativa, isto é, as emissões cresceram proporcionalmente mais do que o produto; e aqueles que tiveram compensação positiva em diferentes níveis: até 50%, de 50 a 100% e acima de 100%. Neste último caso verifica-se o descolamento absoluto, com as emissões se reduzindo enquanto o produto aumenta. Dos 122 países analisados pelos autores tivemos 42 com compensação negativa, 80 com compensações positivas, sendo 34 até 50%, 24 entre 50% e 100% e 22 acima de 100%. No caso das compensações negativas, destacam-se os países de renda média e baixa. No caso do descolamento absoluto sobressaem os países do Anexo 1, que tiveram metas de redução de emissão com o Protocolo de Quioto, e economias em transição, que passaram pela modernização de suas economias e mudança na estrutura econômica.

Segundo os autores, a maior parte das compensações se deu no final dos anos 90 e em menor escala no início deste século. Parcela significativa da queda das emissões decorreu do maior crescimento do setor de serviços em relação à indústria⁸. Além disso, os ganhos de eficiência energética no setor de serviços foram mais acentuados que na indústria, que tem mostrado maior dificuldade em reduzir o consumo e substituir combustíveis fósseis. Nos países em desenvolvimento a compensação é mais difícil, pois os estágios iniciais do desenvolvimento tendem a levar à queda da participação do setor agropecuário, que utiliza menos energia, e ao aumento dos setores industriais, além do aumento do consumo das famílias para bens mais dependentes de energia – automóveis, eletrodomésticos, etc.⁹ Com isso, nenhum país em estágio inicial de desenvolvimento apresentou descolamento absoluto e os níveis de compensação foram muito inferiores. Percebe-se que esses países, além de terem menores níveis de bem-estar, enfrentam maiores dificuldades para gerar compensações.

Os estudos de decomposição nos permitem fazer diversos exercícios e simulações sobre como alcançar situações mais eficientes. Como destacado, o montante de emissões está relacionado ao nível de consumo (produto per capita e população), eficiência energética e grau de limpeza da matriz energética. Um país pode ser um grande emissor por conta de sua elevada renda per capita, mas emitir menos do que se poderia esperar em função de maior eficiência energética, por exemplo. Ou-

7 Os autores fazem a decomposição das emissões em cinco fatores: (i) intensidade em carbono do combustível consumido (CO_2 /combustível fóssil); (ii) participação do combustível fóssil na energia utilizada (combustível fóssil/energia consumida); (iii) energia requerida para produzir uma unidade de PIB (Energia consumida/PIB); (iv) PIB per capita; (v) população. Assim, o aumento das emissões se daria pelo aumento do PIB per capita e da população, que aumentaria o consumo e o produto, incrementos que, no entanto, poderiam ser compensadas por redução na intensidade de carbono dos combustíveis fósseis, redução na participação dos combustíveis fósseis e ganhos de eficiência energética.

8 O aumento da participação dos serviços é uma tendência natural, mas também pode ter ocorrido deslocamento de atividades industriais para os países em desenvolvimento sem metas de redução de emissões, o chamado vazamento das emissões. Por exemplo, deslocam-se as atividades mais emissoras para países não Anexo 1.

9 A Curva de Kuznets ambiental sintetiza essas considerações.

tro país emite mais do que se seria esperado por sua renda per capita, em função de baixa eficiência energética e forte dependência de combustíveis fósseis.

A tabela 1 a seguir apresenta alguns indicadores relacionados à emissão e à decomposição para o período recente. Em primeiro lugar, observa-se um pequeno aumento nas emissões per capita em termos mundiais¹⁰. Isto se deveu principalmente ao aumento do PIB per capita, pois tanto a matriz energética ficou relativamente mais limpa (menor emissão de CO₂ por energia consumida) como se ampliou a eficiência energética (menor consumo de energia por unidade de PIB). Ou seja, ocorreu um deslocamento relativo, mas insuficiente para limitar o crescimento das emissões totais.

Tabela 1 – Evolução das emissões per capita no mundo – valores médios

		2004	2006	2008	2009
Emissões per capita	MtCO ₂ /hab	5.66	5.77	5.90	5.71
PIB per capita	USD Mil/hab	7872.8	8486.8	8937.5	8563.7
Grau de limpeza da matriz energética	MtCO ₂ /TWh	0,0000018	0,00000173	0,00000173	0,00000167
Eficiência Energética	TWh/bil USD	831.0	816.0	756.5	768.0
Emissão por unidade de produto	MtCO ₂ /USD bil	1.34	1.28	1.18	1.18
N. Observações		143	145	145	145

Fonte: IEA (2011) - Grau de limpeza da matriz energética razão entre as emissões de ton de CO₂ por metros cúbicos e o consumo de energia em GWh. Eficiência energética razão entre consumo de energia e o PIB do país.

Em termos de países observa-se que: (i) os países com matriz mais limpa são países desenvolvidos da Europa que utilizam diferentes fontes de energia renováveis e/ou energia nuclear e alguns países da América Latina e da África que possuem maior disponibilidade de recursos hídricos para aproveitamento energético¹¹; (ii) nos indicadores de eficiência energética, tal como os calculamos, destacam-se um conjunto de países de renda baixa, em que a atividade econômica se concentra em atividades que utilizam pouca energia (atividades primárias sem o uso de tecnologias modernas), e alguns países desenvolvidos que se caracterizam com produção de alto valor agregado e eficiência no uso de energia. Vale destacar que a eficiência energética nos países desenvolvidos também decorre da maior participação do setor serviços, e do menor desperdício de energia nos processos produtivos.

A tabela 2 apresenta esses indicadores por diferentes grupos de países: OCDE representando os países desenvolvidos, países europeus e da Eurásia não participantes da OCDE (principalmente economias em transição), América Latina, Ásia e África. Pode-se perceber que a matriz energética mais limpa encontra-se na América Latina seguida dos países da OCDE; em termos de eficiência

¹⁰ Vale destacar que o aumento nas emissões per capita só não foi maior porque o último ano da série é caracterizado pela crise econômica mundial, que levou a significativa retração da atividade econômica.

¹¹ O Brasil aparecia na 16ª posição em termos de limpeza da matriz energética nesta classificação.

energética esta sequência se inverte, com os países da OCDE apresentando os menores índices de consumo de energia por produto seguidos da América Latina. Os menores níveis de emissões per capita se dão nos países africanos e asiáticos, basicamente em função das baixas rendas per capita. As maiores emissões se dão nos países da OCDE, em função das elevadas rendas per capita, e nos países europeus e da Eurásia não pertencentes a OCDE, em função dos piores indicadores de limpeza da matriz energética e da baixa eficiência energética.

Tabela 2 – Grupos de países e os indicadores de decomposição

	PIB/pop	Emissão/energia	Energia/PIB	Emissão/pop
Mundo	5,87	1,57	0,47	4,29
OCDE	24,19	1,23	0,33	9,83
Não OCDE Europa e Eurásia	2,24	1,77	1,87	7,45
América Latina	4,34	1,15	0,43	2,16
Ásia	1,13	1,93	0,66	1,43
África	0,89	1,64	0,63	0,92

Fonte: Banco Mundial

Com base nos indicadores acima, realizamos algumas simulações, para ver, por exemplo: (i) quanto se reduziriam as emissões mundiais se todas as regiões tivessem a mesma matriz energética da América Latina; (ii) se todos os países tivessem a mesma relação energia/PIB dos países da OCDE; (iii) se tivéssemos as relações emissões/energia da América Latina e energia/PIB da OCDE. Os resultados aparecem na tabela 3.

Observa-se que se todos os países tivessem o padrão de eficiência energética dos países da OCDE ou o padrão de emissões da matriz energética dos países da América Latina, as emissões de CO₂ teriam reduções superiores a 25%. A combinação das duas levaria a redução de quase 50% nas emissões. Ou seja, o PIB per capita mundial poderia dobrar sem aumentar as emissões se os países possuísem padrões mais elevados de eficiência energética e matrizes energéticas mais limpas. Percebe-se que as reduções seriam muito acentuadas nos países da Europa e Eurásia não pertencentes a OCDE (89%), na Ásia (70%) e na África (63%). Na América Latina, a queda de 24% decorre dos ganhos de eficiência energética.

Essas simulações mostram como poderia ser o padrão de emissões se todos os países tivessem uma matriz energética mais limpa e utilizassem menos energia na geração de produto. Não é possível alcançar esta situação, pois as características da matriz energética dependem dos recursos naturais de cada país – quantidade e velocidade dos ventos, disponibilidade hídrica, incidência solar,

quantidade e fertilidade dos solos, entre outras variáveis. Já o consumo energético depende de características climáticas (utilização de energia para aquecimento nas regiões mais frias, por exemplo) e da estrutura setorial da economia (agricultura, indústria e serviços), entre outros fatores.

Tabela 3 – Simulações das emissões e os efeitos

Emissões de CO2 per capita							
	Emissão/pop	Simulação 1		Simulação 2		Simulação 3	
Mundo	4,29	3,05	71,19%	3,13	73,00%	2,23	51,97%
OCDE	9,83	9,83	100,00%	9,19	93,45%	9,19	93,45%
Não OCDE Europa e	7,45	1,32	17,70%	4,82	64,63%	0,85	11,44%
América Latina	2,16	1,65	76,24%	2,16	100,00%	1,65	76,24%
Ásia	1,43	0,72	50,29%	0,85	59,55%	0,43	29,95%
África	0,92	0,48	52,42%	0,64	69,96%	0,34	36,68%
Simulação 1 - Coeficientes de Energia/PIB da OCDE							
Simulação 2 - Coeficientes Emissão/Energia da América Latina							
Simulação 3 - combinando simulação 1 e 2							

No entanto, parcela da eficiência energética e do perfil da matriz energética depende da disponibilidade de tecnologias, das condições de acesso e de seu custo. Em vários países há um reaproveitamento muito maior dos resíduos, menores perdas de energia, menor custo na produção de energia renovável, motores mais eficientes que consomem menos energia etc.. Assim, o acesso mais amplo às tecnologias verdes contribuiria para um maior desenvolvimento econômico e social com menores emissões.

O descolamento do desenvolvimento econômico dos problemas relacionados às emissões ainda irá requerer um amplo esforço tecnológico no desenvolvimento de fontes de energia renovável, eficiência energética, captura e sequestro de carbono, entre outras; mas há um amplo conjunto de tecnologias já disponíveis cuja difusão contribuiria para reduzir de maneira significativa as limitações ambientais existentes ao desenvolvimento.

Assim, duas questões se colocam: a necessidade de um maior esforço para o desenvolvimento de tecnologias limpas e mecanismos de difusão das tecnologias disponíveis¹². O padrão de desenvolvimento das tecnologias verdes não deverá ser muito diferente do processo de inovação em geral. A maior parte do investimento em pesquisa e desenvolvimento é feito em um pequeno grupo de países ricos. Mais de 80% dos investimentos se concentram nos países da OCDE, sendo que quase 50% se concentram nos EUA e Japão. Fora da OCDE, o país que mais investe em P&D, em termos absolutos, é a China, o que se explica pela própria dimensão da economia. Estes também deverão ser os principais responsáveis pelas inovações verdes, o que já se verifica pela forte concentração de patentes “ambientais” nesse grupo de países, conforme detectado no estudo de patentes deste projeto.

Os incentivos de mercado tendem a ser insuficientes para estimular o investimento em tecnologia verde por algumas razões, com destaque para as (i) externalidades ambientais, que implicam

12 Ver Popp (2012) sobre o papel da tecnologia verde para as possibilidades de crescimento e arranjos para o seu estímulo.

uma incorreta precificação das emissões/poluição e danos ambientais levando a um mercado reduzido para tecnologias que reduzam as emissões, e a (ii) apropriabilidade imperfeita dos investimentos em desenvolvimento tecnológico. Estes dois problemas tendem a levar a um subinvestimento na busca de tecnologias verdes. Assim, o desenvolvimento de tecnologias verdes requer tanto políticas ambientais como tecnológicas.

A imposição de restrições quantitativas a emissões, a cobrança de impostos sobre as emissões, políticas mandatárias de biocombustíveis, políticas de compra de energias renováveis e outros tipos de políticas tendem a encarecer as emissões e criar mercado para as tecnologias verdes. Outros instrumentos podem ser utilizados como o fortalecimento de sistemas de inovação verdes: financiamento à pesquisa, criação de redes de pesquisa, subvenções para investimentos em P&D, entre outros. A maior preocupação com as questões ambientais nas últimas décadas, com a adoção de restrições ambientais e políticas de estímulo ao desenvolvimento de novas tecnologias, já resultou em um grande aumento do número de patentes em tecnologias verdes, com destaque para energias renováveis – geotérmica, fotovoltaica, eólica, entre outras – em especial nos países do Anexo 1 signatários do protocolo de Quioto; e patentes que buscam ganhos de eficiência energética, como pode ser visto no capítulo de estudos sobre as patentes.

A definição de políticas de promoção de mudanças tecnológicas que reduzam as emissões é uma questão com vários desdobramentos importantes. Percebe-se, primeiramente, que políticas mandatárias e criação de mercados estimulam o desenvolvimento de tecnologias. A União Europeia privilegiou em suas políticas de biocombustíveis o biodiesel enquanto os EUA privilegiou o etanol. No levantamento de patentes realizado no escopo deste trabalho observa-se um predomínio de patentes relacionadas ao biodiesel nos países europeus e vinculadas ao etanol nos EUA. Já a proteção do direito de propriedade intelectual estimula o inventor, mas dificulta a difusão da tecnologia. Assim, políticas públicas devem ser pensadas no sentido de gerar os incentivos necessários sem criar barreiras excessivas à utilização mais ampla das tecnologias. Outro aspecto importante refere-se a incertezas sobre as condições futuras do mercado e em relação a regulações e políticas adotadas. Vários países adotaram políticas mandatárias de biocombustíveis e restrições às emissões, que refluíram com a crise econômica recente. O exemplo brasileiro da política do etanol é emblemático, com a sua crise nos anos 90 e a mudança de política do governo. A estabilidade das regras e dos incentivos e a garantia de mercados para as tecnologias verdes em um prazo suficiente para que os investimentos sejam recuperados é condição necessária para incentivar o investimento em P&D nesses setores.

Para os países em desenvolvimento a transferência de tecnologia é fundamental, em suas diferentes formas: comércio internacional de tecnologias incorporadas em produtos, investimento direto e fluxos de conhecimentos e pessoas. Caberá aos países em desenvolvimento criar as melhores condições para absorver esta tecnologia: ampliar o conhecimento tecnológico da força de trabalho do país, eliminar restrições de crédito, criar centros de pesquisa para a adaptação de tecnologias e seu aperfeiçoamento às necessidades do país, criar ambiente favorável ao investimento, alguns

países se valem de reservas de mercado e políticas de conteúdo nacional, entre outras. O tipo de política que potencializa a absorção tecnológica depende do nível de desenvolvimento, do tamanho do mercado consumidor e do tipo de inserção internacional.

Muitas tecnologias que possibilitam a redução das emissões já estão disponíveis e poderiam favorecer o desenvolvimento dos países de renda baixa e média. A questão é como facilitar sua difusão e utilização. Um ponto importante é o custo marginal do abatimento das emissões em diferentes tecnologias e como se compensa/financia esse custo. Muitas dessas tecnologias ainda apresentam custos elevados e o grande desafio é torná-las atrativas para tentar quebrar o *lock-in* em que os países se encontram nas tecnologias marrons. Deve-se buscar a disseminação das tecnologias verdes e a redução de custos conforme se ampliam a escala de uso e a aprendizagem.

Como muitos países em desenvolvimento não dispõem ainda da infraestrutura e dos serviços mencionados, poder-se-ia disponibilizar determinados serviços já com tecnologias verdes: energia eólica, solar, etc. A questão é como tornar o preço relativo destas mais atraente, como financiar e como disponibilizar e difundir as novas tecnologias. Pode-se penalizar as emissões por meio de impostos e restrições quantitativas, ou ainda, subsidiar as tecnologias verdes. Com restrições quantitativas, a criação de mercados de permissões poderia estimular tecnologias verdes de acordo com o preço para o CO₂ evitado ou reduzido. Nesse caso seriam incentivadas as tecnologias cujo custo de abatimento fosse inferior ao preço do carbono. Por meio dos MDL, as restrições poderiam ser colocadas nos países acima de determinado nível de bem-estar e as tecnologias verdes, ser adotadas nos países de menor renda que teriam direito aos créditos de carbono. Vale destacar que determinadas tecnologias, além da redução das emissões, têm retorno econômico positivo: algumas medidas de eficiência energética com redução do consumo de energia, melhoria de pastagens, reciclagem de materiais, geração de energia a partir do biogás, entre outras¹³.

O custo de abatimento está muito relacionado à natureza das emissões. As emissões mundiais de GEE estão fortemente concentradas na oferta de energia, no transporte e nos processos industriais, o que está diretamente relacionado ao uso de combustíveis fósseis para estas finalidades. Nos países desenvolvidos a concentração é ainda maior nessas atividades. Assim a redução das emissões está relacionada à melhoria da matriz energética e ao menor consumo de energia. As emissões brasileiras são dominadas pelo desflorestamento e mudanças do uso do solo. O país dispõe de uma das matrizes energéticas mais limpas do planeta, com grande importância da biomassa, da hidroeletricidade e, recentemente, de outras fontes de energia limpa, como a eólica. Com isso, as origens das emissões de gases do efeito estufa no país diferem do resto do mundo. Enquanto no mundo o principal responsável é o uso de energia, com 61,4% das emissões mundiais e 86,3% no caso dos EUA, no caso brasileiro este fator representa apenas 16%. A mudança no uso da terra e o desflorestamento decorrente dessas alterações são responsáveis por 58% do total. Além disso, destaca-se a emissão

13 A McKinsey & Company (2009) realizou um estudo bastante detalhado em diversos setores econômicos e regiões do mundo buscando identificar tecnologias disponíveis para a redução das emissões e seus custos. Foram identificadas mais de 200 oportunidades de redução de emissões e estimou-se que as emissões globais poderiam ser reduzidas de uma estimativa de 70GtCO₂ em 2030 para 32GtCO₂ com um custo inferior a €60 por tonelada.

das atividades agrícolas, com destaque para a pecuária (fermentação entérica) que responde pela maior parcela da emissão de metano.

Diante da disparidade na estrutura de emissões entre o Brasil e o resto do mundo, o país tem oportunidade de diminuir sensivelmente seu nível atual de emissões a um custo relativamente baixo, apenas com base em políticas de redução do desmatamento e de uso mais racional da terra. É justamente nesses setores que se concentram a maior parte das metas apresentadas pelo país para a redução de suas emissões na COP de Copenhague.

Essa oportunidade que se apresenta ao Brasil é única entre os principais países emissores. Além disso, o país possui outras oportunidades relacionadas a ganhos de eficiência energética, maior reaproveitamento de materiais, aproveitamento energético de resíduos (biogás, bagaço de cana, cavacos de madeira, entre outros). Enfim, o Brasil é um dos países com grande potencial de abatimento a baixo custo. Em muitas oportunidades o custo é negativo, outras poderiam ser adotadas com baixos preços de carbono, e outras poderiam ser implantadas por mecanismos de transferência de renda para o pagamento de serviços ambientais (REDD, em sigla para Redução de Emissões para o Desmatamento e Degradação, por exemplo).

Outro ponto a ser destacado é a vantagem do país em termos de participação de fontes de energia limpa na matriz energética. Com isso, o país pode se beneficiar da restrição de emissões sobre setores intensivos em energia em função desses se beneficiarem no território nacional de fontes energéticas menos poluentes. Assim, aparentemente o Brasil tende a ser menos afetado em um contexto de transição para uma economia de baixo carbono em função da maior facilidade e do menor custo de mitigação das emissões decorrentes do desflorestamento e mudanças de uso no solo e do maior potencial para o desenvolvimento de fontes de energia limpa que já possuem elevada participação na matriz nacional. Porém, mesmo com vantagens aparentes a economia do país deverá ser afetada negativamente e a competitividade de diversos setores poderá ser contestada por inovações tecnológicas desenvolvidas no resto do mundo.

Para avaliar este impacto abordamos o tema com duas metodologias distintas. A primeira foi uma análise do tipo equilíbrio geral. Foram feitas adaptações no modelo EPPA¹⁴ compatíveis com os objetivos do projeto e simulados os impactos de determinados choques sobre o comportamento da economia brasileira, em termos macroeconômicos e em diferentes horizontes de tempo. As principais adaptações realizadas foram a maior abertura setorial e a estrutura energética. Foi definido um conjunto de mudanças tecnológicas esperadas, diferentes políticas ambientais no Brasil e no mundo e avaliados seus impactos macroeconômicos e sobre os principais setores considerados.

A segunda abordagem foi a realização de estudos setoriais, que buscaram avaliar tanto os fatores determinantes da competitividade dos respectivos setores como a dinâmica tecnológica e as principais questões ambientais que afetam cada um desses setores. Com base nesses estudos, definiram-se perspectivas tecnológicas e potenciais restrições e riscos ambientais que podem afetar os

14 O modelo EPPA será melhor detalhado na seção posterior e no capítulo referente a análise do modelo de Equilíbrio Geral Computável.

setores. Esses cenários subsidiaram as simulações do modelo de equilíbrio geral, ao mesmo tempo em que o estudo de patentes subsidiou os estudos setoriais na identificação de rumos tecnológicos.

Como já destacado, os setores selecionados para o estudo decorreram tanto de sua importância para a economia brasileira como pela maior possibilidade de serem afetados por políticas ambientais, seja no país seja no resto do mundo, e pelo forte estímulo ao desenvolvimento de tecnologias verdes. Assim foram analisados setores intensivos em energia (cimento, alumínio e siderurgia), setores dependentes do consumo de combustíveis fósseis (automobilístico, aeronáutico, petróleo e petroquímico) e setores fortemente relacionados ao uso do solo, principal determinante das emissões brasileiras (agropecuária – pecuária e grãos – e biocombustíveis).

3. Síntese e Conclusões - Avaliação de Impactos de Restrições Ambientais e Mudanças Tecnológicas para uma Economia de Baixo Carbono sobre a Economia Brasileira.

O primeiro item a ser destacado são os resultados obtidos pelas simulações no Modelo de Equilíbrio Geral utilizado. Como já se disse, utilizou-se o modelo EPPA (*Emissions Predictions and Policy Analysis Model*), desenvolvido pelo *MIT Joint Program on the Science and Policy Global Change*, adaptado a algumas características da economia brasileira e aos objetivos do estudo¹⁵. Esta parte do projeto buscou mensurar os impactos da transição para uma economia de baixo carbono sobre a economia brasileira, a partir da implementação de cenários de políticas de redução das emissões de gases de efeito estufa e de mudanças tecnológicas.

Para definir os cenários simulados, em termos de política, fez-se um levantamento das principais políticas climáticas em discussão nos fóruns internacionais e nos principais países emissores, além daquelas políticas que já se encontram em implantação. Foram consideradas diferentes hipóteses sobre a forma de implantação das metas de redução de emissões, por exemplo, contemplando ou não impostos compensatórios de carbono aos países não participantes; possibilitando ou não a negociação de créditos de carbono, seja entre setores e países seja em mercados restritos; e diferentes formas de participação do Brasil nesses arranjos. Além das metas de reduções de emissões obtidas pelas políticas e discussões em andamento, foram simulados cenários que considerassem o alcance de uma política climática global, com todos os países participando e metas mais ambiciosas para que se alcançasse a estabilização das emissões mundiais.

Para os cenários tecnológicos, considerou-se diferentes evoluções de custos para as tecnologias atualmente em discussão, tanto em termos de fontes de energia como para ganhos de eficiência energética de modo a verificar a possibilidade de sua adoção. Além da trajetória normal de ganhos de produtividade e aprendizado tecnológico já incorporados na própria dinâmica do modelo EPPA, foram incorporados cenários de trajetórias tecnológicas apontados nos relatórios setoriais, sob hipóteses de menor custo de implantação de usinas de energia elétrica com captura e sequestro de carbono; menor custo de desenvolvimento e adoção de veículos híbridos e *Plug-in*; possibilidade

¹⁵ Detalhes do modelo podem ser vistos no próximo capítulo e no relatório completo disponível no site www.ebc.fearp.usp.br

de uso de biocombustíveis no transporte aéreo e rodoviário de carga; maior substituição da gasolina por biocombustível importado nos países desenvolvidos; desenvolvimento do etanol de segunda geração no Brasil a partir do uso do bagaço da cana-de-açúcar; e cenários de tecnologias de baixo carbono na agropecuária brasileira.

Os diferentes cenários foram comparados com o cenário de referência (BAU – Business as Usual), que desconsidera a aplicação de políticas climáticas em qualquer país do mundo, excetuando o estágio atual da EU-ETS (European Union Emissions Trading System) e as metas de produção e consumo de biocombustíveis nos EUA e na União Europeia que já fazem parte da política atual ou são anunciadas como certa.

Alguns dos principais resultados obtidos pelas simulações realizadas no estudo são:

- (i) O atual nível de comprometimento dos diferentes países com cortes em emissões é insuficiente para estabilizar o fluxo de emissões. Isso significa que nas próximas décadas as discussões sobre o tema nos fóruns internacionais devem se intensificar, junto com as pressões para que os países reduzam suas emissões.
- (ii) A aplicação de tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos é pouco eficaz em atingir seus objetivos de reduzir a perda de competitividade e evitar vazamentos de atividades poluentes para países sem compromissos de redução de emissões. Dessa forma, os maiores desafios para competir com as exportações de países que não adotem políticas de controle das emissões devem vir de padrões, normas e certificações nacionais ou setoriais (barreiras não tarifárias) e não de tarifas baseadas em carbono.
- (iii) Uma política climática de alcance global, ainda que utópica nas discussões atuais, possibilitaria a estabilização das emissões mundiais com menores custos para se alcançar esta economia mundial de baixo carbono. Com esta política os cortes em emissões seriam melhor distribuídos de acordo com os custos de mitigação de cada setor e país. As metas nacionais de reduções em emissões devem, então, ser acompanhadas de intensa atividade diplomática nos fóruns internacionais para adesão ampla de outros países em desenvolvimento aos esforços de redução em emissões.
- (iv) A política climática brasileira traz baixos impactos na economia do país no ano de 2020 (queda de 0,3% do PIB – em relação ao cenário de referência). Contudo, a intensificação da política geraria perdas crescentes, que chegariam a 4% do PIB de referência em 2050. Esses custos elevados devem-se em parte à aplicação da política com metas setoriais diferenciadas de redução em emissões, o que impede que setores com menores custos de mitigação respondam por maiores cortes em emissões. Uma política climática global que permita a comercialização de créditos de carbono entre países reduziria as perdas para valores inferiores a 1,7% do PIB. Diante de uma maior pressão para reduzir emissões, seria desejável para o país buscar a participação em mercados de carbono de alcance multirregional no longo prazo.

- (v) As mudanças na produção dos diferentes setores são pouco expressivas no ano de 2020 devido aos cortes modestos em emissões. Contudo, ao longo do tempo os custos aumentam e a competitividade relativa dos setores é alterada. Os setores de energia fóssil (gás natural, carvão e de refino de petróleo) são os maiores prejudicados. Os setores agropecuários, a indústria de alimentos, a indústria intensiva em energia e o setor de transportes também são impactados negativamente até o final do período (2050), enquanto as demais indústrias e os serviços quase não sofrem perdas.
- (vi) Os cenários tecnológicos adotados com fortes reduções de custos em determinadas tecnologias, adoção do etanol de segunda geração, tecnologias de sequestro e captura de carbono, entre outras, praticamente não afetam os resultados agregados de emissões, PIB e bem-estar. O principal resultado setorial recai sobre o setor de biocombustível, que apresenta um forte incremento em produtividade e produção, destinado principalmente para exportações e uso em outros setores de transportes, o que afetará negativamente a produção e refino do petróleo no país. A disponibilidade do etanol de cana-de-açúcar a custos competitivos inibe a adoção dos veículos híbridos no país, que só se verifica em volume considerável na frota nacional com hipóteses de elevados custos de produção do etanol. Apesar de os veículos híbridos potencialmente contribuírem para maior redução em emissões no longo prazo, o uso do etanol avançado permitiria emissões menores já a partir de 2020. Tecnologias de geração de eletricidade com captura e sequestro de carbono no país não se tornam competitivas mesmo na presença de uma política climática doméstica. Já a introdução das tecnologias de baixo carbono na agricultura e o Programa ABC permitem menores quedas em PIB no cenário de política climática, o que reflete o menor custo de mitigação para a agropecuária, além de indicar que o subsídio de taxa de juros deste programa não é prejudicial à economia. Dessa forma, o Plano e o Programa ABC são importantes instrumentos de redução em emissões para o país e devem ser ampliados.

Mesmo com os cenários tecnológicos adotados nas simulações gerando pequenos impactos em termos de reduções de emissões, o estudo realizado sobre a dinâmica e evolução das patentes sinaliza alguns resultados interessantes. O primeiro aspecto a ser considerado é o forte crescimento das chamadas patentes verdes, comparativamente às demais patentes, na última década, com destaque para os grupos químicos e metalurgia. Seguindo a trajetória esperada, existe um forte predomínio dos países desenvolvidos, com destaque para Japão, Estados Unidos e Alemanha; e uma forte concentração em grandes empresas como Basf, Shell, Bayer e Exxon, que constam entre as cinco empresas com maior número de patentes concedidas. Isso mostra que os principais grupos colocam a “química verde” como uma estratégia para o seu desenvolvimento.

Outro ponto a ser destacado é que no setor de etanol e biodiesel foram identificadas 30 rotas tecnológicas de destaque com diversos direcionamentos – obtenção de novas tecnologias e matérias primas para desenvolvimento de biocombustíveis, aplicações em elevadas altitudes, desenvolvimento

de novos produtos derivados, entre outros – que foram patenteadas basicamente nos mercados europeu e americano. O Brasil praticamente não aparece como ator nessas rotas tecnológicas, apesar de ser um dos principais produtores mundiais de biocombustíveis e com maior potencial de expansão¹⁶.

Além disso, verificou-se um grande número de patentes voltados a maior eficiência energética (redução de perdas, melhores sistemas de controle de fluxo, distribuição e transmissão; reguladores de frequência, eficiência de motores, entre outros) e novas fontes energéticas. Há também aqui um forte predomínio das empresas americanas, europeias e japonesas.

O dinamismo das patentes revela o grande esforço nos países desenvolvidos pelo desenvolvimento de tecnologias verdes. Assim, como destacado na seção anterior, além do desenvolvimento de novas tecnologias, a disseminação e transferência das tecnologias existentes já tendem a gerar ganhos significativos para o controle das emissões. O perfil das inovações em tecnologia verde segue a concentração nos países desenvolvidos. Apesar de o Brasil ser apontado em diversos estudos com amplo potencial para o desenvolvimento tecnológico em biocombustíveis e fontes energéticas alternativas, os dados de patentes ainda não revelam uma presença nem mesmo minoritária do país nessa corrida tecnológica.

Os estudos setoriais se concentraram em três grupos: (i) os setores intensivos em energia que tenderiam a ser penalizados com restrições a emissões de CO₂ (cimento, siderurgia e alumínio); (ii) os setores afetados por restrições ao uso de combustíveis fósseis, destacando-se os setores de transporte (automotivo e aeronáutico), exploração de petróleo e petroquímico; e, (iii) os setores ligados às mudanças do uso do solo e ao eventual desflorestamento, que são os principais responsáveis pelas emissões brasileiras: biocombustíveis, pecuária e grãos.

Os estudos buscaram identificar setorialmente os fatores de competitividade dos setores, o posicionamento do Brasil no cenário mundial, a dinâmica tecnológica, os principais impactos ambientais, as perspectivas tecnológicas, as principais restrições ambientais e como estas devem afetar as perspectivas dos setores no Brasil.

Tomando os setores intensivos em energia, de uma forma geral, as restrições ambientais com metas de reduções de emissões tendem a afetá-los negativamente pela ampliação de seus custos. Especificamente, no caso brasileiro, dada a grande preponderância das emissões relacionadas ao uso do solo e ao desflorestamento, as metas estabelecidas pela PNMC (Política Nacional de Mudanças Climáticas) para os setores industriais não são muito restritivas, mas a imposição de metas em nível mundial tenderia a afetar o mercado desses produtos. Vale destacar, porém, que como a matriz energética brasileira é relativamente mais limpa, restrições a emissões de CO₂ e a introdução de mecanismos de precificação de carbono poderiam gerar impactos positivos sobre as indústrias brasileiras intensivas em energia brasileiras no cenário mundial. Esses setores podem, em geral, ser considerados indústrias maduras, com introdução de novas tecnologias de forma mais lenta.

Há, de toda maneira, importantes especificidades setoriais. A indústria de cimento é uma das atividades que mais emitem carbono em escala internacional. Dadas as características estruturais

16 Foram realizadas pesquisas junto aos escritórios de patentes dos EUA (USPTO) e da Europa (EPO).

do setor pode-se destacar dois aspectos importantes, a baixa relevância do comércio exterior e uma dinâmica tecnológica típica de indústria madura (modestos gastos em P&D, lento deslocamento da fronteira tecnológica cujas competências se concentram nos fornecedores de equipamentos), com baixos riscos de desenvolvimento de tecnologias proprietárias que coloquem em risco os produtores brasileiros. Como os principais indicadores ambientais do setor relacionam-se ao consumo de energia e a matriz energética brasileira é relativamente limpa, o país apresenta melhores indicadores ambientais, que são favorecidos também pela alta taxa no Brasil de substituição do clínquer por escória de alto-forno. As principais tecnologias específicas para o setor, como cimentos menos intensivos em carbono, não se mostram muito promissoras. Por outro lado, a difusão das melhores práticas de eficiência energética disponíveis seria insuficiente para afetar de maneira significativa o patamar de emissões. Sendo assim, o ajuste em escala mundial da indústria de cimento a padrões de emissões compatíveis com a mitigação do aquecimento global passa, necessariamente, pelo desenvolvimento e difusão de tecnologias de captura e sequestro de carbono, o que implicaria um forte aumento do custo operacional e de investimento. Como estas tecnologias ainda se encontram em estágio incipiente de desenvolvimento e admitem aplicações em vários setores, pode haver aqui uma importante janela de oportunidade para o país.

No caso da siderurgia, também é relativamente baixa a capacidade da indústria brasileira de levar a cabo inovações radicais, predominado um foco na otimização de tecnologias adquiridas junto a fornecedores internacionais. A difusão de tecnologias é relativamente lenta. Com isso, não deverá ser difundida de forma rápida a tecnologia de fusão redutora, mantendo-se o alto forno como o principal equipamento para fabricação de ferro primário, o que é favorável a indústria brasileira. A siderurgia do País apresenta uma situação intermediária em termos de desempenho energético e tecnológico. Existem baixas oportunidades de adensamento da cadeia. A principal mudança tecnológica que deverá ocorrer no setor até 2050 é o incremento da participação da aciaria elétrica, que levará a redução do consumo de energia e da emissão de CO₂, o que deverá afetar negativamente a indústria brasileira em função de suas características baseada em usinas integradas. As principais experiências mundiais em termos de novas tecnologias de baixo carbono estão sendo desenvolvidas na União Europeia (projeto ULCOS) e no Japão (COURSE 50), em ambos os casos em projetos consorciados de grande porte. Não apenas seria difícil replicá-los no Brasil, mas mesmo induzir a participação brasileira no desenvolvimento dos projetos. No entanto, do mesmo modo que no caso da indústria do cimento, não se anteveem restrições importantes à difusão no País das inovações eventualmente desenvolvidas.

No caso do alumínio, as vantagens competitivas da indústria brasileira são a qualidade da bauxita, a capacidade produtiva existente de alumina e a disponibilidade de uma matriz energética limpa. A perda de importância do País no mercado de alumínio e sua concentração na exportação de bauxita e alumina decorrem do elevado custo da energia no Brasil. A mudança deste posicionamento requer garantias de ampla oferta de energia a menores custos. Em relação aos custos da energia, este poderia ser compensado por uma eventual melhor precificação do CO₂ em um

contexto de restrição de emissões no cenário mundial, sendo que algumas políticas internacionais já incentivam produtos com menores emissões de CO₂. A ampliação da reciclagem dos produtos de alumínio no Brasil pode ampliar ainda a vantagem em termos de redução de emissões. O dinamismo tecnológico do setor é bastante restrito e há uma ausência de inovação e desenvolvimento de novos produtos pelas empresas no país.

No segundo grupo de setores foram estudados os setores de petróleo, petroquímico, automobilístico e aeronáutico. No caso do setor de petróleo, tem-se verificado um grande crescimento de novas tecnologias de exploração de petróleo e gás, com destaque para águas profundas, aproveitamento das areias petrolíferas e gás de xisto. A descoberta de novas fontes e novas tecnologias afasta o risco de escassez mundial de petróleo e gás natural no curto prazo, mas estes tendem a ser obtidos com custos crescentes. Por outro lado, o desenvolvimento de óleos não convencionais pode limitar a expectativa de elevação de preços do petróleo. No Brasil, um ponto a ser destacado é a necessidade de fortalecer a cadeia local de fornecedores de bens e serviços, com destaque para equipamentos e serviços de engenharia. Em termos ambientais, destacam-se os investimentos realizados para minimizar os impactos ambientais na extração de petróleo, tais como o sequestro geológico de carbono e a eliminação da queima do gás (flaring) nas plataformas, entre outras.

No caso da petroquímica, com relação à mudança climática, destacam-se as seguintes iniciativas: substituição de óleo combustível por gás natural e biomassa; economia de energia térmica (caldeiras mais eficientes, cogeração, isolamento térmico, reaproveitamento de fontes térmicas etc.); abatimento de emissões de NOx na produção de ácido adípico e de ácido nítrico. Como resultado, a intensidade de emissões de GEE da indústria petroquímica brasileira reduziu-se em 47% entre 2001 e 2010 (de 580 para 306 kg CO₂ eq/t produto). Na comparação internacional, a partir apenas do dióxido de carbono, a vantagem brasileira é substantiva: em 2007, último ano em que os dados internacionais, provenientes da mais representativa entidade setorial e que compreende três quartos da produção mundial, estão disponíveis, o nível brasileiro é de 57% da média global.

Os setores aeronáutico e automobilístico foram analisados pelo fato de a atividade do transporte estar entre as principais emissoras de CO₂ e pelo uso intensivo de combustíveis fósseis. Com isso, tendem a ser impactados negativamente pela imposição de restrições às emissões. Na questão da indústria aeronáutica, há dois componentes principais em termos de trajetória tecnológica: a evolução das configurações aerodinâmicas e estruturais das aeronaves, a estrutura de motores e também o desenvolvimento de combustíveis renováveis. Estes relacionam-se a desenvolvimento de novos materiais, peso das aeronaves e tipo de combustíveis, entre outros. Um ponto relevante para o Brasil é a possibilidade de desenvolvimento da tecnologia de biocombustíveis aeronáuticos. Outra questão é a reorganização das operações aeroportuárias, uma vez que parte importante do consumo de combustíveis no setor está relacionado às operações em solo. No caso do setor automotivo, as perspectivas de longo prazo se concentram nos veículos híbrido e elétricos e o uso de hidrogênio. Com isso, a vantagem de curto prazo do Brasil na tecnologia *flex-fuel* pode colocar em risco o setor no Brasil, por esta poder se tornar uma tecnologia em declínio. O Inovar-Auto, o PROCONVE e o

Programa Brasileiro de Etiquetagem vão no sentido de reduzir as emissões de veículos e estimular o maior desenvolvimento tecnológico. Mas o Brasil possui vários riscos decorrente do fato de os maiores esforços tecnológicos do setor serem realizados fora do país o que não nos possibilitaria beneficiar do dinamismo do desenvolvimento das novas tecnologia; mas por outro lado, como o setor é dominado pelas multinacionais as inovações ocorridas tenderão a ser difundidas por todos os países eliminando o risco da defasagem tecnológica. Outra questão a ser destacada para o setor é a tendência de ampliação dos investimentos em mobilidade urbana e restrições ao uso de veículos nos grandes centros urbanos o que poderá impactar a demanda por automóveis.

No caso dos setores ligados à agropecuária, a transição para uma economia de baixo carbono, pode afetar tanto pelas restrições impostas ao uso do solo e ao desmatamento como pelas maiores oportunidades decorrentes da busca de recursos renováveis. No caso dos biocombustíveis, em especial o etanol, as restrições a emissões de CO₂ tendem a ter um impacto mais favorável do que negativo, uma vez que este ainda se apresenta como uma das alternativas menos custosas de combustível renovável, em especial o etanol de cana. Esta posição pode ser contestável como se verificou pela rápida expansão do etanol de milho nos EUA, cuja produção se faz em escalas industriais maiores, o que pode representar uma vantagem para o adensamento da cadeia e o desenvolvimento das chamadas biorrefinarias. Mas, o etanol de cana possui balanços energéticos significativamente melhores e custos competitivos. A ameaça que se coloca é o desenvolvimento do etanol de segunda geração. O País vinha investindo relativamente pouco comparado com seus concorrentes, mas já existem plantas sendo instaladas. No seu desenvolvimento pode haver vantagens para o Brasil pela maior proximidade da matéria-prima necessária para o etanol de segunda geração, no caso o bagaço da cana e a palha. Cabe desenvolver melhores técnicas de transporte que viabilizem o maior aproveitamento da palha e das folhas. Outro aspecto a ser focado é o desenvolvimento de um mercado internacional da *commodity*, o que requer tratar das questões da padronização, certificação e desenvolvimento de novos países produtores. É preciso também desenvolver uma ampla infraestrutura de logística para se beneficiar deste mercado, o que constitui um desafio. E, como já destacado, no conceito de biorrefinarias amplas oportunidades se colocam para o setor, com o desenvolvimento de novos produtos ligados à química verde e a novos combustíveis para veículos pesados, aeronáutico, entre outras possibilidades. Notem que o conceito de biorrefinaria, apesar de uma realidade, ainda requer amplos investimentos no desenvolvimento tecnológico e ganhos de escala para torná-la viável e competitiva. Destaca-se nesse sentido o Plano PAISS (Apoio à Inovação Tecnológica Industrial dos Setores Sucroenergético e Sucroquímico) lançado pelo BNDES e pela FINEP em 2011 que busca financiar projetos voltados para o desenvolvimento do bioetanol de segunda geração, novos produtos derivados da cana e a tecnologia de gaseificação. O elevado montante de recursos envolvidos e o interesse apresentado pelas empresas sinaliza que parcela do atraso do país nos investimentos nesses segmentos poderá ser reduzida. No caso do biodiesel, o país apresenta uma defasagem tecnológica, diferentemente do etanol, mas que não é tão significativa. O principal desafio do setor é o desenvolvimento de novas variedades de oleaginosas que gerem maior

quantidade de óleo por hectare e viabilizem plantas de maior porte. Este setor ainda continuará a depender de subsídios e mandatos para sua utilização em função dos maiores custos de produção.

Na análise do agronegócio nacional – carnes e grãos –, foram identificados significativos ganhos de produtividade, o que tem viabilizado uma grande expansão, tanto no atendimento do mercado doméstico como no mercado internacional, sem expansão concomitante no uso de recursos, em especial na área cultivada, ou seja, a ampliação da produção brasileira tem se ancorado fortemente em ganhos de produtividade. Os ganhos decorrem tanto da geração e adoção de tecnologias de caráter (bio)químico, como fertilizantes, defensivos, animais e sementes melhoradas como da maior eficiência na gestão e uso de recursos e insumos. Os futuros ganhos tecnológicos tendem a ser de caráter incremental e a maior ruptura tecnológica que pode ocorrer no País refere-se à maior disseminação e efetiva adoção das modernas tecnologias por um contingente ainda maior de produtores. Portanto, deve-se focar na difusão da tecnologia com maior disponibilização de informações, programas de treinamento e políticas que podem envolver incentivos para a difusão de boas práticas, em especial aquelas que possam reduzir os impactos ambientais, sejam locais de uso de água e solo, como globais relacionados à emissão de gases efeito estufa. O Programa Agricultura de Baixo Carbono (ABC) alinha-se com esta tendência ao incentivar ações voltadas para a baixa emissão de carbono, incentivo a tecnologias poupa-terra e ganhos de eficiência em processos. Destacam-se os programas de integração lavoura-pecuária e utilização de técnicas de plantio-direto. De uma forma geral, apesar de o agronegócio enfrentar impactos negativos relacionados à restrições de uso do solo, que tendem a impactar o custo, existe ampla possibilidade de difusão de tecnologias modernas de baixa emissão de CO₂ que reduzam os impactos negativos e cujos ganhos de produtividade possam compensar as restrições. Vale destacar também, as amplas possibilidades de uso mais intensivo de áreas que apresentam, atualmente, baixa produtividade e que a adoção de tecnologias de maior rendimento agrícola tendem a gerar um efeito poupa-terra com repercussões positivas em termos de emissões de carbono.

Em suma, a análise desenvolvida mostrou que apesar de serem relevantes os impactos sobre a economia brasileira da transição para uma economia de baixo carbono, seja com restrições ambientais seja com mudanças tecnológicas, estes podem ser menores do que em outros países em função da natureza das emissões no Brasil e de dispormos de uma matriz energética mais limpa. Deve-se destacar que de uma forma geral a posição brasileira é frágil no âmbito do desenvolvimento tecnológico, tendendo na maior parte dos casos a incorporar tecnologias desenvolvidas nos países mais desenvolvidos. Em segmentos intensivos em energia, que são setores de menor dinamismo tecnológico, haverá elevações de custos e perdas relativas aos demais setores, mas comparando-se com outros países as perdas tendem a ser menores em função da nossa matriz energética. O setor de biocombustíveis tende a se beneficiar com as restrições e com as maiores possibilidades de adensamento tecnológico. A agropecuária enfrentará elevação de custos e perdas com as restrições ao uso do solo, mas a maior disponibilidade de terras no Brasil e a possibilidade de maiores ganhos de produtividade pela difusão de tecnologia farão com o desempenho do

país ainda seja favorecido. Nos setores ligados aos transportes são maiores os riscos. O País corre um significativo risco no setor automobilístico pela opção tecnológica realizada no período recente, o que irá requerer um amplo esforço para atrair desenvolvimentos tecnológicos e evitar que corramos o risco de ficar presos a uma trajetória de tecnologia decadente. No caso aeronáutico, também deverá haver amplo esforço para manter a capacidade competitiva da empresa integradora nacional. O setor com maior impacto negativo será o de petróleo, mas as novas tecnologias do setor deverão protelar a era do petróleo, apesar do aquecimento global, mantendo amplas possibilidades de desenvolvimento e exploração das reservas do pré-sal no país. O setor petroquímico deverá buscar se adequar ao contexto de química verde.

Na sequência, serão apresentadas as versões resumidas dos estudos desenvolvidos, enfatizando os impactos de restrições ambientais e mudanças tecnológicas em direção a uma economia de baixo carbono sobre a economia brasileira, seja em termos macroeconômicos seja em termos setoriais. Inicialmente apresenta-se a avaliação de diferentes cenários em um modelo de equilíbrio geral. Em seguida, apresentam-se o estudo de patentes verdes e posteriormente o conjunto de estudos setoriais realizados, incluindo um texto específico sobre bioenergia e biorrefinarias. Os relatórios completos encontram-se disponíveis no site do Núcleo de Apoio à Pesquisa em Economia de Baixo Carbono: www.ebc.fearp.usp.br.

Referências Bibliográficas

- ALBUQUERQUE, L. Análise Crítica das Políticas Públicas em Mudanças Climáticas e dos Compromissos Nacionais de Redução de Emissão de Gases de Efeito Estufa no Brasil. (Dissertação de Mestrado). UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro, 108 p., 2012.
- BRUNDTLAND, G.H. et alii. Environment and Development Challenges: The Imperative to Act. UNEP, Feb. 2012.
- CGEE; IPAM; SAE/PR. *REDD no Brasil: um enfoque amazônico: fundamentos, critérios e estruturas institucionais para um regime nacional de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal*. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 152p. 2011.
- CONAMA. Resolução n. 005 – PRONAR. Disponível em http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/resolucao_conama_n_005_pronar.pdf. Acesso em 20 de Outubro de 2012.
- FELIPETTO, A.V.M. *Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: Conceito, planejamento e oportunidades*. Rio de Janeiro: IBAM, 40p., 2007.
- GROSSMAN, G. M.; KRUEGER, A. B. Economic Growth and the Environment. *Quarterly Journal of Economics*, v. 112, pp. 353-78, 1995.
- KOJIMA, M. e BACON, R. Changes in CO₂ Emissions from Energy Use: A Multicountry Decomposition Analysis. Extractive Industries for Development Series no 11, World Bank, October 2009.
- MACKAY, D.J.C. *Sustainable Energy: without the hot air*. UIT CAMBRIDGE, ENGLAND, 2009, pp 6.
- MCKINSEY & COMPANY; *Caminhos para uma Economia de Baixa Emissão de Carbono no Brasil*; 2009

MOZONI, M. *Diretrizes para a formulação de políticas públicas em mudanças climáticas no Brasil*. Observatório do Clima, 2009.

POPP, D. The Role of Technological Change in Green Growth; Policy Research Working Paper 6239; World Bank, 2012

SANTOS, L.B. O papel dos países em desenvolvimento na efetividade do regime internacional de mudanças climáticas: adoção de metas de redução de gases de efeito estufa. *I Seminário Nacional do Programa de Pós-Graduação em Ciências Sociais-UFES*. Vitória, 2011.

Sustainable Energy — without the hot air, David JC MacKay, UIT CAMBRIDGE, ENGLAND, 2009, pp 6

Apêndice A – Perspectivas de Emissões mundiais

Tabela A1 - Emissões mundiais de CO₂ por regiões do mundo – 2005 a 2030, em milhões de metros de toneladas de CO₂

	2005	2009	2010	2011	2012	2013	2015	2020	2025	2030	2035	Taxa cresc. (2008-2035)
OCDE Américas	7079	6456	6693	6665	6704	6748	6773	6924	7169	7431	7772	0.40%
EUA	5996	5426	5644	5601	5622	5659	5680	5777	5938	6108	6311	0.30%
OCDE Europa	4400	4111	4094	4097	4115	4116	4115	4147	4156	4198	4257	-0.10%
OCDE Ásia	2172	2058	2074	2112	2110	2132	2143	2181	2224	2253	2294	0.20%
Japão	1241	1087	1090	1114	1102	1118	1125	1142	1136	1110	1087	-0.40%
Coreia do Sul	494	512	528	539	547	549	553	562	597	634	678	1.00%
Austrália/ Nova Zelândia	437	459	456	458	461	465	466	477	492	509	528	0.50%
Total OCDE	13651	12625	12861	12873	12929	12996	13031	13252	13549	13882	14323	0.20%
Não OCDE Eu- ropa e Eurásia	2782	2724	2759	2787	2806	2802	2803	2767	2782	2863	2964	0.20%
Rússia	1645	1605	1632	1651	1655	1650	1648	1607	1603	1659	1747	0.20%
Não OCDE Ásia	8359	11154	11736	11916	12185	12527	13238	14475	16475	18238	19688	2.50%
China	5513	7797	8262	8381	8598	8853	9386	10128	11492	12626	13441	2.60%
Índia	1182	1549	1602	1633	1653	1697	1802	2056	2398	2728	3036	2.70%
Oriente Médio	1400	1604	1692	1743	1805	1832	1889	2019	2199	2435	2659	1.90%
África	978	1062	1107	1137	1165	1176	1209	1311	1430	1568	1735	1.80%
Américas Cen- tral e do Sul	1011	1111	1150	1184	1223	1231	1287	1386	1497	1654	1852	1.90%
Brasil	365	414	440	468	497	505	528	579	644	739	874	2.70%
Total Não OCDE	14530	17655	18445	18766	19184	19567	20426	21958	24383	26758	28897	2.10%
Total Mundo	28181	30280	31305	31640	32113	32562	33457	35210	37932	40640	43220	1.30%

Fonte: Energy Information Administration (2011), EUA.

**Impactos de Restrições Ambientais e Mudanças
Tecnológicas Rumo a uma Economia de Baixo
Carbono Sobre a Economia Brasileira:
Uma Análise de Equilíbrio Geral**

Angelo Costa Gurgel (Coordenador)

Sergey Paltsev

Franklin França

Caroline de Souza Rodrigues Cabral

Maria Juliana Iorio de Moraes

Introdução

O objetivo deste capítulo é mensurar os impactos da transição para uma economia de baixo carbono sobre o Brasil, através da simulação de políticas restritivas à emissão de gases de efeito estufa e de possíveis trajetórias de desenvolvimento de tecnologias de baixas emissões. Espera-se com isso contribuir para o entendimento e mensuração dos impactos que essas possíveis mudanças possam ter sobre a economia brasileira de uma forma geral e sobre setores econômicos específicos.

Foram simulados cenários de política climática, com diferentes metas de emissão, participação de grupos diferenciados de países, possibilidades de trocas (mecanismos de permissão) entre eles, imposição de tarifas compensatórias a países não participantes de metas, entre outras hipóteses. No caso dos cenários tecnológicos, serão considerados ganhos de eficiência energética e surgimento de tecnologias específicas aos setores, conforme definido nos estudos setoriais. Com base nesses cenários pretende-se avaliar os custos destas políticas para a economia em relação a um cenário de referência sem políticas, (business as usual) e como comportam-se os diferentes setores.

Vale destacar que a discussão sobre a imposição de restrições a atividades poluentes e o estabelecimento de mercados de permissões ou de créditos para emissão de poluentes não é um fenômeno tão recente. Pode-se destacar a experiência norte-americana com os mercados de controle de emissões de diversos gases relacionados à formação de chuva ácida na década de 1970, conhecidos hoje como *Emissions Trading Program* (ROCHA, 2003).

Governos, sociedade civil e organizações não-governamentais de muitos países vêm demonstrando grande preocupação com os impactos negativos das mudanças climáticas. Diversas políticas e medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa vêm sendo formuladas, discutidas e até mesmo implementadas por países, blocos econômicos e estados. Entre essas medidas destacam-se os mercados de créditos de carbono, nos moldes estabelecidos no âmbito da UNFCCC e pelo Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 1998). Tais mercados vêm sendo implementados pela União Europeia (UE) (EUROPEAN COMMUNITY, 2003; EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY, 2006) e têm sido discutidos no Congresso Norte-Americano (US HOUSE OF REPRESENTATIVES 2006a, 2006b; US SENATE 2007a, 2007b, 2007c).

Os impostos à emissão de gases de efeito estufa são outro instrumento em discussão e em prática para a redução de emissões desses gases. Estes foram introduzidos em países como Suécia e Noruega (BRANNLUND; GREN, 1999) e no Canadá nas províncias de Quebec (DOUGHERTY, 2007) e British Columbia (FOWLIE; ANDERSON, 2008). Outras políticas e medidas sendo discutidas e implementadas dizem respeito a investimentos em tecnologias de produção de energia de baixa emissão de gases de efeito estufa, como a queima de carvão com captura e armazenagem de emissões de carbono (HOLLOWAY; BENTHAM; KIRK, 2006; EUROPEAN COMMISSION, 2007; MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY - (MIT), 2007), o aumento de eficiência no uso de energia em veículos (US NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2002), e em construções urbanas e plantas industriais (THE PEW CENTER ON GLOBAL CLIMATE CHANGE, 2005), medidas mandatórias de

uso de biocombustíveis e misturas destes aos combustíveis fósseis (EUROPEAN COMMISSION, 2004; COYLE, 2007), entre outras.

Diante desse quadro de esforços internacionais e regionais para redução de emissões de gases de efeito estufa e mitigação dos impactos negativos das mudanças climáticas, diversos desafios e oportunidades se apresentam às nações e aos organismos internacionais. Esforços de controle e redução de emissões de gases por nações individuais ou blocos geralmente possuem alcance limitado no que diz respeito à contribuição para estabilização global das concentrações de gases em níveis adequados e/ou desejáveis. Contudo, podem representar um importante passo em termos de assumir responsabilidades, desenvolver mecanismos internacionais de controle e de convencer outros países a adotar políticas para reduzir suas emissões. O conhecimento dos impactos econômicos de tais esforços é fundamental para que as nações conheçam os custos e o alcance das medidas de mitigação.

Muitos trabalhos e modelos vêm sendo desenvolvidos para estudar os impactos das mudanças climáticas e para simular políticas econômicas que lidam com o problema de externalidades associadas às emissões de gases de efeito estufa. Os exercícios de modelagem de avaliação integrada (*integrated assessment*), por exemplo, combinam modelos de diferentes áreas do conhecimento para representar sistemas socioeconômicos e naturais, e suas relações. Exemplos de exercícios de modelagens de avaliação integrada para o estudo de mudanças climáticas são os desenvolvidos por Nordhaus (1992), Dowlatabadi e Morgan (1993), Edmonds et al. (1994), Prinn et al. (1999) e Sokolov et al. (2005).

A literatura também é rica na aplicação de modelos econômicos individualizados, geralmente mais direcionados para o estudo das políticas de mitigação de gases de efeito estufa.¹ As análises econômicas de mudanças climáticas, seja por modelos econômicos individualizados ou através de modelagens de avaliação integrada, levam em conta economias de diversos países e costumam apresentar certo grau de detalhe na caracterização das tecnologias energéticas de regiões específicas do globo. Diversas aplicações desses modelos no estudo de políticas e medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa podem ser encontradas na literatura. Exemplos dessas aplicações incluem: mensuração dos impactos do Protocolo de Quioto sobre a economia europeia (VIRGUIER et al., 2003), sobre a economia japonesa (PALTSEV et al., 2004), sobre os países em desenvolvimento (BABIKER; REILLY; JACOBY, 2000) e a respeito do papel da Rússia no mesmo (BERNARD et al., 2003); análises sobre propostas recentes de implementação de restrições quantitativas e impostos às emissões de carbono nos EUA (PALTSEV et al., 2008, 2009; JORGENSON et al., 2008; METCALF et al., 2008), no Japão (KASAHARA et al., 2007) e na UE (REILLY; PALTSEV, 2006); mensuração dos efeitos distributivos de políticas adotadas ao mesmo tempo por vários países do mundo (JACOBY et al., 1997, 2009); análises de efeitos das mudanças climáticas sobre a agricultura (REILLY et al., 2007); mensuração de impactos de políticas climáticas sobre o emprego (BABIKER; ECKAUS, 2007); estudo do papel dos diferentes tipos de gases de efeito estufa e sumidouros de carbono nas discussões de políticas (MANNE; RICHEL, 2004, REILLY et al., 2006); considerações sobre os papéis dos biocombustíveis na redução

¹ Exemplos seriam os desenvolvidos por Nordhaus (1992), Bernstein, Montgomery e Rutherford (1999), Burniaux e Truong (2002), Richels, Manne e Wigley (2007), Popp (2004), Paltsev et al. (2005), BABIKER et al. (2008) e BOSETTI et al. (2006).

das emissões de gases de efeito estufa (GURGEL; REILLY; PALTSEV, 2007; MELILLO et al., 2009; HERTEL et al., 2010); investigações sobre o papel dos avanços tecnológicos e da pesquisa e desenvolvimento na avaliação das políticas de redução de gases de efeito estufa (POPP, 2006; BOSETTI; TAVONI, 2009); análises do uso de receitas de impostos de carbono para redução de outras distorções nas economias (GOULDER, 1995; BABIKER; METCALF; REILLY, 2003); estimação dos custos de uma política climática nos Estados Unidos sob a gestão Obama (PALTSEV et al., 2009), entre outros.

Os estudos comentados anteriormente possuem em comum o uso da modelagem quantitativa para o estudo empírico de impactos de políticas de mitigação das mudanças climáticas. Apesar de não ser exaustiva, a relação de estudos aqui apresentada demonstra a importância dos mesmos em desenvolver estimativas dos impactos de medidas de redução de gases de efeito estufa e o contínuo desenvolvimento do tema.

No Brasil, a literatura sobre estudos econômicos de mudanças climáticas e políticas de mitigação é relativamente nova e vem desenvolvendo-se rapidamente. Como exemplo, pode-se citar os trabalhos de: Tourinho, Seroa da Motta e Alves (2003), que investigaram os volumes de emissão de CO₂ para a economia brasileira e um cenário de redução das emissões industriais de CO₂ através de impostos às emissões; Lopes (2003), que desenvolveu um modelo de equilíbrio geral para avaliar a economia brasileira no caso de adoção de impostos às emissões de GEEs no país; Rocha (2003), que usou um “metamodelo” baseado em informações e resultados de outros modelos, para estimar resultados da aplicação de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo no país; Ferreira Filho e Rocha (2007) que avaliaram os efeitos de impostos às emissões de GEE sobre a economia brasileira, através do modelo de equilíbrio geral MOSAICO-GEE; Feijó e Porto Jr. (2009) que analisaram os efeitos de reduções de emissão de CO₂ sugeridas pelo Protocolo de Quioto sobre a economia brasileira; Silva (2010), que utilizou o modelo EPPA para estimar os impactos da implementação de metas de redução de gases de efeito estufa pelo Brasil; e Lima (2011), que por sua vez, procurou mensurar como políticas climáticas em países desenvolvidos afetariam a economia brasileira, utilizando também o modelo EPPA.

Quanto aos impactos das mudanças climáticas sobre a economia brasileira, o estudo “Economia da Mudança do Clima no Brasil” (MARGULIS; DUBEUX, 2010) buscou mensurar tais impactos através da integração de diferentes modelos, ao estilo dos exercícios de avaliação integrada. O núcleo central do sistema de modelagem foi o modelo de equilíbrio geral EFES. Os resultados do estudo revelaram que os impactos da mudança do clima na economia brasileira levarão a uma perda acumulada no período de 2008 a 2050 entre 0,7 a 1,5 vezes o equivalente ao PIB de 2008, com mudanças na distribuição regional da agricultura e possíveis aumentos nas disparidades regionais.

Os trabalhos comentados mostram que a literatura nacional vem desenvolvendo-se rapidamente no uso de modelos quantitativos para a avaliação das questões climáticas relacionadas ao Brasil. O presente trabalho pretende contribuir com essa literatura no desenvolvimento da modelagem dinâmica para avaliação quantitativa de políticas climáticas e trajetórias tecnológicas de interesse para a economia brasileira.

Percebe-se, portanto, a importância de se estimar e mensurar os impactos de políticas e trajetórias tecnológicas capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa no Brasil e no mundo. O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a próxima seção apresenta brevemente o modelo utilizado e os avanços implementados no mesmo para realizar a pesquisa. Os resultados são apresentados e discutidos na terceira seção. A quarta seção sintetiza as possíveis contribuições do país para uma economia de baixo carbono, enquanto a última seção apresenta as conclusões do trabalho.

1. Metodologia

O modelo econômico utilizado no presente estudo é conhecido como *Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model* (PALTSEV et al., 2005). É um modelo dinâmico recursivo de equilíbrio geral computável desenvolvido para projetar cenários de emissões de gases de efeito estufa e impactos de políticas climáticas. O modelo EPPA tem sido empregado em diversos estudos relacionados às mudanças climáticas e apresenta-se documentado em detalhes em Paltsev et al. (2005). Utiliza-se a versão mais atual do modelo (versão 5), detalhando-se no decorrer do texto os avanços realizados para cumprir os objetivos do estudo.

A modelagem computável de equilíbrio geral (CGE) utiliza a teoria econômica de equilíbrio geral como uma ferramenta operacional em análises de orientação empírica sobre questões relacionadas a economias de mercado, como alocação de recursos, fluxos comerciais, mudança tecnológica, distribuição de renda, entre outras. Shoven e Whalley (1998) e Sadoulet e De Janvry (1995) apresentam maiores discussões sobre as características e aplicações dessa classe de modelos.

A aplicação de modelos de equilíbrio geral é adequada no caso de políticas de controle de emissões de gases de efeito estufa, uma vez que estas apresentam um alcance amplo em termos de dimensões geográficas (diversas regiões e países do globo) e econômicas (diversos setores e agentes da economia), com efeitos consideráveis esperados na alocação de recursos nas economias regionais, nacionais e global.

No presente estudo opta-se pelo enfoque de custo-efetividade, em que objetivos de políticas de redução de gases são escolhidos e os custos de se atingir tais objetivos são determinados pelos modelos, sem considerar, contudo, os possíveis benefícios ambientais traduzidos em valores econômicos. Essa escolha reconhece as dificuldades, incertezas e falta de consenso na mensuração monetária dos benefícios ambientais, sendo o enfoque estimulado pela UNFCCC, como discutido por Manne e Richels (1995).

As estimativas de custos das políticas de mitigação de mudanças climáticas devem ser consideradas com cautela e senso crítico quanto à capacidade de serem extrapolados para os eventos reais da economia. A utilização dos resultados do modelo para recomendações de políticas deve basear-se nas direções dos resultados observados e magnitudes relativas, bem como no entendimento dos mecanismos e pressuposições do modelo que geram os resultados observados.

1.1 O Modelo EPPA

O modelo EPPA é desenvolvido pelo *MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change*. Tal modelo vem sendo amplamente utilizado para o estudo de aspectos ligados à agricultura, energia e políticas climáticas², sendo dinâmico recursivo, multi-regional e multi-setorial. Os dados econômicos que alimentam o modelo são formados principalmente por matrizes de contabilidade social e de insumo-produto que representam as estruturas das economias das regiões, provenientes do *Global Trade Analysis Project* - GTAP (HERTEL, 1997; DIMARANAN; MCDOUGALL, 2002; NARAYANAN; WALMSLEY, 2008), um banco de dados consistente sobre consumo macroeconômico regional, produção e fluxos de comércio bilateral. Dados sobre produção e uso de energia em unidades físicas são provenientes tanto da base de dados do GTAP quanto da Agência Internacional de Energia (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA, 1997, 2004, 2005). Já as estatísticas sobre os gases de efeito estufa (dióxido de carbono, CO₂; metano, CH₄; óxido nitroso, N₂O; hidrofluorcarbonos; HFCs; perfluorcarbonos, PFCs; e hexafluoreto de enxofre; SF₆) foram obtidos de inventários mantidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Informações sobre outros poluentes urbanos (dióxido sulfúrico – SO₂; óxidos de nitrogênio – NO_x, carbono negro – BC, carbono orgânico – OC; amônia – NH₃; monóxido de carbono – CO, e compostos orgânicos voláteis não-metano – VOC) foram obtidas junto ao banco de dados desenvolvido por Olivier e Berdowski (2001).

Informações adicionais são utilizadas para desagregar o transporte comercial do transporte de passageiros em automóvel próprio, o setor de geração de eletricidade para representar tecnologias correntes (como hidroelétrica, nuclear e fóssil) e fontes alternativas (como eólica, solar e biomassa) não usadas extensivamente, mas com potencial de oferta em larga escala no futuro, e de políticas nos mercados de energia. Para representar tais tecnologias, informações do tipo “bottom-up” sob parâmetros de engenharia são consideradas (PALTSEV et al., 2005).

O modelo simula a evolução da economia mundial em intervalos de cinco anos entre 2005 e 2100. Funções de produção para cada setor da economia descrevem as combinações de capital, trabalho, terra, energia e insumos intermediários para gerar os bens e serviços. O consumo é representado pela presença de um consumidor representativo em cada região que busca a maximização do seu bem-estar pelo consumo de bens e serviços. Na representação dos setores produtivos, a tecnologia utilizada é representada pela possibilidade de substituir diferentes fatores produtivos e insumos intermediários no processo produtivo. Para o consumidor representativo, a substituição entre bens e serviços ilustra as preferências dos consumidores. Tais escolhas são determinadas pelos parâmetros de elasticidades de substituição nas funções de produção e de utilidade do consumidor.

2 Algumas aplicações do modelo incluem Babiker, Metcalf e Reilly (2003), Reilly e Paltsev (2006), US CCSP (2007), Gurgel, Reilly e Paltsev (2007), Jacoby et al. (2009) e Paltsev et al. (2008, 2009). Diversos outros estudos que usam o modelo EPPA foram citados na seção 2.

A evolução do modelo no tempo é baseada em cenários de crescimento econômico resultantes do comportamento de consumo, poupança e investimentos, além de pressuposições exógenas sobre o aumento da produtividade do trabalho, da energia e da terra. O crescimento na demanda por bens e serviços produzidos por cada setor, incluindo alimentos e combustíveis, ocorre à medida que a renda e o produto aumentam. Os estoques de recursos limitados, como combustíveis fósseis, diminuem à medida que estes são utilizados, forçando o aumento no custo de extração e beneficiamento dos mesmos. Setores que usam recursos renováveis, como a terra, competem pela disponibilidade de fluxos de serviços fornecidos pelos mesmos. Todos esses fenômenos, aliados às políticas simuladas, como impostos e subsídios ao uso de energia, controle nas emissões de poluentes e imposição de mandatos de percentuais mínimos de misturas de combustíveis, determinam a evolução das economias e alteram a competitividade e participação das diferentes tecnologias ao longo do tempo e entre cenários alternativos. O desenvolvimento ou declínio de uma tecnologia em particular é determinado de forma endógena, de acordo com a competitividade relativa da mesma.

O modelo fornece estimativas e previsões sobre o crescimento do Produto Interno Bruto nos países e regiões, consumo agregado e produção setorial, consumo e produção de energia em unidades físicas, preços de bens e serviços, fluxos comerciais, emissões de gases de efeito estufa e de outros poluentes, e custos econômicos das políticas simuladas.

O modelo EPPA é construído como um problema de complementaridade não-linear em linguagem de programação GAMS (*General Algebraic Modeling System*, BROOKE et al., 1998), utilizando a syntax do algoritmo MPSGE (*Modeling Programming System for General Equilibrium*), desenvolvida por Rutherford (1999a). O MPSGE constrói equações algébricas que caracterizam as condições de lucro econômico zero para a produção, equilíbrio entre oferta e demanda nos mercados de bens e fatores de produção e equilíbrio entre renda e despesas para os consumidores.

1.1.1 Agregação do modelo EPPA

A base de dados do GTAP7 apresenta matrizes de insumo-produto para 113 países e regiões do mundo e 57 setores de suas economias, representando produção, consumo, fluxos bilaterais de comércio, medidas de proteção comercial e os mercados de energia em unidades físicas. A versão do modelo a ser utilizada no presente estudo é a quinta versão do EPPA, calibrada para o ano base de 2004, sendo resolvido de forma endógena para o ano de 2005 e após, a cada cinco anos. No EPPA os dados do GTAP foram organizados em dezesseis países e regiões, bem como em diversos setores de produção, como apresentado na Tabela 1. Foram também representados na construção do modelo novos setores que ofertam tecnologias energéticas, considerados potencialmente relevantes no futuro, mas que ainda possuem custos muito elevados no presente (tecnologias *backstop*). O EPPA também considera a desagregação do consumo das famílias em compras de serviços de transporte, uso de transporte próprio (automóveis particulares) e consumo de outros bens e serviços.

Tabela 1 - Agregação de regiões, setores e fatores no modelo EPPA

Regiões	Setores	Fatores
Estados Unidos (USA)	Não Energia	Capital
Canadá (CAN)	Agricultura - Culturas (CROP)	Trabalho
México (MEX)	Agricultura - Pecuária (LIVE)	Petróleo cru
Japão (JPN)	Agricultura - Florestal (FORS)	Petróleo xisto
União Europeia (EUR)	Alimentos (FOOD)	Carvão
Austrália & N. Zelândia (ANZ)	Serviços (SERV)	Gás natural
Federação Russa (RUS)	Químicos, borracha, plásticos, papel (CRP)	Hidráulica
Leste Europeu (ROE)	Siderurgia e metalurgia (STEEL)	Nuclear
China (CHN)	Metais não ferrosos (ALUM)	Eólica & Solar
Índia (IND)	Minerais não metálicos (CIME)	Terra:
Brasil (BRA)	Outras Indústrias (OTHR)	- de culturas
Leste Asiático (ASI)	Serviços de transporte (TRAN)	- pastagens
Oriente Médio (MES)	Transporte próprio das famílias (FTRAN)	- florestal
África (AFR)	Energia	Florestas naturais
América Latina (LAM)	Carvão (COAL)	Pastagens natural
Resto da Ásia (REA)	Petróleo bruto (OIL)	
	Petróleo refinado (ROIL)	
	Gás natural (GAS)	
	Eletricidade: Fóssil (ELEC)	
	Eletricidade: Hidráulica (H-ELE)	
	Eletricidade: Nuclear (A-NUC)	
	Eletricidade: Eólica (W-ELE)	
	Eletricidade: Solar (S-ELE)	
	Eletricidade: Biomassa (biELE)	
	Eletricidade: NGCC ¹ (NGCC)	
	Eletricidade: NGCC – CCS ²	
	Eletricidade: IGCC ³ – CCS	
	Gás sintético (SGAS)	
	Biocombustível (2ª geração) (BOIL)	
	Petróleo de xisto (SOIL)	
	Biocombustível (1ª geração)	

Fonte: Paltsev et al. (2005).

1 NGCC: conversão de gás natural em eletricidade a partir de ciclo combinado de geração

2 CCS: captura e sequestro de carbono

3 IGCC: tecnologia de geração de gás natural a partir do carvão pelo ciclo combinado de geração

Algumas modificações e adaptações foram introduzidas na versão do modelo utilizada na presente pesquisa, de forma a atingir os objetivos propostos. A principal modificação diz respeito à desagregação dos setores intensivos em energia, originalmente agrupados em apenas um setor. Esses setores foram desagregados nos seguintes: químicos, borracha, plásticos e papel (CRP), siderurgia

e metalurgia (STEEL), manufatura de metais não ferrosos como alumínio, zinco e cobre (ALUM) e manufatura de minerais não metálicos como o cimento e o vidro (CIME).

1.1.2 Estrutura do modelo

O modelo EPPA encontra-se formulado como um Problema de Complementaridade Mista (*Mixed Complementarity Problem – MCP*), conforme descrito por Mathiesen (1985) e Rutherford (1995). O problema econômico de equilíbrio geral em MCP envolve três desigualdades que precisam ser satisfeitas: lucro zero, equilíbrio dos mercados (*market clearing*) e equilíbrio ou balanceamento da renda. Essas condições de desigualdades estão associadas a um conjunto de três variáveis não-negativas, quais sejam preços, quantidades e níveis de renda.

As funções de produção e consumo utilizadas pelo modelo EPPA são caracterizadas como funções de elasticidade de substituição constante (*constant elasticity of substitution – CES*), e como tal, todos os insumos são necessários. Isso significa que, para a maioria dos mercados, as condições de MCP são satisfeitas com preços, produto, renda e consumo dos bens estritamente maiores que zero e oferta igual à demanda.

O comportamento das firmas segue a formulação microeconômica de maximização do lucro. Em cada região e em cada setor, uma firma representativa escolhe o nível de produto, a quantidade de fatores primários e insumos intermediários de outros setores, para maximizar os lucros sujeito à sua restrição tecnológica.

Quanto ao comportamento dos domicílios, um agente representativo em cada região possui dotações de fatores de produção, cujos serviços podem ser vendidos às firmas. Em cada período, o agente representativo escolhe os níveis de consumo e poupança que maximizam sua função de utilidade sujeita à restrição orçamentária para o nível de renda. Assim como a produção, as preferências também são representadas por funções CES. As tecnologias e preferências CES são estruturas aninhadas que permitem apresentar possibilidades de substituição de insumos e flexibilidade na escolha das elasticidades de substituição, em particular, no que diz respeito aos combustíveis e eletricidade, e aquelas elasticidades cujas emissões e custos de abatimento são especialmente sensíveis.³

As importações de um determinado bem com origem em diferentes regiões são consideradas substitutas imperfeitas, e posteriormente, o agregado de importados é combinado com a produção doméstica do mesmo bem, de forma a criar uma cesta de bens ofertados dentro da região.

Petróleo bruto é tratado como um produto homogêneo no comércio internacional, estando sujeito a tarifas, impostos às exportações e margens de transporte. Por ser um bem homogêneo, todos os países e regiões se deparam com um único preço no mercado mundial. Carvão, gás e petróleo refinado são considerados bens Armington, devido à diferenciação de produtos e qualidade.

³ As elasticidades utilizadas no modelo EPPA podem ser encontradas em Palsev et al. (2005) e foram baseadas em extensa revisão de literatura e consulta a especialistas, como descrito em Cossa (2004). Análises de sensibilidade dos parâmetros do EPPA foram conduzidas por Webster et al. (2002) e Cossa (2004). *continua*

Na representação das preferências, a poupança entra diretamente na função utilidade, o que gera uma demanda por poupança e faz com que a decisão consumo - investimento se torne endógena. A medida de bem-estar é mensurada em termos de variação equivalente Hicksiana⁴ em cada período do modelo.

A elasticidade entre insumos não energéticos para o consumo varia ao longo do tempo e de acordo com a região, sendo uma função do crescimento da renda per capita. Da mesma forma a participação do consumo em cada período também é atualizada em função do crescimento da renda per capita entre períodos, conforme Lahiri, Babiker e Eckaus (2000).

Uma sofisticação importante do modelo EPPA diz respeito à representação de mudanças no uso da terra. O uso da terra está dividido em cinco categorias: pastagens, culturas, produção florestal (áreas de silvicultura, extração vegetal e florestas plantadas), florestas naturais e pastagens naturais. Cada categoria de terra é considerada um recurso renovável, que pode ser alterado pela sua conversão em outra categoria, ou abandonada em categoria não utilizada (vegetação secundária). A terra também está sujeita a melhorias exógenas de produtividade, de 1% ao ano para cada categoria, refletindo a tendência histórica de avanço na produtividade agropecuária, bem como o rendimento histórico das safras, o qual tem apresentado um crescimento entre 1% e 3% ao ano, de acordo com Reilly e Fuglie (1998).

Com relação à transformação do uso da terra, a área sob determinada categoria de uso pode ser ampliada pela conversão de outras categorias de uso. Por exemplo, estradas e acessos para áreas de florestas podem ser criados, permitindo que uma área desmatada seja transformada em área de florestas plantadas, pastagens ou culturas. O sentido oposto também pode ser observado, ou seja, áreas destinadas às culturas podem ser abandonadas voltando a crescer florestas ou campos secundários.

O valor de uso da terra no modelo representa as transações monetárias reais como inferido pelas agências de estatísticas econômicas de cada país, portanto, esse valor deve ser consistente com os dados sobre receita, custos de insumos e retornos de outros fatores. A renda da terra bem como a área no uso de culturas, pastagens e silvicultura é obtida a partir da base de dados do GTAP (HERTEL, 1997; DIMARANAN; MCDUGALL, 2002; NARAYANAN; WALMSLEY, 2008). Para obter o valor da renda por hectare, os dados acerca das rendas agregadas precisam ser divididos pela quantidade física de terra. Para as categorias florestas naturais e pastagens naturais, que não são utilizadas para produção econômica, infere-se um valor econômico a partir dos dados físicos de Hurtt *et al.* (2006) e do procedimento discutido em Gurgel *et al.* (2007).

1.1.3 Implementação de Políticas Climáticas no modelo

A incorporação de restrições quantitativas às emissões de gases de efeito estufa no modelo é feita através da consideração de relação complementar entre o uso do combustível fóssil gerador de

4 A variação equivalente Hicksiana mede a mudança na renda do consumidor necessária para que este atinja, após uma mudança em preços relativos, o nível de utilidade inicial.

emissões e a quantidade física de permissões ou créditos de emissões associada ao uso do mesmo.

O modelo EPPA permite a incorporação de vários tipos de políticas de controle de emissões de GEEs: impostos e subsídios à produção e ao consumo de combustíveis e a outros tipos de produtos; alíquotas de impostos fixadas com base no conteúdo de carbono dos combustíveis; definição de restrições por região, por setor produtivo ou por tipo de gás de efeito estufa; comércio internacional de créditos (ou permissões) de emissões; limites quantitativos ou impostos diferenciados por tipos de gases de efeito estufa. Controles de preço resultantes da solução do modelo com restrições sobre esses gases são então reportados por toneladas de gás relevante e considerando o preço em carbono equivalente. Quando o comércio de gases é permitido, uma taxa de troca entre os gases deve ser especificada⁵.

1.1.4 Disponibilidade de Tecnologias Alternativas

Um importante elemento que define a evolução dos modelos dinâmicos é a representação de tecnologias que não estão em uso atualmente (ou são usadas em pequena escala), mas que podem tornar-se disponíveis em futuro próximo. Essas opções energéticas, como a solar e a eólica, devem começar a ser utilizadas em maior escala quando a oferta de recursos energéticos convencionais baseados em combustíveis fósseis tornar-se mais escassa e/ou mais cara, ou quando políticas públicas que visem reduzir as emissões de poluição penalizarem as tecnologias energéticas convencionais. O momento no tempo em que essas tecnologias tornar-se-ão disponíveis, também chamado de período de entrada, depende dos custos relativos dessas em relação aos custos das fontes convencionais de energia. A Tabela 2 apresenta as opções de tecnologias avançadas representadas no modelo EPPA.

Três tecnologias produzem substitutos para os combustíveis fósseis convencionais, gás de carvão, produto de petróleo cru do xisto e combustível refinado da biomassa. Outras cinco opções tecnológicas incluem a geração de energia elétrica eólica e solar, a partir da biomassa, e de ciclo combinado de gás natural com e sem captura e sequestro de carbono. Ainda, veículos híbridos (movidos tanto a energia elétrica quanto a combustíveis líquidos) e veículos elétricos são tecnologias disponíveis para uso em larga escala no futuro.

Tabela 2 - Tecnologias alternativas disponíveis no modelo EPPA

Tecnologia	Descrição
Gaseificação de carvão	Converte carvão em um substituto perfeito para o gás natural.
Petróleo de xisto	Extraí e melhora o betume do xisto transformando-o em um substituto perfeito para o petróleo.
Bicombustível de biomassa	Converte a biomassa em um substituto perfeito para petróleo refinado (segunda geração de biocombustíveis).

⁵ O valor de troca, ou equivalente, entre os diferentes gases é definido com base no potencial de aquecimento global – GWP (Global Warming Potential) para o período de 100 anos.

Eletricidade de biomassa	Converte biomassa em um substituto perfeito para eletricidade.
Eólica e solar	Converte a energia eólica e solar intermitente em um substituto imperfeito para eletricidade.
Gás avançado	Tecnologia de geração de eletricidade baseada no ciclo combinado do gás natural (CCGN) que converte gás natural em eletricidade.
Gás avançado com sequestro e captura de carbono	Tecnologia de ciclo combinado do gás natural que captura 90% ou mais do CO ₂ produzido na geração de energia.
Carvão avançado com sequestro e captura de carbono	Ciclo combinado integrado de gaseificação do carvão (CCIG) que captura 90% ou mais do CO ₂ produzido na geração de energia.
Veículos Híbridos e Elétricos	Tecnologia de transporte urbano de passageiros movidos por sistemas de propulsão elétricos ou híbridos (eletricidade e combustíveis líquidos)

Fonte: Paltsev et al. (2005).

1.2 Adaptações do Modelo às Especificidades Brasileiras

O modelo EPPA considera biocombustíveis de segunda geração como uma tecnologia *backstop*, com potencial de desenvolvimento futuro, enquanto os biocombustíveis atualmente produzidos e em uso não são considerados explicitamente na versão 5 do modelo. Diante do grande desenvolvimento na produção e uso dos biocombustíveis de primeira geração em diversos países na última década, essas tecnologias e suas especificidades foram acrescentadas no modelo EPPA, de acordo com o nível corrente de produção existente nos diferentes países. Foram utilizados dados das matrizes de insumo-produto do GTAP, de área cultivada da FAO, e dados regionais específicos para definir os custos de produção dos diferentes tipos de biocombustíveis. Foram incluídos os seguintes tipos de biomassa: culturas açucareiras (cana de açúcar e beterraba), grãos (milho), trigo e oleaginosas (canola, soja, palma).

O modelo EPPA utiliza dados do GTAP e da IEA sobre quantidades produzidas e consumidas de energia, bem como dados do EPA dos EUA e de Olivier e Berdowski (2001) sobre emissões de gases de efeito estufa. Os dados de uso da terra são provenientes da base de dados do GTAP e dos estudos desenvolvidos por Hurtt *et al.* (2006). Esses dados são passíveis de comparação com aqueles produzidos por instituições brasileiras, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Ministério das Minas e Energia e o Ministério da Ciência e Tecnologia. Dessa forma, foram coletados dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2006), do Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2009), e do Balanço Energético Nacional (Empresa de Pesquisa Energética, 2010) para ajustar os dados iniciais do modelo EPPA de forma a melhor refletir as estatísticas produzidas por instituições oficiais brasileiras. Tais ajustes permitem uma representação mais realista da base de dados inicial do modelo para o caso brasileiro.

O modelo EPPA agrega todos os setores mais intensivos no uso de energia sob um único setor, denominado de EINT. De forma a ampliar o escopo da análise para considerar diferen-

tes setores intensivos em energia, procurou-se desagregar o setor EINT do modelo em quatro novos setores, quais sejam: a) químicos, borracha, plásticos, celulose e papel (CRP); b) siderurgia e metalurgia (STEEL); c) metais não ferrosos (ALUM); e d) minerais não metálicos (CIME). Tal desagregação foi realizada a partir da base de dados do GTAP7 (NARAYANAN; WALMSLEY, 2008). Foram considerados dados de valor da produção, consumo intermediário, consumo final, consumo do governo, formação bruta de capital fixo, alíquotas de impostos, pagamentos aos fatores de produção, consumo de energia, exportações e importações, dos setores intensivos em energia desagregados nos três setores acima descritos.

2. Resultados

2.1 Cenários de Políticas Climáticas

Para definir os cenários simulados no modelo, fez-se um levantamento das principais políticas climáticas em discussão e/ou implementação pelos principais países emissores e nos fóruns de discussões internacionais sobre o tema. Com base nas metas e comprometimentos assumidos por diferentes países no âmbito das COPs bem como outras políticas e metas consideradas pelos mesmos (CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS, 2011) foram definidos os cenários de políticas climáticas. Vale ressaltar que na COP-17 em Durban em 2011 os países membros sinalizaram que uma reformulação da economia global em direção a uma economia de baixo carbono só deverá ser atingida em discussões posteriores, para início de aplicação provável a partir de 2020. Até lá, os compromissos assumidos no Protocolo de Kyoto devem ser prorrogados, sendo que alguns países declararam abertamente retirar sua participação naquele protocolo, como o Canadá. No caso do Brasil, as metas foram baseados na Política Nacional sobre Mudança do Clima, aprovada na Lei nº 12.187 de dezembro de 2009, e no Plano Nacional sobre Mudança do Clima.

Foram simulados os seguintes cenários:

1. Cenário de referência (*business as usual* - **BAU**): desconsidera a aplicação de políticas climáticas em qualquer país do mundo, excetuando o estágio atual da EU-ETS. Contudo, as metas de produção e consumo de biocombustíveis nos EUA e na UE são mantidas, por já fazerem parte da política atual ou anunciada como certa.
2. Cenário de políticas climáticas mundiais (**Policy**): considera a implementação de políticas climáticas em diversos países do mundo, via mercados domésticos de permissões de carbono, de forma a atingir:

UE: Redução de 14% das emissões em 2020 em relação às emissões observadas em 2010, com metade desta redução (7%) até 2015. Como ainda não se determinaram metas para os anos seguintes, considerar-se-á a tendência de redução de 14% a cada década até o ano de 2050, atingindo redução de 56% neste ano, em relação às emissões de 2010.

EUA: Mesma política da UE, porém com início uma década após, ou seja, redução de 14% das emissões em 2030 em relação às emissões de 2010, com metade desta redução (7%) até 2025 mantendo a redução de 14% a cada década até o ano de 2050, atingindo redução de 42% neste ano, em relação às emissões de 2010. Ainda, consideram-se reduções modestas de 2% e 4% nos anos de 2015 e 2020, respectivamente, em relação às emissões de 2010.

Japão: redução linear das emissões em 30% de 2015 a 2050 em relação aos níveis de emissões observadas em 2005.

Canadá: redução linear das emissões em 21% de 2015 a 2050 em relação aos níveis de emissões observadas em 2005.

Austrália: redução linear das emissões em 21% de 2015 a 2050 em relação aos níveis de emissões observadas em 2005.

China: aumento da eficiência energética via redução da intensidade de carbono (Emissões/PIB) em 50% até 2050. Como tal redução já ocorre espontaneamente no cenário de referência do modelo EPPA⁶, nenhuma política de mercado de carbono é aplicada efetivamente neste cenário.

Índia: aumento da eficiência energética via redução da intensidade de carbono (Emissões/PIB) em 25% até 2050. Como tal redução já ocorre espontaneamente no cenário de referência do modelo EPPA, nenhuma política de mercado de carbono é aplicada efetivamente neste cenário.

México: redução linear em 30% em emissões até 2050 em relação às emissões projetadas pelo modelo no cenário de referência.

África do Sul: Meta de redução desconsiderada, uma vez que o continente africano está todo agregado como uma única região no modelo EPPA.

Coreia do Sul e Indonésia: redução linear em 26% nas emissões até 2050 em relação às emissões projetadas pelo modelo no cenário de referência (como os países do Leste Asiático de maior dinamismo econômico estão todos agregados em uma única região, considera-se a meta da Indonésia para esta região como um todo, região ASI no EPPA).

Rússia: redução de 25% nas emissões até 2050, em relação às emissões observadas em 1990.

Brasil: redução das emissões de GEEs de 38,9% até 2020 em relação ao nível de referência estabelecido pelo governo brasileiro, o que significa reduzir as emissões de cerca de 2.704 milhões de toneladas (ton.) de CO₂ Equivalente (CO₂-Eq.) para 1.652 milhão de ton CO₂-Eq. Tal meta deve ser atingida com cortes diferenciados em emissões por setor, sendo 24,7% de redução em emissões provenientes do desmatamento e de mudanças no uso da terra (*Land Use Changes – LUC*), 6,1% de redução em emissões dos setores agropecuários, 7,7% de emissões do uso de energia, e 0,4% de emissões dos setores de cimento e siderurgia.

⁶ O Modelo EPPA considera o aumento da eficiência no uso de energia à medida que a renda per capita de um país aumenta, de acordo com o observado para os países desenvolvidos ao longo dos últimos 100 anos. Dado o crescimento do PIB per capita da China no modelo, o ganho de eficiência a partir deste crescimento é suficiente para atingir a redução na intensidade de carbono delineada pela China. O mesmo é válido para a meta de redução na intensidade de carbono da Índia.

Como o cenário de referência gerado pelo modelo EPPA não necessariamente reflete o delineado pelo governo brasileiro, implementou-se cortes de emissões no Brasil de forma a alcançar o nível máximo em emissões de 1.652 milhão de ton CO₂-Eq, como desejado na Política Nacional de Mudança Climática, considerando os cortes diferenciados por setores. Assumiu-se que a política teve início em 2015, sendo implementados cortes correspondentes à metade dos aplicados em 2020. Deste ano em diante, considerou-se que os cortes nas emissões da agricultura e do uso de energia foram aprofundados em um ponto percentual a cada ano, até o ano de 2050. Já as emissões provenientes do desmatamento e de mudanças no uso da terra foram reduzidas gradualmente até cessarem completamente no ano de 2040. Devido às metas diferenciadas de cortes entre os setores, estabeleceu-se mercados de carbono setoriais sem a possibilidade de negociação de créditos de carbono entre diferentes setores. Assim, o modelo determina endogenamente um preço para as permissões de carbono (ou créditos negociáveis de emissões) para cada setor representado, de acordo com a oferta (determinada pela meta de corte em emissões) e demanda de permissões, sem a possibilidade de interagir com outros setores (compra ou venda de permissões). Acredita-se que essa estratégia de implementação da política reflita melhor os custos associados à aplicação das diferentes medidas de mitigação previstas no Plano Nacional de Mudanças Climáticas, baseadas em adoção de tecnologia, expansão de fontes renováveis, controle de desmatamento, entre outras, que são específicas aos diferentes setores e, portanto, não cambiáveis entre eles.⁷

A Tabela 3 apresenta os cortes em emissões implementados nas diferentes regiões do modelo (exceto Brasil) no cenário *Policy*, enquanto a Tabela 4 apresenta um esboço dos cortes implementados para o Brasil. A Tabela 3 evidencia que cada país ou região possui uma meta diferenciada em reduções, que por sua vez é relativa a um ano específico ou às emissões ano a ano do cenário de referência. Já os cortes em emissões no Brasil, apresentados na Tabela 4, são relativos às emissões do cenário de referência, sendo determinados de forma a atingir as metas em volume de emissões previstas pelo Plano Nacional de Mudanças Climáticas.

7 É importante ressaltar, contudo, que a estratégia de implementação da política climática brasileira na forma de mercados setoriais de carbono nesses cenários não representa exatamente as políticas explicitamente direcionadas ao incentivo de adoção de tecnologias de menores emissões, como é o caso do Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC), que prevê a adoção voluntária de tecnologias como plantio direto, integração lavoura-pecuária e recuperação de pastagens degradadas, a partir de financiamento com taxas de juros mais baixas que as de mercado. Enquanto o mercado setorial de carbono, ao impor o custo de pagamento pelos créditos de carbono pelas emissões que excederem o limite determinado, pode levar tanto à adoção de tecnologias de menores emissões quanto à redução da produção se a tecnologia poupadora de carbono for relativamente cara, o incentivo à adoção de tecnologias a partir de financiamento mais barato pode gerar a redução em emissões pela adoção tecnológica ou a não adoção e, conseqüentemente, o fracasso em atingir as metas de redução. Dessa forma, ao simular o mercado de carbono setorial nesse cenário parte-se da hipótese de que a meta de redução em emissões deve ser obrigatoriamente atingida, seja via adoção de tecnologias de baixo carbono, seja via redução na produção.

Tabela 3 – Cortes percentuais em emissões de gases de efeito estufa nas diferentes regiões do modelo EPPA

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
USA*	2	4	7	14	21	28	35	42
CAN ⁺	3	5	8	11	13	16	18	21
MEX**	4	8	11	15	19	23	26	30
JPN ⁺	4	8	11	15	19	23	26	30
ANZ ⁺	3	5	8	11	13	16	18	21
EUR*	7	14	21	28	35	42	49	56
RUS ⁺⁺	3	6	9	13	16	19	22	25
ASI**	3	7	10	13	16	20	23	26

Fonte: Resultados do estudo.

* Cortes em relação ao ano de 2010

+ Cortes em relação ao ano de 2005

** Cortes em relação ao respectivo ano do cenário de referência

++ Cortes em relação ao ano de 1990

Tabela 4 – Cortes percentuais em emissões de gases de efeito estufa no Brasil em relação ao cenário de referência

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
LUC	20	56	65	70	85	100	100	100
Agropecuária	2	5	10	15	20	25	30	35
Uso de Energia	3	6	11	16	21	26	31	36

Fonte: Resultados do estudo.

3. Cenário de políticas climáticas mundiais com impostos compensatórios de carbono (**Policy_BCA**): aplicação das políticas climáticas delineadas no cenário “Policy”, com a cobrança pelos países desenvolvidos (EUA, UE, Canadá, Japão, Austrália e Rússia) de impostos de importação compensatórios com base no conteúdo de carbono (*Board Carbon Adjustment Taxes - BCA*) para produtos importados de países sem metas de redução em emissões.
4. Cenário de políticas climáticas mundiais sem a participação do Brasil e com impostos compensatórios de carbono (**Policy_BCA_noBRA**): aplicação das políticas climáticas delineadas no cenário “Policy” com exceção das políticas discutidas para o Brasil, com a cobrança pelos países desenvolvidos (EUA, UE, Canadá, Japão, Austrália e Rússia) de impostos de importação compensatórios com base no conteúdo de carbono para produtos importados de países sem metas de redução em emissões.
5. Cenário de pacto mundial para redução em emissões (**Policy_Global**): aplicação de um mercado mundial amplo de créditos de carbono, com participação de todos os países e preço único de carbono no mundo, com créditos de carbono distribuídos por países de acordo com os limites

em emissões delineados nas Tabelas 3 e 4, com os demais países e regiões não incluídos na Tabela 3 (ROE, CHN, IND, REA, AFR, MES, LAM) seguindo o mesmo corte em emissões aplicados pela região ASI, em relação às emissões observadas nessas regiões no cenário de referência.

Todos os cenários de políticas, com exceção da aplicação da política climática setorial no Brasil e do cenário “Policy_Global”, foram simulados no modelo EPPA como mercados domésticos de créditos de carbono amplos na região implementadora, com os limites em emissões sobre todos os gases de efeito estufa. Foi considerada a possibilidade de comercialização de créditos entre diferentes setores e tipos de gases, de forma a obter um preço único em termos de dólares por unidade de CO₂ equivalente em toda a região. Os limites em emissões aplicam-se às emissões provenientes do uso de energia e de atividade dos setores (emissões fugitivas), incluindo as provenientes das atividades agropecuárias e produção de cimento. As emissões provenientes de mudanças no uso da terra e desmatamento também foram limitadas no Brasil, porém com mercado e preço diferenciado dos demais setores. No cenário “Policy_Global” assume-se um mercado mundial de carbono, com a possibilidade de compras e vendas de créditos de carbono entre países e preço único no mercado mundial.

2.2 Resultados

2.2.1 Emissões de gases de efeito estufa

A Figura 1 a seguir apresenta as trajetórias individuais de emissões de gases de efeito estufa para as regiões do modelo EPPA, com exceção do Brasil. Os países desenvolvidos estão sujeitos a um esforço maior de redução em emissões no cenário Policy, já que seus cortes em emissões são determinados com base em algum ano fixo de referência. Já os países em desenvolvimento que se comprometeram com políticas climáticas nesse cenário, como o México (MEX) e os países asiáticos de crescimento acelerado (ASI), reduzem emissões em relação ao cenário de referência. Os diferentes comprometimentos entre os grupos refletem a noção de responsabilidades comuns, porém diferenciadas, de acordo com a contribuição histórica para o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera.

Os países em desenvolvimento que não aplicam ações explícitas de redução em emissões apresentam nítida trajetória de crescimento das emissões tanto no cenário de referência (BAU) quanto no cenário Policy. Porém, a trajetória de emissões no tempo é afetada negativamente no cenário Policy para apenas algumas regiões, como a África (AFR), o resto da América Latina (LAM) e o restante do Leste da Ásia (REA), o que indica que essas regiões possuem uma elevada dependência, seja por conta de importações, exportações ou fluxos de capitais, daquelas regiões que aplicam políticas climáticas no cenário Policy.

A aplicação de tarifas compensatórias de carbono (*Carbon Board Adjustment Taxes*) pelos países desenvolvidos no cenário Policy_BCA tem efeitos pouco expressivos sobre as emissões de gases de efeito estufa da maioria das regiões. Já os países que não possuem políticas climáticas, e que,

portanto, precisam pagar as tarifas compensatórias nas suas exportações para os países desenvolvidos, têm as trajetórias de emissões afetadas modestamente, o que sugere que as tarifas são pouco efetivas para evitar ou reduzir os vazamentos em emissões.

No cenário Policy_Global de aplicação de uma política climática global a trajetória de emissões de gases de efeito estufa é afetada em todas as regiões do modelo EPPA. Os países desenvolvidos apresentam maiores emissões nesse cenário do que no cenário Policy, pois podem comprar créditos de carbono de outras regiões do mundo, sem ter que reduzir tanto suas emissões. Já os países em desenvolvimento que não realizaram cortes no cenário Policy, passam a contribuir com cortes em emissões no cenário Policy_Global, tendo suas trajetórias de emissões drasticamente afetadas, com destaque para as reduções em emissões na China. Dessa forma, a política global alivia os países desenvolvidos via comercialização de créditos de carbono, permitindo aos países em desenvolvimento a venda de créditos de carbono aos países desenvolvidos.

O conjunto de políticas implementadas produzem diferentes trajetórias nas emissões globais de gases de efeito estufa (Figura 2). Sem políticas climáticas, o modelo projeta que as emissões alcançariam 80 bilhões de ton. de CO₂-Eq. em 2035, e cerca de 96 bilhões de ton. em 2050. A implementação das políticas por parte apenas dos países desenvolvidos e alguns poucos países em desenvolvimento seria capaz de alterar essa trajetória, reduzindo as emissões em cerca de 20 bilhões de ton. de CO₂-eq. no final do período, o que equivale a uma queda de cerca de 20% apenas. Tal redução mostra-se modesta e insuficiente para conter a concentração de gases de efeito estufa em níveis considerados seguros, como os níveis de 450 e 550 ppm, associados a mudanças em temperaturas restritas a cerca de 2º C até o final do século. Já a política global aqui simulada estabilizaria as emissões anuais em cerca de 60 bilhões de ton. de CO₂-Eq., evidenciando a necessidade do esforço conjunto de todos os países, incluindo grandes emissores como China e Índia.

As trajetórias de emissões de gases de efeito estufa no Brasil nos cenários simulados são apresentadas na Figura 3 considerando as diferentes fontes emissoras. O modelo prevê uma trajetória crescente em emissões no cenário BAU, com algumas oscilações devido às emissões de mudanças no uso da terra (*Land Use Change* – LUC). As emissões de 2005 e 2010 são calibradas no modelo para refletir os níveis observados no Inventário Brasileiro de Emissões (BRASIL, 2009), e as reduções no desmatamento dos biomas naturais, no caso do ano de 2010. Nos demais anos, as emissões são consequência do funcionamento das economias segundo as hipóteses consideradas na construção do modelo. A partir de 2020 o modelo projeta emissões constantes provenientes de mudanças no uso da terra, refletindo os parâmetros calculados com base no desmatamento histórico observado desde a década de 1990. O setor agropecuário também apresenta emissões relativamente constantes ao longo do tempo, enquanto os demais setores geram emissões crescentes, com destaque para o aumento da participação do setor de outras indústrias (Outros) devido ao consumo de energia.

Figura 1 Trajetórias de emissões de gases de efeito estufa nos cenários implementados

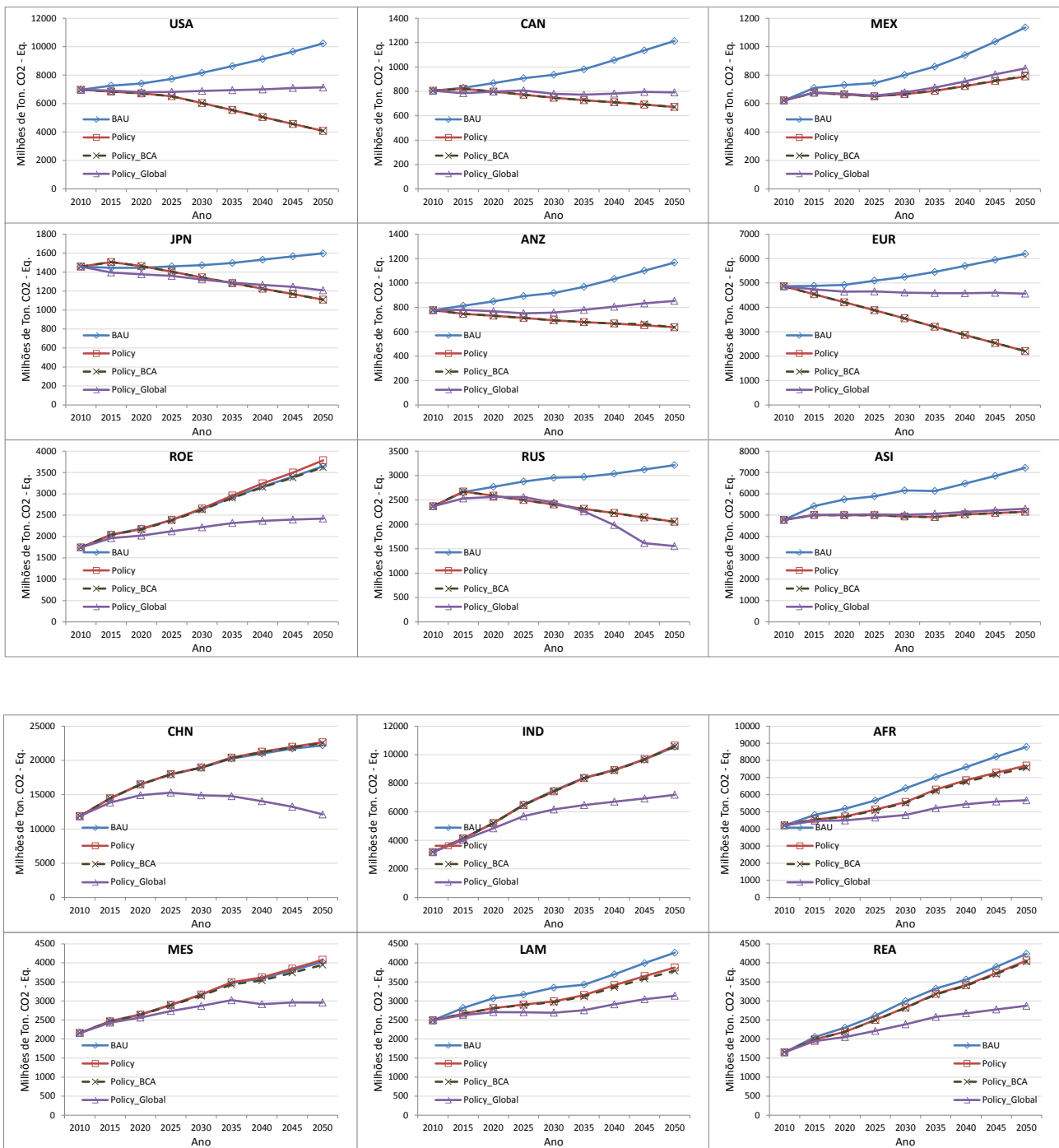
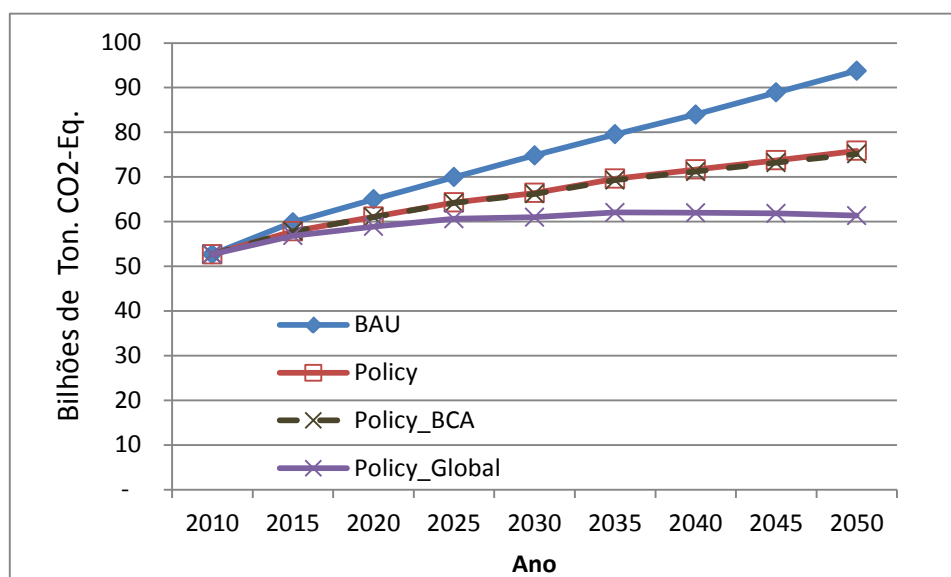


Figura 2 Trajetória mundial de emissões de gases de efeito estufa nos cenários implementados



Quando da aplicação da política climática no cenário Policy, as emissões provenientes de mudanças no uso da terra são drasticamente reduzidas, até serem completamente eliminadas em 2040. As emissões dos setores agropecuários (Agri), outras indústrias (Outros), transportes (Transp.) e indústrias intensivas em energia (Intens. Ener.) são reduzidas gradualmente em comparação com o cenário BAU, levando a uma estabilização nos níveis de emissões do país em cerca de um bilhão de toneladas de CO₂-Eq a partir de 2040. Quando o Brasil não contribui com o esforço de redução em emissões (cenário Policy_BCA_noBRA), a imposição de tarifas compensatórias de carbono sobre o país praticamente não afeta as emissões dos diferentes setores.

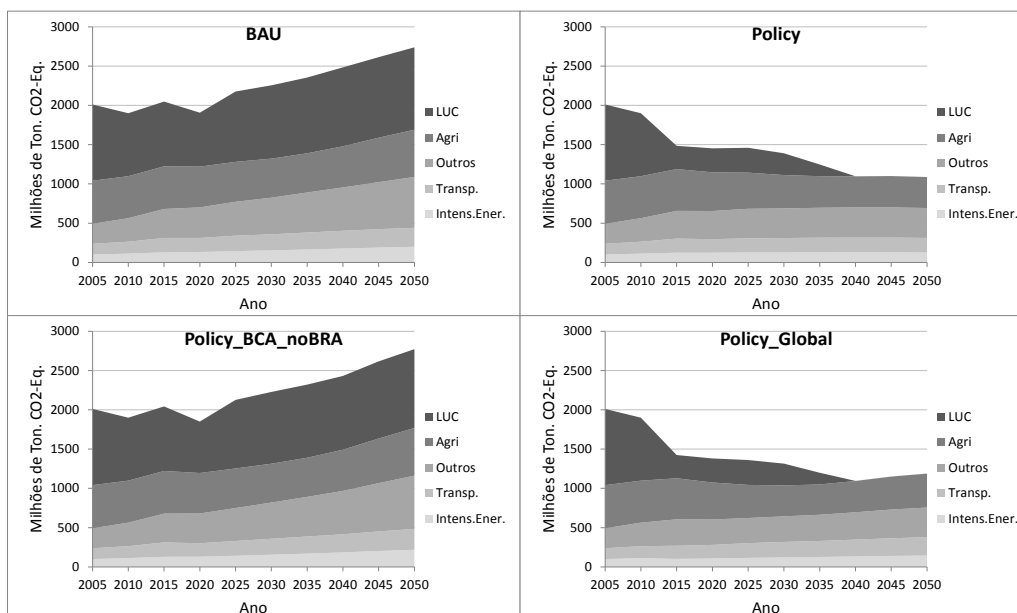
Já o cenário de acordo global para redução em emissões (Policy_Global) gera reduções nas emissões brasileiras similares às do cenário Policy, contudo, ligeiramente superiores nos setores agropecuários e transportes, e menores emissões no uso de energia. Isso é devido à adoção de um mercado único de créditos de carbono ao invés de metas setoriais de controle de emissões como no cenário Policy.

2.2.2 Impactos sobre o PIB e o bem-estar

A Figura 4 apresenta os resultados dos diferentes cenários sobre o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, em relação ao PIB projetado no cenário BAU. A política delineada para 2020 possui impactos bastante modestos sobre o PIB, de queda de 0,28% em relação ao PIB que seria observado no cenário de referência (BAU), o que significa que os impactos de se atingir as metas de redução em emissões previstas no Plano Nacional de Mudanças Climáticas são modestos. Contudo, as perdas em PIB crescem acentuadamente com o tempo, considerando as hipóteses adotadas de incremento nos cortes em emissões em cerca de um ponto percentual ao ano na agropecuária e no uso de energia, o que gera perdas de cerca de 4% do PIB em 2050. Essas perdas representam uma forma de estimar

os custos agregados de se perseguir metas de redução em emissões de gases de efeito estufa no Brasil e demais países, ou seja, da transição para uma economia de baixo carbono. Contudo, não significam que o crescimento do PIB se torna negativo, mas sim, que o PIB cresce a uma taxa menor que no cenário BAU de ausência de políticas climáticas.⁸

Figura 3 – Trajetórias de emissões de gases de efeito estufa no Brasil



As reduções na taxa de crescimento do PIB devem-se aos aumentos em custo de produção associados ao pagamento de impostos ao carbono nas atividades que emitem gases de efeito estufa, à necessidade de redução no consumo de energia e de aumento na eficiência no uso da mesma, bem como à necessidade de investimentos em capital, trabalho e outros insumos na substituição de insumos e fontes de energia emissoras por insumos e fontes de energia mais limpos ou renováveis.⁹

Deve-se ressaltar, contudo, que esses resultados não levam em conta os benefícios associados ao controle das emissões, ou seja, à redução nos possíveis danos e prejuízos que seriam causados pelas mudanças climáticas no cenário BAU, o que caracterizaria uma análise de custo-benefício.

Um ponto importante sobre os impactos da política climática em termos de redução do PIB é o custo estimado, não desprezível, de cerca de 1,4% de queda em 2035 e de 4% em 2050. Esses custos, relativamente elevados, devem-se à aplicação da política com metas setoriais diferenciadas

⁸ A taxa de crescimento do PIB entre os anos de 2010 a 2050 projetada pelo modelo EPPA passa de 3,26% ao ano no cenário BAU para 3,16% ao ano no cenário Policy.

⁹ Como o modelo adota a hipótese de pleno emprego, mudanças na oferta e demanda de trabalho são acomodadas por variações no salário relativo. As direções das mudanças em PIB são um ótimo indicativo da direção das mudanças esperadas no nível de emprego da economia. A hipótese de pleno emprego evita a modelagem complicada das diferentes teorias e dos diversos fatores que afetam os mercados de trabalho nas regiões representadas no modelo, aspectos ainda carentes de consenso na literatura econômica. A hipótese de pleno emprego equivale à premissa de que a taxa natural de desemprego das economias é determinada por fatores estruturais que não são afetados pelos choques simulados no estudo.

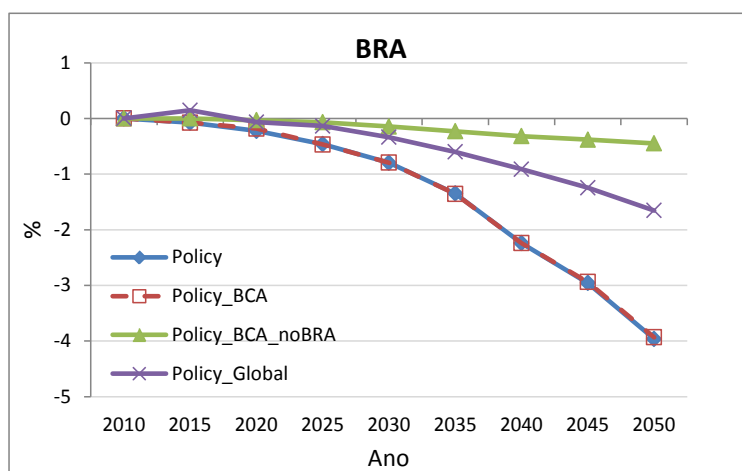
de redução em emissões, com créditos de carbono não comercializáveis entre setores. Isso significa que seria possível reduzir os custos da política se esta permitisse maiores cortes em emissões em setores com menores custos de mitigação, através, por exemplo, de mercados amplos de créditos de carbono, que abrangessem todos os setores ao mesmo tempo.

No cenário em que os países desenvolvidos aplicam tarifas compensatórias de carbono (cenário Policy_BCA), as perdas em PIB no Brasil são praticamente as mesmas que no cenário Policy, uma vez que as exportações brasileiras não estão sujeitas ao pagamento das tarifas compensatórias, que neste cenário só são aplicadas a países que não possuem políticas de reduções em emissões.

Se o Brasil não aplicar políticas climáticas, mas estiver sujeito às tarifas compensatórias de carbono (cenário Policy_BCA_noBRA), ocorrem perdas inferiores a 0,5% do PIB a cada ano, ao longo de todo o horizonte de política simulado.

Já o cenário de esforço mundial de redução em emissões, cenários Policy_Global, traz impactos bem menores em termos de crescimento do PIB (0,06% em 2020, 0,61% em 2035 e 1,7% em 2050) que o cenário Policy, em que um número limitado de países participa dos esforços de redução em emissões. Esse resultado é consequência tanto da capacidade do país de comercializar créditos de carbono com outros países e assim diminuir os prejuízos com os cortes em emissões, quanto do menor custo de mitigação com a possibilidade dos diferentes setores negociarem créditos de carbono para atingir uma meta nacional ou global de redução em emissões.

Figura 4 – Mudanças no PIB (%) nos cenários de políticas em relação ao cenário BAU, Brasil



A Tabela 5 apresenta os resultados de mudanças em bem-estar na economia brasileira a partir dos cenários de políticas climáticas simulados, em relação ao cenário de referência (BAU). As mudanças em bem-estar são uma boa indicação dos impactos agregados esperados sobre o nível de conforto e satisfação das famílias do país, considerando todas as mudanças em preços de bens e serviços e dos fatores de produção, que em última instância determinam a renda das famílias. Os resultados para o Brasil sugerem impactos modestos até 2030, contudo, efeitos negativos consideráveis a partir de então. Caso os países desenvolvidos adotem tarifas compensatórias de carbono, as

perdas em bem-estar no Brasil continuam similares ao do cenário Policy, a não ser no ano de 2020, quando as perdas em bem-estar se tornam bem menores, o que sugere que a aplicação da tarifa compensatória nos países desenvolvidos confere alguma vantagem comparativa para a economia brasileira naquele ano em relação a países que não adotam políticas climáticas e, portanto, estão sujeitos ao pagamento das tarifas compensatórias quando exportam para os países desenvolvidos.

No cenário em que o Brasil não aplica políticas climáticas, mas está sujeito ao pagamento das tarifas compensatórias de carbono (Policy_BCA_noBRA), o país apresenta perdas de bem-estar bem menos intensas do que quando aplica políticas climáticas, apesar das perdas serem persistentes. Isso significa que a imposição das tarifas compensatórias sobre as exportações brasileiras é capaz de afetar em algum grau o bem-estar do consumidor brasileiro, uma vez que a competitividade relativa do país diminui, comprometendo a geração de renda via exportações. Quando a política climática global é simulada (cenário Policy_Global), o Brasil apresenta ganhos de bem-estar no primeiro período, o que é consequência da exportação de créditos de carbono para outros países. Contudo, perdas em bem-estar ocorrem a partir de 2020, porém substancialmente mais modestas que no cenário Policy, uma vez que os mercados de carbono são aplicados de forma ampla no país e internacionalmente, incluindo as economias em desenvolvimento. A participação do país em um esforço global de redução em emissões seria uma opção razoável, uma vez que traz resultados próximos ao do cenário de não participação nesse esforço.

Tabela 5 – Mudanças em bem-estar nos cenários de política em relação ao cenário BAU (%)

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Policy	-0.01	-0.21	-0.24	-0.53	-1.02	-1.94	-2.65	-3.61
Policy_BCA	-0.01	-0.05	-0.29	-0.52	-1.05	-1.95	-2.62	-3.57
Policy_BCA_noBRA	0.00	-0.15	-0.04	-0.16	-0.27	-0.49	-0.69	-0.91
Policy_Global	0.59	-0.04	-0.05	-0.19	-0.32	-0.52	-0.83	-1.22

Fonte: Resultados da pesquisa.

2.2.3 Impactos sobre a produção setorial no Brasil

Os impactos sobre a produção setorial no Brasil são medidos pelas taxas anuais de crescimento dos setores sob os diferentes cenários considerados em relação ao nível de produção no ano de 2010, apresentadas na Tabela 6.

As variações em produção nos setores de culturas (CROP), pecuária (LIVE) e indústria de alimentos (FOOD) são bastante similares em direção e magnitude e se traduzem em pequenos desvios na trajetória de crescimento dos mesmos, como pode ser observado pela Tabela 6. A taxa de crescimento do setor de culturas, que no cenário de referência é de 2,09% até 2020, 2,37% até 2035, e de 2,82% até 2050, em relação à produção em 2010, reduz-se no máximo para 1,98%, 2,23% e

2,53%, respectivamente. Esses resultados indicam um efeito relativamente pequeno das políticas consideradas sobre os setores agropecuários e de alimentos. Efeitos negativos mais pronunciados sobre a agropecuária brasileira estão relacionados à aplicação da política climática através de mercados de carbono setoriais, que impedem a comercialização de créditos de emissões entre setores e, portanto, impõem elevados custos a setores intensivos em emissões não associadas ao consumo de energia, como a agricultura. As tarifas compensatórias aplicadas pelos países desenvolvidos (cenário Policy_BCA_noBRA) impactam pouco a produção da agropecuária brasileira quando o Brasil não aplica políticas climáticas, uma vez que a produção daqueles países sofre forte queda e é mais intensiva em emissões que a brasileira. No cenário de política climática global (Policy_Global), as quedas em produção agropecuária e de alimentos são maiores em 2020 e 2035 e ligeiramente menores em 2050 que no cenário de política Policy. Como nesse cenário os diferentes setores e países podem comercializar créditos de carbono, os impactos mais pronunciados em 2020 e 2035 indicam que esses setores possuem menores custos de abatimento para o nível total de redução em emissões projetados para aqueles anos, tornando-se ofertadores líquidos de créditos de emissões. Já em 2050 as quedas em produção menos pronunciadas nos setores CROP, LIVE e FOOD no Brasil indicam que a política setorial implementada no cenário Policy impõe cortes em emissões nesses setores proporcionalmente mais elevados do que em outros setores da economia do ponto de vista do custo de abatimento por unidade de emissão. Dessa forma, ao estabelecer um mercado único mundial de carbono, esses setores podem negociar créditos de carbono de forma a reduzir menos suas emissões que as metas originalmente traçadas. Vale ressaltar que os impactos negativos sobre a produção agropecuária nos cenários de políticas climáticas são consequência da necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa associados ao processo produtivo, como o CH_4 e o N_2O , o que é possível a partir de reduções na produção e/ou da adoção de práticas agrícolas e tecnologias mais caras que permitam a produção com menores níveis de emissões.

Já os setores mais intensivos em energia, quais sejam os de químicos, borracha, plásticos e papel (CRP), de siderurgia e metalurgia (STEEL), de manufatura de metais não ferrosos (ALUM) e de manufatura de minerais não metálicos (CIME), apresentam em comum o comportamento de pequenas mudanças na produção nos cenários de políticas em relação à produção do cenário de referência no ano de 2020.

Outro resultado comum a esses setores é o de aumento na produção nos cenários em que o Brasil aplica cortes em emissões especificados setorialmente (cenários Policy e Policy_BCA) em 2020, e quedas posteriormente nos anos de 2035 e 2050. Os aumentos de produção observados em 2020 indicam que o nível dos cortes em emissões (de cerca de 6% nas emissões advindas do uso de energia) pode ser absorvido pelos mesmos de forma barata relativamente aos demais setores da economia, levando à atração de fatores produtivos para estes setores intensivos em energia, antes empregados em setores como os de alimentos, transportes e energia. Ainda, a aplicação da tarifa compensatória de carbono nos países desenvolvidos favorece esses setores no Brasil naquele ano, por limitar as exportações de países em desenvolvimento que não aplicam políticas climáticas. Contudo, a intensificação dos cortes em emissões nos anos

posteriores acaba tornando o abatimento de emissões mais caro, forçando a queda da produção em 2035 e 2050 em relação ao cenário de referência.

O setor de metais não ferrosos (ALUM) enfrenta as maiores quedas em taxa de crescimento da produção, o que indica uma menor capacidade deste setor em substituir fontes de energia e reduzir emissões no seu processo produtivo em comparação com os demais setores da economia. Nota-se que no cenário Policy_BCA as perdas são ligeiramente menores do que no cenário Policy para todos os setores, o que significa que as tarifas compensatórias cobradas pelos países desenvolvidos no cenário Policy_BCA possuem um pequeno efeito de diminuir a vantagem comparativa daqueles países que não aplicam políticas climáticas.

Quando o país não faz parte do grupo de nações aplicando políticas climáticas (cenário Policy_BCA_noBRA) os setores intensivos em energia são afetados negativamente em 2020 e positivamente em 2035 e 2050, apesar de que em magnitudes muito pequenas. Isso significa que as tarifas

Tabela 6 – Taxas de crescimento (%) da produção setorial e do PIB brasileiros em relação ao ano de 2010

	2020					2035					2050				
	BAU	Policy	Policy_BCA	Policy_BCA_noBRA	Policy_Global	BAU	Policy	Policy_BCA	Policy_BCA_noBRA	Policy_Global	BAU	Policy	Policy_BCA	Policy_BCA_noBRA	Policy_Global
CROP	2.09	2.10	2.18	2.00	1.98	2.37	2.27	2.26	2.33	2.23	2.82	2.53	2.53	2.79	2.55
LIVE	2.48	2.42	2.45	2.43	2.39	2.53	2.38	2.37	2.52	2.37	2.57	2.25	2.25	2.59	2.31
FOOD	2.47	2.41	2.44	2.44	2.40	2.48	2.33	2.32	2.49	2.35	2.48	2.20	2.19	2.51	2.27
CRP	3.08	3.21	3.35	3.00	3.02	3.17	3.17	3.17	3.27	3.19	3.10	3.06	3.06	3.23	3.07
STEEL	2.87	2.91	2.97	2.83	2.86	2.93	2.91	2.91	2.95	2.95	2.88	2.86	2.87	2.90	2.87
ALUM	2.76	2.86	3.04	2.56	2.66	2.84	2.74	2.75	2.84	2.78	2.81	2.66	2.66	2.82	2.60
CIME	2.84	2.88	2.92	2.81	2.84	2.84	2.79	2.80	2.87	2.86	2.84	2.80	2.82	2.87	2.85
OTHR	3.14	3.18	3.20	3.12	3.15	3.02	3.02	3.02	3.02	3.04	3.00	2.99	2.99	3.00	3.01
SERV	4.07	4.06	4.05	4.08	4.08	3.74	3.73	3.73	3.73	3.74	3.52	3.49	3.49	3.51	3.51
TRAN	3.63	3.33	3.34	3.53	3.55	3.41	2.94	2.94	3.45	3.37	3.20	2.68	2.68	3.30	3.10
COAL	2.15	1.71	1.64	2.01	2.11	2.08	1.20	1.18	1.72	1.17	1.87	0.78	0.75	1.44	0.48
OIL	4.92	4.07	3.15	5.40	5.17	2.98	2.97	2.98	2.89	2.73	2.07	1.93	1.91	1.86	1.94
GAS	4.29	3.81	3.71	4.22	4.26	4.15	3.32	3.30	4.15	3.59	3.88	2.66	2.62	3.87	2.85
ROIL	1.93	2.11	2.58	1.59	1.71	1.71	1.28	1.32	1.74	1.64	1.45	1.01	1.12	1.66	1.18
ELEC	2.36	2.30	2.32	2.31	2.32	2.16	1.98	1.98	2.20	2.08	2.04	1.77	1.77	2.12	1.83
PIB	3.74	3.71	3.7	3.74	3.73	3.44	3.38	3.38	3.43	3.41	3.29	3.18	3.18	3.28	3.24

Fonte: Resultados da pesquisa.

compensatórias de carbono impostas pelos países desenvolvidos possuem pequeno impacto sobre tais setores, seja pelo volume relativamente pequeno de exportações brasileiras em alguns,

seja pela matriz energética relativamente mais limpa no Brasil do que em outros países em desenvolvimento, que se traduzem em menores tarifas compensatórias aplicadas ao produto brasileiro. Contudo, o setor de químicos, plásticos, borracha e papel (CRP) apresenta-se como exceção, pelo elevado aumento na produção deste setor no cenário Policy_BCA_noBRA. Tal resultado é consequência do maior uso de eletricidade por este setor, que significa baixos coeficientes de emissões por unidade produzida no Brasil e, portanto, menores tarifas de ajustamento de carbono no comércio internacional. Já sob o cenário de política climática global, enquanto os setores CRP e STEEL sofrem pequenas reduções em produção em relação ao cenário de referência e o setor CIME experimenta pequenos incrementos, o setor ALUM apresenta quedas mais pronunciadas. Esse resultado indica que, entre os setores intensivos em energia, o setor ALUM é o mais prejudicado pelas políticas climáticas, perdendo capacidade de competir por recursos econômicos com outros setores da economia, mesmo na possibilidade de adquirir créditos de emissões de setores com menores custos de redução em emissões.

As mudanças em produção diante das políticas revelam que os cortes em emissões mudam a competitividade relativa de um setor em relação aos demais, levando à realocação de fatores produtivos em direção aos setores com maior capacidade de reduzir emissões e/ou consumo de energia fóssil, bem como afetam a competitividade relativa nos mercados internacionais, tanto por conta de diferenças na matriz energética quanto no conteúdo de carbono associado ao valor de cada bem. Dessa forma, as políticas provocam mudanças em custos relativos que podem ser mais favoráveis ou prejudiciais em alguns setores e países.

Os setores de outras indústrias (OTHR) e de serviços (SERV) apresentam mudanças bastante modestas em produção. Em termos de trajetórias setoriais de crescimento, a taxa anual de crescimento dos setores OTHR e SERV permanece praticamente a mesma em todos os cenários simulados. Os resultados positivos para o setor OTHR refletem a menor intensidade de emissões desse setor, bem como certa facilidade em trocar fontes de energia fósseis por renováveis, enquanto os impactos negativos para o setor SERV são mais influenciados pela diminuição da renda doméstica agregada, uma vez que serviços não são transacionados internacionalmente. As maiores perdas para o setor de serviços relativas ao cenário de referência são observadas nos cenários Policy e Policy_BCA, justamente os de maior impacto negativo em PIB e no bem-estar.

O setor de transportes (TRAN) é bastante afetado negativamente pelas políticas climáticas setoriais implementadas no Brasil nos cenários Policy e Policy_BCA. No cenário de referência o setor cresce cerca de 3,6% a.a de 2010 a 2020, 3,4% até 2035 e 3,2% até 2050. Essas taxas reduzem-se a 3,3% em 2020, 2,9% em 2035 e 2,7% em 2050 nos cenários Policy e Policy_BCA, o que significa mudanças expressivas na trajetória de crescimento de longo prazo do setor. Esse resultado revela a baixa disponibilidade de alternativas aos combustíveis fósseis para o uso neste setor, menor capacidade de ganhos em eficiência, bem como uma política setorial brasileira que coloca um peso desproporcional sobre este setor em relação ao seu custo de mitigação mais elevado. Deve-se ressaltar que, apesar da possibilidade do uso de biocombustíveis em parte da frota brasileira de automóveis

de passeio, o setor de transporte abarca todo o transporte aéreo, hidroviário, e de carga rodoviário, o que torna a capacidade de substituição dos derivados de petróleo pelos biocombustíveis apenas parcial. Já o cenário de política climática global (Policy_Global) produz impactos negativos bem menos expressivos sobre esse setor, reforçando a assertiva de que a política setorial do cenário Policy desconsidera os elevados custos de mitigação neste setor. Sob a política global, o setor pode adquirir créditos de emissões de outros setores e países a custos bem menores que os da adoção de tecnologias setoriais mais limpas ou de maior eficiência no uso de energia.

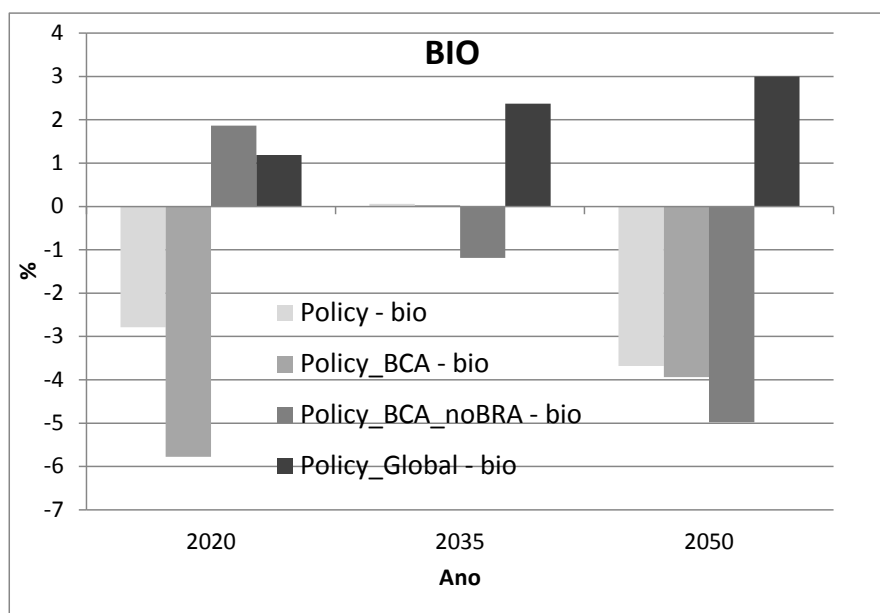
Os setores brasileiros produtores de energia fóssil são, em geral, impactados negativamente pelas políticas climáticas. Tais impactos são esperados, uma vez que as políticas buscam reduzir as emissões de gases de efeito estufa causadas em grande parte pelo uso dessas fontes de energia. O setor de extração de petróleo (OIL) é o setor que mais deve crescer na economia até 2020 no cenário de referência, por conta dos investimentos previstos para o mesmo. As políticas climáticas setoriais podem reduzir essa taxa de crescimento de 4,92% para níveis entre 3,15% e 4,07%, devido à menor demanda por esse produto nos países que impõem políticas climáticas.

O setor de gás natural (GAS) também apresenta taxas de crescimento elevadas no cenário de referência que são bastante impactadas pelas políticas climáticas. Já o setor de refino de petróleo (ROIL) possui taxa de crescimento mais modesta nos cenários de referência que os setores OIL e GAS, em parte por conta do direcionamento da produção de petróleo cru para exportações e investimentos menores na ampliação da capacidade de refino. A taxa de crescimento desse setor pode aumentar no cenário em que o país não aplica políticas climáticas (Policy_BCA_noBRA), saindo de 1,93% no cenário de referência para 2,58% em 2020, e de 1,45% para 1,66% em 2050. Esse aumento está relacionado à menor capacidade de exportar tanto o petróleo cru quanto o refinado nesse cenário, que aumentam a oferta doméstica e reduzem o preço do produto refinado, que passa a ser mais consumido internamente.

O setor de geração de eletricidade apresenta resultados que seguem a mesma direção dos impactos sobre o PIB e o consumo agregado. A aplicação de políticas climáticas nos países desenvolvidos e em alguns países em desenvolvimento (cenário Policy) reduz a produção de energia elétrica no Brasil, como consequência da redução na demanda total por energia. A aplicação de tarifas compensatórias nos países desenvolvidos (cenário Policy_BCA) não altera os resultados do cenário Policy para o setor de energia elétrica, já que a mesma não é exportada diretamente para aqueles países. O cenário em que o Brasil não impõe políticas climáticas, mas enfrenta tarifas compensatórias pelos países desenvolvidos, permite um pequeno incremento na produção de energia elétrica no país, de forma a atender ao crescimento de setores industriais como o de químicos, borracha, plásticos e papel (CRP) e de alimentos (FOOD). Já no cenário de política climática global (Policy_Global), a produção de energia elétrica é impactada negativamente, uma vez que a produção e o consumo dos demais setores na economia tende a diminuir para atingir as metas de reduções em emissões. Note-se, porém, que os impactos são menos pronunciados nesse cenário do que nos cenários de políticas setoriais (Policy e Policy_BCA), já que a política global é mais custo-efetiva do que as políticas setoriais.

O último setor energético de interesse na análise é o de produção de biocombustível (BIO), representado no Brasil pelo etanol gerado a partir da cana-de-açúcar. Apesar de ser um substituto potencial para o uso de petróleo refinado no setor de transportes diante de políticas climáticas, já que geram menores níveis de emissões, este setor também sofre alguns impactos negativos na produção, em relação ao cenário de referência, porém menos expressivos que dos demais setores energéticos (Figura 5). As quedas em produção estão relacionadas, na sua maioria, com a redução no consumo de combustíveis para transporte pelas famílias.

Figura 5 – Mudanças na produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil nos cenários de políticas climáticas em relação à produção no cenário de referência.



Vale ressaltar que apenas uma parcela da frota de automóveis brasileiros possui a capacidade de substituir petróleo e biocombustível, enquanto existe a obrigatoriedade de adição de uma parcela de etanol à gasolina comum, o que gera uma relação mista de substituição quando do uso do etanol nos carros *flex-fuel* por um lado, e, por outro, complementariedade com a gasolina por conta das exigências de mistura entre esses combustíveis. Ainda, as políticas climáticas possuem um efeito de redução na atividade econômica agregada, com quedas na produção de serviços de transportes. Dessa forma, a menor produção no setor de biocombustíveis em relação ao cenário de referência, quando ocorre, é consequência da redução na produção do setor de transportes, da relação de complementariedade entre gasolina e etanol, e da capacidade limitada de substituição do petróleo refinado pelo etanol.

Nos cenários Policy e Policy_BCA as quedas em produção de biocombustíveis ocorrem em 2020 e em 2050, chegando a cerca de 5%. Em 2020 esse resultado vem do redirecionamento da oferta de petróleo cru para o mercado doméstico, com aumento da produção da indústria de refino, o que reduz o preço da gasolina e, portanto, o consumo de etanol nos veículos flex-fuel. Já em 2050

o resultado é consequência da política setorial menos custo-efetiva, que impacta mais fortemente o setor de transportes. O cenário Policy_BCA_noBRA provoca os efeitos negativos mais pronunciados em relação ao cenário de referência BAU em 2050, que estão relacionados à competição com o petróleo refinado, que atinge um menor preço domesticamente por conta da menor demanda dos países desenvolvidos por este insumo e das proteções contra às importações do mesmo. Já o cenário de política climática global (Policy_Global) gera aumentos na produção do setor de biocombustíveis, de cerca de 3% em 2035 e 2050, uma vez que são uma forma relativamente mais barata de mitigar emissões em um cenário de política mundial de redução em emissões.¹⁰

É importante observar a proporção de uso da gasolina (gasool) e do etanol hidratado no setor de transporte urbano (Tabela 7), que no cenário de referência atinge proporções elevadas (89%) devido ao crescimento da frota de veículos *flex-fuel* no país, bem como do aumento no preço do petróleo ao longo do tempo. O modelo considera um aumento gradativo na proporção de automóveis *flex-fuel* na frota, até atingir 100% da frota no ano de 2050. A proporção de etanol hidratado utilizada é consequência da substituição entre este e a mistura de gasolina com etanol anidro, o que é uma decisão endógena do modelo, de acordo com o preço relativo dos diferentes combustíveis. O modelo gera no cenário de referência (BAU) uma elevada participação do etanol hidratado no total de combustível utilizado nos automóveis urbanos no Brasil. Nos cenários de políticas climáticas essa participação aumenta nos anos de 2020 e 2050, mesmo que modestamente, evidenciando a substituição da mistura gasolina-etanol anidro pelo etanol hidratado a partir das políticas climáticas simuladas. Como discutido anteriormente, no cenário Policy_BCA_noBRA o preço da gasolina tende a ser afetado negativamente pela redução da demanda internacional naqueles anos, o que favorece o consumo da mesma em detrimento do etanol hidratado. Já em 2020 o efeito contrário é observado, com aumento da produção da indústria de refino do petróleo (ROIL) nos cenários de políticas setoriais (Policy e Policy_BCA) e redução do preço desse substituto do etanol.

Tabela 7 – Proporção de etanol hidratado (%) no total de combustíveis usados nos automóveis urbanos no Brasil nos diferentes cenários

	BAU	Policy	Policy_BCA	Policy_BCA_noBRA	Policy_Global
2010	55	55	55	55	55
2020	50	58	58	57	57
2035	73	75	75	72	76
2050	89	90	90	82	93

Fonte: Resultados da Pesquisa

¹⁰ Vale ressaltar que o modelo EPPA considera a possibilidade de exportação do etanol de cana-de-açúcar para outros países. Contudo, devido às fortes oscilações nas exportações brasileiras desse produto nos últimos anos, as incertezas no desenvolvimento desse mercado a nível mundial e as barreiras comerciais tarifárias e não tarifárias existentes e em discussão, incluindo critérios de sustentabilidade e certificações, considera-se no modelo que a possibilidade de substituição do petróleo refinado pelo etanol brasileiro nos principais países importadores é bastante limitada, o que impede grandes mudanças nos fluxos comerciais observados no ano de 2010 no modelo.

2.3 Cenários Tecnológicos

A presente seção analisa as consequências de possíveis trajetórias de desenvolvimento de tecnologias de menores emissões de gases de efeito estufa no Brasil e no mundo. Diversas hipóteses de trajetórias tecnológicas foram consideradas no modelo de equilíbrio geral, com base nos resultados de estudos setoriais e opiniões de especialistas. Cada hipótese gerou a formulação de cenários de referência (BAU_Tec) e de políticas climáticas (Policy_Tec), que foram comparados com os cenários simulados anteriormente (BAU e Policy). Primeiramente consideram-se diversas tecnologias ao mesmo tempo nos cenários Tec, e posteriormente algumas tecnologias são analisadas isoladamente.

2.3.1 Cenários com Hipóteses Gerais de Trajetórias Tecnológicas

De acordo com os estudos setoriais, não são esperadas mudanças tecnológicas nos setores intensivos em energia capazes de alterar positivamente a competitividade relativa da produção brasileira. Para os quatro setores intensivos em energia (CRP, STEEL, ALUM e CIME), o cenário de referência simulado no modelo EPPA anteriormente (cenário BAU) reflete o que se espera do cenário tecnológico mais provável sugerido pelos estudos setoriais como: pouca mudança na participação das diferentes fontes de energia no total de energia consumida pelo setor; maior custo com energia no Brasil do que no resto do mundo como um todo; adoção tecnológica lenta e de custo elevado; aumento gradual na eficiência energética e redução gradual nas emissões. Dessa forma, não são adotadas hipóteses alternativas no modelo EPPA nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec.

Contudo, os estudos setoriais indicam que as emissões por tonelada de produto podem reduzir drasticamente, em cerca de 42%, caso haja desenvolvimento das tecnologias de captura e sequestro de carbono. Essas tecnologias estão disponíveis no modelo EPPA no caso da produção de energia elétrica a partir de carvão e gás natural (tecnologias NGCC-CCS e IGCC-CCS na Tabela 1), mas apenas seriam adotadas em cenários com restrições às emissões de carbono, uma vez que representam formas bem mais caras de se gerar eletricidade que as fontes convencionais fósseis. Assim, o cenário Policy_Tec considera a redução dos custos associados ao desenvolvimento dessas tecnologias e compara a adoção das mesmas com o cenário Policy.

O estudo setorial sobre transportes sugere a entrada dos veículos híbridos (movidos tanto a gasolina quanto a energia elétrica) e dos veículos elétricos com novos sistemas de propulsão a partir de 2020, e sua popularização em 2035 e 2050. No cenário BAU simulado anteriormente, esses veículos possuem uma pequena penetração a partir de 2035 em alguns poucos países (como exemplo, nos EUA esses veículos teriam uma participação de 8% em 2050 no total de novos veículos adquiridos). Dessa forma, para representar uma penetração maior e mais precoce desses veículos nos cenários tecnológicos reduziu-se o custo relativo de desenvolvimento e aquisição desses automóveis para torná-los mais atrativos, e permitir a sua adoção a partir da década de 2020. Os veículos híbridos são considerados no modelo EPPA cerca de 30% mais caros que os veículos com os sistemas de propulsão convencionais, enquanto os movidos completamente a energia elétrica são 65% mais caros. Nos cenários tecnológicos, reduz-se gradativamente o custo dos sistemas de propulsão des-

ses automóveis, de forma a torná-los apenas 20% mais caros que os automóveis convencionais no caso dos híbridos e 50% mais caros no caso dos veículos movidos apenas a energia elétrica.

No caso do setor de transporte aéreo, espera-se um aumento na economia de uso de combustíveis de cerca de 2% ao ano. Ainda, espera-se que o setor aéreo passe a usar biocombustíveis em proporções crescentes, atingindo cerca de 5% em 2020, 7,5% em 2035 e 55% em 2050. Para refletir esse prognóstico, considera-se nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec a possibilidade de uso dos biocombustíveis de segunda geração no setor de transporte comercial (TRAN), e não apenas no setor de transporte das famílias, como nos cenários originais.

Considera-se nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec uma maior possibilidade de substituição entre etanol e gasolina nos países desenvolvidos ao longo do tempo e o desenvolvimento da segunda geração de biocombustíveis no Brasil a partir do uso do bagaço de cana-de-açúcar, já a partir de 2020. Ainda, considera-se o uso de biocombustíveis no setor de serviços de transporte, que inclui o setor de transporte rodoviário de carga e o de transporte aeroviário.

Nos setores agropecuários seria importante representar mais explicitamente as diferentes possibilidades de mitigação previstas no Plano e no Programa ABC, que para o horizonte de 2010 a 2020 pretende atingir a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas, a ampliação da integração lavoura pecuária em 4 milhões de hectares, o aumento na área com plantio direto de qualidade em 8 milhões de hectares, e a expansão das áreas que fazem uso da fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares. Espera-se que essas medidas, que fazem parte dos “NAMAs” apresentados pelo Governo Brasileiro em Copenhague, em dezembro de 2009, reduzam as emissões anuais de CO₂-equivalente em, respectivamente, 83 a 104 milhões de toneladas, 18 a 22 milhões de toneladas, 16 a 20 milhões de toneladas e 16 a 20 milhões de toneladas. Essas tecnologias podem ser representadas no modelo considerando-se os custos necessários para reduzir determinado volume de emissões. Contudo, existe uma escassez de informações sobre esses custos e as potenciais reduções em emissões das tecnologias de mitigação previstas para a agropecuária brasileira. Dessa forma, optou-se por investigar a agricultura de baixo carbono separadamente, em cenários que serão explorados mais adiante neste trabalho.

2.3.2 Resultados gerais dos cenários tecnológicos

A Tabela 8 apresenta os resultados de emissões brasileiras de gases de efeito estufa nos cenários tecnológicos, comparando-os com os dos cenários BAU e Policy simulados inicialmente. Os resultados revelam que as diferentes hipóteses tecnológicas consideradas levam a poucas diferenças em emissões agregadas para o Brasil entre os cenários originalmente simulados e os cenários tecnológicos. As emissões são ligeiramente inferiores nos cenários tecnológicos (BAU_Tec e Policy_Tec) a partir de 2030. Esses resultados indicam que as hipóteses consideradas nos cenários tecnológicos, não provocam diferenças consideráveis nas emissões totais do país, apesar de contribuírem para uma ligeira redução nas emissões. Deve-se ainda considerar que as pequenas diferenças em resulta-

dos entre os cenários iniciais e os cenários Tec apenas significam que o modelo EPPA já incorporava diversos padrões de mudanças tecnológicas previstos nos estudos setoriais, como é o caso dos ganhos de eficiência nos setores intensivos em energia.

Tabela 8 – Emissões brasileiras de gases de efeito estufa em diferentes cenários (Milhões e Ton. Co₂-Eq.)

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
BAU	1905	2046	1879	2169	2254	2360	2468	2635	2777
BAU_Tec	1905	2037	1929	2200	2208	2305	2419	2581	2721
Policy	1905	1491	1438	1453	1389	1253	1107	1116	1112
Policy_Tec	1905	1508	1469	1481	1373	1215	1071	1083	1080

Fonte: Resultados da pesquisa.

A Figura 6 apresenta as mudanças percentuais no PIB nos cenários de políticas Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente. Percebe-se que as quedas em PIB são praticamente as mesmas, independente das hipóteses tecnológicas dos cenários Tec. Como seria esperado, observam-se menores custos econômicos diante de políticas climáticas no cenário Tec, contudo, as diferenças na trajetória de queda relativa do PIB indicam que as tecnologias simuladas no cenário Tec ou são pouco adotadas no Brasil, mesmo que possuam custos menores do que nos cenários originalmente simulados, e/ou não trazem grandes benefícios em reduzir os custos de mitigação.

A Tabela 9 apresenta as mudanças em bem-estar nos cenários de políticas Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec. Tais mudanças representam medidas de custos das políticas climáticas sobre os consumidores dos países, considerando todas as mudanças em preços relativos e renda. Observa-se um custo relativo consideravelmente menor da política climática brasileira sob as hipóteses tecnológicas dos cenários Policy_Tec e BAU_Tec até o ano de 2030. A partir de 2035, os custos tornam-se maiores sob tais hipóteses. Esses resultados indicam que as tecnologias incorporadas nesses cenários contribuem para mitigar emissões de forma mais barata apenas sob metas menos restritivas às emissões. Quando tais metas se intensificam, as tecnologias incorporadas não são suficientes para reduzir os custos de mitigação no Brasil, ou por apresentarem baixo nível de adoção no país ou serem capazes de reduzir muito pouco os custos de mitigação.

É interessante notar que esse resultado não é o mesmo para todas as regiões do modelo. Como exemplo, a Figura 7 apresenta as mudanças em bem-estar para os EUA e China nos mesmos cenários. Para esses países, as hipóteses tecnológicas consideradas nos cenários Tec significam possibilidades de reduzir consideravelmente os custos de mitigação. Nos EUA, que adota uma política climática no cenário Policy, a sua menor queda em bem-estar sob os cenários Tec deve-se à adoção em larga escala de tecnologias como o uso de veículos elétricos híbridos no setor de transportes e a construção de usinas de energia a carvão e gás natural com captura e sequestro de carbono. Já na

China, que não adota políticas climáticas, o resultado menos prejudicial sob os cenários Tec reflete a menor queda de produção, consumo e importações de países desenvolvidos.

Figura 6 – Mudanças (%) no PIB brasileiro nos cenários de políticas Policy em Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente.

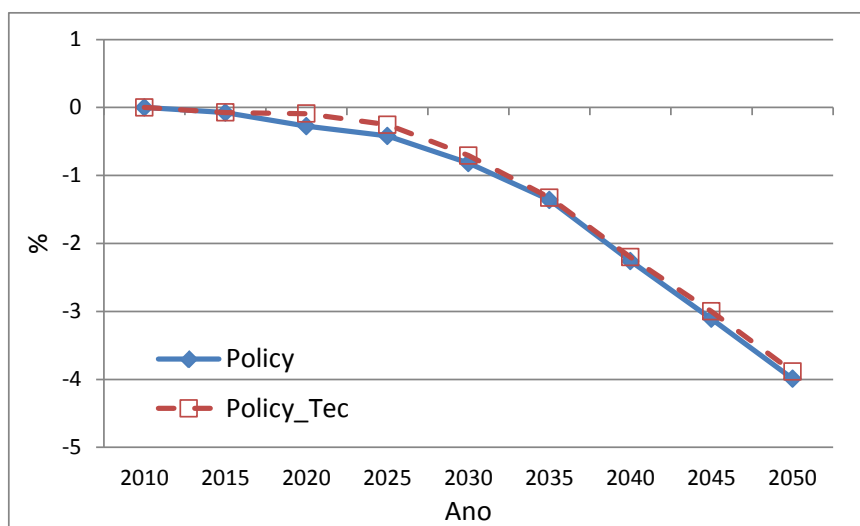


Tabela 9 – Mudanças em bem-estar (%) no Brasil nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Policy	-0.01	-0.21	-0.24	-0.53	-1.02	-1.94	-2.65	-3.61
Policy_Tec	-0.02	0.07	0.17	-0.31	-1.05	-2.00	-2.80	-3.62

Fonte: resultados da pesquisa.

A Tabela 10 apresenta as taxas de crescimento (%) da produção setorial brasileira em relação ao ano de 2010 nos cenários BAU, BAU_Tec, Policy e Policy_Tec. As taxas setoriais de crescimento são ligeiramente superiores nos cenários Tec em 2020 para quase todos os setores, excetuando-se apenas os setores de serviços (SERV) e de petróleo bruto (OIL). Esses dois setores apresentam menores taxas de crescimento nos cenários Tec também nos anos de 2035 e 2050. A menor taxa de crescimento do setor OIL nos cenários Tec sugere que o desenvolvimento da tecnologia de biocombustível de segunda geração a partir do uso do bagaço da cana-de-açúcar é capaz de aumentar a oferta e reduzir o preço deste combustível renovável, gerando uma competição com a produção de petróleo bruto, o que reduz sua taxa de crescimento em relação aos cenários em que não se considerava a possibilidade de desenvolvimento daquele combustível alternativo. Esse resultado é corroborado pelas maiores taxas de crescimento no setor de transportes (TRAN) nos cenários Tec em todos os anos. A partir de 2035, todos os setores apresentam taxas de crescimento menores nos cenários Tec, com exceção do setor TRAN já citado e dos setores de produção de gás natural (GAS) e de geração de

eletricidade (ELEC). Nota-se, contudo, que as diferenças em taxas de crescimento são muito pequenas entre os cenários Tec e não Tec, e que os cenários de políticas climáticas sempre geram quedas nas taxas de crescimento em relação aos cenários de referência, reflexo dos maiores custos que as restrições às emissões de GEE impõem aos mesmos. Dessa forma, as hipóteses tecnológicas consideradas nos cenários Tec causam diferenças relevantes apenas nos setores de petróleo e de transportes, o que indica que, dentre as tecnologias consideradas naqueles cenários, apenas as de biocombustíveis são capazes de provocar mudanças relevantes nos resultados encontrados inicialmente.

Figura 7 – Mudanças em bem-estar (%) nos cenários Policy e Policy_Tec em relação aos cenários BAU e BAU_Tec, respectivamente, nos EUA e China

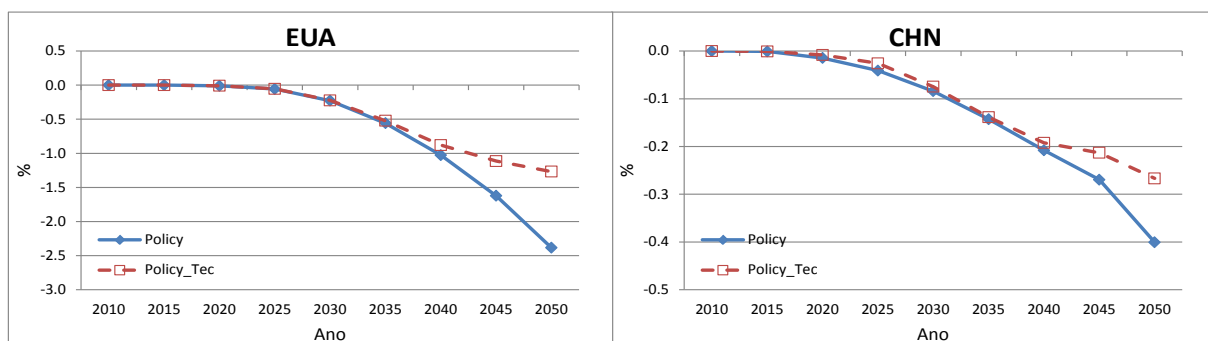


Tabela 10 – Taxas de crescimento (%) da produção setorial brasileira em relação ao ano de 2010, cenários selecionados

	2020				2035				2050			
	BAU	BAU_Tec	Policy	Policy_Tec	BAU	BAU_Tec	Policy	Policy_Tec	BAU	BAU_Tec	Policy	Policy_Tec
CROP	2.09	2.26	2.10	2.12	2.37	2.34	2.27	2.25	2.82	2.79	2.53	2.50
LIVE	2.48	2.57	2.42	2.43	2.53	2.50	2.38	2.36	2.57	2.55	2.25	2.22
FOOD	2.47	2.55	2.41	2.42	2.48	2.45	2.33	2.31	2.48	2.46	2.20	2.18
CRP	3.08	3.37	3.21	3.25	3.17	3.13	3.17	3.14	3.10	3.06	3.06	3.00
STEEL	2.87	3.02	2.91	2.96	2.93	2.89	2.91	2.88	2.88	2.85	2.86	2.84
ALUM	2.76	3.34	2.86	3.08	2.84	2.80	2.74	2.72	2.81	2.78	2.66	2.61
CIME	2.84	2.96	2.88	2.93	2.84	2.80	2.79	2.76	2.84	2.81	2.80	2.77
OTHR	3.14	3.19	3.18	3.19	3.02	2.99	3.02	3.00	3.00	2.97	2.99	2.98
SERV	4.07	4.04	4.06	4.05	3.74	3.73	3.73	3.72	3.52	3.51	3.49	3.48
TRAN	3.63	3.99	3.33	3.66	3.41	3.51	2.94	3.04	3.20	3.29	2.68	2.77
COAL	2.15	2.36	1.71	2.02	2.08	1.98	1.20	1.11	1.87	1.83	0.78	0.67
OIL	4.92	3.12	4.07	3.87	2.98	2.91	2.97	2.81	2.07	2.03	1.93	1.81
GAS	4.29	4.54	3.81	4.26	4.15	4.15	3.32	3.34	3.88	3.88	2.66	2.70
ROIL	1.93	3.08	2.11	2.42	1.71	1.43	1.28	1.05	1.45	1.30	1.01	0.91
ELEC	2.36	2.53	2.30	2.42	2.16	2.16	1.98	1.98	2.04	2.04	1.77	1.76

Fonte: Resultados da Pesquisa.

Biocombustíveis

As hipóteses consideradas nos cenários tecnológicos BAU_Tec e Policy_Tec pouco afetam os resultados obtidos inicialmente nos cenários BAU e Policy, com algumas poucas exceções relacionadas aos setores de produção e refino do petróleo e de serviços de transportes. Vale, portanto, uma análise mais detalhada sobre a produção e uso dos biocombustíveis, principal fonte de energia capaz de competir com o combustível fóssil no setor de transportes. O Quadro 1 abaixo apresenta a produção e a área de etanol no Brasil nos cenários BAU, BAU_TEC, Policy e Policy_Tec. Os resultados indicam um crescimento bem maior na produção do que na área de 2010 para 2020 nos cenários Tec, consequência do desenvolvimento do etanol de segunda geração a partir do uso do bagaço da cana-de-açúcar no processo de produção. Assumiu-se que o ganho de eficiência por área permitiria aumentar em 50% a produção de etanol por ha de cana-de-açúcar colhida a partir do desenvolvimento da tecnologia, o que aumenta a produção em 2020 nos cenários Tec mesmo com redução da área plantada em relação ao ano de 2010. A oferta de etanol também é maior nos cenários Tec em relação aos cenários originais, em cerca de 9% a 15% em 2020, e entre 50% e 61% em 2035 e 2050, dependendo do cenário considerado. Esses resultados sugerem mudanças importantes na produção do setor, caso a tecnologia de etanol de segunda geração no Brasil seja desenvolvida efetivamente através da quebra da celulose do bagaço.

Quadro 1 – Produção de etanol no Brasil e área de cana-de-açúcar na produção de etanol nos cenários BAU, BAU_Tec, Policy e Policy_Tec

	Ano	Produção (Mil TEP*)	Área (milha)		Ano	Produção (Mil TEP)	Área (milha)
BAU	2010	10994	4939	Policy	2010	10994	4939
	2020	15373	5832		2020	16155	6102
	2035	24261	7850		2035	24107	7673
	2050	34397	9247		2050	32937	7975
BAU_Tec	2010	10994	4939	Policy_Tec	2010	10994	4939
	2020	16014	4133		2020	16319	4190
	2035	38336	8424		2035	35916	7722
	2050	58043	10621		2050	51944	8609

* TEP: tonelada equivalente de petróleo.

Fonte: Resultados da Pesquisa.

O Quadro 2 apresenta o destino da produção de etanol nos cenários considerados. Até 2020, uma maior parcela do etanol é destinada ao uso em automóveis flex fuel em todos os cenários considerados. A partir daí, nos cenários inicialmente simulados (BAU e Policy) a proporção de etanol hidratado cresce, acompanhando o aumento da frota de automóveis flex fuel e o menor preço relativo deste combustível em relação à gasolina. A política climática acentua ligeiramente este pa-

drão. As exportações praticamente mantêm a sua participação, já que o desenvolvimento de um mercado internacional para biocombustíveis nestes cenários é considerado pouco provável. Já nos cenários tecnológicos, considera-se a possibilidade de usar os biocombustíveis em outros setores de transportes (transporte aéreo e rodoviário de carga), bem como o desenvolvimento do mercado internacional de biocombustíveis, pelo aumento da elasticidade de substituição do etanol importado pelos derivados do petróleo nos principais países importadores. Como consequência, observa-se um forte aumento na participação das exportações nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec, bem como uma demanda bastante expressiva do etanol pelos demais setores de transportes.

O cenário Policy_Tec acentua o uso do etanol hidratado nos veículos flex fuel e para exportações, em detrimento do uso nos demais setores de transportes. Percebe-se, portanto, que mudanças expressivas nos resultados podem ocorrer nos mercados de biocombustíveis dependendo das hipóteses consideradas sobre o desenvolvimento e adoção dessa tecnologia. Deve-se salientar as incertezas atuais sobre as hipóteses assumidas nos cenários Tec, tanto no que diz respeito ao possível sucesso no desenvolvimento tecnológico do etanol de segunda geração da cana-de-açúcar, da liberalização dos mercados dos países desenvolvidos e desenvolvimento de um mercado mundial, quanto do amplo uso dos mesmos em diferentes modais de transportes, que tornam difícil a previsão do futuro deste setor.

Quadro 2 – Uso do etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil (%)

		Parcela de uso (%)						Parcela de uso (%)			
		Hidrata- do	Anidro	Export.	Outros Transp.			Hidrata- do	Anidro	Export.	Outros Transp.
BAU	2010	55	41	3	-	Policy	2010	55	41	3	-
	2020	51	43	6	-		2020	55	40	5	-
	2035	63	33	5	-		2035	64	32	5	-
	2050	70	27	4	-		2050	71	26	3	-
BAU_Tec	2010	55	41	3	-	Policy_Tec	2010	55	41	3	-
	2020	52	41	6	-		2020	54	40	6	-
	2035	41	21	8	31		2035	44	21	8	27
	2050	42	16	17	25		2050	46	17	19	19

Fonte: Resultados da Pesquisa

Veículos híbridos e elétricos

Os cenários tecnológicos consideram menores custos para o desenvolvimento e adoção dos veículos com novos sistemas de propulsão, veículos híbridos movidos a combustível convencional e energia elétrica e movidos apenas por energia elétrica. O custo de aquisição dos veículos híbridos é 30% superior ao dos veículos convencionais nos cenários BAU e Policy quando essas tecnologias

se tornam disponíveis em 2015, enquanto os veículos elétricos custam 65% mais. O modelo ainda prevê uma curva de aprendizagem no desenvolvimento desses veículos que reduz esses custos em 5 pontos percentuais até 2050. Nos cenários BAU_Tec e Policy_Tec, os custos de aquisição desses veículos foram reduzidos para apenas 20% no caso dos híbridos e 50% no caso dos elétricos. Os resultados revelam que, apesar dos menores custos nos cenários tecnológicos, esses veículos possuem participação desprezível na frota brasileira, mesmo na presença de políticas climáticas. Esse resultado é consequência da disponibilidade e competitividade do etanol de cana-de-açúcar no Brasil, que se mostra uma opção mais barata de mitigação do que a aquisição dos veículos híbridos, mesmo considerando a economia relativa de combustíveis que os mesmos permitem.

Para outras regiões do mundo, contudo, os automóveis híbridos mostram-se uma opção tecnológica interessante para mitigar as emissões de GEE. Este é o caso dos EUA, cujos resultados são apresentados na Tabela 11 a título de exemplo, como o percentual de aquisição de novos veículos nos EUA de acordo com o sistema de propulsão dos mesmos. Sob políticas climáticas no cenário Policy_Tec, 8% dos novos veículos são híbridos em 2035 e atingem 25% das novas aquisições em 2050. Dessa forma, a redução nos custos de aquisição desses veículos permite a sua maior penetração em algumas regiões do modelo, apesar disso só ocorrer a partir de 2035.¹¹

Tabela 11 – Participação (%) dos veículos por tipo de sistema de propulsão no total de novos veículos de passeio, EUA.

		2020	2035	2050
BAU	Tradicional	100	100	92
	Híbridos+elétricos	-	-	8
BAU_Tec	Tradicional	100	95	81
	Híbridos+elétricos	-	5	19
Policy	Tradicional	100	97	79
	Híbridos+elétricos	-	3	21
Policy_Tec	Tradicional	100	92	75
	Híbridos+elétricos	-	8	25

Fonte: Resultados da pesquisa

Tecnologias de geração de eletricidade com captura e sequestro de carbono

O modelo EPPA considera o desenvolvimento futuro das tecnologias de geração de eletricidade a partir de gás natural e gaseificação de carvão com captura e sequestro de carbono (tecnologias

¹¹ Ressalva-se que os resultados da Tabela 11 desconsideram a existência de incentivos, na forma de “tax credit” na declaração do imposto de renda, à compra de veículos híbridos e elétricos nos EUA. Na presença desses subsídios, os resultados de adoção de carros híbridos e elétricos naquele país pelo modelo EPPA situam-se entre 3% e 4% em 2020, 20% e 24% em 2035, e atingem entre 40% e 47% em 2050, para os cenários simulados.

NGCC-CCS e IGCC-CCS descritas na Tabela 1). Essas tecnologias de captura e sequestro de carbono permitiriam a redução nas emissões provenientes da geração de eletricidade, apesar de não serem capazes de representar a redução em emissões não provenientes do uso de energia (como seria o caso das observadas na indústria de cimento). As tecnologias NGCC-CCS e IGCC-CCS são cerca de 42% a 52% mais caras para a obtenção de eletricidade que as tecnologias convencionais a base de carvão e gás natural nos cenários BAU e Policy. Nos cenários tecnológicos BAU_Tec e Policy_Tec assume-se que essas tecnologias são apenas entre 20% e 30% mais caras que as tecnologias convencionais de geração de eletricidade baseadas em carvão e gás natural.

A Tabela 12 apresenta os resultados em termos de proporção da geração de eletricidade oriunda das tecnologias de captura e sequestro de carbono no total da eletricidade gerada em regiões selecionadas do modelo. Os resultados dos cenários BAU e BAU_Tec não são apresentados, uma vez que não há adoção dessas tecnologias no modelo na ausência de políticas climáticas. Percebe-se que esse tipo de tecnologia não se desenvolve no Brasil, uma vez que o custo da geração de eletricidade no país a partir de fontes fósseis é mais elevado que a hidroelétrica. Contudo, em outras regiões essas tecnologias são adotadas como é o caso dos EUA. Sob os custos menores do cenário Policy_Tec, a proporção de eletricidade gerada por essas tecnologias nos EUA é substancialmente maior no final do período considerado. Na UE, por outro lado, a tecnologia só seria adotada no cenário Policy_Tec, e em menor proporção que nos EUA. No mundo como um todo, a taxa de adoção dessas tecnologias é nula em 2020, atinge até 1,3% da geração de eletricidade em 2035 e até 17% em 2050 no cenário tecnológico de menores custos das mesmas. Dessa forma, a consideração de menores custos para as tecnologias de captura e sequestro de carbono não altera os resultados para o Brasil, mas contribui para reduzir os custos de políticas climáticas em alguns países.

Tabela 12 – Proporção da geração de eletricidade proveniente de tecnologias de captura e sequestro de carbono em regiões selecionadas (%)

	Tecnologia	Policy		Policy_Tec	
		2035	2050	2035	2050
EUA	NGCC-CCS	-	0.9	0.9	3.1
	IGCC-CCS	-	1.2	3.2	65.2
EU	NGCC-CCS	-	-	0.0	3.4
	IGCC-CCS	-	-	0.8	10.9
Brasil	NGCC-CCS	-	-	-	-
	IGCC-CCS	-	-	-	-
Mundo	NGCC-CCS	-	0.1	0.1	0.9
	IGCC-CCS	-	0.1	1.2	15.9

Fonte: Resultados da Pesquisa.

2.3.3 Interação entre Etanol e Carros Híbridos

Uma conclusão dos resultados dos cenários tecnológicos discutidos até aqui é de que a competitividade do etanol brasileiro acaba prevenindo a adoção dos carros híbridos no país. Para investigar essa questão mais a fundo, primeiramente adicionou-se a possibilidade de substituição entre etanol hidratado e a mistura gasolina + etanol anidro nos veículos híbridos no Brasil. Ainda, foram simulados vários cenários tecnológicos alternativos. No primeiro, considerou-se que a produção de etanol de segunda geração no Brasil não será desenvolvida. Em um segundo cenário, aumentou-se o custo de produção do etanol de cana-de-açúcar brasileiro de primeira geração em 50%. Em um terceiro cenário, dobrou-se o custo de produção de etanol de primeira geração no Brasil. Em todos esses cenários, manteve-se o custo dos carros híbridos como sendo 20% superior ao dos carros convencionais e dos carros elétricos como sendo 50% mais caros no ano de 2015 e a curva de aprendizagem na redução de custos desses veículos. Desses três cenários, apenas o terceiro resultou na penetração dos carros híbridos e elétricos no país, reforçando a conclusão anterior de que a competitividade do etanol brasileiro previne a adoção em larga escala dos carros híbridos.

Para entender esse resultado, é importante compreender como estão representadas as novas tecnologias de sistemas propulsores no modelo e como as mesmas competem com os veículos convencionais. O modelo considera que os consumidores escolhem entre os três tipos de veículos considerando que o serviço de transportes prestados pelos mesmos, junto com seus gastos de combustíveis, são substitutos perfeitos. Ou seja, o consumidor compra a combinação veículo + combustível que for mais atraente quanto ao custo. Como o veículo possui uma vida útil relativamente longa e existem limites à taxa de penetração dos veículos híbridos e elétricos, é possível em um dado momento o consumo de dois, ou mesmo dos três, tipos de veículos pelos consumidores de um país.¹²

Considerando essa representação da competição entre tecnologias veiculares no modelo, os veículos híbridos e elétricos são adotados quando seus custos de aquisição e gastos com combustível forem inferiores aos associados ao veículo convencional, o que tende a acontecer ao longo do tempo com o encarecimento do derivado de petróleo, devido ao seu esgotamento e à maior eficiência dos híbridos e elétricos. Quando políticas climáticas são adotadas, o preço dos derivados de petróleo aumenta mais rapidamente devido à necessidade de pagar pelas emissões de carbono, o que acelera o processo de penetração dos híbridos e elétricos.

No caso brasileiro, a não penetração desses veículos avançados, mesmo quando o etanol de segunda geração no país é desconsiderado, significa que a combinação de veículos convencionais mais combustível é sempre mais barata que as combinações de veículos híbridos ou elétricos com seus respectivos combustíveis. Esse resultado significa que, à medida que o derivado do petróleo se torna mais caro, o etanol substitui a gasolina nos motores flex fuel dos veículos brasileiros, como demonstraram os resultados da Tabela 7, impedindo que os veículos híbridos e elétricos se tornem mais competitivos, uma vez que esses veículos possuem um custo de aquisição mais elevado. Dessa forma, a capacidade de produzir etanol a preços que não acompanham o aumento do preço do pe-

¹² Karplus et al. (2012) discute em detalhes a representação das tecnologias de veículos híbridos e elétricos no modelo EPPA.

tróleio desestimula a penetração dos carros híbridos. Apenas quando os custos de produção do etanol foram aumentados em 100% a adoção dos carros híbridos e elétricos foi observada no modelo.

A Tabela 13 apresenta a proporção de veículos híbridos e elétricos na frota brasileira nos cenários de referência (BAU) e Policy sob essa hipótese de maiores custos na produção de etanol. Os resultados revelam uma pequena penetração dos veículos híbridos em 2035, que atinge 15% de participação na aquisição de novos veículos em 2050 no cenário de referência, chegando a 24% no cenário de política. Esses resultados são parecidos com os observados para os EUA na Tabela 11, e sugerem que a política climática estimula a adoção dos veículos híbridos no Brasil, caso o etanol de cana-de-açúcar se torne uma opção tecnológica bem mais cara do que o observado atualmente.

Duas questões importantes devem ser consideradas a partir do resultado acima: como a adoção dos carros híbridos diante de maiores custos de produção do etanol afetariam as emissões de gases de efeito estufa pelo país? Qual cenário traria menores custos para o país, o cenário de etanol mais barato ou o de adoção dos carros híbridos? A Tabela 14 procura responder a primeira questão, apresentando as emissões de gases de efeito estufa nos cenários BAU e Policy sob as diferentes hipóteses. Os resultados evidenciam que sob a hipótese de custos correntes do etanol, que previnem a penetração dos carros híbridos, as emissões totais de gases de efeito estufa são menores tanto no cenário de referência quanto no cenário de política ao longo de todo o horizonte analisado. Isso ocorre uma vez que o etanol já é uma tecnologia competitiva e é utilizado não apenas no setor de veículos de passeio das famílias, mas também em outros setores de transportes. O encarecimento deste combustível permitiria a adoção dos carros híbridos, porém, impediria o seu uso pelos demais setores da economia. É importante notar, contudo, que tanto em 2035 quanto em 2050 as reduções percentuais em emissões do setor de transporte das famílias tornam-se maiores quando da penetração dos carros híbridos, indicando que esta tecnologia possui um potencial de mitigação maior quando um horizonte de tempo bastante distante é considerado.

Tabela 13 – Participação (%) dos veículos por tipo de sistema de propulsão no total de novos veículos de passeio no Brasil sob a hipótese de custos de produção de etanol mais elevados.

		2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
BAU_Tec	Tradicional	100	100	100	100	98	95	90	85
	Híbridos				0	2	5	10	15
Policy_tec	Tradicional	100	100	100	98	94	89	83	76
	Híbridos			0	2	6	11	17	24
	Elétricos								0

Fonte: Resultados do modelo

Tabela 14 - Emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte domiciliar e no Brasil em Mton CO₂ Eq. nos cenários tecnológicos sob hipóteses alternativas de custo do etanol

Cenário	Setor	Etanol aos custos correntes				Custos mais elevados do Etanol (Penetração dos carros híbridos)			
		2010	2020	2035	2050	2010	2020	2035	2050
BAU_Tec	Transporte	56	80	96	113	75	112	147	162
	Total	1898	1929	2305	2721	1924	2078	2447	2884
Policy_Tec	Transporte	56	79	93	106	75	112	140	140
	Total	1898	1469	1215	1080	1924	1575	1328	1179
Redução %	Transporte	0	-2	-3	-6	0	0	-5	-13
	Total	0	-24	-47	-60	0	-24	-46	-59

Fonte: Resultados da pesquisa.

Na Tabela 15 apresentam-se as variações percentuais no PIB brasileiro sob as duas hipóteses consideradas de custo do etanol. Os resultados indicam que a disponibilidade do etanol a custos compatíveis com os observados atualmente permitem menores impactos das políticas climáticas no PIB brasileiro pelo menos até o ano de 2040. Nos dois últimos períodos do horizonte temporal considerado, a penetração dos carros híbridos reverte esse resultado, tornando a política climática mais onerosa na situação em que o etanol mais barato impede a penetração desses veículos avançados. Esse resultado reforça o discutido anteriormente, de que existe um potencial de contribuição dos veículos híbridos para mitigação das mudanças climáticas, porém, bastante distante temporalmente dados os custos dessas tecnologias. Deve-se ainda observar que as quedas em PIB a partir de 2045 nos cenários simulados, apesar de mais intensas quando os veículos híbridos não se desenvolvem, estão associadas a maiores volumes totais de emissões de gases de efeito estufa (vide Tabela 14). Esse resultado sugere cautela na atribuição de um papel muito importante aos veículos híbridos na mitigação das mudanças climáticas no longo prazo, uma vez que o horizonte temporal embute maiores incertezas e os cenários aqui simulados ainda consideram que esses veículos possuem custos mais baixos do que os atualmente previstos no desenvolvimento e aquisição desses veículos.

Esses resultados sugerem que a adoção dos carros híbridos e elétricos no país se tornaria viável apenas diante de uma forte redução nos custos desses veículos, e que o potencial de redução de emissões no setor de transporte urbano é maior pelo uso do etanol no curto e médio prazos. Em relação a políticas públicas, os resultados não suportam a adoção explícita de incentivos (como subsídios) à aquisição destes veículos pelo consumidor, uma vez que são uma opção menos custo efetiva de redução de emissões diante da disponibilidade do etanol de cana-de-açúcar. Políticas mais adequadas estariam relacionadas à pesquisa e inovação para reduzir os custos de produção e aquisição desses veículos.

Tabela 15 – Variações percentuais no PIB no cenário de política em relação ao cenário BAU sob hipóteses alternativas de custo do etanol

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Etanol aos custos correntes	0.00	-0.07	-0.09	-0.25	-0.71	-1.33	-2.20	-3.00	-3.88
Custos mais elevados do etanol (penetração dos carros híbridos)	0.00	-0.08	-0.23	-0.34	-0.72	-1.37	-2.22	-2.88	-3.66

Fonte: Resultados da pesquisa.

2.3.4 Agricultura de Baixo Carbono

A representação explícita das diferentes possibilidades de mitigação previstas no Plano de Agricultura de Baixo Carbono (Plano ABC) e no Programa ABC é um desafio no modelo EPPA, devido às especificidades tecnológicas previstas nessas políticas, de difícil representação no modelo EPPA diante da agregação setorial de apenas dois grandes setores agropecuários, o de culturas e o de pecuária.

O Plano e Programa ABC pretendem, para o horizonte de 2010 a 2020, atingirem a recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas, a ampliação da integração lavoura pecuária em 4 milhões de hectares, o aumento na área com plantio direto de qualidade em 8 milhões de hectares, e a expansão das áreas que fazem uso da fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares. Espera-se que essas medidas, que fazem parte dos “NAMAs” apresentados pelo Governo Brasileiro em Copenhague, em dezembro de 2009, reduzam as emissões anuais de CO₂-equivalente em, respectivamente, 83 a 104 milhões de toneladas, 18 a 22 milhões de toneladas, 16 a 20 milhões de toneladas e 16 a 20 milhões de toneladas.

Essas opções tecnológicas podem ser representadas no modelo EPPA considerando-se os investimentos em capital e outros fatores produtivos necessários para reduzir determinado volume de emissões e os custos associados a esses investimentos. Essas informações permitiriam a calibragem das elasticidades das árvores tecnológicas de produção de culturas e de pecuária de forma a obter curvas de custo marginal de abatimento compatíveis com os dados de custos das tecnologias de baixo carbono e seus potenciais de mitigação de emissões. A maior limitação para tal calibragem, contudo, é a escassez de informações sobre as necessidades de investimentos para adoção dessas tecnologias e potenciais reduções em emissões que os mesmos proporcionariam.

O estudo *Brazil Low-Carbon Country Case Study* (GOUVELLO, 2010) estimou curvas de custo marginal de abatimento para diversas opções de estratégias e tecnologias de redução de emissões. As tecnologias consideradas naquele estudo relacionadas à agropecuária, seu potencial anual de redução de emissões e o preço do carbono capaz de induzir a sua adoção são apresentados na Tabela 16.

A Tabela 16 não apresenta informações sobre todas as tecnologias previstas no Plano ABC, além de que o estudo sugere cautela no uso dos números, devido ao elevado grau de incerteza nas mensurações. Contudo, na ausência de informações, esses são os únicos parâmetros disponíveis para incorporar a agricultura de baixo carbono no modelo EPPA. Dessa forma, o modelo foi calibrado de forma a refletir algumas das tecnologias da Tabela 16, gerando as curvas marginais de abatimento da Figura 8. Essas curvas representam o nível anual de redução em emissões esperado (em valores absolutos ou em percentual) de acordo com o preço do carbono em vigor.

Tabela 16 – Redução anual em emissões entre 2010 e 2030 e preço do carbono para induzir a adoção de tecnologias de redução de emissões.

	Redução em Emissões		Preço Carbono
	%	Mt CO2 eq	U\$/ton CO2 Eq.
Cogeração	1	7,9	8
Etanol substituindo Gasolina (uso doméstico)	2	8,8	24
Redução do desmatamento + intensificação pecuária	53	302,05	6
Aumento do plantio direto	3	17,75	0,5
Exportações de etanol substituindo a gasolina	6	33,35	48
Reflorestamento	10	54,25	12

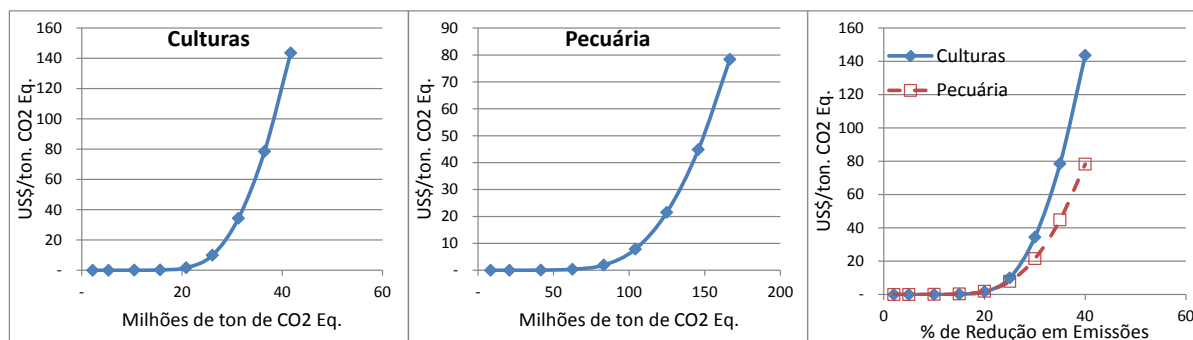
Fonte: Gouvello (2010).

Para o setor de culturas, a calibragem do modelo EPPA permite representar o potencial de redução de 16 Mton de CO₂ Eq. a um preço de carbono de R\$0,25, o que caracteriza a contento o crescimento do uso do plantio direto na Tabela 16. Já para o setor de pecuária, a Figura 8 indica a redução de 104 Mton de CO₂ Eq. ao preço de carbono de R\$7,85. Como o estudo de Gouvello (2010) não separa a redução do desmatamento da intensificação de pastagens, não há como fazer comparações precisas daquele estudo com a calibragem do modelo EPPA.

Ainda, para uma representação mais adequada do Plano e Programa ABC, faz-se necessário simular no modelo EPPA o aporte de recursos previstos para a adoção das tecnologias de baixo carbono. O Programa ABC prevê financiamentos com taxas de juros de 5% ao ano e até US\$1 milhão por tomador para a adoção das tecnologias e práticas previstas no Plano ABC. Essa política pode ser representada no modelo EPPA na forma de um subsídio ao uso do fator capital, dado pela diferença entre a taxa de juros do programa e a taxa de referência da economia ou do setor (taxa Selic ou taxa média de outros financiamentos agropecuários).

A partir dessas considerações, buscou-se simular novamente o cenário Policy, só que agora com a representação das tecnologias de baixo carbono no modelo como nas curvas marginais de abatimento da Figura 8 e com o incentivo à adoção dessas tecnologias, na forma de subsídios ao uso do capital na agricultura. Esse cenário foi chamado de Policy_Tec.

Figura 8 – Curvas de custo marginal de abatimento geradas pelo modelo EPPA para representar as tecnologias da agricultura de baixo carbono no Brasil



Os resultados desse cenário para algumas variáveis são apresentados a seguir, comparando-os, quando pertinente, aos resultados encontrados anteriormente. A Figura 9 Apresenta os resultados de mudanças no valor da produção dos setores de Culturas (CROP) e Pecuária (LIVE) nos cenários Policy e Policy_Tec. Considerando que o corte em emissões é o mesmo nos dois cenários, a representação das tecnologias de baixo carbono e do Programa ABC no modelo EPPA reduzem os impactos negativos da política climática brasileira. O setor de culturas experimenta resultados mais favoráveis, com aumentos na produção nos anos de 2020 e 2035, e queda de apenas 3% na produção em 2050 no cenário Policy_Tec, bem inferior à queda de mais de 10% no cenário Policy. Já o setor de pecuária continua sofrendo perdas em todos os anos, porém, menos expressivas que no Cenário Policy. Esses resultados indicam que a calibragem da curva de custo marginal de abatimento do modelo EPPA no cenário Policy_Tec permitem menores custos na mitigação das emissões do que a formulação original do modelo, bem como os recursos do Programa ABC amenizam os custos de se adotar tecnologias de baixo carbono para os produtores, impedindo assim perdas expressivas na produção e na competitividade dos setores agropecuários. Contudo, o setor da pecuária tem maior dificuldade em manter a produção, mesmo com os recursos do Programa ABC, perdendo competitividade em relação ao setor de culturas.

Deve-se ressaltar que as mudanças no valor da produção são calculadas em relação à produção no Cenário de Referência (BAU). A Tabela 17 apresenta as taxas de crescimento da produção nos setores de culturas e pecuária em diferentes cenários. Essas taxas confirmam que o cenário de tecnologias de baixas emissões na agricultura brasileira permite taxas de crescimento na produção mais próximas daquelas observadas no cenário de referência.

Um aspecto importante do Programa ABC é o volume de recursos necessários para induzir o agricultor a adotar as tecnologias de baixas emissões. A Tabela 18 apresenta os montantes de recursos que seriam tomados pelos agricultores para atingir as metas de cortes em emissões simuladas. Os valores necessários seriam de cerca de US\$ 0,54 bilhões em 2015 e US\$ 0,6 bilhões em 2020, o que são montantes compatíveis com o disponibilizado pelo governo atualmente no Programa ABC. O setor de culturas sempre toma mais recursos que o de pecuária, por ter um valor de produção

mais expressivo. Ainda, isso reflete a maior competitividade que o cenário tecnológico traz para esse setor, sugerindo que as taxas de juros do programa ABC para mitigação de emissões na pecuária deveriam ser menores se fosse objetivo do programa distribuir recursos de forma mais equitativa entre os dois setores ou evitar perdas maiores na pecuária. Contudo, a aplicação de taxas de juros diferentes entre os setores tenderia a diminuir a eficiência do programa ABC, por discriminar o setor com maior capacidade de abatimento de emissões.

Figura 9 – Variações na produção brasileira (%) dos setores agropecuários nos cenários Policy e Policy_Tec

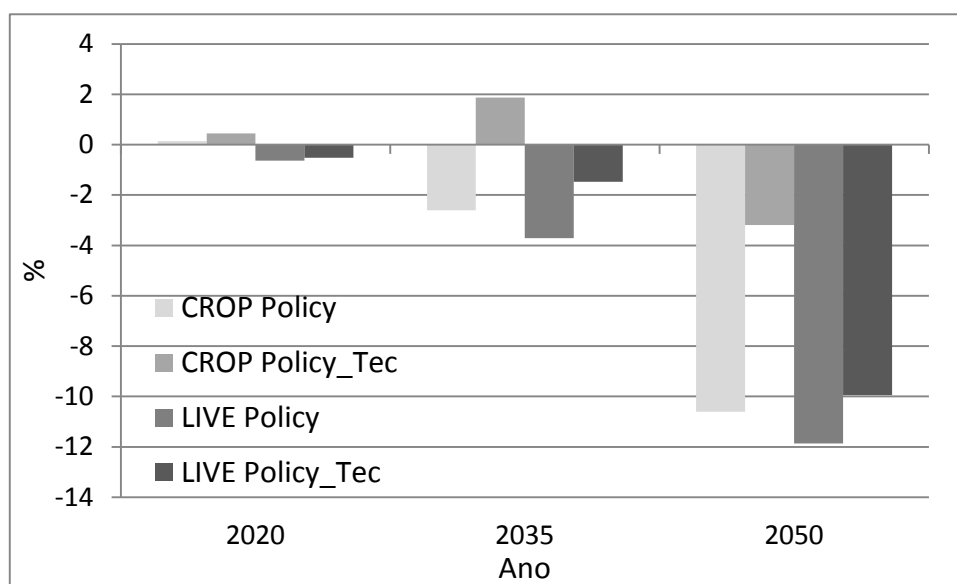


Tabela 17 – Taxas de crescimento (%) da produção dos setores agropecuários em relação ao ano de 2010

	2020			2035			2050		
	BAU	Policy	Policy_Tec	BAU	Policy	Policy_Tec	BAU	Policy	Policy_Tec
CROP	2.09	2.10	2.24	2.37	2.27	2.48	2.82	2.53	2.74
LIVE	2.48	2.42	2.46	2.53	2.38	2.49	2.57	2.25	2.31

Fonte: Resultados da pesquisa.

Tabela 18 – Montante de recursos do Programa ABC necessários para atingir os cortes em emissões do cenário Policy, em bilhões de US\$

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CROP	0.33	0.37	0.88	1.51	2.50	3.88	5.60	7.86
LIVE	0.21	0.23	0.54	0.96	1.53	2.24	3.13	4.24

Fonte: Resultados da pesquisa.

A introdução das tecnologias de baixo carbono no modelo e do Programa ABC no cenário Policy_Tec pouco alteram os resultados do PIB na política climática simulada. A Tabela 19 compara as variações do PIB nos cenários Policy e Policy_Tec em relação ao PIB do cenário de referência. A queda em PIB é geralmente menor quando da incorporação das tecnologias de baixo carbono na agricultura e do Programa ABC até o ano de 2035, quando então se torna mais elevada, reflexo do menor custo de mitigação na agropecuária, além de indicar que o subsídio do Programa ABC não é prejudicial à economia. Contudo, quando os cortes em emissões e o volume de recursos tomados através do Programa ABC se tornam mais expressivos a partir de 2040, as perdas em PIB são mais acentuadas.

Tabela 19 – Variações no PIB brasileiro nos cenários de políticas climáticas

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Policy	-0.08	-0.28	-0.42	-0.82	-1.36	-2.26	-3.11	-3.99
Policy_Tec	-0.05	-0.17	-0.42	-0.67	-1.24	-2.35	-3.11	-4.10

Fonte: Resultados da pesquisa.

3 Contribuição Do Brasil Para Mitigação Das Mudanças Climáticas

Os cenários simulados até o momento mostram que o país possui grande potencial de contribuição para mitigação dos impactos negativos das mudanças climáticas pela redução nas emissões de gases de efeito estufa. De forma a verificar o custo associado aos cortes em emissões em diferentes setores da economia, os cortes em emissões do cenário Policy foram simulados novamente, porém, de forma a considerar a aplicação parcial da política restrita a alguns setores de cada vez. Dessa forma, seis cenários foram considerados: o cenário Policy original com reduções em emissões nos diversos setores da economia através de mercados setoriais de carbono e das provenientes do

desmatamento; um cenário de redução apenas das emissões de desmatamento (denominado LUC); cenário de redução apenas das emissões provenientes do uso de energia (Energia); redução apenas das emissões da agropecuária (Agropecuária); redução das emissões de todos os setores como no cenário Policy, porém, sem redução das emissões do desmatamento (Sem LUC); e redução das emissões de todos os setores através de um mercado amplo de carbono no país, porém, sem redução das emissões do desmatamento.

A Figura 10 apresenta as reduções em emissões em cada cenário, em Milhões de Ton. de CO₂ Eq. Essas reduções seguem os cortes setoriais descritos na Tabela 4. Como previsto na Política Nacional de Mudança do Clima, os cortes mais pronunciados devem-se ao controle das emissões do desmatamento, enquanto os setores da agropecuária e o consumo de energia contribuem com menores parcelas. Contudo, a partir de 2035 as possibilidades de reduções de emissões de mudanças no uso da terra praticamente se esgotam, e a participação dos setores da agropecuária e do uso de energia no controle de emissões se intensificam.

A Figura 11 apresenta as quedas percentuais no PIB brasileiro em relação ao PIB do cenário de referência BAU, a partir da aplicação desses diferentes cortes em emissões. Os resultados sugerem que o controle de emissões de mudanças no uso da terra (cenário LUC) é bem mais vantajoso em termos de custo econômico e de potencial de redução em emissões, seguido das reduções em emissões dos setores agropecuários. Os cortes nas emissões provenientes do uso de energia são os mais onerosos. Contudo, se um mercado amplo de carbono for aplicado, as opções mais baratas de mitigação na agricultura contribuem para que os custos de redução de emissões provenientes do consumo energético sejam minimizados, alcançando menor nível de perda do produto na economia como um todo.

Dessa forma, a contenção das emissões provocadas pelo desmatamento e mudanças no uso da terra mostra-se como a opção de menor custo e de maior potencial de contribuição do país para ações de mitigação das mudanças climáticas. A grande disponibilidade de áreas desmatadas subutilizadas, incluindo pastagens de baixa produtividade, deve contribuir para que a redução do desmatamento não afete negativamente a expansão da produção agropecuária no país. Nesse sentido, a adoção de tecnologias de baixas emissões na agropecuária também mostra-se como uma importante via de contribuição para reduzir as mudanças climáticas. Contudo, deve-se atentar para os custos relativamente maiores de medidas setoriais associadas à transição para uma economia de baixo carbono em comparação a políticas de mercados amplos de créditos de emissões, uma vez que essas tendem a estimular a redução no consumo de energia, investimentos em aumento na eficiência e na substituição de insumos e fontes de energia emissora de forma mais eficiente, impedindo assim o risco de escolha de metas setoriais e tecnologias menos eficientes pelos formuladores de políticas.

Figura 10- Redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil em relação ao cenário de referência (BAU)

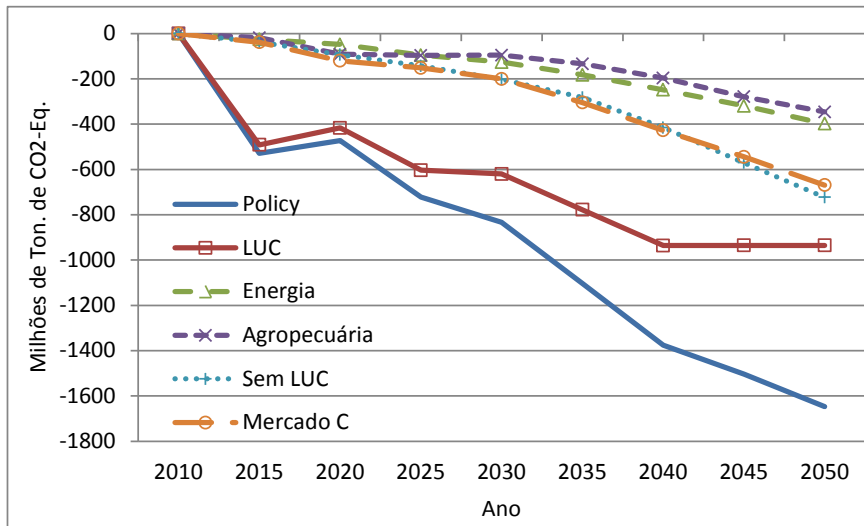
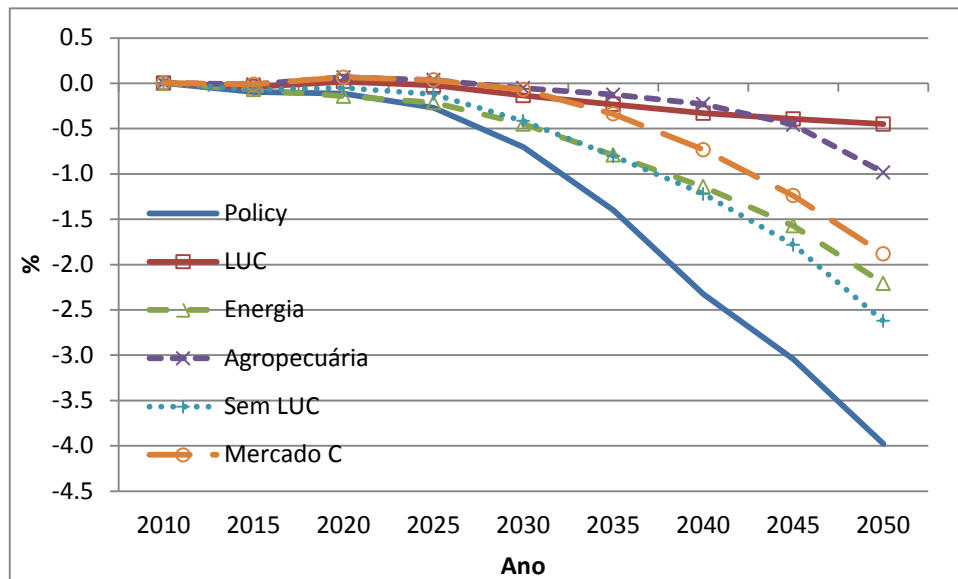


Figura 11 – Variações no PIB brasileiro em relação ao cenário de referência (BAU)



4 Conclusões

O presente estudo mensura os impactos da economia mundial de baixo carbono a partir da implementação de cenários de políticas climáticas capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e de cenários de mudanças tecnológicas de aumento na eficiência energética e redução no uso de insumos emissores de gases de efeito estufa. Diferentes cenários de políticas climáticas foram considerados, de forma a representar as discussões internacionais sobre

o tema. Tais cenários consideram: a adoção de políticas climáticas pelos países desenvolvidos e alguns países em desenvolvimento que se comprometeram com metas de cortes em emissões nos fóruns internacionais (Rússia, Brasil, México, Coreia do Sul e Indonésia) (cenário Policy); a adoção de políticas climáticas pelos mesmos países, porém com a cobrança de tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos contra importações de países sem políticas de reduções em emissões (cenário Policy_BCA); adoção de políticas climáticas pelos mesmos países com cobrança de tarifas compensatórias de carbono, porém sem a participação do Brasil (cenário Policy_BCA_noBRA); e adoção de política climática global, com participação de todos os países em um mercado único de carbono (cenário Policy_Global).

Os cenários simulados mostram que as discussões internacionais vão em direção a maiores esforços de reduções em emissões pelos países desenvolvidos, considerando a contribuição histórica mais expressiva destes para os atuais níveis de concentrações de gases de efeito estufa. Contudo, os resultados encontrados sugerem que o atual nível de comprometimento dos diferentes países com cortes em emissões é insuficiente para estabilizar o fluxo de emissões em patamares considerados seguros pela comunidade científica, que evitem um aumento na temperatura média terrestre inferior a 2º C. A aplicação de tarifas compensatórias de carbono pelos países desenvolvidos não evita os vazamentos em emissões nem a perda de competitividade pelos países que as adotarem, revelando que este instrumento tem baixa capacidade de atingir seus objetivos. A adoção da política climática de alcance global permite reduzir os custos de mitigação nos países desenvolvidos através do comércio de créditos de carbono, bem como atingir um nível estacionário de emissões de cerca de 60 bilhões de toneladas de CO₂-Eq. Os países em desenvolvimento que ainda não se comprometeram com reduções em emissões seriam justamente os que se tornariam ofertadores líquidos de créditos de carbono.

A política climática brasileira prevê cortes em emissões diferenciados entre agropecuária, mudanças no uso da terra, siderurgia e uso de energia. Os cortes mais intensos estão associados à redução do desmatamento, sendo este componente o mais importante na composição das emissões brasileiras. A aplicação desses cortes produz poucos impactos na economia brasileira no ano de 2020, com ligeira queda de 0,3% do PIB em relação ao que seria observado no cenário de referência sem a política. Contudo, a intensificação da política gera perdas crescentes, que chegam a 4% do PIB em 2050. Esses custos, elevados em comparação aos estimados para os países desenvolvidos, devem-se em parte à aplicação da política com metas setoriais diferenciadas de redução em emissões, com créditos de carbono não comercializáveis entre setores. Tal política não permite que aqueles setores com menores custos de mitigação respondam por maiores cortes em emissões. Dessa forma, as perdas em PIB são relativamente elevadas devido ao menor custo-efetividade da política setorial considerada. As perdas econômicas representam custos associados à transição para uma economia de baixo carbono, como pagamentos de impostos ao carbono, redução no consumo de energia, investimentos em aumento na eficiência e na substituição de insumos e fontes de energia emissora por outros mais limpos ou renováveis. Esses resultados não consideram os benefícios associados ao controle das emissões, de redução nos danos e prejuízos que seriam causados pelas mudanças climáticas.

Se o Brasil não aplicar políticas climáticas, mas estiver sujeito às tarifas compensatórias de carbono, as perdas em bem-estar são inferiores a 0,5%, provenientes da incidência das tarifas compensatórias e da desaceleração da economia dos países desenvolvidos. Já um cenário de política climática global permite que os países comercializem créditos de carbono, e assim, diminuam os custos dos cortes em emissões, o que reduz as perdas em PIB para o Brasil a valores percentuais inferiores a 1,7%, menos da metade das perdas em PIB observadas nos cenários de aplicação de políticas setoriais pelo Brasil.

Os resultados setoriais sobre a produção, exportações e importações revelam mudanças importantes na competitividade relativa dos setores. As mudanças na produção dos diferentes setores são pouco expressivas no ano de 2020 em todos os cenários simulados, o que reflete que os cortes em emissões implementados naquele ano afetam pouco os custos de produção dos setores, seja pelo nível modesto de corte em emissões, seja pela capacidade dos setores de adotarem tecnologias e fontes energéticas de menores emissões.

Os setores de energia fóssil são os maiores prejudicados com as políticas climáticas, com destaque para a queda na produção de gás natural, carvão e de refino de petróleo. Os setores agropecuários, a indústria de alimentos, a indústria intensiva em energia e o setor de transportes também são impactados negativamente, principalmente no ano de 2050, enquanto os setores de outras indústrias e de serviços quase não sofrem perdas. Esses resultados são consequência das diferentes capacidades dos diversos setores em reduzir emissões via adoção de tecnologias de baixas emissões, aumento na eficiência energética, e substituição de fontes de energia fóssil por fontes renováveis ou limpas. Setores com custos mais elevados para reduzir emissões acabam perdendo fatores produtivos para os setores com maior capacidade de adaptação à economia de baixo carbono, alterando a estrutura de produção da economia. Os resultados obtidos para o ano de 2020 são pouco expressivos e modestos, não representando grandes mudanças ou desafios à economia. Já para o ano de 2035 e 2050 os impactos são consideráveis em alguns setores, e indicam mudanças importantes na competitividade relativa setorial e estrutura produtiva da economia.

Dentre os cenários simulados, o que apresenta resultados mais favoráveis ou menos prejudiciais à economia como um todo e para produção setorial em geral, é aquele em que o Brasil não adota políticas climáticas, enquanto os países desenvolvidos reduzem emissões e cobram tarifas compensatórias às importações baseadas nas emissões de cada bem. Esse resultado é consequência dos menores custos que a economia sofreria ao ter que enfrentar barreiras baseadas em carbono às suas exportações, que contribuem relativamente pouco para a produção da maioria dos setores e para o PIB do país, em comparação com os custos de ter que reduzir diretamente as emissões nos diferentes setores. Contudo, esse resultado não deve ser interpretado como um desestímulo à busca por uma economia de baixo carbono, uma vez que as consequências negativas do aumento nas concentrações de gases de efeito estufa são desconsideradas no presente estudo e têm sido apontadas pela comunidade científica mundial como certas e potencialmente elevadas.

Assim, os resultados indicam que a implementação de um mercado mundial amplo de carbono permite que uma economia de baixo carbono seja estabelecida a menores custos, já que as responsabilidades de cortes em emissões são melhores distribuídas de acordo com os custos de mitigação de cada setor, permitindo maiores cortes em emissões naqueles setores com menores custos. Dessa forma, as metas nacionais de reduções em emissões devem ser acompanhadas de intensa atividade diplomática nos fóruns internacionais para adesão ampla de outros países em desenvolvimento aos esforços de redução em emissões e maiores comprometimentos pelos países desenvolvidos. Ainda, arranjos e esquemas que permitam o aproveitamento das oportunidades mais baratas de mitigação, como os mercados de carbono internacionais, mecanismos de desenvolvimento limpo e outros instrumentos de cooperação multilateral e multiregional, devem ser buscados nesses fóruns.

Por fim, foram implementados cenários considerando trajetórias tecnológicas apontadas nos relatórios setoriais. As hipóteses consideradas nesses cenários incluem: menor custo de implantação de usinas de geração de energia elétrica com captura e sequestro de carbono; menor custo de desenvolvimento e adoção de veículos híbridos e Plug-in; possibilidade de uso de biocombustíveis no transporte aéreo e rodoviário de carga; maior substituição da gasolina por biocombustível importado nos países desenvolvidos; desenvolvimento do etanol de segunda geração no Brasil a partir do uso do bagaço da cana-de-açúcar; cenários de tecnologias de baixo carbono na agropecuária brasileira. Nos demais setores não foram considerados hipóteses adicionais. Vale lembrar que o modelo EPPA já representa vários aspectos de futuras trajetórias tecnológicas apontadas nos estudos setoriais, como por exemplo, o aumento da eficiência no uso de energia nos setores intensivos em energia.

Os resultados dos cenários tecnológicos foram comparados com os dos cenários originais, e revelam que, para o Brasil, as hipóteses tecnológicas praticamente não afetam os resultados agregados em termos de emissões e os custos das políticas climáticas em termos de PIB e em bem-estar. Isto ocorre uma vez que a principal mudança provocada pelos cenários tecnológicos recai sobre o setor de biocombustível, que apresenta um forte incremento em produção e produtividade. Esse aumento em produção é destinado principalmente para exportações e para o uso em outros setores de transportes, o que acaba afetando os resultados dos setores de produção e refino do petróleo e de transportes. Contudo, a disponibilidade do etanol de cana-de-açúcar a custos competitivos com a gasolina no país impede a adoção dos veículos híbridos, que nada contribuem para mitigar os custos das políticas climáticas no país. Apenas sob hipóteses de custos de produção do etanol 100% superiores aos custos correntes os veículos híbridos penetrariam em volume considerável na frota nacional. Ainda, não se observa o desenvolvimento das tecnologias de geração de eletricidade com captura e sequestro de carbono no país, o que significa que as mesmas não se tornam competitivas mesmo na presença de uma política climática doméstica.

A introdução das tecnologias de baixo carbono na agricultura e do Programa ABC permite menores quedas em PIB no cenário de política climática, o que reflete o menor custo de mitigação para a agropecuária, além de indicar que o subsídio de taxa de juros deste programa não é prejudicial à economia. Esse resultado sugere que o Plano e o Programa ABC são importantes instrumentos de redução em emissões para o país.

Referências Bibliográficas

- BABIKER, M. H.; ECKAUS, R. S. Unemployment effects of climate policy. *Environmental Science and Policy*, New York, v. 10, n. 7-8, p. 600-609, 2007.
- BABIKER, M.; GURGEL, A.; PALTSEV, S.; REILLY, J. *The forward-looking version of the MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) model*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2008. Report n. 161. Disponível em: <http://web.mit.edu/globalchange/www/MITJPSPGC_Rpt161.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2009.
- BABIKER, M.; METCALF, G.; REILLY, J. Tax distortions and global climate policy. *Journal of Economic and Environmental Management*, Maryland Heights, v. 46, n. 2, p. 269-287, 2003.
- BABIKER, M.; REILLY, J.; JACOBY, H. The Kyoto Protocol and developing countries. *The Energy Policy*, Oxford, v. 28, n. 8, p. 525-536, 2000.
- BERNARD, A.; PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; VIELLE, M.; VIRGUIER, L. *Russia's role in the Kyoto Protocol*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2003. Report n. 98. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=670>. Acesso em: 25 ago. 2006.
- BERNSTEIN, P. M.; MONTGOMERY, W. D.; RUTHERFORD, T. F. Effects of restriction on international permit trading: the MS-MRT model. *The Energy Journal*, Wellington, n. esp., p. 221-256, 1999.
- BOSETTI, V.; CARRARO, C.; GALEOTTI, M.; MASSETTI, E.; TAVONI, M. A world induced technical change hybrid model. *The Energy Journal*, Wellington, v. 26, n. esp., p. 13-37, 2006.
- BOSETTI, V.; TAVONI, M. Uncertain R&D, backstop technology and GHGs stabilization. *Energy Economics*, Amsterdam, v. 31, p. S18-S26, 2009. Suplemento 1.
- BRANNLUND, R.; GREN, I. M. (Eds.). *Green taxes: economic theory and empirical evidence from scandinavia*. Cheltenham: Edward Elgar, 1999.
- BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. *Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Informações Gerais e Valores Preliminares*. 2009.
- BROOKE, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A; RAMAN, R. *GAMS: a user's guide*. Washington: GAMS Development Corporation, 1998. 262 p.
- BURNIAUX, J. M.; TRUONG, P. T. *GTAP-E: an energy-environmental version of the GTAP model*. Center for Global Trade and Analysis. Purdue, 2002. Technical Paper n. 16. Disponível em: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/resources/res_display.asp?RecordID=923>. Acesso em: 03 ago. 2008.
- CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS. Disponível em: <http://www.pewclimate.org/policy_center/international_policy>. Acesso em: 13 dez. 2011.
- COSSA, P. *Uncertainty analysis of the cost of climate policies*. 2004. Thesis (Master of Science) - Technology and Policy Program, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.
- COYLE, W. The future of biofuels: a global perspective. *Amber Waves*, Washington, v. 5, n. 5, p. 24-29, 2007. Disponível em: <<http://www.ers.usda.gov/AmberWaves/November07/Features/Biofuels.htm>>. Acesso em: 7 mar. 2008.
- DIMARANAN, B.; MCDUGALL, R. *Global trade, assistance, and production: the GTAP 5 Data Base*. West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2002.

- DOUGHERTY, K. Quebec the first to announce carbon tax. *Canada National Post*, Ontario, 7 jun. 2007. p. A1.
- EDMONDS, J.; PITCHER, H.; ROSENBERG, N.; WIGLEY, T. Design for the global change assessment model. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON INTEGRATIVE ASSESSMENT OF MITIGATION, IMPACTS AND ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE. *Proceeding ...* Laxenburg, Austria: IIASA, 1994.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balanco Energético Nacional 2010: Ano Base 2009*. Rio de Janeiro: EPE, 2010. 276 p.
- EUROPEAN COMMUNITY. Directive 2003/87/EC of the european parliament and of the council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the community and amending Council Directive 96/61/EC. *Official Journal*, L 275, p. 32–45, 25 October 2003.
- EUROPEAN COMMISSION. *Communication from the commission to the council and the european parliament: the share of renewable energy in EU*. Brussels, Belgium, 2004. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/res/legislation/country_profiles/com_2004_366_en.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2008.
- EUROPEAN COMMISSION. *Impact assessment, commission staff working document, sustainable power generation from fossil fuels: aiming for near-zero emissions from coal after 2020*. Brussels, Belgium, 2007. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/energy_policy/doc/16_communication_fossil_fuels_en.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2008.
- EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY. *Application of the emissions trading irective by EU Member States*. Copenhagen, Denmark, 2006. European Environmental Agency Technical Report, N. 2/2006.
- FEIJÓ, F. F.; PORTO JÚNIOR, S. S. Protocolo de Quioto e o bem-estar econômico no Brasil: uma análise utilizando equilíbrio geral computável. *Análise Econômica*, João Pessoa, v. 27, n. 51, p. 127-154, 2009.
- FERREIRA FILHO, J. B. S.; ROCHA, M. T. Avaliação econômica de políticas públicas visando redução das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 45., 2007, Londrina. *Anais ...* Londrina: SOBER, 2007.
- FOWLIE, J.; ANDERSON, F. B. C. Introduces carbon tax. *The Vancouver Sun*, Vancouver, Feb. 19 2008.
- GOULDER, L. H. Effects of carbon taxes in an economy with prior tax distortions: an intertemporal general equilibrium analysis. *Journal of Economic and Environmental Management*, Maryland Heights, v. 29, n. 3, p. 271-297, 1995.
- GOUVELLO, C. Brazil Low-Carbon Country Case Study. The World Bank Group, 2010. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILEXTN/Resources/Brazil_LowcarbonStudy.pdf>. Acesso em: 3 out. 2012.
- GURGEL, A. C.; REILLY, J. M.; PALTSEV, S. Potential land use implications of a global biofuels industry. *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, Berkeley, v. 5, n. esp, 2007.
- HERTEL, T. *Global trade analysis: modeling and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- HERTEL, T. W.; GOLUB, A. A.; JONES, A. D.; O'HARE, M.; PLEVIN, R. J.; KAMMEN, D. M. Effects of US maize ethanol on global land use and greenhouse gas emissions: estimating market-mediated responses. *BioScience*, Berkeley, v. 60, n. 3, p. 223-231, 2010.
- HOLLOWAY, S.; BENTHAM, M.; KIRK, K. Underground storage of carbon dioxide. In: SHACKLEY, S.; GOUGH, C. (Eds.). *Carbon capture and its storage: an integrated assessment*. Aldershot: Ashgate, 2006. p. 15-42.
- HURTT, G. C., FROLKING, S., FEARON, M. G., MOORE, B., SHEVLIAKOVAS, E., MALYSHEV, S., PACALA, S. W., HOUGHTON, R. A. The underpinnings of land-use history: three centuries of global gridded land-use transitions, wood-harvest activity, and resulting secondary lands. *Global Change Biology*, v. 12, p. 1208-1229, 2006.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Censo Agropecuário 2006*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/default.shtm>>. Acesso em: 01 junho 2009.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Renewable energy policy in IEA countries*. Paris: OECD/IEA, 1997. Country reports, v. 2.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *World energy outlook: 2004*. Paris: OECD/IEA, 2004.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Energy balances of non-OECD countries: 2005 edition*. Paris: OECD/IEA, 2005.
- JACOBY, H. D.; BABIKER, M. H.; PALTSEV, S.; REILLY, J. M. Sharing the burden of GHG reductions. In: ALDY, J.; STAVINS, R. (Eds.). *Post-Kyoto International climate policy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. p. 753 -785.
- JACOBY, H. D.; ECKHAUS, R. S.; ELLERMAN, A. D.; PRINN, R. G.; REINER, D. M.; YANG, Z. CO₂ emissions limits: economic adjustments and the distribution of burdens. *The Energy Journal*, Wellington, v. 18, n. 3, p. 31-58, 1997.
- JORGENSEN, D. W.; GOETTLE R. J.; WILCOXEN, P. J.; SING HO, M. The economic costs of a market-based climate policy. *The pew center on global climate change*. White Paper, Apr. 2008. Disponível em: <<http://www.pewclimate.org/docUploads/economic-costs-market-based-climate-policy.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2009.
- KARPLUS, V. J.; PALTSEV, S.; BABIKER, M.; HEYWOOD, J.; REILLY, J. M. Applying engineering and fleet detail to represent passenger vehicle transport in a computable general equilibrium model. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2012. Report n. 216. Disponível em: <<http://globalchange.mit.edu/research/publications/2270>>. Acesso em: 30 jul. 2012.
- KASAHARA, S.; PALTSEV, S.; REILLY, J.; JACOBY, H.; ELLERMAN, A. D. Climate change taxes and energy efficiency in Japan. *Environmental and Resource Economics*, Dordrecht, v. 37, n. 2, p. 377-410, 2007.
- LAHIRI, S.; BABIKER, M.; ECKHAUS, R. S. *The effects of changing consumption patterns on the costs of emission restrictions*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2000. Report n. 64. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=636>. Acesso em: 27 maio 2006.
- LIMA, E. M. C. *Impactos de políticas climáticas internacionais sobre a economia brasileira*. 2011. 151p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2011.
- LOPES, R. L. *Efeitos de uma restrição na emissão de CO₂ na economia brasileira*. 2003. 170p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- MANNE, A.; RICHELIS, R. The greenhouse debate: economic efficiency, burden sharing and hedging strategies. *The Energy Journal*, Wellington, v. 16, n. 4, p. 1-37, 1995.
- MANNE, A. S.; RICHELIS, R. G. *The role of non-CO₂ greenhouse gases and carbon sinks in meeting climate objectives*. Stanford University, 2004. Disponível em: <<http://www.stanford.edu/group/MERGE/EMF21.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2007.
- MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. (Eds). *Economia da mudança do clima no Brasil: custos e oportunidades*. São Paulo: IBEP Gráfica, 2010. 82 p.
- MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. *The future of coal: options for a Carbon-Constrained World*. Cambridge: MIT, 2007. Disponível em: <http://web.mit.edu/coal/The_Future_of_Coal.pdf>. Acesso em: 9 set. 2008.
- MATHIESEN, L. Computation of economic equilibrium by a sequence of linear complementarity problems. *Mathematical Programming Study*, Heidelberg, v. 23, p. 144-162, 1985.
- MELILLO, J. M.; REILLY, J. M.; KICKLIGHTER, D. W.; GURGEL, A. C.; CRONIN, T. W.; PALTSEV, S.; FELZER, B. S.; WANG, X.; SOKOLOV, A. P.; SCHLOSSER, C. A. Indirect emissions from biofuels: how Important? *Science*, Washington, v. 326, p.1397-1399, 2009.

- METCALF, G. E.; PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; HOLAK, J. *Analysis of U.S. greenhouse gas tax proposals*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2008. Report n. 160. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=870>. Acesso em: 2 fev. 2009.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*: informações gerais e valores preliminares. 2009. Disponível em: <http://oc.org.br/cms/arquivos/inventa%20a1rio_emissa%20b5es_gee-valores_preliminares-25-11-2009.pdf>. Acesso em 18 jul. 2010.
- NARAYANAN, B. G.; WALMSLEY, T. G. *Global trade, assistance, and production: the GTAP 7 data base*. West Lafayette: Center for Global Trade Analysis, Purdue University, 2008.
- NORDHAUS, W. D. An optimal transition path for controlling greenhouse gases. *Science*, Washington, v. 258, p.1315-1319, 1992.
- OLIVIER, J. G. J.; BERDOWSKI, J. J. M. Global emission sources and sinks. In: BERDOWSKI, J.; GUICHERIT, R.; HEIJ, B. J. (Ed.). *The climate system*. Lisse: Swets and Zeitlinger Publishers, 2001. p. 33-78.
- PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; ECKHAUS, R.S.; MCFARLAND, J.; SAROFIM, M.; ASADOORIAN, M.; BABIKER, M. *The MIT Emissions Prediction and Policy Analysis (EPPA) Model: version 4*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2005. Report n. 125. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=697>. Acesso em: 18 fev. 2006.
- PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; GURGEL, A.C.; METCALF, G. E.; SOKOLOV, A.P.; HOLAK, J. F. Assessment of US cap-and-trade proposals. *Climate Policy*, London, v. 8, p. 395-420, 2008.
- PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; MORRIS, J. F. *The cost of climate policy in the United States*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2009. Report n. 173. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=1965>. Acesso em: 26 jan. 2010.
- PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; TAY, K. H. *The cost of Kyoto protocol targets: the case of Japan*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2004. Report n. 112. Disponível em: <http://globalchange.mit.edu/pubs/abstract.php?publication_id=684>. Acesso em: 23 março 2006.
- POPP, D. ENTICE: endogenous backstop technology in the DICE model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management*, Maryland Heights, v. 48, n. 1, p. 742-768, 2004.
- POPP, D. ENTICE-BR: the effects of backstop technology R&D on climate policy models. *Energy Economics*, Amsterdam, v. 28, p. 188-222, 2006.
- PRINN, R. H. J.; JACOBY, H. D.; SOKOLOV, A. P.; WANG, C.; XIAO, X.; YANG, Z.; ECKHAUS, R. S.; STONE, P. H.; ELLERMAN, A. D.; MELILO, J. M.; FITZMAURICE, J.; KICKLIGHTER, D.; HOLIAN, G.; LIU, Y. Integrated global system model (IGSM) for climate policy assessment: feedbacks and sensitivity studies. *Climatic Change*, Dordrecht, v. 41, n. 3, p. 469-549, 1999.
- REILLY, J.; FUGLIE, K. Future yield growth in field crops: what evidence exists? *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v. 47, p. 275-290, 1998.
- REILLY, J.; PALTSEV, S. European greenhouse gas emissions trading: a system in transition. In: MIGUEL, C.; LABANDEIRA, X.; MANZANO, B. (Ed.). *Economic modelling of climate change and energy policies*. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2006. p. 45-64.

- REILLY, J.; PALTSEV, S.; FELZER, B.; WANG, X.; KICKLIGHTER, D.; MELILLO, J.; PRINN, R.; SAROFIM, M.; SOKOLOV, A.; WANG, C. Global economic effects of changes in crops, pasture, and forests due to changing climate, carbon dioxide, and ozone. *The Energy Policy*, Oxford, v. 35, p. 5370-5383, 2007.
- REILLY, J.M.; SAROFIM, M.; PALTSEV, S.; PRINN, E. The role of non-CO₂ greenhouse gases in climate policy: analysis using the MIT IGSM. *The Energy Journal*, Wellington, n. esp., p. 503-520, 2006.
- RICHELS, R. G.; MANNE, A. S.; WIGLEY, T. M. L. Moving beyond concentrations: the challenge of limiting temperature change. In: SCHLENSINGER, M. E. et al. *Human-induced climate change*. New York: Cambridge University Press, 2007. p. 387-401.
- ROCHA, M. T. *Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT*. 2003. 196 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- RUTHERFORD, T. F. Extension of GAMS for complementarity problems arising in applied economic analysis. *Journal of Economic Dynamics and Control*, Amsterdam, v. 19, n. 8, p. 1299-1324, 1995.
- RUTHERFORD, T. F. Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: an overview of the modeling framework and syntax. *Computational Economics*, New York, v. 14, p. 1-46, 1999a.
- SADOULET, E. ; DE JANVRY, A. *Quantitative development policy analysis*. Baltimore: The Johns Hopkins University, 1995. 397 p.
- SEABRA, J. E. A. Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa da cana. 2008. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - UNICAMP, Campinas, 2008.
- SEARCHINGER, T., HEIMLICH, R., HOUGHTON, R. A., DONG, F., ELOBEID, A., FABIOSA, J., TOKGOZ, S., HAYES, D., YU, T. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. *Science*, v. 319, p.1238-1240, 2008.
- SHOVEN, J. B.; WHALLEY, J. *Applying general equilibrium*. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 299 p.
- SILVA, J. G. *Impactos econômicos de políticas de mitigação das mudanças climáticas na economia brasileira: um estudo a partir de um modelo de equilíbrio geral computável*. 2010. 128p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2010.
- SOKOLOV, A.; SCHLOSSER, C. A.; DUTKIEWICZ, S.; PALTSEV, S.; KICKLIGHTER, D. W.; JACOBY, H. D.; PRINN, R. G.; FOREST, C. E.; REILLY, J.; WANG, C.; FELZER, B.; SAROFIM, M. C.; SCOTT, J.; STONE, P. H.; MELILLO, J. M.; COHEN, J. *The MIT integrated global system (IGSM) version 2: model description and baseline evaluation*. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change. Cambridge, 2005. Report n. 124. Disponível em: <http://web.mit.edu/global-change/www/MITJPSPGC_Rpt124.pdf>. Acesso em: 4 maio 2006.
- THE PEW CENTER ON GLOBAL CLIMATE CHANGE. The 10-50 solution: technologies and policies for a low-carbon future. *In Brief*, Arlington, n. 9, 2005. Disponível em: <<http://www.pewclimate.org/docUploads/10-50%20In-Brief.pdf>>. Acesso em: 22 mar. 2006.
- TOURINHO, O. A. F.; SEROA DA MOTTA, R.; ALVES, Y. L. B. *Uma aplicação ambiental de um modelo de equilíbrio geral*. Rio de Janeiro: IPEA, 2003. Texto para discussão n. 976. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/pub/td/2003/td_0976.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2006.
- UNITED NATIONS. *World population prospects: the 2000 revision*. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2001. 22 p. Disponível em: <<http://www.un.org/spanish/esa/population/wpp2000h.pdf>>. Acesso em: 9 mar. 2006.

- US CCSP. United States Climate Change Science Program. Synthesis and assessment product 2.1, part A: scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. In: CLARKE, L. et al. *U.S. climate change science program*. Washington: Department of Energy, 2007.
- US HOUSE OF REPRESENTATIVES. *Keep america competitive global warming policy act of 2006*. 109th Congress, 2nd Session, Washington, 2006a. Disponível em: <<http://thomas.loc.gov/cgi-bin/bdquery/z?d109:h.r.05049>>. Acesso em: 19 fev. 2007.
- US HOUSE OF REPRESENTATIVES. *Safe climate act of 2006*. 109th Congress, 2nd Session. Washington, 2006b. Disponível em: <<http://thomas.loc.gov/cgi-bin/bdquery/z?d109:h.r.05642>>. Acesso em: 19 fev. 2007.
- US NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *The effectiveness and impact of corporate average fuel economy (CAFÉ) standards*. Washington: National Academies Press, 2002.
- US SENATE. *Climate stewardship and innovation act of 2007*. 110th Congress, 1 st Session, Washington, 2007a. Disponível em: <<http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/z?c110:S.280>>. Acesso em: 7 fev. 2008.
- US SENATE. *Global warming pollution reduction act of 2007*. 110th Congress, 1st Session, Washington, 2007b. Disponível em: <<http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/z?c110:S.309>>. Acesso em: 7 fev. 2008.
- US SENATE. *Global warming reduction act of 2007*. 110th Congress, 1st Session, Washington, 2007c. Disponível em: <<http://thomas.loc.gov/cgi-bin/query/z?c110:S.485>>. Acesso em: 7 fev. 2008.
- VIRGUIER, L. L.; BABIKER, M. H.; REILLY, J. M. The cost of the Kyoto Protocol in the European Union. *The Energy Policy*, Oxford, v. 31, p. 459-481, 2003.
- WEBSTER, M. D.; BABIKER, M.; MAYER, M.; REILLY, J. M.; HARNISCH, J.; HYMAN, R.; SAROFIM, M. C.; WANG, C. Uncertainty in emissions projections for climate models. *Atmospheric Environment*, Oxford, v. 36, p. 3659-3670, 2002.

Análise das Rotas Tecnológicas a partir de Grupos Tecnológicos para Patentes Verdes

*Geciane Porto*¹
*Sérgio Kannebley Jr*²
*João Baroni*³

1 Professora Associada do departamento de Administração da FEARP/USP – geciane@usp.br

2 Professor Titular do departamento de Economia da FEARP/USP – skj@usp.br

3 Pesquisador do Ingtec – terrabaroni@gmail.com

Introdução

Há um debate corrente a respeito do impacto da atividade humana sobre os ativos ambientais e a sustentabilidade destas ações no longo prazo. A redução desse impacto deve ser obtida por meio de mudanças dos modos de produção e distribuição de mercadorias e serviços e dos hábitos de consumo. Sendo assim, a promoção do desenvolvimento econômico com sustentabilidade ambiental deve ser ancorada na mudança tecnológica, promovendo um aumento, em escala mundial, da produtividade total dos fatores.

Órgãos internacionais que defendem esta ideia, como a OCDE e a ONU, mantêm núcleos de pesquisas permanentes sobre políticas de inovação, avaliando casos de sucesso em todo o planeta e fazendo recomendações às instituições interessadas.

De acordo com a *Latin America Trade Network* (LATN, 2011), apesar de a preocupação ambiental ter ganhado destaque no Brasil a partir de fins 2009 – quando o país comprometeu-se voluntariamente a reduzir emissões de gases do efeito estufa – ainda não há uma agenda articulada de mitigação da mudança climática. Os esforços consistem em algumas linhas de financiamento, sobretudo pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Neste contexto de recursos limitados para investimentos em tecnologias verdes, tanto no Brasil quanto em outros países, é natural questionar quais destas tecnologias devem receber incentivos. Apesar da discussão entre formulação de políticas horizontais ou setoriais, ou ainda de estratégias do tipo “*pick the winners*”, é possível se argumentar que as diretrizes da política de inovação verde podem ser melhor orientadas se houver uma compreensão mais adequada das rotas tecnológicas mais proeminentes.

De forma integrada aos estudos setoriais, a pesquisa buscou contribuir para uma melhor compreensão das trajetórias tecnológicas possíveis de serem identificadas a partir de patentes verdes. Ou seja, o objetivo principal desta pesquisa é auxiliar na informação sobre tecnologias mais promissoras na mitigação da mudança climática complementarmente aos estudos setoriais conduzidos em todo projeto.

Para isso foi identificado um conjunto de rotas tecnológicas mais significativas, tanto para os grupos tecnológicos quanto para os setores. Destaca-se que em geral estas rotas envolveram um conjunto bastante específico e restrito de tecnologias protegidas por patentes, indicando, por outro lado, que há uma forte pulverização das tecnologias que foram desenvolvidas. Inclusive em ambas as análises (setores e grupos tecnológicos) observou-se um percentual muito elevado de patentes isoladas. Isto é, tecnologias que não provocaram outros desdobramentos e que desta forma pode-se supor que o seu impacto também tenha sido pontual.

A construção dessas rotas envolveu a seleção das tecnologias de interesse por parte dos pesquisadores setoriais, utilizando como base a classificação de patentes do *IPC Green Inventory*, elaborado na Conferência Internacional da Mudança Climática, a construção de uma base de dados de patentes verdes e aplicação da abordagem metodológica da matriz de impacto superlimite, propos-

ta por Kim et al (2011), para filtrar os grupos tecnológicos de maior impacto. Posteriormente a isso a identificação das tecnologias promissoras foi concluída observando redes de citação de patentes, utilizando a estatística SPLC (*search path link count*) proposta por Verspagen (2007) para o caso de redes mais densas; ou pela observação direta das patentes em redes menos densas seguindo as perspectivas de grupos tecnológicos e setores.

Além dessa introdução, este capítulo conta ainda com mais cinco seções. Na segunda seção é apresentada uma breve discussão sobre as patentes verdes, enquanto na seção seguinte são detalhados os aspectos metodológicos que nortearam o presente estudo. Nas terceira e quarta seções são apresentadas as análises das rotas tecnológicas sob as perspectivas dos grupos tecnológicos e dos setores econômicos, respectivamente. Na última seção são tecidas algumas considerações finais e as conclusões do estudo.

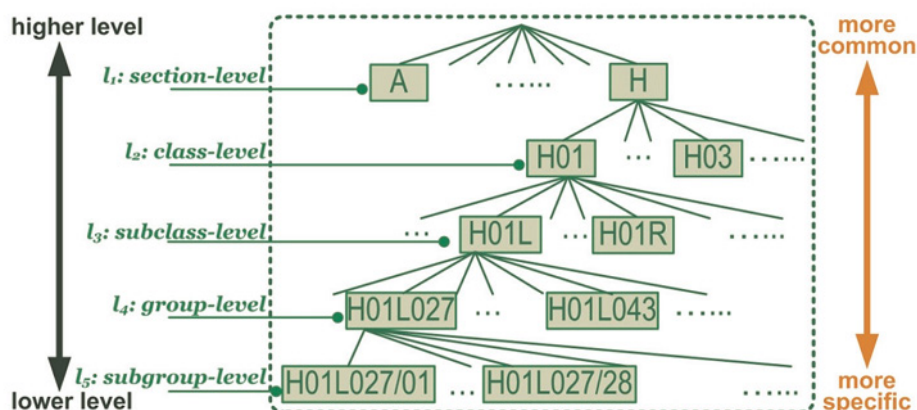
1. Patentes Verdes

As preocupações com questões ambientais fizeram com que instituições ligadas à propriedade intelectual elaborassem classificações específicas de patentes verdes. Entende-se por patente verde o documento patentário que descreve uma tecnologia capaz de atenuar a necessidade de recursos envolvidos no processo de produção e/ou que abranda a emissão de resíduos. Atualmente existem alguns sistemas de classificação de patentes verdes, como por exemplo, o Sistema Europeu de Classificação de Patentes (ECLA), que conta com as subclassificações das tecnologias de energia limpa, reformulado para melhor classificar as tecnologias verdes¹. Outro sistema de classificação de patentes, o *IPC Green Inventory*, foi desenvolvido por uma comissão de especialistas em sistemas de classificação de patentes a fim de facilitar as pesquisas de informações relativas às chamadas Tecnologias Ambientalmente Adequadas (*Environmentally Sound Technologies*), e ratificados na Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*). O sistema utilizado pela WIPO tem portanto, a vantagem de ter reconhecimento mundial.

De modo similar ao sistema de classificação internacional (IPC), que fornece uma estrutura hierárquica para classificação de patentes de acordo com as diferentes áreas tecnológicas, o *IPC-Green Inventory* também possui uma hierarquia de classificações tecnológicas, conforme apresentado na figura 1. No nível de seção estão as oito grandes classes de interesse dadas por: Necessidades humanas; Operações e transporte; Química e metalurgia; Têxteis e papel; Construções Fixas; Engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos; Física; e eletricidade. Essas classes são desagregadas em subclasses, grupos e em subgrupos, respectivamente.

¹ Essa nova classificação conta com as chamadas “Patents in Clean-Energy Technologies” (UNEP, EPO e ICTSD, 2010), que é uma classificação elaborada pelo Escritório Patentário da Comunidade Europeia, constituindo um sub-setor específico de tecnologias demitigação da mudança climática.

Figura 1 – Estrutura hierárquica dos códigos IPC



Fonte: Chen e Chiu (2012)

As buscas de patentes verdes foram realizadas ao nível de agregação de grupo e subgrupo, respectivamente l_4 e l_5 na figura 1. Isso significa que foram realizadas aos menores níveis de desagregação e, portanto, com maior grau de ajuste sobre o objetivo pretendido de apresentar tecnologias verdes, que deverão desempenhar um papel relevante em uma economia de baixo carbono².

O Gráfico 1 mostra a evolução no número de depósitos de patentes verdes nos escritórios de patentes nos Estados Unidos (USPTO) e Europa (EPO) no período de aproximadamente três décadas (1978 a 2007), de acordo com a classificação da ECLA para patentes verdes. Nota-se que o número total de patentes registradas nos escritórios cresceu de 20 mil em 1980 para mais de 120 mil no fim do período. Todavia, a proporção de patentes verdes depositadas ainda é relativamente baixa, com nenhuma das áreas tecnológicas alcançando 3% do total. De todo modo, em algumas áreas é nítida a tendência de aumento de participação no conjunto de tecnologias patenteadas. As principais áreas de crescimento em termos de depósitos de patentes ao longo dos anos foram: a) Geração de energia a partir de fontes renováveis e não-fósseis; b) Tecnologias com contribuição potencial direto ou indireto para atenuação das emissões; c) Redução de emissões e aumento da eficiência de combustível no transporte.

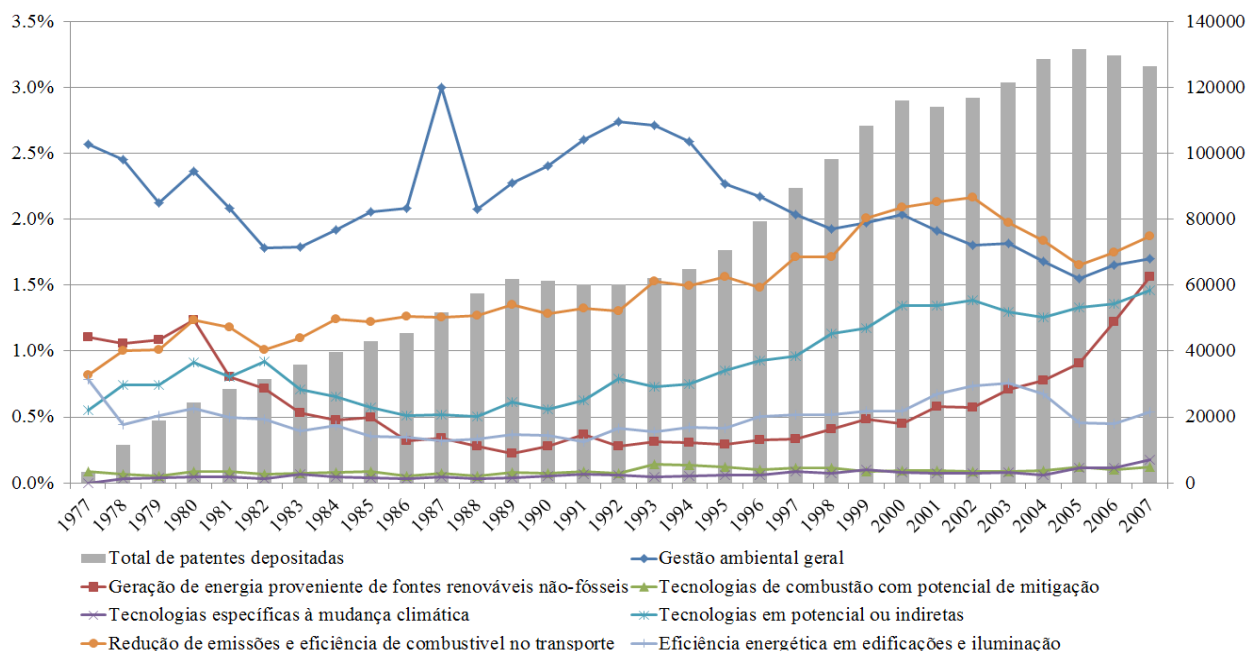
A partir de 1997, as classes “redução de emissões e aumento da eficiência de combustível no transporte”, “tecnologias com potencial de contribuição, direta ou indireta, para atenuação das emissões”, “eficiência energética em construções e sistemas de iluminação” seguiram tendências de crescimento semelhante, o que pode ser em parte relacionado à repercussão do Protocolo de Kyoto, também assinado no ano de 1997 (ONU, 2011).

O percentual de tecnologias na classe “gestão ambiental” decresceu a partir de 1992. Entretanto, mesmo que o pico na porcentagem de depósitos tenha sido atingido em 1987, com 3% do total, esta classe ainda se mantém entre as classes de maior índice de depósitos de patentes entre as tecnologias verdes. Já as classes “tecnologias de combustão com potencial de mitigação” e “tec-

² Os IPCs mais relevantes segundo os especialistas setoriais envolvidos na pesquisa, que compuseram o SASTec (Sistema de Informações Tecnológicas), podem ser verificados no apêndice 1.

nologias específicas para a mitigação das alterações climáticas” não mostraram grandes alterações na porcentagem de depósitos ao longo dessas três décadas, variando sempre na faixa de 0,08% a 0,10% do total de depósitos por ano.

Gráfico 1 – Evolução do percentual de patentes verdes depositadas no USPTO e EPO com relação ao total de depósitos nos dois escritórios (1978-2007).



Fonte: Elaborado a partir dos dados da OCDE (2011).

O desafio metodológico de traçar rotas tecnológicas verdes passa, antes de tudo, pela construção de uma base de dados, a ser utilizada na análise. A escolha dos IPC’s que foram utilizados para construir esta base de dados específica para esta pesquisa contou com a colaboração dos diversos pesquisadores setoriais. Como ponto de partida foi utilizado o *O IPC Green Inventory*, a partir do qual foi realizada uma priorização dos IPC mais relevantes para cada um dos setores analisados nas seções IV e V, conforme pode ser observado no apêndice 1.

2. Metodologia Para Identificação Das Rotas Tecnológicas

É importante notar que dos 94 IPCs priorizados na pesquisa, 29 são indicados por dois ou mais analistas setoriais como relevantes para as atividades econômicas do setor, constituindo um banco de dados com um total 842.007 (oitocentas e quarenta e duas mil e sete) patentes identificadas.

Dado esse número extremamente elevado de patentes, que inviabiliza a identificação de trajetórias tecnológicas, foram empregados procedimentos de seleção e redução de grupos tecnológicos. Isto foi realizado de acordo com técnicas baseadas no critério de co-classificação de patentes,

utilizando inicialmente a soma dos impactos cruzados por pares descrito em Choi et al (2007) para a identificação clusters entre os grupos tecnológicos, seguido pela análise de impacto cruzado (AIC), por meio da técnica de proposta por Kim et al (2011).

Para a seleção de grupos tecnológicos relevantes, a partir da identificação clusters entre os grupos tecnológicos, os IPCs foram ordenados em ordem crescente na hierarquização dos IPC e suas descrições foram comparadas. Posteriormente, a clusterização foi validada utilizando a soma dos impactos cruzados por pares descrito em Choi et al (2007), a qual tem que ser maior do que a soma dos impactos entre os IPCs deixados fora do cluster. Trata-se de uma matriz em que linhas e colunas são os IPCs ordenados hierarquicamente. Cada célula na matriz é o impacto cruzado de Choi et al (2007). De maneira geral, as maiores relações tecnológicas são entre IPCs próximos na classificação, e mesmo dentro de uma mesma seção tecnológica há processo de clusterização.

A tabela 1 apresenta as somas dos impactos tecnológicos entre pares de IPCs ao nível de grupo, agrupados por seção tecnológica, considerando a diagonal – o impacto intra-grupo e entre-grupos; e desconsiderando o impacto intra-grupo. Com exceção das seções D e E, que possuem poucos IPCs priorizados, em todos os demais casos, a soma dos impactos considerando ou desconsiderando o impacto intra-grupo é maior dentro da mesma seção do que entre outras seções.

Tabela 1 – Soma dos impactos cruzados por pares

		Seção Tecnológica do IPC					
		B	C	D	E	F	H
B	SD	16.62	3.49	0.31	1.20	1.60	3.73
	CD	31.62					
C	SD	3.49	14.71	0.72	0.35	5.71	3.64
	CD		50.71				
D	SD	0.31	0.72	0.00	0.00	0.01	0.00
	CD			1.00			
E	SD	1.20	0.35	0.00	0.74	0.14	0.11
	CD				3.74		
F	SD	1.60	5.71	0.01	0.14	10.01	2.45
	CD					31.01	
H	SD	3.73	3.64	0.00	0.11	2.45	10.01
	CD						26.01
Outras seções		10.33	13.90	1.04	1.80	9.91	9.93
CD: considerando os impactos das diagonais da matriz (números 1). SD: Desconsidera os elementos da diagonal principal.							

Fonte: elaborado pelos autores

Utilizando da classificação por descrição e da soma dos impactos intra e entre grupos tecnológicos por pares, foram separados os clusters para posterior análise da matriz de impacto cruzado super limite. Os treze clusters encontrados foram os seguintes:

- i. Separação e recuperação de materiais³, afetando os setores de alumínio, automóveis e aeronáutico, cimento, química e petróleo e siderurgia;
- ii Veículos em geral⁴, afetando os setores de automóveis e aeronáutico e química e petróleo;
- iii Química orgânica, inorgânica e processamento químico⁵, afetando os setores de cimento, energia, etanol e biodiesel, química e petróleo e siderurgia;
- iv Petróleo, gás ou coque⁶, afetando os setores de automóveis e aeronáutico, etanol e biodiesel e química e petróleo;
- v Óleos, substâncias graxas, detergentes, bioquímica, microbiologia e enzimologia⁷ afetando o setor de etanol e biodiesel;
- vi Metalurgia do ferro⁸ afetando os setores de cimento e siderurgia;
- vii Metalurgia de ligas ferrosas e não-ferrosas⁹, afetando os setores de alumínio, cimento, energia e siderurgia;
- viii Equipamentos e dispositivos utilizados em poços e minas¹⁰, afetando os setores de cimento, química e petróleo e siderurgia;
- ix Iluminação ¹¹, afetando o setor de energia;
- v Combustão, aquecimento, resfriamento e refrigeração¹² afetando os setores de cimento, energia, química e petróleo e siderurgia;
- xi Secagem, fornalhas e troca de calor¹³, afetando os setores de cimento, energia e siderurgia ;
- xii Elementos elétricos básicos¹⁴, afetando os setores de energia e química e petróleo;
- xiii Produção, conversão ou distribuição de energia elétrica¹⁵, afetando o setor de energia e química e petróleo;

Como será mencionado posteriormente a metodologia utilizada para a definição de rotas tecnológicas é baseada na Análise de Redes Sociais (ARS). No entanto, essa metodologia sofre de restrição na capacidade limitada de análise em grandes bases de dados¹⁶. Visando amenizar as limitações da metodologia de citações de patentes, Choi et al (2007) propuseram um critério de co-classificação

3 IPCs B01D-053, B03B-009, B29B-007 e B29B-017

4 IPCs B60K-001, B60K-006, B60K-015, B60K-016, B60L-003, B60L-008, B60L-009, B60L-011, B60W-010 e B60W-020,

5 IPCs C01B-031, C01B-033, C04B-007, C07C-067, C07C-069, C08J-011 e C09K-005

6 IPCs C10G-001, C10G-005, C10G-045, C10G-047, C10J-003, C10L-001, C10L-003 e C10L-003

7 IPCs C11B-011, C11B-013, C11C-003, C12N-009 e C12P-007,

8 IPCs C21B-003, C21B-005, C21B-007 e C21C-005,

9 IPCs C22B-007, C22B-021, C22C-021, C23C-014, C23C-016, C25C-001, C25C-003, C25D-011 e C30B-029

10 IPCs E21B-041, E21B-043 e E21F-017

11 IPCs F21K-099, F21L-002, F21L-004 e F21S-009

12 IPCs F22B-001, F23B-080, F23B-090, F23C-009, F23G-005, F23G-007, F24H-007, F24J-001, F24J-002, F25B-027 e F25J-003,

13 IPCs F26B-003, F27B-001, F27B-015, F27D-017, F28D-017, F28D-019 e F28D-020

14 IPCs H01G-009, H01L-025, H01L-027, H01L-031, H01L-033, H01L-051, H01M-004, H01M-010, H01M-012 e H01M-014,

15 IPCs H02J-003, H02J-007, H02J-009, H02J-015 e H02N-006

16 Por um lado, boa parte dos softwares de ARS não comportam bases de dados com elevado número de informações; por outro, a análise gráfica se torna impraticável quando há um grande número de nós e/ou conexões, o que dificulta a inferência, por exemplo, sobre a estrutura da rede.

conjuntamente com uma análise de impacto cruzado (AIC) operacionalizada por meio da construção de matrizes de impacto. O pressuposto é de que uma mesma patente pode pertencer a mais de uma classificação, considerando suas características tecnológicas. A frequência com que duas classificações são conjuntamente utilizadas pode ser interpretada como um sinal da conexão entre as áreas de conhecimento (BRESCHI; LISSONI; MALERBA, 2003; CHOI et al, 2007; KIM et al, 2011). A AIC é uma análise de um componente matemático apenas, podendo abrigar grandes bases de dados.

O procedimento de Kim et al (2011) é baseado em dois métodos: *association rule mining* (ARM) e *analytic network process* (ANP). A ARM pretende extrair correlações, padrões, associações ou estruturas casuais entre conjuntos de itens em bases de dados (KOTSIANTIS; KANELLOPOULOS, 2006, p. 71). Já a ANP¹⁷ pode ser vista como um desdobramento da ARS, cujo foco reside no cálculo do limite de uma matriz de conexões entre patentes, considerando matematicamente todas as inter-relações entre os nós; e não a análise gráfica da rede. O método baseia-se no critério de co-classificação das patentes, no qual as informações sobre a classe das patentes citadas são utilizadas para o cálculo de um índice, englobando toda a informação das citações diretas e indiretas das áreas (classificações) relevantes.

Admitindo que as inovações tecnológicas são o resultado de um processo marcado pelo alto grau de complexidade. As interações entre os *inputs* – como pesquisadores e infraestrutura de pesquisa – são vistas como importantes determinantes dos resultados do processo. Sendo assim, a avaliação de processos inovadores envolve não somente relações diretas, mas também estruturas indiretas complexas e o fluxo de informações e recursos entre elas. Considerando essa estrutura de relações diretas e indiretas, a análise de redes sociais (ARS) auxilia na compreensão de processos inovadores (STERNITZKE, BARTKOWSKI; SCHRAMM, 2008; LEE ET AL, 2009).

A ARS retrata a interação (ligação ou conexão) entre atores (nós). A técnica pode ser utilizada para analisar uma gama bem distinta de variáveis, como relações entre empresas e universidades, a dispersão de uma doença, quais línguas se propagam mais rápido, a posição social de um indivíduo e suas oportunidades profissionais, dentre outras (JACKSON, 2008). Em estudos de citações de patentes como *proxy* para rotas tecnológicas, os nós representam as patentes e a ligação é dada pela citação de uma patente por outra(s). Pressupõe-se que as patentes citadas têm uma conexão tecnológica com aquelas que as citam (WARTBURG; TEICHERT; ROST, 2005).

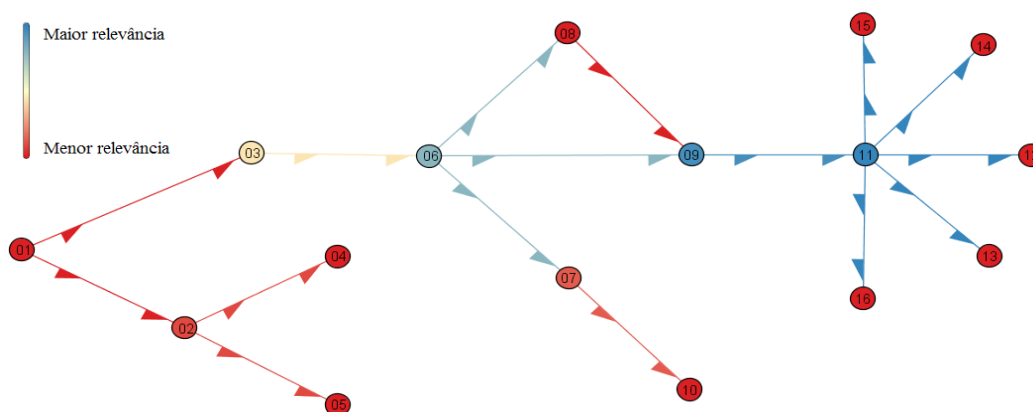
A Figura 2 ilustra uma rede direcionada, nos moldes de como seria uma rede de citações de patentes. O que a ARS consegue capturar de mais relevante é o desenvolvimento tecnológico necessário para a evolução das patentes. Para chegar até a patente 11, por exemplo, foi necessária uma trajetória tecnológica que se inicia pela patente 01, passa pelas patentes 03, 06, 08 e 09.

As trajetórias mais relevantes poderiam ser definidas a partir da observação dos gráficos das redes. Todavia, em redes muito densas esse procedimento não é ótimo e pode apresentar caráter arbitrário. Hummon e Doreian (1989) propõem a criação de duas estatísticas com base no algoritmo

17 Na verdade, a ANP é um avanço em relação ao analytic hierarchy process (AHP). Trata-se de um método para auxiliar em escolhas com bases em critérios (ponderações). Liebowitz (2005) debate uma forma de realizar a análise conjuntamente à ARS.

de busca exaustiva – quais sejam, SPLC (*search path link count*) e SPNP (*search path node pair*) – visando facilitar, com maior confiabilidade, o procedimento que traça as melhores rotas tecnológicas. Ambas as estatísticas buscam caracterizar a importância das ligações entre as patentes, diferentemente das medidas de centralidade, por exemplo, que caracterizam a patente em si (o nó) ¹⁸.

Figura 2 – Rede com ligações diretas



Fonte: Elaborado pelos autores

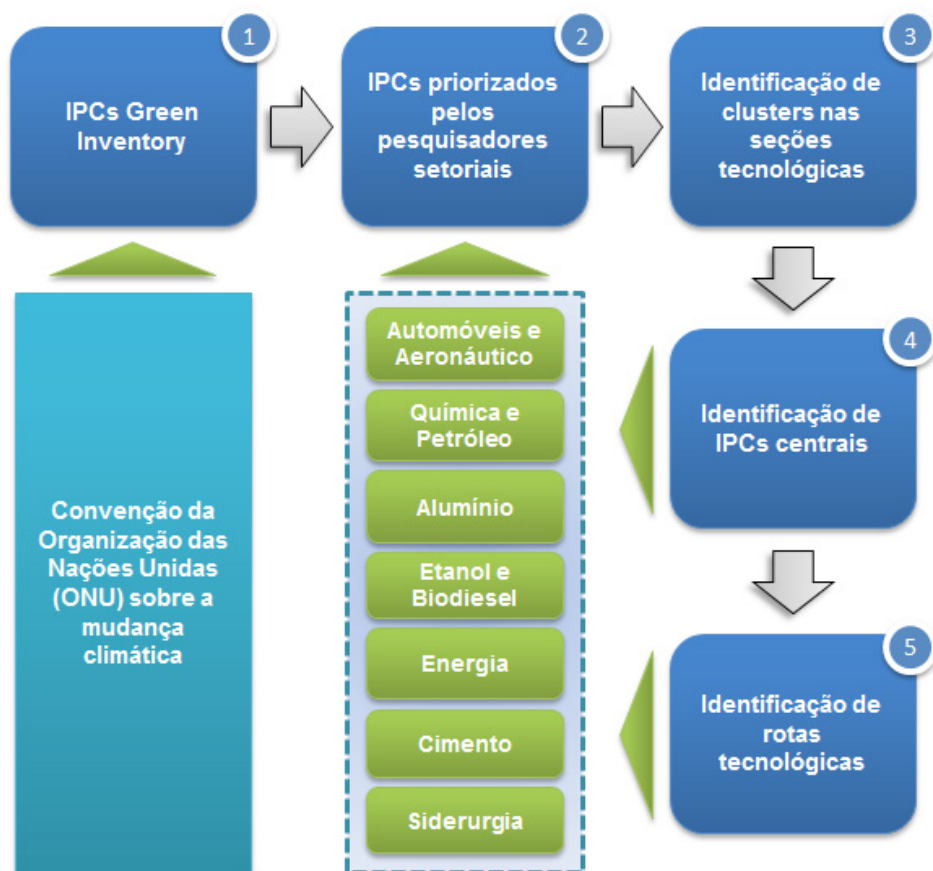
A principal crítica ao uso de citações de patentes reside na defasagem intrínseca ao processo de patenteamento, sobretudo no *gap* entre o depósito e a concessão da patente (HALL; JAFFE; TRAJTENBERG, 2001). Sendo assim, as análises realizadas com essa metodologia costumam padecer de substantiva defasagem (KIM et al, 2011). Razão pela qual nesta pesquisa optou-se por trabalhar com os pedidos de depósitos e não com as patentes já concedidas¹⁹.

Sumarizando, a abordagem metodológica descrita anteriormente pode ser por meio da figura 3 a seguir.

¹⁸ A SPLC enumera todos os caminhos possíveis numa rede e conta a frequência das patentes por cada um destes caminhos (ligações). Os caminhos com a maior quantidade de ligações são os mais importantes e sinalizam o rumo principal para a tecnologia. Já a SPNP conta o número de trajetórias que passam por pares de nós, remetendo às medidas de centralidade (HUMMON; DOREIAN, 1989).

¹⁹ De acordo com o Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI), o tempo médio para concessão de uma patente no Brasil é de 8,3 anos; a meta para 2014 é chegar a 4 anos de espera, em média. Nos Estados Unidos, esse tempo está entre 3 e 5 anos, em média, de acordo com o United States Patent and Trademark Office (USPTO).

Figura 3 – Abordagem utilizada para identificar tecnologias promissoras e a associação com os setores econômicos de interesse



Fonte: elaborado pelos autores

3. Análise Das Rotas Tecnológicas Sob a Perspectiva Dos Grupos Tecnológicos

A seguir apresenta-se as principais informações de cada um dos grupos tecnológicos extraídas a partir das análises da matriz de impacto cruzado, a qual permitiu identificar os IPC mais relevantes, bem como o cálculo dos escores SPLC das redes de citação do agrupamento tecnológico, o que permitiu verificar a quantidade de rotas tecnológicas para a construção das redes, e da ARS (análise de redes sociais) para a construção da própria rede de citações²⁰. A tabela 02 apresenta uma síntese da análise de tecnologias relevantes, indicando a seção do WIPO, o agrupamento, os IPCs mais relevantes, os setores interessados, as tecnologias identificadas na análise patentária, empresas mais relevantes e algumas observações relevantes encontradas. As redes e as trajetórias tecnológicas estimadas referentes a essa análise estão apresentadas no apêndice 3 a este capítulo.

O primeiro agrupamento de tecnologias, descrito como **separação e recuperação de materiais**, possui apenas 4 IPCs, mas que têm influência em 6 setores analisados.

²⁰ O detalhamento metodológico e os resultados específicos de cada uma destas análises estão disponíveis no relatório “Rotas tecnológicas e Sistemas de Inovação” disponível em www.ebc.fearp.usp.br

Ao utilizar a metodologia de análise de rotas tecnológicas de Verspagen (2007), verifica-se a existência de uma rede composta por patentes que estão nos dois grupos tecnológicos de maior impacto deste agrupamento. Destaca-se a existência de quatro rotas mais relevantes²¹. Estas rotas possuem ao todo 13 patentes distintas, cujos depósitos mais antigos são de 1991 e o mais recente, de 2008. A rota principal descreve tecnologias de preparação mecânica de sucata não-ordenada via equipamentos eletrônicos, método e dispositivo para a reciclagem de resíduos de aparelhos, e dispositivo de recusa com sistema de armazenagem para material reciclável, respectivamente. Já a segunda rota trata de processos e dispositivos de recuperação de resíduos com plásticos e embalagens, matérias-primas secundárias, objetos moldados de polímeros, na qual a última das patentes citadas é sobre o uso de um moinho de impacto para recuperação de resíduos.

No agrupamento tecnológico de **separação e recuperação de materiais** destacam-se a empresa Volkswagen (de origem alemã), que desenvolveu tecnologias para separação e recuperação de materiais. A mais distinta das tecnologias identificadas neste agrupamento descreve um processo de produção de combustível a partir de refugos de combustíveis provenientes de lixo. Apesar dos IPCs de maior impacto no agrupamento serem priorizados pelo setor de alumínio, as tecnologias identificadas ao nível patentário estão voltadas para a recuperação de plástico.

O agrupamento de **veículos em geral**, possui 10 IPCs priorizados, influenciando os setores de automóveis e aeronáutico e 2 por meio do setor de química e petróleo. Nota-se que muitas tecnologias são extremamente correlacionadas, o que produz leva os cálculos da matriz super limite a constatar que 5 IPCs respondem por 80% do impacto tecnológico do agrupamento.

No agrupamento de **veículos em geral** observa-se uma grande participação de empresas de origem japonesa, tais como Toyota, Nissan, Toshiba e Aisin AW CO, ainda que os mercados de proteção sejam primariamente o europeu e o estadunidense. Como os IPCs de maior impacto da matriz super limite apontaram para tecnologias ligadas à geração e utilização de energia a partir de forças da natureza e as patentes identificadas como mais relevantes protegem tecnologias de dispositivos de controle, transformadores de energia e fontes de alimentação, pode-se dizer que os dispositivos de controle de energia são tão (ou mais) importantes do que a própria geração de energia proveniente de outras fontes.

A seção de química e metalurgia (C) é a mais extensa em quantidade de IPCs priorizados, possuindo cinco agrupamentos tecnológicos neste trabalho: Química orgânica, inorgânica e processamento químico – influenciando os setores de cimento, energia, etanol e biodiesel, química e petróleo e siderurgia; Petróleo, gás ou coque – afetando os setores de automóveis e aeronáutico, etanol e biodiesel, e química e petróleo; Óleos, substâncias graxas, detergentes, bioquímica, microbiologia e enzimologia – essenciais ao setor de etanol e biodiesel somente; Metalurgia do ferro – importante para os setores de cimento e siderurgia; e Metalurgia de ligas ferrosas e não-ferrosas, relacionada aos setores de alumínio, cimento, energia e siderurgia.

21 Verspagen (2007) comentou que há arbitrariedade na escolha do ponto de corte das principais rotas tecnológicas da rede. Neste trabalho optou-se por demonstrar graficamente os maiores escores para identificar os pontos de quebra relevantes.

No agrupamento de **química orgânica, inorgânica e processamento químico**, o componente principal da rede apresenta três IPCs de maior impacto²². Ao se observar as dez rotas tecnológicas de maior escore SPLC, verifica-se que todas estas rotas iniciam-se pela patente JP3942226, depositada pela empresa Taiheiyo Cement, em 1997, que trata de um método de produção de composição de cimento. Esta empresa é responsável por 15 das 18 patentes contidas nas rotas mais relevantes – três destas compartilhadas com a empresa Daiichi Cement (JP4629170, JP4164229 e JP4164242); sendo, portanto, uma referência para o setor.

Deste modo, o agrupamento tecnológico de química orgânica, inorgânica e processamento químico tem como destaque as tecnologias de cimentos hidráulicos, silício, carbono e seus componentes. Todavia, a patente mais recente das principais rotas tecnológicas da rede trata de um tema não abordado anteriormente: a utilização de lodo de esgoto para composição de cimento.

Já o agrupamento tecnológico de **petróleo, gás ou coque**, contém 5 IPCs, com importância para os setores de automóveis e aeronáutico, etanol e biodiesel e química e petróleo²³. Como a rede é muito conectada entre si, os escores SPLC são extremamente altos, passando dos 2 mil pontos. Este fato aponta para um setor altamente explorado tecnologicamente, com uma grande quantidade de patentes intermediárias na rede.

A patente que origina todas as rotas foi depositada em 1991 e protege um método para tratamento de gás natural, cujo titular é a empresa francesa IFP Energies Nouvelles. Nas demais patentes é expressiva a preocupação com a inibição e/ou controle de formação de hidratos, já que 19 patentes tratam do assunto. Nota-se que não se trata de um assunto já esgotado, pois há patentes protegendo temas relacionados a materiais poliméricos. Destaca-se ainda que as gigantes do petróleo Exxon Mobil e Shell depositaram patentes com estas finalidades ainda nos anos 1990; sendo que todas as patentes citadas na rede estão protegidas em território estadunidense. Além disso, observa-se que há 5 casos de patentes que possuem vários titulares, incluindo bancos²⁴, e a empresa com a maior quantidade de depósitos nesta rede é alemã, Clariant GMBH, com 5 depósitos.

No agrupamento tecnológico de **petróleo, gás e coque**, os IPCs centrais no desenvolvimento tecnológico verde são os de Recuperação de misturas líquidas de hidrocarboneto a partir de gases, Combustíveis sólidos, Craqueamento de óleos hidrocarbonetos, na presença de hidrogênio ou de compostos geradores de hidrogênio, para obter frações de ponto de ebulição inferior, Combustíveis gasosos; Gás natural; Gás natural sintético obtido por processos não abrangidos pelas subclasses C10G, C10K; Gás liquefeito de petróleo e Produção de gases contendo monóxido de carbono e hidrogênio²⁵; que possuem um volume considerável de patentes depositadas. A análise mais desagregada indicou

22 Somados, os IPCs C04B-007, C01B-033 e C01B-031 possuem 6660 patentes distintas, sendo que 838 (12,6% do total) destas estão conectadas entre si por relações de citação e 85 (1,3%) estão no componente principal da rede.

23 Estes IPCs possuem mais de 30 mil patentes distintas, 17,7% destas – 5,4 mil, aproximadamente, possuem conexões de citação com outras patentes do agrupamento; e 3734 estão no componente principal da rede (12,1% do total).

24 US6180699, WO200240433 (2000) e WO200274722 (2001), tem por titulares a Ashland Aqualon, Bank of Nova Scotia, Chase Manhattan Bank e ISP Capital and Investment e WO201045520 e WO201045523 (2008), tem por titulares o Bank of America, Calgon e Nalco;

25 Respectivamente C10G-005, C10L-005, C10G-047, C10L-003, C10J-003.

que uma preocupação recorrente é a inibição de gases hidratados em fluidos, já que diversas tecnologias distintas foram protegidas ao longo do período de análise. Além disso, há uma grande complexidade e interesse nestes setores, dadas a quantidade de patentes intermediárias nas redes, que elevam o escore SPLC das redes e também a presença de bancos como co-titulares das patentes. Sob a perspectiva dos setores econômicos analisados, pode-se dizer que as tecnologias identificadas provocam um impacto direto no setor de química e petróleo e indireto nos setores de automóveis e aeronáutico.

O agrupamento tecnológico de **óleos, substâncias graxas, detergentes, bioquímica, microbiologia e enzimologia**, tem os IPCs priorizados exclusivamente pelos setores de etanol e biodiesel²⁶. As dez rotas mais relevantes iniciam-se por uma patente depositada 1992, que descreve um método para acidificação de sabão²⁷ com uma solução de bissulfito de sódio. Além disso, boa parte destas dez rotas termina na patente depositada em 2009 pela empresa Linde Ag (Alemanha), que protege um processo e um aparelho para neutralizar sabão oleoso.

É uma rede composta majoritariamente por patentes depositadas via tratado PCT e no escritório Europeu, sendo apenas 2 patentes depositadas primariamente no mercado estadunidense. A maioria das patentes (20 patentes) foi depositada nos anos 2000. Há a predominância de empresas finlandesas como titulares (Forchem OY (2 patentes), LT Dynamics OY (1), Parkon Innovations e Valtion Teknillinen (1), Polargas AB OY (5 cotitularidades com Air Liquide francesa), Raisio Benecol (5 patentes e 1 com a Ravintoraisio e 2 em conjunto com a Sterol Technologies LTD); além de uma patente que tem como titular a Universidade de Helsinki e a Fundação da Universidade de Aalto).

Nesta rede também está presente uma patente(2006), relacionada a metodologias e usos de produtos de ácidos graxos, de titularidade do Bank of America, Calgo e Nalco. Apesar da forte presença de empresas finlandesas, a Linde AG (Alemanha), detém a maior quantidade de depósitos (7), que tratam da preparação, recuperação, aquecimento da produção, desativação e beutralização de salmora, de tall oil²⁸. As tecnologias mais diferenciadas pertencem a Cognis (Alemanha) e tratam do processo de produção de ácidos graxos, ésteres de ácidos graxos e sterol esters (um grupo heterogênico de componentes químicos) de pastas de neutralização e da Raisio Benecol (Finlândia) sobre processo de hidrogenação.

Portanto, dentre as tecnologias de **recuperação ou refinação de outras substâncias graxas; e recuperação de gorduras, óleos graxos, ou ácidos graxos a partir de materiais de refugo**, consideradas relevantes para o setor de etanol e biodiesel, há uma preocupação relevante com o método de processamento e neutralização de sabão para/de óleos, com forte presença de empresas finlandesas, tal como a Raisio; e alemãs, tal como a Linde AG. Também há neste mercado a presença de universidades e bancos. Não foram identificadas patentes com o título explícito de etanol e biodiesel, mas muitas das apresentadas acabam por citar a produção destes produtos em sua descrição. Como no Brasil boa parte do etanol é produzido a partir da cana-de-açúcar – e não de resíduos de madeira – duas alternativas

²⁶ C11B-011, C11B-013, C11C-003, C12N-009 e C12P-007.

²⁷ O sabão descrito nesta rota é um derivado de ácidos graxos, utilizado primariamente na separação e preparo de óleos.

²⁸ Tall oil, também chamado de resina líquida ou resina de pinheiro, é um líquido obtido no processo de fabricação de pasta de madeira, sobretudo quando utilizadas árvores coníferas.

tecnológicas podem surgir: primeiro, pode haver processos provenientes de outras matérias-primas que podem ser aproveitados no preparo de etanol de cana-de-açúcar; segundo, o preparo de combustível a partir de *tall oil* pode ser uma alternativa no país, ligado, por exemplo, a indústria moveleira.

O agrupamento de **metalurgia do ferro** compreende 4 IPCs, dos quais três possuem fator de impacto relevante, e são ligados a **fabricação de ferro-gusa em altos-fornos e as características em geral de fabricação do ferro gusa**, sendo apontados pelos pesquisadores setoriais de cimento e siderurgia como prioritários. Trata-se de um agrupamento com baixo volume de depósitos, porém todos os IPCs compartilham patentes entre si, mesmo que a quantidade relativa seja pequena.

Dentre as rotas mais importantes, as 3 com escores mais altos se iniciam na patente que protege uma tecnologia de processo de fabricação de ferro-gusa e clinker de cimento, depositada em 1993, pela empresa de cimento suíça Holderbank Financiere Glarus, que detém 12 patentes na rede, todas anteriores aos anos 2000. Essas tecnologias abrangem o processo para produção de aço e pastas hidraulicamente ativas, métodos de manufatura de ferro gusa ou aço e clinker de cimento provenientes de escórias.

A Holcim Technology LTD, possui 9 patentes com diferentes co-titulares relacionadas a construções sustentáveis²⁹. Os depósitos a partir de 2004, são individuais e protegem tecnologias que buscam a redução do cromo em escórias metalúrgicas – patentes.

A empresa Voest Alpine Ind Anlagen (Áustria), possui 5 patentes na rede, uma individual que protege o método e a instalação para condicionamento de escória com adição de resíduos metalúrgicos; as demais patentes em co-titularidade com a Siemens VAI Metals Technologies e tratam de métodos de utilização de escórias.

As tecnologias dos agrupamentos tecnológicos de **metalurgia de ligas ferrosas e não-ferrosas** afetam os setores de alumínio, cimento, energia e siderurgia. Embora apresente um volume considerável, há vários IPCs que não compartilham patentes, indicando uma baixa proximidade tecnológica. Há uma baixa concentração de patentes intermediárias e somente uma pequena porção possui muitas conexões mútuas, aumentando o escore SPLC.

As patentes mais antigas, que integram as rotas tecnológicas mais relevantes, pertencem a empresa holandesa Hoogovens Aluminium BV que protegeu tecnologia sobre fluxo de sal para adição em metal fundido, com o intuito de remover outros constituintes (1994), e métodos para refino de fundição de sucata de alumínio obtidos a partir de fundições refinadas (2004). Em 1995, a Sharp protegeu um aparelho para purificação de metais. Em 1996 há um depósito da TNO - *Netherlands Organisation for Applied Scientific Research*, a respeito de um método e um dispositivo para separação de metais ou placas metálicas de diferentes tempos de fundição. A patente mais recente é da Pyrotec (2009) e descreve o uso de um fluxo de sal de cloreto de sódio e cloreto de magnésio para a purificação de folhas de alumínio.

²⁹ Estas patentes tratam da produção de ligas hidráulicas e outras ligas, como ferrocromo e ferrovanádio; métodos de produção de pozolonas, escórias sintéticas de altos-fornos, clinker belite ou alite, ligas de ferro-gusa, provenientes de escórias oxidadas; método de processamento de resíduos de incineração a partir de um conversor de banho de metal multi-estágio; método para tratamento de escórias em banho de ferro; método de remoção de cromo e/ou níquel de escórias líquidas.

Portanto, a maioria das tecnologias do agrupamento de **metalurgia de ligas ferrosas e não-ferrosas**, afeta os setores de alumínio, cimento, energia e siderurgia, estão voltadas para a purificação de alumínio, sobretudo do reaproveitamento de resíduos de metais. A princípio, o impacto imediato do aprimoramento destas tecnologias acontece no setor de alumínio, sendo repassadas indiretamente aos demais setores. As empresas com mais depósitos nas rotas tecnológicas são a Aleris Switzerland e a Corus Technology.

Na seção de **têxteis e papel**, em razão de apenas 1 IPC priorizado não foi possível calcular o fator de impacto. Este IPC é descrito como recuperação dos materiais de partida, de resíduos materiais ou de solventes durante a manufatura de filamentos artificiais ou similares e conta com apenas 112 patentes depositadas ao longo dos 20 anos de análise, das quais apenas quatro são conectadas entre si. As duas mais antigas foram depositadas no escritório patentário alemão. Uma trata da reutilização de resíduos de poliamida, depositada pela Thuringisches Inst Textil (Alemanha); e a segunda, descreve granulados oriundos de materiais poliméricos reciclados – depositada pela Akzo NV (Holanda).

As duas patentes mais recentes são da BASF, e da Cookson Fibers e Prisma Fibers, depositadas nos EUA, descrevendo métodos de reciclagem de resíduos de polímeros. Portanto, dentre as tecnologias de recuperação de materiais de resíduos ou de solventes, há pouca evidência a favor de uma tecnologia específica, com algumas poucas patentes sugerindo métodos de reciclagem de polímeros.

A seção E, de **construções fixas**, possui três IPCs priorizados pelos setores de cimento, química e petróleo e siderurgia, sejam eles: equipamentos ou detalhes de perfuração, limpeza e vedação de poços, sondagem subaquática, contêineres para sondagem; métodos ou aparelhos para obter óleo, gás, água, matérias solúveis ou fundíveis ou de lama minerais de poços; e métodos ou dispositivos empregados em minas ou túneis não incluídos em outro local³⁰. Estas tecnologias estão relacionadas a equipamentos utilizados em poços e minas. A rede de citações possui 170 patentes. Todavia, nenhuma destas patentes está conectada por relações de citação, impossibilitando a análise SPLC. Este pequeno volume de depósitos gera poucos desdobramentos tecnológicos.

Na seção tecnológica de **engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos**, há três agrupamentos tecnológicos. O primeiro deles abrange tecnologias de iluminação e é composto por quatro IPCs priorizados pelo setor de energia³¹: sistemas de dispositivos de iluminação elétrica, matéria não abrangida pelos demais grupos desta subclasse³², dispositivos de iluminação com fonte de energia incorporada; sistemas de iluminação usando dispositivos de iluminação com fonte de energia incorporada e dispositivos de iluminação elétrica com acumuladores ou baterias elétricas incorporadas. A rede de citação de patentes abriga somente 80 depósitos e apenas 2 destes estão conectados por citação, as quais protegem uma tecnologia de bastão com chips emissores de luz LED, cujos titulares são pessoas físicas e os depósitos foram realizados na China.

30 Respectivamente E21B-041; E21B-043; E21F-017.

31 Respectivamente F21L-002; F21K-099; F21S-009.

32 Trata-se de uma linha de tecnologias de iluminação distinta das incandescentes.

O segundo agrupamento da seção F, que abrange **dispositivos e métodos de combustão, aquecimento, resfriamento e refrigeração**; é um dos maiores, com 11 categorias de IPC, cujo aprimoramento tecnológico auxilia os setores econômicos de cimento, energia, química e petróleo e siderurgia.

A rede contendo as patentes depositadas nos três IPCs de destaque possui 694 patentes, mas apenas 18 das mesmas estão conectadas por citações. Assim, há apenas pares de patentes conectadas com relação de citação, o que torna impossível a análise via escore SPLC.

Destacam-se 4 depósitos da Hitachi (Japão); que tratam do diagnóstico para a degradação de caldeiras; e também sistemas e método de caldeira com combustível oxidável com realimentação de ar quente. As empresas japonesas Tiyoda Seisakusho KK e Sakura Seiki Co Ltd possuem patentes sobre método, geradores e estabilizadores de vapor saturado. Assim o agrupamento de **dispositivos e métodos de combustão, aquecimento, resfriamento e refrigeração** envolve, em grande parte, a redução de emissões de gases nocivos, além de formas mais eficientes de armazenamento de calor.

O último dos agrupamentos da seção F, **secagem, fornalhas e troca de calor**, há sete IPCs priorizados pelos pesquisadores setoriais de cimento, energia e siderurgia. Algumas destas tecnologias, apesar de estarem classificadas de maneira próxima, guardam pouca relação – neste sentido um aprimoramento em um destas não tem condições de transbordar para outras tecnologias. Os resultados indicam que as tecnologias relevantes para são pouco conectadas, com métodos e dispositivos geradores, regeneradores e armazenadores de calor.

A rede de citações patentárias do agrupamento tecnológico de secagem, fornalhas e troca de calor é restrita. Apenas 6,4% (181) das 2822 patentes da rede possuem conexões com demais patentes do agrupamento e 26 estão no componente principal. Nota-se a baixa prevalência de patentes intermediárias, sugerindo que os aprimoramentos tecnológicos não são sequenciais, mas dispersos. Há vinte trajetórias possíveis nesta rede. Porém o aprimoramento tecnológico não é distribuído sequencialmente entre as patentes da área. As duas rotas mais relevantes, de acordo com o escore, iniciam-se pela patente da RYMS, uma empresa americana, que protegeu em 1995 um gerador de alto rendimento em lâmina para utilizar em ciclos regenerativos de gás.

Há ainda quatro patentes depositadas pela Força Aérea dos Estados Unidos, duas de 2001 que protegem estruturas em folha para regeneradores de calor; uma de 2002 sobre um regenerador de calor com guias conjuntas; e uma de 2004, que abrange um método e um aparelho para absorção de energia térmica.

Outras tecnologias abordadas são: materiais regeneradores de calor, armazenamento de calor, geradores e regeneradores de calor, permutadores de calor. Dentre as empresas mais conhecidas, podem-se citar as japonesas Honda Motors, Sharp e Toshiba.

Os pesquisadores setoriais de energia e química e petróleo identificaram 16 IPCs centrais, que foram aglutinados como: i) elementos elétricos básicos, que conta com dez IPCs; ii) produção, conversão ou distribuição de energia elétrica, que possui cinco IPCs. Destaca-se que foi excluído da análise aquele que não possuía patentes em comum com os demais IPCs.

O agrupamento tecnológico de **elementos elétricos básicos**, possui uma quantidade expressiva de patentes, com alguns pares de IPCs³³ compartilhando mais de 3 mil patentes. E mesmo os IPCs, com menor quantidade possuem boa parte de suas patentes compartilhadas³⁴. A rede de citações patentárias deste agrupamento, apesar de possuir um número considerável de patentes na rede, apresenta poucas patentes que são intermediárias, sugerindo que os desenvolvimentos são pontuais.

Uma vez que há distintas patentes iniciais e finais, optou-se por avaliar as patentes contidas nas 19 rotas tecnológicas mais relevantes. Das 21 patentes contidas nas 19 rotas tecnológicas mais relevantes, 17 são propriedade da Semiconductor Energy Lab, empresa de P&D japonesa, das quais 10 patentes estão relacionadas a aparelhos ou dispositivos emissores de luz e seus métodos de fabricação³⁵, protegidas entre 2000 a 2007. Esta empresa também detém tecnologia sobre dispositivo de display; display emissor de luz, aparelhos eletrônicos, dispositivo elétrico-ótico com camada isolante, método de fabricação de dispositivo elétrico-ótico, método de cristalização de isolante de silicone e fabricação de dispositivos semicondutores e dispositivo semicondutor e seu método de fabricação.

As demais patentes da rede descrevem processo para fabricação de semicondutores, depositada pela Cannon em 1995; monitores, depositada pela Casio em 1996; e pela Seiko em 1997; e monitores de tela plana, depositada pela Samsung em 2003.

No agrupamento de **elementos elétricos básicos**, que afeta os setores de energia e química e petróleo. O resultado da matriz de impacto cruzado indicou diversas tecnologias relevantes, tais como células híbridas, geradores eletroquímicos, capacitores eletrolíticos e semicondutores. Mais especificamente as patentes contidas nas rotas mais relevantes tratam de monitores, dispositivos emissores de luz e semicondutores. A empresa Semiconductor Energy Lab é peça chave na rede, com muitos aprimoramentos tecnológicos sequenciais, cujas patentes envolvem, em sua maioria, dispositivos monitores e emissores de luz.

O último agrupamento tecnológico do setor de eletricidade abrange tecnologias verdes relacionadas à **produção, conversão ou distribuição de energia elétrica**. São cinco IPCs priorizados pelos setores de energia, química e petróleo também. Nota-se uma grande relação tecnológica entre os IPCs. A rede de citação deste agrupamento de produção, conversão ou distribuição de energia elétrica conta com 23275 patentes, das quais 1586 (6,8%) estão conectadas por citações e 634 estão no componente principal. Ao analisar as 20 rotas tecnológicas mais relevantes, constata-se 20 patentes depositadas entre 1994 e 2010, com 14 destas depositadas no escritório patentário japonês e as outras 6 protegidas via tratado PCT.

33 patentes (H01L-031 e H01L-033, H01L-031 e H01M-014, H01M-004 e H01M-010).

34 É o caso do IPC H01M-012, que possui 60,8% (816) patentes também classificadas como H01M-004 e 17,7% (237) classificadas como H01M-010.

35 (US7442963, US7432529, US6828727, US7728326, US7952101, US6605826, US8188655, US7867053, US7683535, US7745993).

As patentes mais antigas da rede foram depositadas pela empresa japonesa Hitachi nos anos de 1994 e 1995. A primeira descreve um dispositivo de controle de armazenamento de energia elétrica; a segunda, e a terceira, patente sistemas de armazenamento de energia baseado em bateria secundária.

Ainda nos anos de 1990, a Meidensha Electric Mfg Co Ltd (Japão, 1997) protegeu tecnologias de estação de entrada e transformação de energia para uso privado; enquanto a Tokyo Gas (Japão, 1999) protegeu sistema de entrada de energia instantânea com controle para reversão de potência.

Somente em 2005, voltam a acontecer depósitos a respeito de sistemas de controle de fluxo de energia e compensadores. A partir de 2006 algumas patentes começam a descrever tecnologias diferentes. A Mitsubishi, protege um acumulador de energia e um sistema de distribuição híbrido; a Kinden e a Toshiba, protegem método e sistema de regulador de frequência; enquanto a Honda, possuem sistemas de co-geração de energia; por fim, a NGK Insulators (Japão), protege um método de controle de energia com sistemas de compensação.

Com exceção do depósito em 2008 por Mario La Rosa (Itália) de um sistema de geração com base em energia eólica, todas as demais patentes, descrevem distintos tipos de sistemas de controle de energia.

Portanto, no agrupamento de **produção, conversão, distribuição e armazenamento de energia** há certa homogeneidade da importância dos IPCs priorizados, com os mesmos compartilhando uma grande quantidade de patentes. As patentes identificadas pelo escore SPLC nas redes de citação tratam de sistemas de controle de energia elétrica e empresas japonesas, tais como a Toshiba, Mitsubishi e Honda detém a maior quantidade de depósitos.

Tabela 2 – Resumo das análises baseadas em grupos tecnológicos

Seção WIPO	Agrupamento	IPCs mais relevantes	Setores econômicos de interesse	Tecnologias identificadas por patentes	Empresas mais relevantes	Observações
Operações de processamento e transporte (B)	Separação e recuperação de materiais	B29B-007; B03B-009	Alumínio	Separação e recuperação de materiais a partir de resíduos	Diversas empresas alemãs	Patentes das rotas mais relevantes depositadas nos escritórios alemão e europeu
Operações de processamento e transporte (B)	Veículos em geral	B60K-016; B60L-008; B60L-009; B60L-003; B60K-015	Veículos e aeronáutico	Dispositivos de controle, transformadores de energia e fontes de alimentação - associados a geração de energia a partir de forças da natureza	Empresas de origem japonesa - Toyota, Nissan, Toshiba e Aisin AW CO	Dispositivos de controle de energia são mais citados do que a própria geração de energia
Química e Metalurgia (C)	Química orgânica, inorgânica e processamento químico	C04B-007; C01B-033; C01B-031	Cimento (direto); Energia; Química e petróleo; e Siderurgia (indireto)	Composições e métodos de produção de cimentos a partir de resíduos	Taiheiy Cement (Japão)	Patente mais recente das rotas mais relevantes trata de produção de cimento a partir de lodo de esgoto

continua

Química e Metalurgia (C)	Petróleo, gás ou coque	C10G-005; C10L-005; C10G-047; C10L-003; C10J-003	Automóveis e aeronáutico; Química e petróleo	Inibição de gases hidratados em fluidos	Exxon Mobil, Shell (anos 1990) e Clairant GMBH (mais recente)	Rotas tecnológicas possuem muitas conexões. Presença de bancos como co-titulares de patentes
Química e Metalurgia (C)	Óleos, substâncias graxas, detergentes, bioquímica, microbiologia e enzimologia	C11B-011; C11B-013	Etanol e biodiesel	Preparação de óleo combustível a partir de resina de pinheiro	Empresas finlandesas e a alemã Linde AG	Não foram encontradas patentes citando etanol e biodiesel nas rotas tecnológicas mais relevantes
Química e Metalurgia (C)	Metalurgia do ferro	C21B-005; C21B-007; C21B-003	Cimento; Siderurgia	Tratamento e reutilização de escórias em altos-fornos	Holderbank Financiere Glarus (até 2000) Siemens, Holcim Technology e Voest Alpine Ind Anlagen (mais recentemente)	Forte presença da empresa Holcim Technology
Química e Metalurgia (C)	Metalurgia de ligas ferrosas e não-ferrosas	C25D-011; C25C-001; C22B-021; C23C-016; C23C-014; C30B-029	Alumínio (direto); Cimento; Energia; Siderurgia (indireto)	Purificação de placas de alumínio via reaproveitamento de resíduos	Aleris Switzerland e Corus Technology	Presença de pessoas físicas e institutos de pesquisa como titulares
Engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos (F)	Iluminação	F21L-002	Energia	Chips emissores de luz LED (apenas duas patentes identificadas)	-	Patentes depositadas por pessoas físicas chinesas (inventores)
Engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos (F)	Combustão, aquecimento, resfriamento e refrigeração	F23B-080; F24H-007; F23B-090	Energia; Química e petróleo	Redução da emissão de gases nocivos em máquinas de combustão	Empresas japonesas como Hitachi, Tiyoda Seisakusho KK e Sakura Seiki Co Ltd	Diversidade na descrição de tecnologias no componente principal da rede
Engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos (F)	Secagem, fornalhas e troca de calor	F28D-019; F27B-015; F27B-001; F28D-017	Cimento; Siderurgia	Métodos e dispositivos geradores, regeneradores e armazenadores de calor	Honda, Sharp e Toshiba	Presença significativa da Força Aérea dos Estados Unidos na rede com as principais rotas tecnológicas
Eletricidade (H)	Elementos elétricos básicos	H01M-012; H01M-014; H01G-009; H01L-027; H01L-025	Energia; Química e petróleo	Monitores, dispositivos emissores de luz e semicondutores	Semiconductor Energy Lab, Cannon, Casio, Seiko	Presença significativa da empresa japonesa de P&D Semiconductor Energy Lab
Eletricidade (H)	Produção, conversão ou distribuição de energia elétrica	H02J-015; H02J-003; H02J-009; H02N-006	Energia; Química e petróleo	Sistemas de controle de energia elétrica	Empresas japonesas como Toshiba, Mitsubishi e Honda	Todas as patentes contidas nas rotas principais foram depositadas no Japão ou via tratado PCT

4. Considerações Finais

Este capítulo procura apresentar rotas tecnológicas para doze (12) grupos tecnológicos, estimadas a partir de um conjunto de IPCs priorizados pelos pesquisadores Setoriais. A estimativa dessas rotas envolveu um processo de redução e seleção que condicionou as características das rotas tecnológicas estimadas.

Dados esse condicionante, a primeira conclusão que pode ser extraída do estudo, dado ainda o elevado número de patentes presentes nas análises (842.007 patentes identificadas), é a natureza dissociada que o desenvolvimento das tecnologias guarda entre si. Isto é, usualmente as redes estimadas envolvem um subconjunto bastante restrito do conjunto das patentes utilizadas para sua estimação.

Ainda assim, é possível perceber que dentre os grupos tecnológicos considerados, Os IPCs que envolvem produtos químicos e de metalurgia (seção C) constitui o conjunto mais relevante de tecnologias verdes da pesquisa. Dos 35 de tipos de tecnologias (IPCs) consideradas, 19 delas se mostraram relevantes nas análises de impacto. Dentre conjunto de grupos tecnológico também houve o maior número de associações, diretas ou indiretas, com setores econômicos, sendo as empresas responsáveis por esses desenvolvimentos, na maior parte dos casos, sediadas nos países centrais, como Japão, EUA, Alemanha, entre outros.

No setor de etanol e biodiesel destacaram-se 30 rotas tecnológicas, com direcionamentos diversos. Desde tecnologias de hiper-saturação micro-molecular de óleos de cozinha convencionais para aplicações em elevada altitude e espaços confinados até desenvolvimento de lipídio estruturado contendo composições e métodos com características promotoras de saúde e nutrição. As trajetórias possuem baixo número de patentes intermediárias e diversas patentes finais, o que é um indicativo de que a tecnologia ainda está em expansão. As patentes mais recentes envolvem a produção de esteres de glicerol acil e ácidos graxos triglicéridos para realização de revestimentos biocompatíveis.

Não se localizou nenhuma patente com depósito prioritário no Brasil, o que chama a atenção uma vez que há diversos programas voltados a Biodiesel, os quais tem sido alvo de investimentos em tecnologia. Verifica-se que não se trata apenas de uma política de primeiro patentear no exterior, e sim de realmente não haver tecnologia nacional sendo desenvolvida para esta importante rota tecnológica, nem por empresas brasileiras, nem por ICTs (Instituição de Ciência e tecnologia) nacionais. Isto no futuro poderá significar que o país enfrentará dependência tecnológica em relação à produção desta categoria de combustíveis.

A seção de operações de engenharia mecânica, iluminação, aquecimento, armas e explosivos (F) também é numerosa em quantidade de IPCs, com 24 grupos de tecnologias afetando 5 setores distintos – automóveis e aeronáutico, cimento, energia, química e petróleo, e siderurgia. Entretanto, o número de IPCs relevantes se mostra relativamente menor, com destaque para os IPCs de tecnologias supostamente relacionadas ao setor de Energia. Nos grupos tecnológicos pertencentes a essa seção se observa-se a presença de empresas japonesas, e em alguns casos norte-americanas.

A seção de Eletricidade também merece destaque nas considerações finais. Dentre os 16 IPCs priorizados, 5 destes compartilhados entre ambos os setores, 9 exclusivos ao setor de energia e 2 exclusivos ao de química e petróleo, 9 demonstraram-se relevantes por meio da análise de impacto. As tecnologias desenvolvidas encontram aplicações principalmente nos setores de Energia, Química e Petróleo, sendo novamente relevante a presença de empresas japonesas.

No agrupamento de **elementos elétricos básicos**, as tecnologias mais relevantes estão associadas a células híbridas, geradores eletroquímicos, capacitores eletrolíticos e semicondutores, com destaque para as patentes que tratam de monitores, dispositivos emissores de luz e semicondutores; onde a empresa Semiconductor Energy Lab se sobressai em razão de aprimoramentos tecnológicos sequenciais nesta rota.

O último agrupamento tecnológico do setor de eletricidade abrange tecnologias verdes relacionadas à **produção, conversão ou distribuição de energia elétrica**. Nota-se uma grande relação tecnológica entre os IPCs. Esta rede conta com 23.275 patentes, das quais 1586 (6,8%) estão conectadas por citações e 634 estão no componente principal, com destaque para os depósitos recentes realizados no escritório patentário japonês e proteção via tratado PCT (*Tratado de Cooperação em matéria de Patentes*).

Há indícios de que muitas das patentes estão associadas a economia de energia. Destaca-se a proteção de tecnologias a respeito de sistemas de controle de fluxo de energia e compensadores; acumuladores de energia; sistema de distribuição híbrido; método e sistema de regulador de frequência; sistemas de co-geração de energia; método de controle de energia com sistemas de compensação. Como boa parte dos setores envolvidos no projeto EBC é intensivo em energia, como alumínio, cimento, química e petroquímica, há indicativos de que estes setores necessitam estar preparados para uma concorrência que deverá ter um dos seus pilares em melhorias no uso de energia, que tanto poderão resultar em melhorias de produtividade, quanto em redução de custos.

As análises mostram que houve uma maior inflexão na trajetória de pedidos de patentes a partir do final dos anos de 1990 ou início dos anos de 2000 para a maior parte das áreas tecnológicas consideradas, com forte predomínio de firmas de origem japonesa, alemã, americanas e em menor número dos principais desenvolvidos. No entanto, dado o caráter recente desse desenvolvimento é interessante questionar o que determinou a maior capacidade de resposta ao estímulo para o desenvolvimento de tecnologias verdes.

O primeiro fator é de conhecimento geral, dado pela associação positiva entre renda per capita dos países, o nível de esforço tecnológico e o grau de consolidação institucional dos sistemas de inovações nacionais, sendo, portanto, grande parte desses resultados explicados por essa regularidade. Isto é, países mais estruturados economicamente e institucionalmente para atividades inovativas foram aqueles mais aptos ao desenvolvimento de tecnologias verdes.

Entretanto, outro fator relevante para esse predomínio é o grau prioritário que a inovação verde é tida em países como Japão, Alemanha, Coreia, França, entre outros, que articulado às vantagens comparativas das industriais desses países, fazem com que seja possível associar a origem das empresas à desenvolvimentos tecnológicos específicos. Exemplo notório disso é a predominância japonesa na detenção de patentes relacionadas ao setor automobilístico, ao passo que empresas químicas alemãs se destacam na detenção de patentes em áreas tecnológicas de química e energia. Outro exemplo são as restrições enfrentadas pelos EUA no setor energético, que os motivam a liderar a pesquisa nas áreas tecnológicas de energia limpa, com desenvolvimentos definidos no setor

de etanol e biodiesel. Isto é, o caráter trajetória dependente do desenvolvimento das tecnologias também pode estar associado ao histórico de políticas e sua orientação estratégica. Nesse sentido a priorização estratégica ao desenvolvimento de indústrias e mercados para tecnologias verdes, combinados a um amplo conjunto de incentivos à pesquisa e desenvolvimento, além de restrições mais significativas em termos de reduções de emissões combinadas com mercados de trocas de permissões define o conjunto de políticas relevantes para explicar a segunda parcela explicativa das evidências obtidas. A questão que se coloca, entretanto, é qual o papel reservado para o Brasil nessa categoria de desenvolvimento tecnológico e econômico. A participação incipiente de firmas e universidades brasileiras nas estatísticas patentárias é um sintoma de que o país encontra-se bastante atrasado na definição do seu “mix” de políticas relevantes, bem como de sua orientação estratégica. Essa definição é premente dadas as transformações em curso e as possibilidades de definição das trajetórias futura de desenvolvimento dos países em uma economia de baixo carbono.

Referências Bibliográficas

- BRESCHI, S.; LISSONI, F.; MALERBA, F. *Knowledge-relatedness in firm technological diversification*. Research Policy, v. 32, p. 69-87, 2003.
- CHEN, Y.; CHIU, Y. *Vector space model for patent documents with hierarchical class labels*. Journal of Information Science, 2012, p. 1-12.
- CHOI, C., Kim, S. & Park, Y., 2007. A patent-based cross impact analysis for quantitative estimation of technological impact: The case of information and communication technology. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 74, p. 1296–1314.
- COURTIAL, J. P.; CALLON, M.; SIGOGNEAU, A. *The use of patent titles for identifying the topics of invention and forecasting trends*. Scientometrics, v. 26, n. 2, p. 231-242, 1994.
- HALL, B. H.; JAFFE, A. B.; TRAJTENBERG, M. *The NBER Patent Citation Data File: Lessons, Insights and Methodological Tools*. NBER Working paper series, n. 8498, 2001.
- HUMMON, N. P.; DOREIAN, P. *Connectivity in a citation network: the development of the DNA theory*. Social networks, v. 11, p. 39-63, 1989.
- JACKSON, M. O. *Social and Economic Networks*. Princeton: Princeton University Press, Primeira edição, 2008.
- KIM, C.; LEE, H.; SEOL, H.; LEE, C. *Identifying core technologies based on technological cross-impacts: An association rule mining (ARM) and analytic network process (ANP) approach*. Expert Systems with Applications, v. 38, p. 12559-12564, 2011.
- KOTSIAANTIS, S.; KANELLOPOULOS, D. *Association Rules Mining: A Recent Overview*. GESTS International Transactions on Computer Science and Engineering, v. 32, n. 1, p. 71-82, 2006.
- LEE, H.; KIM, C.; CHO, H.; PARK, Y. *An ANP-based technology network for identification of core technologies: A case of telecommunication technologies*. Expert Systems with Applications, v. 36, p. 894-908, 2009.
- LIEBOWITZ, J. *Linking social network analysis with the analytic hierarchy process for knowledge mapping in organizations*. Journal of Knowledge Management, v. 9, n. 1, p. 76-86, 2005.

- NARIN, F. *Patent Bibliometrics*. *Scientometrics*, v. 30, n. 1, p. 147-155, 1994.
- OCDE a. *Better policies to support eco-innovation*. OECD Studies on Environmental Innovation, OECD Publishing, 2011.
- OCDE b. *Fostering innovation for green growth*. OECD Studies on Environmental Innovation, OECD Publishing, 2011.
- OCDE c. *Invention transfer of environmental technologies*. OECD Studies on Environmental Innovation, OECD Publishing, 2011.
- ONU; *World Economic and Social Survey 2011 – The great green technological transformation*. Department of Economic and Social affairs, 2011, New York.
- STERNITZKE, C.; BARTKOWSKI, A.; SCHRAMM, R. *Visualizing patent statistics by means of social network analysis tools*. *World Patent Information*, v. 30, p. 115-131, 2008.
- TRAJTENBERG, M. *A Penny for Your Quotes: Patent Citations and the Value of Innovations*. *The RAND Journal of Economics*, v. 21, n. 1, p. 172-187, 1990.
- UNEP, EPO and ICTSD (United Nations Environment Programme (UNEP), European Patent Office (EPO) and International Centre for Trade and Sustainable Development (ICTSD). *Patents and clean energy: bridging the gap between evidence and policy*. Final report, 2010. 102 paginas. Disponível em <http://www.epo.org/news-issues/issues/clean-energy/study.html>, acesso outubro de 2011.
- VERSPAGEN, B. *Mapping technological trajectories as patent citation networks: a study on the history of fuel cell research*. *Advances in Complex Systems*, v. 10, n. 1, p. 93-115, 2007.
- WALLIN, J. A. *Bibliometric Methods: Pitfalls and Possibilities*. *Basic & Clinic Pharmacology & Toxicology*, v. 97, p. 261-275, 2005.
- WARTBURG, I. V.; TEICHERT, T.; ROST, K. *Inventive progress measured by multi-stage patent citation analysis*. *Research Policy*, v. 34, p. 1591–1607, 2005.
- WIPO; *IPC Green Inventory*. World Intellectual Property Organization Disponível em <http://www.wipo.int/classifications/ipc/en/est/>. Acesso em outubro de 2011

Apêndice 1: Lista dos IPC priorizados pelos pesquisadores Setoriais para elaboração do estudo de Rotas Tecnológicas.

Descrição	IPCs priorizados
Vehicles in general (B60)	
Disposição ou montagem de uma diversidade de máquinas motrizes de propulsão recíproca ou comum, p. ex., sistema de propulsão híbrido constituído de motores elétricos e motores de combustão interna	B60K 6/00 B60K 6/28
Regenerative braking systems	---
Propulsão elétrica a partir de energia extraída das forças da natureza (ex. sol, vento)	B60L 8/00
Propulsão elétrica com fonte de energia externa ao veículo	B60L 9/00
Propulsão elétrica com fonte de energia no interior do veículo	B60L 11/00
Disposições relativas à alimentação de energia extraída das forças da natureza, p. ex., do sol, do Vento	B60K 16/00
Disposições relativas à alimentação de combustível aos motores de combustão; Montagem ou construção de tanques de combustíveis	B60K 15/00
Disposições ou montagem de unidade de propulsão elétrica	B60K 1/00
Sistemas de controle especialmente adaptados a veículos híbridos, i.e. veículos com dois ou mais de tipos de dispositivos motrizes diferentes, p. ex., motores elétrico e de combustão interna, todos usados para propulsão do veículo	B60W 20/00

continua

Combustíveis (C10)	
Recuperação de misturas líquidas de hidrocarboneto a partir de gases(ex. gás natural)	C10G 5/00
Refinação de óleos hidrocarbonetos usando hidrogênio ou compostos geradores de hidrogênio	C10G45/00
Craqueamento de óleos hidrocarbonetos, na presença de hidrogênio ou de compostos geradores de hidrogênio, para obter frações de ponto de ebulição inferior	C10G 47/00
Combustíveis carbonáceos líquidos	C10L 1/00
Combustíveis gasosos; Gás natural; Gás liquefeito de petróleo	C10L 3/00
Motores de Combustão; Instalações de Motores A Gás Quente ou de Produtos de Combustão (F02)	
Instalações caracterizadas pela forma ou disposição do tubo de jato ou dos bocais; Tubos ou bocais próprios para esse fim	F02K 01/00
Separation of solid materials using liquids or using pneumatic tables or jigs; magnetic or electrostatic separation of solid materials from solid materials or fluids; separation by high-voltage electric fields	
Separating solid materials; General arrangement of separating plant specially adapted for refuse	B03B 9/06
Preparation or pretreatment of the material to be shaped; making granules or preforms; recovery of plastics or other constituents of waste material containing plastics	
Preparing material; Recycling the material	B29B 7/66
Outros IPCs sugeridos pelo pesquisador que não constam no IPC Green Inventory	
Obtaining aluminium	C22B 21/00
with reducing	C22B 21/02
with alkali metals	C22B 21/04
Refining	C22B 21/06
Alloys based on aluminium	C22C 21/00
with silicon as the next major constituent	C22C 21/02
Modified aluminium-silicon alloys	C22C 21/04
with copper as the next major constituent	C22C 21/12
Revestimento eletrolítico por reação de superfície, i.e., formando camadas de conversão	C25D 11/00
Anodisação	C25D 11/02
Revestimento de alumínio e suas ligas	C25D 11/04
Produção, recuperação, ou refino eletrolítico dos metais por eletrólise de banhos fundidos (C25C 5/00 takes precedence)	C25C 3/00
of aluminium	C25C 3/06
Cell construction, e.g. bottoms, walls, cathodes	C25C 3/08
External supporting frames or structures	C25C 3/10
Anodes	C25C 3/12
Harnessing energy from manmade waste	
Using top gas in blast furnaces to power pig-iron production	C21B 5/06
Separation of components	B01D 53/02, 53/04, 53/047, 53/14, 53/22, 53/24
Using waste heat	
Arrangements for using waste heat from furnaces, kilns, ovens or retorts	F27D 17/00
Regenerative heat-exchange apparatus	F28D 17/00-20/00
Reuse of waste materials	
Recovery or working-up of waste materials	C08J 11/00-11/28, C14C 3/32, C21B 3/04, C25C 1/00, D01F 13/00-13/04
Polution Control	
Carbon capture and storage	B01D 53/14, 53/22, 53/62; B65G 5/00, C01B 31/20; E21B 41/00, 43/16; E21F 17/16, F25J 3/02
Treatment of waste gases	B01D 53/00-53/96

continua

Removal of waste gases or dust in steel production	C21C 5/38
Dust removal from furnaces	C21B 7/22; C21C 5/38; F27B 1/18; F27B 15/12
Production of hydraulic cements from waste materials ¹	C04B 7/24-7/30
Bio-fuels	
Biodiesel	C07C 67/00, 69/00; C10G; C10L 1/02, 1/19; C11C 3/10; C12P 7/64
Bioethanol	C10L 1/02, 1/182; C12N 9/24; C12P 7/06-7/14
Alternative Energy Production	
Fuel cells	H01M 4/86-4/98
Within hybrid cells	H01M 12/00-12/08
Harnessing energy from manmade waste	
Gasification	C10J 3/02, 3/46, F23B 90/00, F23G 5/027
Using waste heat	
Storage of electrical energy	B60K 6/28, B60W 10/26, H01M 10/44-10/46, H01G 9/155 H02J 3/28, 7/00, 15/0
Pollution control	
Carbon capture and storage	B01D 53/14, 53/22, 53/62, B65G 5/00, C01B 31/20, E21B 41/00, 43/16, E21F 17/16, F25J 3/02
Air quality management	
Combustion apparatus using recirculation of flue gases	C10B 21/18; F23B 80/02; F23C 9/00
Combustion of waste gases or noxious gases	F23G 7/06
Reuse of waste materials	
Recovery of plastics materials from waste	B29B 17/00
Of polymers	C08J 11/04-11/28
Production of liquid hydrocarbons from rubber waste	C10G 1/10
Solid fuels derived from waste	C10L 5/46, 5/48
energia solar	
Dispositivos adaptados para a conversão de energia de radiação em energia eléctrica	<u>H01L 27/142</u> , <u>31/00-31/078</u> <u>H01G 9/20</u> <u>H02N 6/00</u>
O uso de materiais orgânicos como a parte ativa	<u>H01L 27/30</u> , <u>51/42 - 51/48</u>
Montagens de uma pluralidade de células solares	<u>H01L 25/00</u> , <u>25/03</u> , <u>25/16</u> , <u>25/18</u>
Silicone; um único cristal de crescimento	<u>C01B 33/02</u> <u>C23C 14/14</u> , <u>6/24</u> <u>C30B 29/06</u>
Aparelhos elétricos, dispositivos de iluminação com ou recarregáveis com, células solares	<u>F21L 4/00</u> <u>F21S 9/03</u>
Carregar baterias	<u>H02J 7/35</u>
Dye células solares sensibilizadas (DSSC)	<u>H01G 9/20</u> ; <u>H01M 14/00</u>
A utilização de calor solar	<u>F24J 2/00-2/54</u>

Produção de energia mecânica a partir de energia solar	F03G 6/00-6/06
Geração de vapor usando o calor solar	F22B 1/00 F24J 1/00
Refrigeração ou sistemas de bombas de calor usando energia solar	F25B 27/00
Uso de energia solar para secagem de materiais ou objetos	F26B 3/00 , 3/28
Concentradores solares	F24J 6/2 ; G02B 7/183
Conservação De Energia	
Armazenamento de energia elétrica	B60K 6/28 , B60W 10/26 , H01M 10/44 - 10/46 , H01G 9/155 , H02J 3/28 , 7/00 , 15/00 _
Circuito fonte de alimentação	H02J
Com modos de economia de energia	H02J 9/00
Medição do consumo de eletricidade	B60L 3/00 G01R
Armazenamento de energia térmica	C09K 5/00 , F24H 7/00 , F28D 20/00 , 20/02
Eletroluminescentes fontes de luz (LEDs, OLEDs, PLEDs)	F21K 99/00 F21L 02/04 H01L 33/00-33/64 , 51/50 H05B 33/00

Apêndice 2: Fatores de Impacto dos Grupos Tecnológicos priorizados

DESCRIÇÃO SUGERIDA	IPC	IMPACTO
separação e recuperação de materiais	B29B-007	0,7933
	B03B-009	0,1967
	B29B-017	0,0776
	B01D-053	0,0088
veículos em geral	B60K-016	0,3891
	B60L-008	0,2244
	B60L-009	0,0752
	B60L-003	0,0684
	B60K-015	0,0644
	B60K-001	0,0504
	B60W-010	0,0401
	B60W-020	0,0375
	B60L-011	0,0361
B60K-006	0,0338	

química orgânica, inorgânica e processamento químico	C04B-007	0,4536
	C01B-033	0,2242
	C01B-031	0,1233
	C09K-005	0,1021
	C08J-011	0,0592
	C07C-067	0,0447
	C07C-069	0,0367
petróleo, gás ou coque	C10B-021	0,7375
	C10G-005	0,1299
	C10G-045	0,0369
	C10L-003	0,0225
	C10G-001	0,0180
	C10J-003	0,0178
	C10L-005	0,0155
	C10G-047	0,0149
C10L-001	0,0108	
óleos, substâncias graxas, detergentes, bioquímica, microbiologia e enzimologia	C11B-011	0,5130
	C11B-013	0,3634
	C11C-003	0,1015
	C12N-009	0,0454
	C12P-007	0,0407
metalurgia do ferro	C21B-005	0,3842
	C21B-007	0,3008
	C21B-003	0,2329
	C21C-005	0,1420
DESCRIÇÃO SUGERIDA	IPC	IMPACTO
metalurgia de ligas ferrosas e não-ferrosas	C25D-011	0,2104
	C25C-001	0,1973
	C22B-021	0,1459
	C23C-016	0,1100
	C23C-014	0,0838
	C30B-029	0,0822
	C25C-003	0,0737
	C22B-007	0,0564
	C22C-021	0,0483
	D01F-013	-
equipamentos e dispositivos utilizados em poços e minas	E21F-017	0,8207
	E21B-041	0,1655
	E21B-043	0,0138
iluminação	F21L-002	0,9218
	F21K-099	0,0375
	F21S-009	0,0213
	F21L-004	0,0176

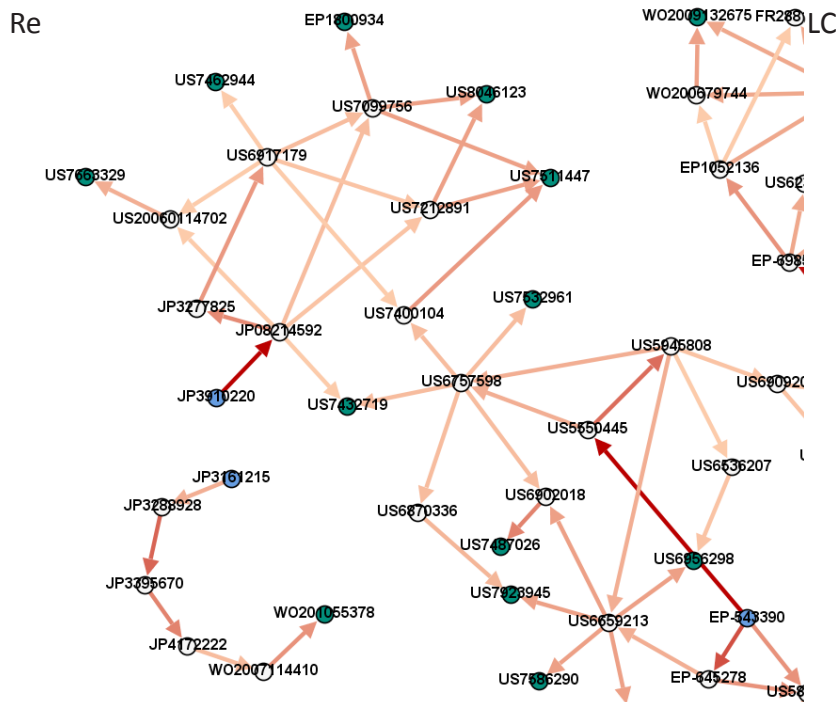
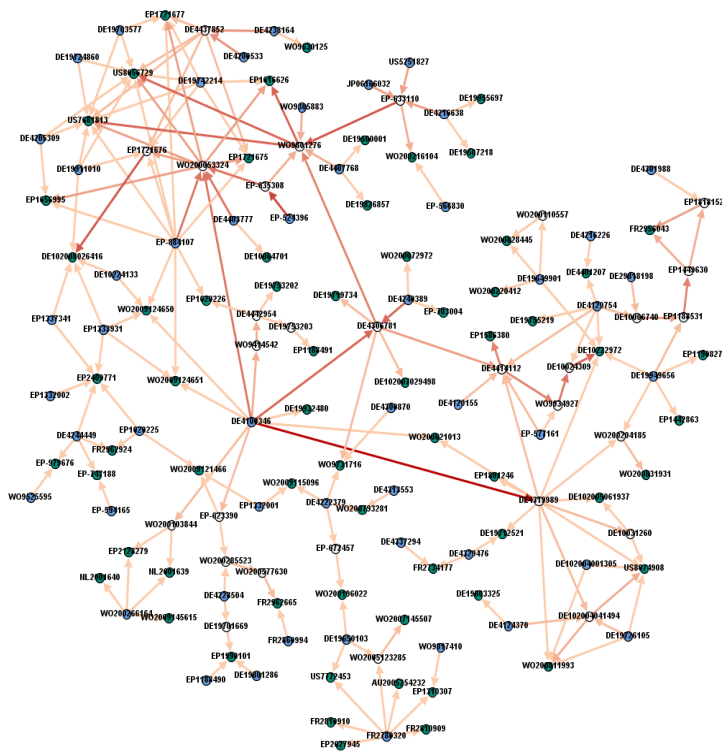
continua

combustão, aquecimento, resfriamento e refrigeração	F23B-080	0,3471
	F24H-007	0,2711
	F23B-090	0,2176
	F24J-001	0,0508
	F23C-009	0,0412
	F25B-027	0,0194
	F23G-007	0,0138
	F23G-005	0,0129
	F22B-001	0,0116
	F25J-003	0,0058
	F24J-002	0,0045
secagem, fornalhas e troca de calor	F28D-019	0,3131
	F27B-015	0,2213
	F27B-001	0,1860
	F28D-017	0,1302
	F28D-020	0,0825
	F27D-017	0,0316
	F26B-003	0,0302

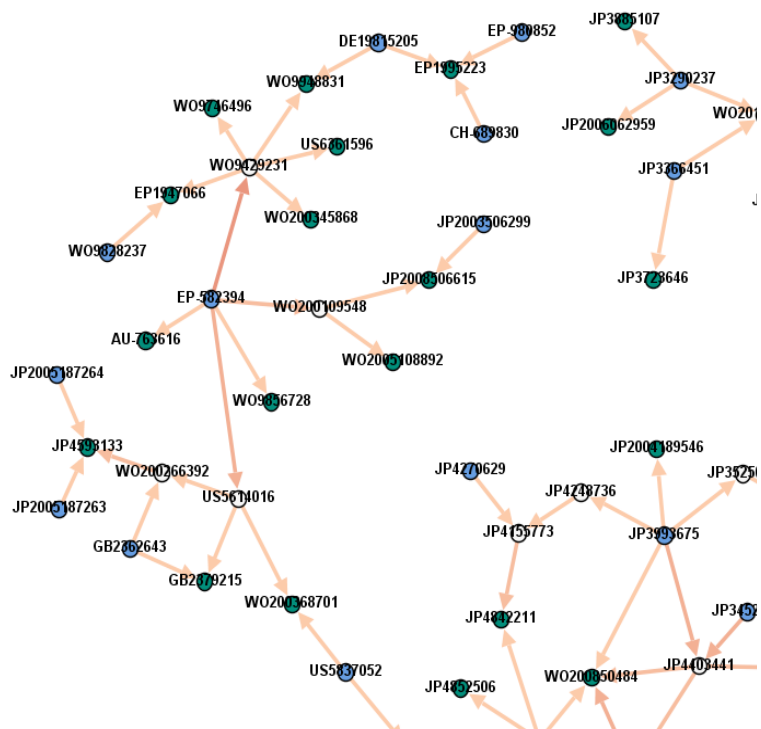
DESCRIÇÃO SUGERIDA	IPC	IMPACTO
elementos elétricos básicos	H01M-012	0,4607
	H01M-014	0,1417
	H01G-009	0,0837
	H01L-027	0,0725
	H01L-025	0,0562
	H01L-051	0,0521
	H01L-031	0,0345
	H01M-004	0,0302
	H01M-010	0,0254
	H01L-033	0,0198
produção, conversão ou distribuição de energia elétrica	H02J-015	0,2798
	H02J-003	0,2476
	H02J-009	0,2431
	H02N-006	0,1829
	H02J-007	0,0429

Apêndice 3 - Redes de Citações e Trajetórias Tecnológicas

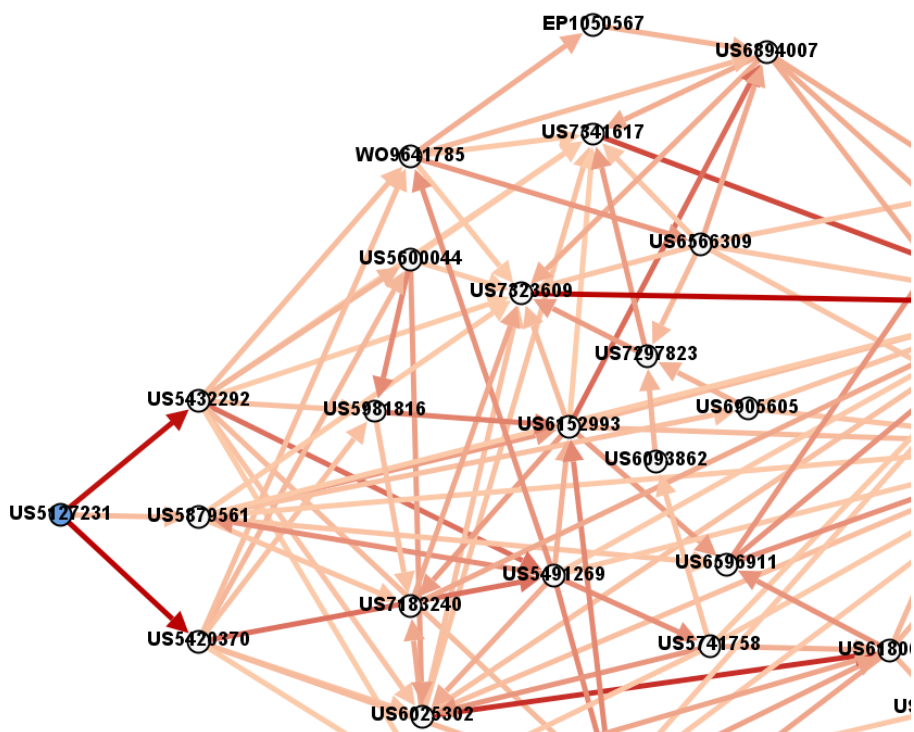
Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de separação e recuperação de materiais



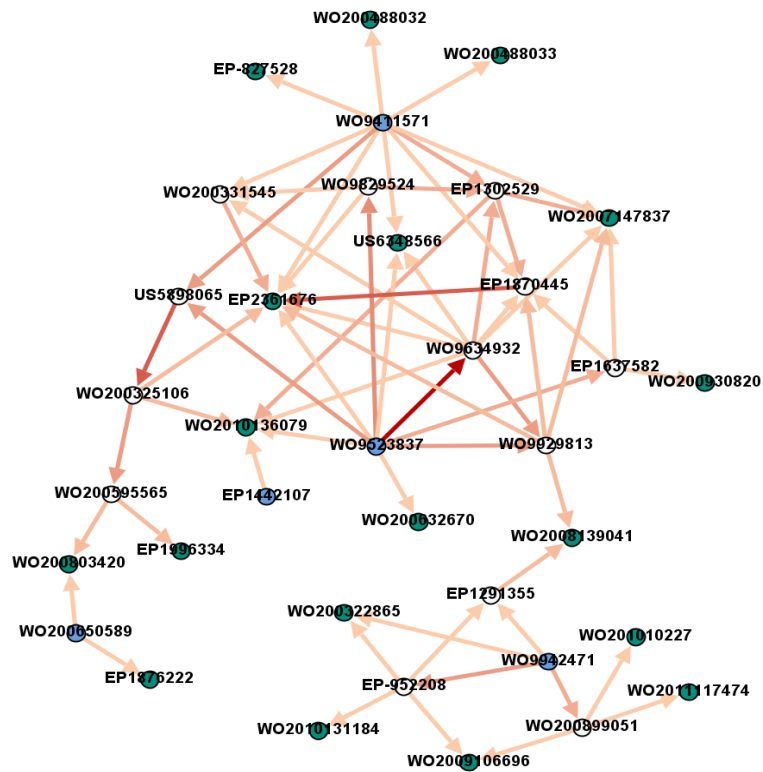
Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de química orgânica, inorgânica e processamento químico.



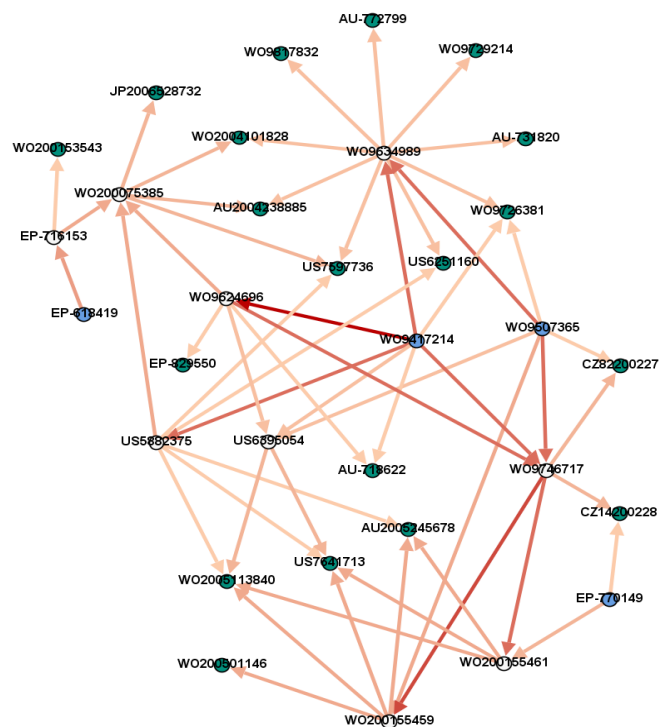
Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de petróleo, gás ou coque – Filtrado com apenas 50 rotas de maior escore SPLC.



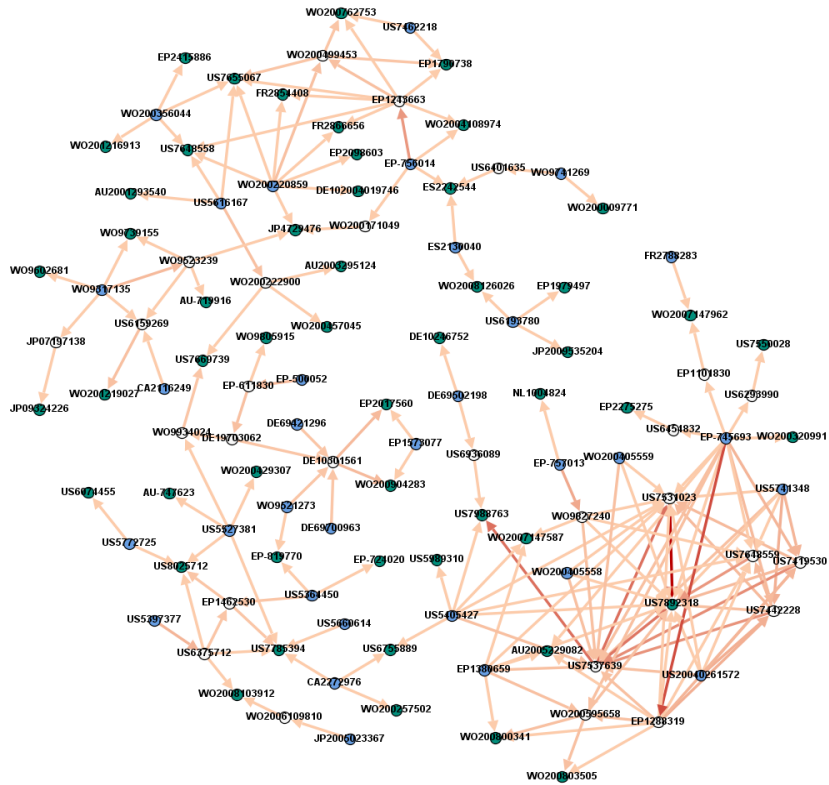
Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de óleos, substâncias graxas, detergentes, bioquímica, microbiologia e enzimologia.



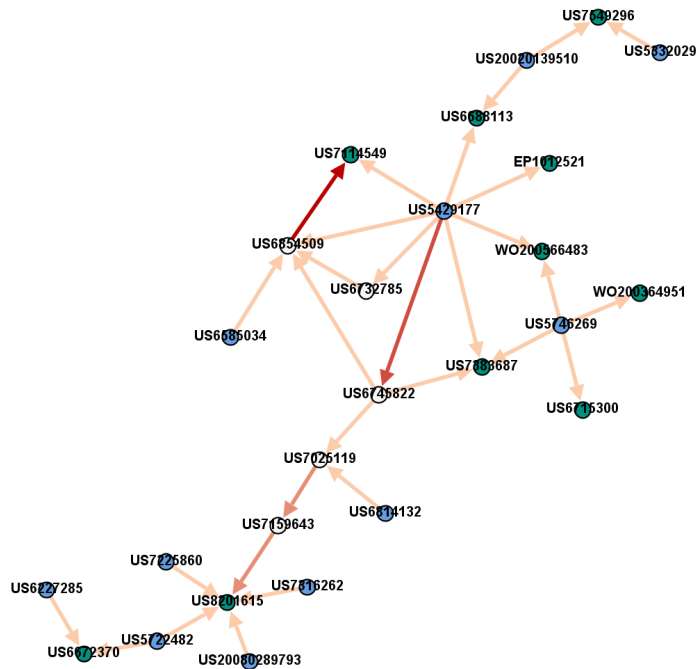
Rede de citações de patentes do agrupamento Metalurgia do ferro.



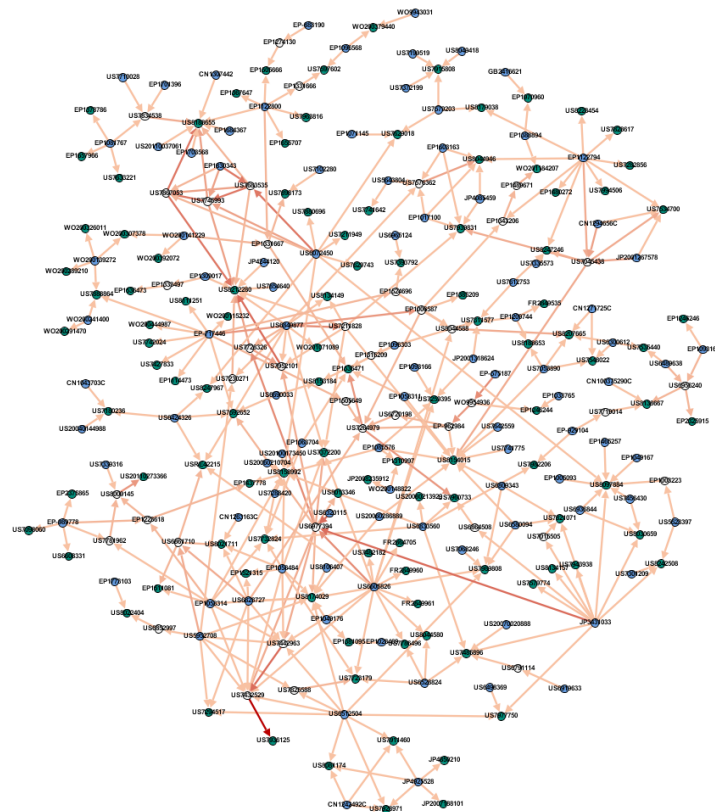
Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de metalurgia de ligas ferrosas e não-ferrosas.



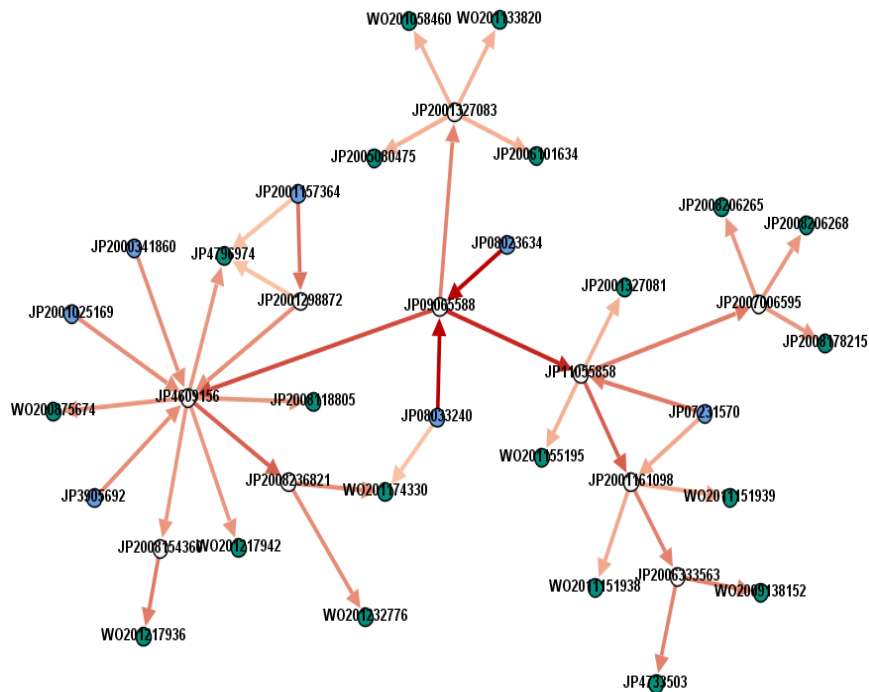
Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de secagem, fornalhas e troca de calor.



Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de elementos elétricos básicos.



Rede de citações de patentes do agrupamento tecnológico de produção, conversão ou distribuição de energia elétrica.



Indústria do Cimento

Marcelo Pinho
Lourenço G. D. Faria

Introdução

A fabricação de cimento é uma das atividades industriais com maior impacto em termos de emissões de gases do efeito estufa. Não só por sua intensidade em energia térmica, mas também em decorrência da operação de descarbonatação do calcário, que é central na transformação industrial que resulta na produção do cimento, o setor gera emissões que, em escala mundial, são estimadas em 7,5% das emissões antrópicas de CO₂. Nesse contexto, nenhum esforço sério de mitigação das mudanças climáticas pode deixar de lado a indústria do cimento. O propósito central deste capítulo é discutir como as mudanças institucionais e tecnológicas associadas à mitigação das emissões de carbono e das mudanças climáticas afetam a indústria do cimento, contribuindo assim para o debate sobre as estratégias públicas e privadas de ajustamento do setor a esse contexto.

A pesquisa que deu origem a este capítulo se baseia em fontes de informação primárias e secundárias. Entre estas, cabe destacar dados estatísticos compilados por associações empresariais, relatórios de pesquisa e um levantamento na imprensa econômico-financeira de reportagens recentes sobre as empresas líderes do setor. Foram consultados também sites e relatórios de empresas, entidades empresariais e órgãos governamentais com atuação relevante sobre o setor e os temas estudados. Já a informação primária provém de entrevistas realizadas com agentes vinculados à indústria e questionários enviados a especialistas setoriais, tanto pesquisadores acadêmicos quanto profissionais vinculados às empresas e entidades empresariais¹. Ainda que o número de respostas a este questionário tenha sido pequeno, o nível de qualificação dos respondentes – expresso numa experiência profissional com a indústria do cimento, em média, acima de 20 anos – indica que seus resultados são relevantes para a pesquisa.

Além desta breve introdução, este capítulo se divide em cinco seções principais. A primeira fornece uma caracterização técnica e econômica do setor que, considerando as restrições de espaço, não pode deixar de ser sumaríssima. O segundo item descreve os principais traços da dinâmica tecnológica setorial. O tópico subsequente discute a competitividade internacional da indústria brasileira do cimento. A quarta e mais extensa seção desenvolve os temas centrais do capítulo, apresentando os principais impactos ambientais – locais e globais – decorrentes da produção de cimento e discutindo no contexto setorial as mudanças institucionais e tecnológicas vinculadas à transição para uma economia de baixo carbono. Por fim, o quinto e último tópico sintetiza os efeitos dessas mudanças sobre a indústria do cimento no Brasil e aponta os eixos principais de uma estratégia de ajustamento do setor a tal contexto.

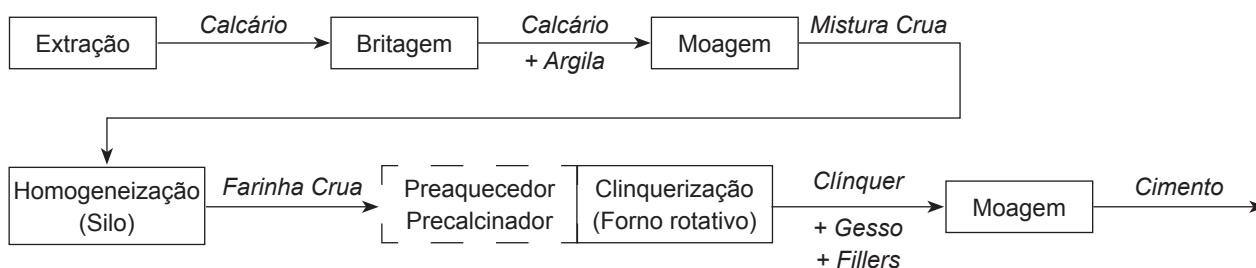
1 Foram entrevistados José Otávio Carvalho, presidente do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria do Cimento), Yoshiro Kihara, gerente de tecnologia da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), Daniel Mendonça, gerente de certificação da qualidade e meio-ambiente da Cimpor do Brasil, e Valéria Soares Pereira, gerente de meio-ambiente da Holcim (Brasil) S/A. Além dos três últimos, responderam ao questionário Gonzalo Visado (SNIC), Edvaldo Araújo Rabelo (Votorantim Cimentos), Seiiti Suzuki (Intercement), Oscar Rubem Klegues Montedo (Unesc – Universidade do Extremo Sul Catarinense), Guilherme Chagas Cordeiro (UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense) e Jorge Luís Akasaki (Unesp – Universidade Estadual Paulista). A todos os entrevistados e interrogados, que gentilmente dispuseram de seu tempo para contribuir com esta pesquisa, os autores consignam seu agradecimento. Naturalmente, isso não implica compartilhar a responsabilidade pelas informações, análises e pontos de vista aqui expressos, que é indelegavelmente nossa.”

1. Caracterização Setorial

O cimento é um material de grande utilidade para a construção civil. Após ser misturado à água e reagir com ela, adquire resistência mecânica e apresenta capacidades aglomerantes que não são encontradas em outros produtos com nível de preço semelhante. Sua fabricação se supre de duas matérias-primas básicas: o calcário e a argila (Figura 1). O primeiro é britado e, em seguida, moído em conjunto com a argila. O material obtido – chamado de mistura crua – é homogeneizado em silos que servem apenas a esse propósito. Na etapa seguinte, ocorrem as transformações químicas críticas para a produção do cimento. Depois de um preaquecimento a uma temperatura entre 700 °C e 800 °C, a farinha crua é submetida a uma chama que atinge 2.000°C. Nesse processo, o componente mais importante do calcário, o carbonato de cálcio (CaCO_3), é descarbonatado.

Os fornos de calcinação são equipamentos rotativos, levemente inclinados e revestidos com refratários, para proteger a carcaça e evitar a dispersão do calor. Na configuração mais atualizada, têm tipicamente diâmetro de 4 m a 6 m e comprimento de 60 m. Esta etapa do processo é muito intensiva em capital fixo e sujeita a escalas mínimas eficientes relativamente altas². No interior dos fornos de calcinação, a temperatura do material em processamento eleva-se a 1.450 °C, deflagrando diversas reações químicas até se produzir um semiproduto chamado clínquer.

Figura 1 Esquema Simplificado de Fabricação de Cimento Portland



Fonte: Elaboração própria.

A fabricação do clínquer é a etapa central do processo de produção de cimento. As duas principais alternativas tecnológicas para esse processo são a “via úmida” e a “via seca”, hoje largamente predominante. Os fornos que operam a via seca se caracterizam pela menor dimensão, maior produtividade e, sobretudo, menor consumo de energia térmica. A preocupação em aproveitar o calor residual dos gases de exaustão dos próprios fornos e dos resfriadores de clínquer

² Uma alternativa aos fornos rotativos compatível com a operação em menor escala são os fornos verticais. Pesam contra os fornos verticais duas desvantagens críticas: maior consumo de energia e restrições quanto à qualidade do produto, tanto em termos de homogeneidade quanto de alcance das especificações requeridas para usos estruturais mais exigentes. Uma proporção declinante, mas ainda significativa, do cimento chinês é fabricada em fornos desse gênero.

ampliou a difusão dos preaquecedores, introduzidos já nos anos 1930, e precalcinadores, que se disseminaram a partir dos anos 1970.

Combustíveis fósseis – coque de petróleo, carvão mineral, gás natural e óleo combustível – são as fontes convencionais de calor para um processo que é intensivo em energia e libera na atmosfera enorme quantidade de CO₂, não só pela queima dos combustíveis, mas também pela descarbonatação do calcário. A etapa de produção do clínquer é responsável por 90% das emissões de carbono na indústria do cimento. As estimativas mais recentes apontam um volume total de emissões da ordem de 2,3 Gt de CO₂, equivalentes, como já se disse, a 7,5% das emissões antrópicas desse gás (IEA, 2012: 402). Nesse contexto, entende-se que a atenuação dos impactos ambientais e o incremento da eficiência energética sejam dois objetivos de primeira ordem no desenvolvimento tecnológico do setor.

O resfriamento do clínquer deve ser feito de forma rápida, mas controlada. Somente depois disso, o clínquer pode ser moído, geralmente com uma pequena proporção (4% a 7%) de gesso, componente que retarda a “pega” – o endurecimento depois da mistura com a água – de modo a permitir que o cimento seja trabalhado e moldado. Outros materiais, como a escória de alto-forno, as cinzas volantes da queima de carvão ou a pozolana (cinza vulcânica), são misturados ao clínquer na moagem final. Servem como adições ou *fillers*, isto é, materiais de custo mais baixo que o clínquer e que, tendo também características ligantes, podem substituí-lo parcialmente. O produto dessa moagem final é o cimento.

Alguns usos – galerias de esgoto, obras marítimas, concreto massa para grandes obras e situações em que se requer uma secagem mais rápida – exigem cimentos com especificações bem precisas. Não obstante, cimentos que atingem a resistência padrão (32 MPa) no prazo usual (28 dias) podem ser usados na maioria das aplicações sem restrições quanto à sua composição. Além disso, mesmo nas aplicações mais peculiares costuma haver opções de tipo de cimento.

A fabricação de cimento é geralmente um empreendimento bastante verticalizado. Para minimizar o custo de transporte, as unidades industriais são implantadas junto às jazidas de calcário. Não são, no entanto, incomuns situações diferentes, com fábricas especializadas na moagem final, o que ocorre principalmente, mas não apenas, com unidades instaladas junto a grandes usinas siderúrgicas para aproveitar o suprimento de escória, que é complementado com clínquer fornecido por outras fábricas.

Do ponto de vista econômico, o primeiro aspecto a destacar é o dinamismo recente do mercado do cimento. Entre 1990 e 2011, a produção mundial cresceu a uma taxa média de 5,6% ao ano³. Embora em outros países em desenvolvimento a ampliação do mercado também tenha sido expressiva, foi o consumo do produto na China que indubitavelmente comandou essa expansão: cerca de ¾ do incremento tanto da demanda quanto da produção ocorreram em território chinês. Efetivamente, a produção chinesa de cimento decuplicou no período 1990-2011, o que fez sua parcela no total

3 Ao menos em termos globais, o dinamismo do consumo mundial do produto resistiu até mesmo aos efeitos da crise econômica internacional iniciada em 2008. Embora nesse ano tenha desacelerado e crescido apenas 1,6%, a demanda mundial de cimento voltou a crescer a um ritmo muito forte em 2009 (6,4%) e, mais ainda, em 2010 (10,3%).

mundial subir de 18% para 57%. Em contrapartida, a importância relativa dos países desenvolvidos no conjunto da indústria do cimento caiu de 29% no ano 2000 para pouco mais de 11% em 2011.

Se, em escala global, os efeitos da crise econômica sobre a produção de cimento foram modestos e passageiros, o mesmo não se pode dizer do impacto sobre o comércio internacional do produto. Um setor tradicionalmente pouco aberto ao comércio internacional experimentou um recuo expressivo do coeficiente de exportações da casa dos 7% em meados da década passada para 5% já em 2009⁴. Cabe notar que o principal obstáculo ao comércio internacional do cimento não é o protecionismo, mas sim os custos e as condições de transporte de um produto de baixo valor unitário e bastante perecível. Com efeito, um levantamento sobre as tarifas de importação aplicadas ao produto em 172 países indica uma mediana de 6,2% e uma tarifa modal nula.

No Brasil, o crescimento da produção de cimento tem sido menos regular, mas ainda assim expressivo. Mesmo acelerando-se nos últimos anos, o crescimento da produção no Brasil entre 1990 e 2011 (4,4% a.a.) ficou abaixo da média mundial, porém em linha com a média dos demais países em desenvolvimento e acima do observado na maioria dos países não asiáticos. Com efeito, a partir de 2004 o setor tem vivido a trajetória de crescimento mais duradoura desde os anos 1970 e, exceto pelos percalços de 2009, vem batendo sucessivos recordes históricos, os quais culminaram numa produção de 63,9 Mt (milhões de toneladas) em 2011. O fato de o consumo per capita de cimento no Brasil ainda se situar abaixo da média mundial indica que o mercado nacional está longe do ponto de saturação. Em se confirmando os investimentos projetados em infraestrutura e construção residencial, o impulso de crescimento do setor deve perdurar por bastante tempo. Como o setor é ainda mais fechado no Brasil do que na média mundial – em 2010, os coeficientes de exportação e importação foram, respectivamente, 0,06% e 1,42% –, a ampliação do consumo requer expansão da produção doméstica.

A estrutura de mercado prevalecente na indústria de cimento brasileira não destoa do padrão internacional. Com a possível exceção da China, a indústria apresenta uma configuração oligopolizada. Características estruturais, como as escalas mínimas relativamente altas e a relevância dos custos de transporte na composição do preço final do produto, implicam que, sobretudo em âmbito regional, o mercado seja quase que inevitavelmente concentrado. As empresas líderes mundiais, embora especializadas, são grandes e muito internacionalizadas. As duas maiores, a francesa Lafarge e a suíça Holcim, têm uma presença relevante no mercado brasileiro, sem, no entanto, disputarem as posições de liderança máxima do *ranking* de fabricantes. Efetivamente, em 2010 a liderança da Votorantim seguia incontestemente, com uma parcela de mercado pouco abaixo de 40%, e os seis maiores grupos controlavam 83% da produção brasileira de cimento.

4 Excluindo-se a China, o coeficiente de exportações se situa num patamar um pouco mais elevado, mas também recua com a crise, de 13,8% em 2006 para 11% em 2009.

2. Dinâmica Tecnológica⁵

A dinâmica tecnológica na indústria do cimento é caracterizada pelo deslocamento relativamente lento da fronteira tecnológica e baixa frequência de inovações de largo alcance. Com efeito, as características essenciais dos processos de produção de cimento portland foram definidas em meados do século XIX. Mesmo a introdução dos fornos rotativos data de 1895 (CEMBUREAU, 1999: 99). Desde então, a única inovação realmente radical difundida na fabricação de cimento foi a chamada “via seca”. Os benefícios são enormes, já que a energia térmica requerida é reduzida pela metade em relação ao processo úmido típico (DAMTOFT, 2008: 117). De qualquer maneira, a difusão do conjunto de alternativas abarcadas pelo rótulo “via seca” não é propriamente recente. No mínimo desde os anos 1980, essa tecnologia é dominante na maior parte do mundo.

Outra característica marcante da dinâmica tecnológica do setor, reconhecida por todos os analistas, é a posição central dos fornecedores de equipamentos no desenvolvimento das tecnologias críticas de processo. Os principais fabricantes são a dinamarquesa FLSmidth, a alemã Polysius (vinculada à ThyssenKrupp), a francesa Fives FCB e a japonesa Onoda. Exceto no caso desta última e de alguns fornecedores chineses, os fabricantes de equipamentos para o setor são empresas independentes dos grandes grupos cimenteiros, com os quais não mantêm acordos de exclusividade de suprimento (PROCHNIK *et alii*, 1998; ANDRADE *et alii*, 2002).

O contexto de trajetórias tecnológicas com oportunidades limitadas para a inovação e a situação de controle externo, pelos fornecedores de equipamentos, de competências críticas no âmbito das tecnologias de processo se combinam para formar um quadro em que a intensidade tecnológica é pequena mesmo entre os maiores grupos cimenteiros. Todos os principais grupos, ainda assim, dispõem de centros de pesquisa e desenvolvimento. A estrutura mais avançada parece ser a da Lafarge, que conta com um centro de pesquisa centralizado (França) e quatro centros técnicos instalados em três diferentes continentes. Enquanto estes se dedicam à adaptação e desenvolvimento incremental de produtos e à otimização dos processos fabris, aquele está voltado a projetos mais básicos e ao desenvolvimento de novas tecnologias. A mexicana Cemex, por sua vez, opera dois centros de tecnologia e inovação, um no México e outro na Suíça. A alemã Heidelberg articula em uma empresa suas atividades na área de tecnologia. Já a italiana Italcementi destaca na descrição de sua estrutura de desenvolvimento tecnológico, além de um centro próprio de P&D, uma rede que articula mais de 60 organizações, incluindo centros de pesquisa, universidades e empresas. Também no caso da Lafarge, há relatos de importantes desenvolvimentos que contaram com a participação de instituições acadêmicas.

Apesar da relevância das estruturas de desenvolvimento tecnológico, alguns indicadores sugerem que relativamente ao porte dos grupos não só os esforços, mas também os resultados são modestos. O centro de pesquisa da Lafarge emprega 200 pessoas, apenas 0,3% dos funcionários de um

⁵ Este tópico baseia-se amplamente em Pinho (2008).

grupo que opera em um setor altamente intensivo em capital⁶. Os gastos com P&D, ao menos até 2008, representariam uma fração equivalente a essa do faturamento do grupo, proporção inferior à tipicamente despendida pela Heidelberg, na casa de 0,5%. A Italcementi, por sua vez, divulga gastos em P&D da ordem de € 25 milhões, algo como 0,4% de seu faturamento. Em termos de resultados, a Lafarge proclama que 5% do valor de suas vendas provêm de produtos introduzidos nos últimos cinco anos, enquanto a Italcementi menciona 2,5% do faturamento associados a “projetos inovativos”.

Naturalmente, esse quadro de maturidade tecnológica não deve ser confundido com estagnação. Numa indústria que opera processos produtivos complexos, há um espaço significativo para inovações incrementais. Os focos das estratégias tecnológicas das líderes mundiais convergem para três campos, dos quais os dois primeiros são claramente vinculados entre si: (1) redução do consumo de energia; (2) diminuição da emissão de gases do efeito estufa (GEE); e (3) desenvolvimento de produto, em particular de novas variedades de concreto. Esses são, a rigor, os alvos principais do progresso técnico na indústria do cimento.

A natureza intensiva em energia da fabricação do cimento torna a melhoria do desempenho energético um objetivo inescapável do desenvolvimento tecnológico no setor, ainda mais num quadro de encarecimento das várias fontes de energia. Conquanto a estimativa varie de acordo com a fonte e o país avaliado, as referências mais recentes apontam que a energia responde por algo como 40% dos custos de produção do cimento (CEMBUREAU, 2006). O esforço realizado nas últimas décadas teve efeitos significativos, mas resultados adicionais parecem cada vez mais difíceis: o CEMBUREAU (2006) indica uma redução de 40% na energia fóssil despendida na fabricação de clínquer entre 1960 e 2000, mas de apenas 6-7% nos últimos 15 anos desse período.

Considerando que 90% da energia utilizada na fabricação do cimento destina-se à geração de calor para a etapa de calcinação e que, para fins térmicos, os combustíveis fósseis são a fonte primária usual, as emissões de gás carbônico são um problema vinculado ao anterior. Como as alternativas mais simples para reduzir, ao mesmo tempo, o consumo de combustíveis e a emissão de GEE – a adoção da via seca, a produção de cimentos compostos com menor proporção de clínquer e o coprocessamento de resíduos – estão próximas de esgotar seu potencial, avanços adicionais exigirão o desenvolvimento de novas soluções. Na seção 4.2.3, serão discutidas as inovações em tecnologia de processo que podem alterar esse quadro.

3. Competitividade Internacional

Embora os esforços de fixação de marcas e de desenvolvimento de variedades mais nobres para aplicações específicas não sejam irrelevantes, na maior parte dos casos a decisão do comprador de cimento é guiada basicamente pelo preço. Numa situação que se aproxima do referencial teórico do produto homogêneo, é muito limitada a capacidade das empresas líderes praticarem

⁶ Segundo Salvo (2004: 19), a japonesa Taiheiyo, a despeito de sua forte posição tecnológica, também gastava menos de 1% do faturamento em P&D. Tomando-se como indicador das despesas em P&D os gastos com inovação em produto em 2010 divulgados pela Lafarge (€ 153 milhões), chega-se a uma proporção semelhante.

preços superiores aos dos concorrentes. Nesse contexto, a concorrência na indústria do cimento é dominada pela tentativa de obter vantagens nos custos de produção. Portanto, a avaliação da posição competitiva brasileira neste setor deve focar a análise dos custos de fabricação, fortemente dependentes do grau de atualização dos equipamentos principais, da escala de produção e do preço, disponibilidade e nível de eficiência no uso dos principais insumos.

Um levantamento sobre as 78 principais unidades produtivas de cimento da indústria brasileira revela que a média simples da idade das fábricas é de 31 anos e apenas 35% delas iniciaram suas operações após 1990 (PINHO & FARIA, 2012). Essa idade média elevada não implica necessariamente defasagem do parque industrial, já que o progresso técnico no setor é, como se discutiu, relativamente lento, e também porque esse indicador não leva em consideração reformas e modernizações que muitas unidades mais antigas experimentaram ao longo de sua existência.

Ademais, não é pequeno o número de fábricas construídas recentemente: das 78 unidades produtivas, 20 foram inauguradas (ou reinauguradas) nos últimos dez anos e 14, entre 2008 e 2011. Esse movimento reflete o ciclo de investimentos desde meados da década passada e acaba levando à utilização de estruturas produtivas mais modernas. Apesar de ser possível incorporar por meio de reformas em equipamentos mais antigos muitos dos avanços graduais introduzidos nas tecnologias de produção, certas inovações de maior alcance – como os fornos rotativos de menor comprimento – estão associadas tipicamente a novas plantas.

Dada uma capacidade produtiva estimada em 74 Mt/ano de cimento em 2010 (SNIC, 2011: 16; USGS, 2011), é possível inferir que a escala média de produção no Brasil se situa apenas um pouco abaixo de 1 Mt/ano por fábrica. A Tabela 1 fornece elementos para a comparação internacional quanto a este parâmetro. A média das fábricas brasileiras é 20% inferior à encontrada numa amostra de 20 países, ficando 18% abaixo inclusive da encontrada na América Latina. No entanto, desagregando-se a análise, nota-se que essa condição de inferioridade é determinada pela situação mais favorável de uns poucos países. Excluindo-se os países asiáticos, a escala média das fábricas de cimento brasileiras é rigorosamente equivalente à encontrada no restante da amostra; algo semelhante ocorre se forem excluídas do cálculo da média latino-americana as fábricas mexicanas. Além disso, a posição brasileira não é desvantajosa em escala quando comparada à dos EUA e é certamente superior à dos cinco países europeus listados na tabela.

O custo dos insumos energéticos tem importância crítica para a competitividade na indústria do cimento e tanto o preço pago por esses insumos quanto seu rendimento exercem efeitos decisivos na condição competitiva de empresas e países. Entre os insumos energéticos, o mais empregado no Brasil continua sendo o coque de petróleo, um subproduto do refino de óleos pesados que foi responsável por 76% do consumo de energia do setor em 2010 (Tabela 2)⁷. Nos últimos anos, a despeito de fortes oscilações, a tendência tem sido de elevação do preço do coque de petróleo, um

7 Essa ênfase no uso de coque de petróleo como combustível para a produção de cimento não se reproduz em escala internacional. Referindo-se ao mundo como um todo, IEA (2009: 77) sustenta que o “carvão responde por cerca de 60% do combustível queimado nos fornos produtores de cimento”.

resultado da demanda internacional crescente por energia. Como, porém, este é um fenômeno global, seus efeitos sobre a competitividade da indústria brasileira frente a concorrentes externos são limitados e dependem basicamente dos custos adicionais derivados do abastecimento em fontes distantes e sujeitas a significativos custos de transporte.

Dados relativos a 2009 disponibilizados pelo *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), através da *Cement Sustainability Initiative* (CSI), apontam que a eficiência da indústria brasileira de cimento no uso da energia térmica estaria ligeiramente abaixo da média internacional. O consumo de energia seria de 3.670 MJ por tonelada de clínquer, 2,2% acima dos 3.590 MJ encontrados na média dos países cobertos pelo levantamento (Tabela 3). A situação de ligeira desvantagem se reproduz na comparação com regiões em que a capacidade de produção cresceu mais rapidamente na última década, como o restante da América Latina e, sobretudo, os países asiáticos. No entanto, o indicador de consumo energético no Brasil estaria em posição ligeiramente melhor do que na União Europeia e nos EUA, provavelmente por conta da maior difusão no País da “via seca”. De acordo com o SNIC (2009), 99% do cimento brasileiro são produzidos usando-se esse processo.

Tabela 1 Capacidade e Escala Média na Fabricação de Cimento (2011)

Países e Regiões	Fábricas	Capacidade (Mt/ano)	Escala Média (Mt/ano)
Brasil	75	73,2	976
Argentina	17	18,0	1.059
Chile	11	7,1	645
Colômbia	20	20,5	1.025
México	34	58,7	1.726
Peru	7	11,0	1.571
Venezuela	10	9,9	990
EUA	97	98,7	1.018
Canadá	14	18,1	1.293
Espanha	50	55,0	1.100
França	44	29,0	659
Itália	90	60,0	667
Reino Unido	13	12,9	992
Índia	144	242,0	1.681
Japão	32	61,5	1.922
Tailândia	14	56,3	4.021
América Latina	109	129,8	1.191
AL, exc. México	75	71,1	948
Europeus	203	162,1	799
Asiáticos	190	359,8	1.894
Total	688	841,7	1.223
Total, exc. Asiáticos	498	481,9	968

Fonte: Elaboração própria com base em dados do 9th Global Cement Report citados em SNIC (2011).

Tabela 2 Consumo de Energia na Indústria do Cimento Brasileira (em %)

Fonte de energia	1998	2005	2010
Gás Natural	1,4	0,6	0,6
Carvão Mineral	9,8	0,2	1,5
Lenha	0,2	0,0	0,0
Óleo Diesel	0,7	1,2	1,1
Óleo Combustível	52,1	0,8	0,2
Eletricidade	11,6	12,2	10,4
Carvão Mineral	6,1	8,8	1,5
Coque de Petróleo	14,8	66,4	76,3
Outros	3,2	9,7	8,5
Total	100,0	100,0	100,0

Fonte: EPE (2011).

Tabela 3 Consumo de Energia Térmica e Elétrica na Indústria do Cimento em 2009

Países e Regiões	Térmica MJ/t clínquer	Elétrica KWh/t cimento
CIS	6.100	128
EUA	4.130	137
Áustria	3.900	115
Canadá	3.810	149
França	3.810	115
Reino Unido	3.800	117
Alemanha	3.760	102
Brasil	3.670	104
Itália	3.660	116
Espanha	3.560	120
China	3.470	98
Índia	3.090	90
<i>América do Norte</i>	<i>4.070</i>	<i>139</i>
<i>Europa (EU27)</i>	<i>3.710</i>	<i>112</i>
<i>África + Oriente Médio</i>	<i>3.660</i>	<i>96</i>
<i>América Central</i>	<i>3.600</i>	<i>111</i>
<i>América do Sul, exc. Brasil</i>	<i>3.580</i>	<i>101</i>
<i>Ásia, exc. China, Índia, CIS e Japão</i>	<i>3.340</i>	<i>110</i>
<i>Japão + Austrália + Nova Zelândia</i>	<i>3.310</i>	<i>112</i>
Média Mundial	3.590	107

Nota: A média mundial se refere apenas aos países e empresas participantes do *Cement Sustainability Initiative*.
Fonte: WBCSD (2010).

Outro dado importante de eficiência do processo produtivo diz respeito ao consumo de energia elétrica para a fabricação de cimento, que no Brasil representa cerca de 10% do consumo energético total da indústria. A posição brasileira é mais favorável neste caso do que no consumo de energia térmica. De acordo com informações da CSI relativas a 2009, embora levemente superior ao consumo dos vizinhos sul-americanos e dos dois maiores produtores mundiais – China e Índia –, o consumo de energia elétrica na indústria brasileira do cimento (104 kWh por tonelada de cimento) foi menor do que a média mundial. Mais do que isso, esteve em nível substancialmente abaixo da União Europeia, EUA e Canadá. De todo modo, a eficiência técnica no uso de eletricidade tende a ser mais do que compensada pelo preço pago no Brasil pela energia elétrica de uso industrial.

A busca de custos mais baixos aliada à redução da dependência de insumos energéticos não renováveis e, em certos casos, a remuneração obtida pela destinação de resíduos potencialmente perigosos têm estimulado a indústria do cimento no mundo inteiro a usar crescentemente insumos energéticos alternativos. O coprocessamento permite usar como fonte de energia e eventualmente insumo material resíduos como pneus velhos, plásticos, óleos, tintas, moinha de carvão vegetal, casca de arroz e bagaço de cana. Segundo o SNIC (2011), 36 das 48 fábricas integradas de cimento do País, responsáveis por 80% da produção de clínquer, detinham capacidade tecnológica e licença para coprocessar estes insumos alternativos. O aproveitamento de cerca de um milhão de toneladas de resíduos teria permitido substituir 15% do volume de combustíveis fósseis utilizados no setor. Apesar de significativa, essa proporção ainda está bastante aquém da registrada em outros países. Suíça e Holanda apresentam taxas de substituição na casa dos 50%, enquanto Alemanha e França, entre outros países europeus, superam os 30%. Em todo caso, no conjunto da Europa, a substituição se situava em meados da década passada em 17% (CEMBUREAU, 2007).

Outro meio de reduzir o consumo de energia na indústria cimenteira é a fabricação de cimentos compostos, que utilizam diferentes proporções de insumos materiais em substituição parcial ao clínquer, como escórias siderúrgicas, cinzas de termelétricas e *filler* calcário. Nesse aspecto, o Brasil apresenta uma condição privilegiada e tem uma das menores taxas de utilização de clínquer do mundo: 0,65 tonelada de clínquer por tonelada de cimento, ante 0,78 na União Europeia, 0,90 no Japão e 0,75 na China (MÜLLER & HARNISCH, 2009).

A principal matéria-prima utilizada na fabricação de clínquer é o calcário, empregado na proporção de 1,4 tonelada por tonelada de cimento (DNPM, 2009). Por isso, a localização de reservas de calcário é o principal determinante da decisão locacional das fábricas integradas de clínquer e cimento. Embora a disponibilidade de jazidas em localização suficientemente próxima dos mercados consumidores de cimento seja uma restrição importante para a entrada de novos concorrentes no mercado de cimento, do ponto de vista do Brasil como um todo não chega a constituir preocupação. Um levantamento do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), relativo a 2007, apontou reservas lavráveis de calcário no território brasileiro de 50,3 bilhões de toneladas, volume suficiente para sustentar a fabricação de cimento no ritmo atual por 600 anos. O fato de nem todo calcário reunir o conjunto de características exigidas para a fabricação de cimento atenua, mas não modifica substancialmente esse quadro.

4. Impactos Ambientais e Emissões de Carbono

A indústria do cimento sempre teve sua imagem prejudicada por problemas ambientais, em particular pela poluição atmosférica em escala local associada a suas operações. Com a emergência do problema do aquecimento global, o setor acabou se mantendo na berlinda das questões ambientais, mesmo que o foco do debate tenha se deslocado. Na agenda da indústria do cimento outros problemas dessa natureza, contudo, continuam a pesar. Boa evidência disso é oferecida pelo relatório de 2010 da associação empresarial europeia do setor, o Cembureau. Embora priorize questões relativas ao *Emissions Trading Scheme*, o relatório (CEMBUREAU, 2011: 22-29) cobre uma série de outras questões ambientais, entre as quais a regulamentação da incineração de resíduos, os limites a emissões de mercúrio, os alertas sobre riscos expostos nas embalagens e os efeitos da poeira sobre a saúde dos trabalhadores do setor.

Neste tópico, serão abordadas primeiramente questões ambientais cujas repercussões são locais para, em seguida, passar às emissões de gases de efeito estufa (GEE), que são de interesse primordial para este estudo.

4.1. Impactos Ambientais Locais

A fabricação de cimento apresenta um conjunto de impactos ambientais locais ao longo de todo o ciclo de vida de cada unidade produtiva, desde o projeto até a eventual desativação, passando pelas etapas de construção e operação. Os impactos mais importantes, todavia, ocorrem durante a fase de operação.

A implantação de uma fábrica integrada de cimento, que inclui a extração mineral das matérias-primas, tem impactos relevantes nas regiões adjacentes à mina. Podem ser afetados pela instalação de uma mina a biodiversidade, registros fósseis e elementos valorizados pela comunidade local, como a própria paisagem. Já a lista de impactos decorrentes da operação fabril inclui barulho, resíduos sólidos e contaminação dos rios pela drenagem de águas pluviais. Não há, porém, muita dúvida de que “historicamente, as emissões de material particulado (poeira) têm sido a principal preocupação na fabricação de cimento” (WILLS, 2010: 30). Entre os poluentes atmosféricos, despertam preocupação também as emissões de gases vinculados à chuva ácida (NO_x e SO_2) e metais pesados, principalmente o mercúrio.

As emissões de material particulado ocorrem em vários estágios da produção de cimento. Sem controle adequado, a emissão desses materiais provoca impactos negativos na saúde da população (SANTI & SEVÁ, 1999). O pó gerado na moagem do clínquer, por exemplo, afeta tanto os empregados quanto a comunidade local, provocando enfermidades do aparelho respiratório e outras doenças, como conjuntivite, gastrite, dermatites e bronquites crônicas (BAPTISTA, 1995). SANTI (2003) avaliou os impactos da produção de cimento em cidades cimenteiras da Grande Belo Horizonte e relatou a incidência de várias doenças, particularmente as de caráter respiratório, nas comunidades próximas às unidades industriais.

WILLS (2010: 32) indica que técnicas e equipamentos de controle muito eficientes estão disponíveis a um custo que não é considerado alto. Técnicas simples têm efeitos importantes, como a pavimentação das estradas, o uso de sprays estabilizadores nas pilhas de armazenamento de matéria-prima e a cobertura dos equipamentos de moagem e dos pontos de transferência e estocagem de produtos e semiprodutos. Além disso, em pontos mais críticos do processo podem ser usados filtros de mangas e precipitadores eletrostáticos, equipamentos que conseguiriam reduzir as emissões de material particulado em até 99,8% e 99,9%, respectivamente. O mesmo autor aponta a existência de uma grande variedade de tecnologias capazes de reduzir as emissões de SO₂ e NO_x, com variantes dedicadas ao tratamento das matérias-primas, à melhoria dos processos de combustão em que são gerados e diretamente à redução das emissões.

A preocupação com essas emissões tem levado ao endurecimento das legislações que estipulam seus limites máximos. Na União Europeia, a comparação entre as diretivas de 1994 e 2000 demonstra uma redução generalizada desses limites e particularmente importante no caso do SO₂ e dos metais pesados (Quadro 1). A legislação federal brasileira tem evoluído em direção semelhante, embora com certa defasagem e alguns tetos menos restritivos.

Quadro 1 Evolução dos Limites de Emissões de Poluentes Atmosféricos na União Europeia (mg/Nm³)

Poluente	Diretiva da UE 1994	Diretiva da UE 2000
Material particulado	50	30
NO _x (plantas antigas)	800	800
NO _x (plantas novas)		500
SO ₂	400	50
Compostos orgânicos totais	10	10
Cloro	30	10
Dioxinas	n.d.	0,1
Metais pesados classe 1: Cd, Ti, Hg	0,2	0,1
Metais pesados classe 2: As, Co, Ni, Se, Te	1,0	0,5
Metais pesados classe 3: Sb, Cr, Cu, Mn, Sn, Pb, V, Zn	5,0	

Fonte: BATTLE (2002) citado em WILLS (2010: 48).

Nota: A Diretiva da União Europeia de 2000, de um lado, discriminou os limites de emissões de NO_x entre fábricas antigas e novas, impondo tetos mais restritivos apenas para estas; de outro, estipulou limites para as emissões de metais pesados das chamadas classes 2 e 3 que são mais restritivos e, desde então, conjuntos para as duas categorias.

O Quadro 2 retrata os limites de emissões estabelecidos para a indústria do cimento pelas Resoluções do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 382/2006 e 436/2011, que se referem respectivamente a novas unidades produtivas e a fábricas já instaladas ou com pedido de licença anterior a 2007. Acompanhando o padrão europeu, a legislação brasileira define padrões mais brandos

para fábricas mais antigas. Em todo caso, percebe-se que os limites de emissões tanto de material particulado quanto de NO_x são menos restritivos no Brasil do que na União Europeia. Além disso, seguindo MILANEZ (2007), pode-se estender essa avaliação aos limites de emissões estabelecidos em outra Resolução do CONAMA (264/1999), a qual regula as condições associadas ao coprocessamento de resíduos e define valores máximos substancialmente mais altos para as emissões de dioxinas e ácido fluorídrico (HFI). Por fim, deve-se registrar que a legislação federal remete a regulação do SO_2 para os órgãos ambientais estaduais.

Quadro 2 Limites de Emissões de Poluentes Atmosféricos no Brasil para Fábricas Novas e Antigas (mg/Nm^3)

Equipamentos	Res. CONAMA 382/2006		Res. CONAMA 436/2011	
	Material Particulado	NO_x	Material Particulado	NO_x
Fornos de clínquer sem coprocessamento	50 ⁽¹⁾	650 ⁽³⁾	50 ⁽¹⁾	1.000 ⁽³⁾
Fornos de clínquer com coprocessamento			50 ⁽¹⁾	800 ⁽³⁾
Resfriadores	50	n.a.	50	n.a.
Moinhos de cimento	50	n.a.	50	n.a.
Secadores de escória e de areia	50 ⁽²⁾	n.a.	50 ⁽²⁾	n.a.
Ensacadeiras	50	n.a.	50	n.a.

Fontes: Resoluções do CONAMA.

Notas: Com teores de oxigênio de (1) 11%, (2) 18% e (3) 10%. Além disso, de acordo com a Resolução CONAMA 436/2011, para fornos que operam segundo a via úmida, os limites seriam estabelecidos pelo órgão ambiental licenciador.

4.2. Impactos Ambientais Globais

4.2.1. Emissões de Carbono

Não cabem dúvidas de que entre as questões ambientais que afetam a indústria do cimento, ao menos em escala internacional, atualmente sobressaem as relativas às mudanças climáticas. Efetivamente, a produção do cimento é uma atividade muito intensiva em carbono. O *benchmark* estabelecido para os propósitos da política ambiental europeia ao final de 2010 foi de 766 kg de CO_2 por tonelada de clínquer (CEMBUREAU, 2011). Como já se sugeriu, a fabricação de clínquer é a etapa crítica do processo produtivo em termos de emissões de CO_2 , que emergem tanto da energia térmica requerida para as altíssimas temperaturas em que opera o forno rotativo quanto da própria transformação química de descarbonatação do calcário, que libera gás carbônico na atmosfera. Tipicamente, o primeiro desses fenômenos seria responsável, por 40% da geração de CO_2 e o segundo, por 50%. Os outros 10% se distribuiriam mais ou menos em partes iguais entre as atividades de mineração e transporte, de um lado, e as variadas necessidades de energia para a operação da fábrica,

de outro. Em contrapartida, na indústria do cimento é reconhecidamente muito limitada a relevância de outros gases geradores de efeito estufa (MÜLLER & HARNISCH, 2009: 10, 18).

Dadas a intensidade da geração de CO₂ no processo de fabricação e a enorme escala em que o cimento é consumido e produzido, compreende-se a posição de proa do setor no *ranking* dos emissores. Os dados mais recentes publicados no site da IEA (International Energy Agency) indicam emissões setoriais em 2009 de 2,3 Gt (bilhões de toneladas) de CO₂, o que implica uma participação de 7,5% nas 31 Gt de emissões totais estimadas para esse ano⁸. Referindo-se a 2006, MÜLLER e HARNISCH (2009: 1) propõem uma proporção ainda maior, de cerca de 8% das emissões de gás carbônico, equivalentes a nada menos que 6% de todas as emissões de GEE⁹.

Mesmo tendo havido nos últimos anos aumento na eficiência energética e ambiental da indústria do cimento, sua participação no conjunto das emissões não só aumentou como continuará a fazê-lo. De fato, o consumo de energia por tonelada de clínquer entre 1990 e meados dos anos 2000 teria caído 15% no mundo como um todo e cerca de 25% na China (IEA, 2010: 181). No entanto, o ritmo acelerado de incremento da produção mais do que compensou o aumento na eficiência e, a menos que ocorra uma importante mudança nas trajetórias vigentes, a expansão da produção seguirá sobrepujando a redução na intensidade das emissões.

Um levantamento realizado no âmbito da *Cement Sustainability Initiative* (CSI) permite desagregar por países o quadro das emissões de CO₂ na indústria do cimento. Os dados apresentados na Tabela 4 não têm cobertura universal, porém abrangem 900 fábricas de 46 empresas responsáveis por 26% da produção mundial. Ratifica-se a redução no nível de emissões por tonelada de produto, mas, sobretudo, revela-se que, do mesmo modo que no caso do consumo de energia (Tabela 3), as emissões de carbono estão longe de uma configuração homogênea.

A Tabela 4 confirma a posição de liderança da indústria do cimento brasileira quanto à eficiência no uso do carbono. Considerando que o Brasil apresenta um bom desempenho nos indicadores de consumo energético (Tabela 3) sem, contudo, desfrutar neles da mesma condição de primazia, pode-se interpretar a *performance* quanto às emissões como fruto do amplo uso de materiais substitutos ao clínquer e da baixa dependência de combustíveis fósseis na geração de eletricidade. Na outra ponta da hierarquia, estão os EUA. Nesse país, a proporção de fornos que operam segundo a via úmida ainda é expressiva, o sistema de geração de energia elétrica depende fortemente de combustíveis fósseis e, por fim, o uso de adições na produção de cimento é muito limitado.

8 Cf. <http://www.iea.org/etp/explore/>, acessado em 29/12/2012.

9 No Brasil, tendo em vista a proeminência das emissões decorrentes da mudança do uso da terra, a participação é bem menor. Embora os inventários de emissões disponíveis não discriminem as emissões indiretas derivadas do consumo de eletricidade, pode-se estimar, considerando-se a baixa intensidade em carbono da matriz de energética brasileira, a parcela do setor em um valor próximo a 1,5%. Tomando-se apenas as emissões diretas discriminadas no mais recente inventário brasileiro de emissões essa participação se situaria em 1,4% em 2005, último ano com informações disponíveis (MCT, 2010). Consideradas apenas as emissões do setor industrial, a participação do setor de cimento alcança 16,3%.

Tabela 4 Emissões de CO₂ por Tonelada de Cimento

Países	1990	2000	2005	2009
Brasil	712	628	571	585
Alemanha	729	658	617	589
Índia	810	728	663	600
Áustria	571	641	516	607
França	657	637	637	633
China	816	790	713	642
Itália	641	653	635	647
Reino Unido	950	790	721	648
Espanha	749	712	670	690
Canadá	828	788	781	748
EUA	930	862	794	778
Ex-URSS	775	766	732	781
<i>África + Oriente Médio</i>	<i>807</i>	<i>725</i>	<i>673</i>	<i>641</i>
<i>América Central</i>	<i>720</i>	<i>689</i>	<i>669</i>	<i>636</i>
<i>América do Norte</i>	<i>913</i>	<i>849</i>	<i>791</i>	<i>773</i>
<i>América do Sul, exc. Brasil</i>	<i>707</i>	<i>647</i>	<i>615</i>	<i>562</i>
<i>Ásia, exc. China, Índia, CIS e Japão</i>	<i>803</i>	<i>774</i>	<i>739</i>	<i>697</i>
<i>Europa (EU27)</i>	<i>721</i>	<i>687</i>	<i>660</i>	<i>640</i>
<i>Japão + Austrália + Nova Zelândia</i>	<i>729</i>	<i>713</i>	<i>699</i>	<i>683</i>
<i>Média Mundial</i>	<i>764</i>	<i>727</i>	<i>692</i>	<i>653</i>

Nota: A média mundial se refere apenas aos países participantes da Cement Sustainability Initiative.
Fonte: WBCSD (2010).

4.2.2. Mudanças Climáticas e Regulatórias

A regulação pode agir de duas maneiras diferentes para reduzir as emissões de GEE: (1) definindo diretamente limites, seja para as emissões, seja para as tecnologias empregadas pelas empresas; (2) gerando incentivos para a adoção de processos com menor impacto ambiental ao impor um preço para a emissão desses gases. No caso da segunda alternativa, pode-se simplesmente fixar um imposto sobre essas emissões ou adotar um esquema em que o preço cobrado é definido a partir de mecanismos influenciados pelo mercado. No âmbito das emissões de GEE, a experiência internacional tem privilegiado mecanismos deste último tipo.

O sistema de comercialização de emissões (ETS, *Emissions Trade System*) da União Europeia¹⁰ é provavelmente a iniciativa institucional mais ambiciosa de promoção da redução das emissões de carbono. Baseado no princípio do *cap-and-trade*, o sistema exige licenças (*allowances*) de emissões das empresas atuantes nos setores mais intensivos em energia e responsáveis pela maior parte das emis-

10 A discussão dos parágrafos seguintes baseia-se principalmente em informação colhida nos sites da Comissão Europeia (ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm) e da associação empresarial europeia do setor do cimento, o Cembureau (www.cembureau.be/topics/climate-change).

sões de GEE. Anualmente, as empresas cobertas pelo esquema têm que apresentar licenças suficientes para cobrir suas emissões, sob pena de pagarem multas pesadas se não o fizerem¹¹. Essas licenças são, porém, emitidas em uma quantidade limitada por metas decrescentes ao longo do tempo.

O sistema começou a ser implementado em 2005, já passou por duas fases e entrará numa terceira em 2013. Em relação à primeira fase (2005 a 2007), a União Europeia reconhece que quase todas as licenças foram concedidas gratuitamente e mesmo na segunda (2008 a 2012), no mínimo 90% das licenças teriam sido atribuídas sem custo. Na terceira fase (2013 a 2020), o esquema se aproximará gradualmente de sua concepção básica, isto é, as licenças serão leiloadas em proporção cada vez maior. Internalizar ao sistema de preços o custo das emissões implica diretamente penalizar o uso de bens e recursos intensivos em carbono. Por outro lado, a penalização tende a estimular as empresas a adotar tecnologias mais eficientes em termos de emissões. Além disso, a comercialização das licenças de emissões induz à formação de um mercado em que empresas que enfrentariam custos muito elevados para reduzir suas próprias emissões podem adquirir licenças não utilizadas de outras empresas em que os custos de abatimento sejam mais baixos, ou seja, são estimuladas formas mais baratas de redução das emissões. Por fim, as receitas obtidas pelos governos no leilão das licenças podem ser investidas na mitigação das mudanças climáticas.

O ETS europeu cobre cerca de 11 mil unidades produtivas – fábricas e usinas termelétricas – de setores responsáveis por 45% das emissões de GEE da União Europeia. A fase do programa que se iniciará em 2013 estipula uma redução anual de 1,74% nas emissões licenciadas pelo sistema, resultando num teto programado para 2020 21% inferior aos das emissões em 2005. Como se disse acima, nessa fase o esquema básico de atribuição das licenças passará a ser o leilão. Já em 2013, pretende-se que 40% das alocações sejam feitas por esse meio. Na indústria de transformação, porém, o cronograma de transição para os leilões é menos estrito. Em 2013, 80% das permissões continuarão a ser alocadas gratuitamente e a proporção declinará gradativamente até 30% em 2020.

A par desse cronograma estendido, setores sujeitos a riscos de *carbon leakage* – transferência da produção para países em que a regulação das emissões é mais frouxa – serão privilegiados na alocação gratuita de licenças. Empresas que atingem o *benchmark* setorial em termos de emissões recebem gratuitamente todas as licenças de que precisam. O *benchmark*, contudo, é estabelecido a partir do padrão das empresas que se situam no decil superior em termos de eficiência nas emissões de carbono. Quem tem desempenho inferior a esse parâmetro terá que recorrer ao mercado de licenças para cobrir a diferença. Portanto, embora a indústria do cimento tenha sido incluída em setembro de 2009 na lista de 164 setores sujeitos a esse tipo de risco¹², os impactos do ETS sobre os

11 A multa era de € 40 por tonelada de CO₂ na primeira etapa de implementação do ETS e subiu para € 100 na segunda etapa.

12 Antes dessa decisão, era muito maior a preocupação da entidade representativa dos interesses empresariais do setor na Europa, o Cembureau. Um estudo encomendado por essa associação ao Boston Consulting Group concluiu que “a produção de clínquer e cimento na União Europeia não é competitiva sem alocações gratuitas de licenças de emissões” (BCG, 2008: 1). De acordo com o mesmo estudo, preços de CO₂ acima de € 35/t levariam a uma transferência completa da indústria do cimento para o exterior e mesmo a um preço de € 25/t mais de 80% da produção de clínquer da União Europeia correria o mesmo risco.

fabricantes de cimento na União Europeia acabam não sendo completamente neutralizados. Com efeito, o setor de cimento é um dos que mais compram licenças de emissão de CO₂ pelo ETS: a Lafarge e a Heidelberg estão entre as dez empresas que mais adquiriram licenças de emissão de carbono em 2011 (GLOBAL CEMENT, 2012).

De todo modo, as tendências do preço das licenças de emissões desde que a crise econômica irrompeu na Europa em 2008 tornaram o ETS um mecanismo muito menos efetivo de promoção de transição para uma economia de baixo carbono do que se esperava quando foi concebido. Num contexto que afetou a atividade econômica em geral, mas particularmente os setores intensivos em emissões, que costumam responder elasticamente ao ciclo econômico, os tetos de emissões previamente fixados se situam acima da demanda por licenças de emissões. Esse excedente derrubou os preços do CO₂ e tem minado a capacidade do esquema induzir investimentos na direção de tecnologias menos intensivas em carbono, além de reduzir a capacidade de arrecadação nos leilões bem abaixo das cifras inicialmente esperadas¹³. Está em curso um debate sobre as medidas que devem ser tomadas para revisar o ETS da União Europeia. Há propostas para recalibrar os tetos, adotando metas mais restritivas, e para impor preços mínimos nos leilões, mas o contexto recessivo e os sucessivos fracassos nas negociações internacionais sobre mudanças climáticas definem um ambiente pouco favorável à adoção de iniciativas que ampliam o ônus para a indústria europeia.

De fato, embora esquemas de *cap-and-trade* sejam muito discutidos, sua aplicação à questão das emissões de GEE em escala internacional é bem limitada. Além da União Europeia, aparentemente apenas dois países estão implantando em escala nacional sistemas semelhantes: Austrália e Nova Zelândia. Há registro também de iniciativas em escala subnacional no Japão, EUA e Canadá. Em quase todos os casos, os esquemas de comercialização são menos abrangentes do que na União Europeia. Nos EUA, a iniciativa de maior alcance cobre nove estados do nordeste do país, mas atinge apenas termelétricas. Suíça, Coreia do Sul, China e Índia são exemplos de países que, em graus diferentes, avançaram na discussão da adoção de esquemas de comercialização de emissões, mas ainda não chegaram a implantá-los. Assim, não surpreende que as licenças de emissões da União Europeia tenham respondido por 84% do mercado mundial de carbono.

Um estudo realizado pela OECD (2008) permite avaliar os efeitos de possíveis desdobramentos futuros no campo da regulação das emissões. Projetou-se o impacto de duas diferentes políticas voltadas à redução das emissões: (1) a adoção de um imposto – ou um ETS de extensão equivalente – de € 15 por tonelada de CO₂ emitida pela indústria do cimento dos países integrantes da OCDE; (2) a adoção dessa mesma tributação, mas com ajustamentos para compensar seus efeitos sobre o comércio exterior, isto é, taxaço das importações de acordo com a intensidade em CO₂ do exportador bem como compensação da tributação nas exportações de cimento fabricado localmente.

13 Projetavam-se receitas públicas de € 150-200 bilhões durante a fase 3 do ETS europeu (GRUBB, 2012:4).

Tendo como horizonte o ano de 2030, o resultado do modelo para a adoção da tributação, isoladamente, seria uma queda de cerca de 20% nas emissões do setor¹⁴. As causas de tal redução seriam (1) mudança tecnológica em favor de processos menos intensivos em energia, (2) uso de combustíveis de baixo carbono, (3) redução do conteúdo de clínquer no cimento e (4) decréscimo no próprio nível de produção no conjunto de países que adotassem a medida (-7,5%). A diminuição da produção responde a efeitos sobre o consumo, mas também à perda de competitividade. Em todo caso, o impacto sobre a competitividade seria modesto por causa do custo de transporte, que gera no setor um efeito de isolamento competitivo. Por outro lado, a adoção de BTAs (*border tax adjustments*) tornaria os impactos sobre a produção ainda menores: perdas de 2% a 4% conforme a extensão dessas medidas. Em outras palavras, o modelo sugere que seriam modestos os impactos sobre as exportações de países mais bem posicionados para a produção de cimentos de baixo carbono.

No Brasil, foi definido em agosto de 2012 o chamado Plano Indústria, um dos detalhamentos da Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC), que prevê iniciativas análogas para vários outros ramos de atividade. O cimento faz parte do conjunto de sete setores – alumínio, cal, cimento, siderurgia, papel e celulose, química e vidro – que, por responderem por 90% das emissões diretas da indústria de transformação, são priorizados inicialmente pela política. O objetivo estratégico do Plano Indústria é “garantir que a produção nacional seja, em média, mais eficiente em termos de emissões de GEE em comparação com o resto do mundo”, dando sustentação à posição vantajosa atualmente identificada nesses setores (MDIC, 2012: 23). Esse objetivo deve ser almejado sem, entretanto, prejudicar o potencial de crescimento da produção industrial.

Nesse sentido, a meta estabelecida para a redução das emissões não é muito ousada: em 2020, reduzir em 5% as emissões ante um cenário tendencial resultante da extrapolação de um crescimento anual de 5% nas emissões de 2005. Para um período de 15 anos, essa meta corresponde a uma diminuição da intensidade em carbono de 0,34% ao ano. Dado o grande peso que as emissões geradas pela mudança no uso da terra e o desmatamento têm nas emissões brasileiras, a meta da indústria não chega a comprometer a meta para o conjunto do País estipulada pela PNMC. Cabe registrar também que, ao menos em sua versão inicial¹⁵, o Plano Indústria não desdobra metas por setores e empresas nem tampouco estabelece medidas coercitivas e penalizações, enfatizando instrumentos de outra natureza, como incentivos fiscais, estímulos creditícios e a adequação do ambiente regulatório.

14 Este modelo assume um crescimento autônomo de 2% a.a. na produção e de 1,5% nas emissões; a diferença corresponde a um aumento da eficiência decorrente do uso mais intensivo do coprocessamento e de tecnologias mais modernas.

15 A possibilidade de que isso venha a ocorrer no futuro é, em todo caso, explicitada no preâmbulo do documento que descreve o Plano Indústria: “o eventual estabelecimento de metas de redução de emissões por gás, por setor ou por empresa [ocorrerá] durante as revisões periódicas do Plano Indústria ao longo dos próximos anos” (MDIC, 2012: 20). O Decreto 7.390/2010 prevê revisões em períodos não superiores a dois anos.

4.2.3. Emissões de Carbono e Mudança Tecnológica

Um estudo da IEA (2010) apresenta projeções sobre o comportamento futuro da indústria do cimento no tocante à demanda por seus produtos, consumo de energia e emissões de CO₂. A apresentação dos seus resultados oferece um bom fio condutor para a discussão sobre os efeitos do progresso técnico sobre as emissões de CO₂ no setor de cimento. Para esse estudo, foram elaborados dois cenários. O cenário base assume que os governos não implementarão nenhuma política climática ou energética nova, o que não implica descartar a ocorrência de melhorias nos coeficientes de emissões de carbono, provocadas pelo próprio encarecimento dos combustíveis fósseis e pela difusão de tecnologias mais eficientes. Segue, portanto, a tradição das projeções *Business as Usual* (BAU). Já o cenário “blue” parte do princípio de que será alcançada uma redução até 2050 de 50% na emissão de CO₂, proporção considerada necessária pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) para estabilizar a elevação da temperatura numa faixa de 2 a 3 °C Levando em conta os diferentes custos de abatimento, este cenário trabalha com uma diminuição de 20% nas emissões provenientes da indústria do cimento. Em ambos os casos, são adotadas duas variantes, com maior ou menor aumento da demanda. Os principais resultados são sintetizados na Tabela 5.

Tabela 5 Projeções de Consumo de Energia e Emissões de CO₂ em 2050 na Indústria do Cimento

Cenário / Situação	Consumo de Cimento (Mt)	Consumo de Energia (Mtep)	Emissões de CO₂ (Gt)
Atual (2007)	2.774	240	2,00
Base / Baixa demanda	3.817	273	2,45
Base / Alta demanda	4.586	327	2,90
Blue / Baixa Demanda	3.817	287	1,60
Blue / Alta Demanda	4.586	372	1,60

Fonte: IEA (2010: 182-183).

Nos dois cenários a demanda por cimento se amplia, mas a um ritmo bem inferior ao das últimas duas décadas. Na hipótese de alta demanda, o crescimento se dá a uma taxa anual de 1,2%, enquanto na de baixa demanda, não passa de 0,7% ao ano¹⁶. Supõe-se gradual amadurecimento dos mercados nos países em desenvolvimento, de modo que o consumo projetado para a China em 2050 seria inferior ao de 2007 em ambas as situações de demanda. De qualquer maneira, 95% do aumento do consumo teria lugar em países que não são integrantes da OCDE.

¹⁶ O estudo elaborado em 2012 aponta para demandas bem mais elevadas em ambas as hipóteses. Com crescimentos anuais de 0,9% e 1,5%, são projetados para 2050 consumos de 4.400 Mt e 5.521 Mt de cimento, respectivamente nas hipóteses de baixa e alta demanda. Cumulativamente, as diferenças em relação aos cenários de 2010 seriam de 15% e 20%.

No cenário base, há elevação das emissões, mesmo quando se presume um crescimento mais moderado da demanda. Já no cenário “blue”, ainda que o consumo de energia cresça, não o faz na mesma proporção da produção de cimento e, sobretudo, ocorre redução de cerca de 20% nas emissões de carbono. Para se alcançar tais resultados, não bastaria aproveitar as melhorias tecnológicas disponíveis. Seria preciso adotar novas tecnologias, especialmente sistemas de captura e sequestro de carbono (CCS, na sigla em inglês). É conveniente, portanto, segmentar em duas partes a discussão sobre as mudanças tecnológicas requeridas para a atenuação das mudanças climáticas: difusão das melhores tecnologias já disponíveis e desenvolvimento e adoção de novas tecnologias, algumas delas ainda em gestação.

No campo da difusão de tecnologias disponíveis, sobressai inicialmente o uso de equipamentos com a melhor eficiência energética possível. A alternativa mais favorável para a etapa mais intensiva em energia e emissões é a via seca, numa operação com um forno rotativo de larga escala acoplado a preaquecedores em seis estágios e um precalcinador. Ocorre que nem sempre é possível instalar, por exemplo, precalcinadores e preaquecedores em fábricas que não disponham desses equipamentos. Contudo, em novas instalações e quando a modernização for possível, o padrão a ser seguido está bem estabelecido.

Efetivamente, as características básicas dos fornos de produção de clínquer são a principal fonte de heterogeneidade no desempenho energético. O Quadro 3 resume a informação disponível a esse respeito. Além de evidenciar a inferioridade da via úmida e dos fornos verticais, o quadro demonstra que é grande a disparidade entre as variantes da via seca. Uma instalação com forno rotativo precedido de seis preaquecedores em suspensão e um precalcinador representa o estado da arte atual, com ganhos relevantes, mas modestos, em relação aos esquemas mais difundidos, que combinam um precalcinador a quatro ou cinco preaquecedores. É consensual a avaliação de que, em sua melhor configuração, essa tecnologia se encontra muito perto do limite prático de eficiência do processo. Embora o dispêndio energético mínimo em termos estritamente termodinâmicos situe-se no intervalo de 1,7 GJ a 1,8 GJ por tonelada de clínquer, não se acredita que em escala industrial seja possível aprimorar substancialmente o consumo mínimo atualmente alcançado.

A importância que a etapa de calcinação tem no consumo de energia e geração de CO₂ na fabricação de cimento não deve fazer com que se desprezem os efeitos da adoção das melhores práticas em outros estágios do processo. Na China, a mera utilização de material refratário de qualidade superior nos fornos pode resultar em uma economia de até 0,5 GJ por tonelada de clínquer. Sistemas de correias transportadoras são uma opção frequentemente superior no transporte de insumos dentro das cimenteiras. Gerações mais avançadas de equipamentos de moagem tanto da mistura crua quanto do clínquer permitem reduzir em 40% ou mais o consumo de energia elétrica nas duas operações mais intensivas em eletricidade da indústria do cimento (MÜLLER & HARNISCH, 2009: 19-22). Por fim, na operação de resfriamento do clínquer, resfriadores de grade são uma alternativa mais eficiente aos resfriadores rotativos e planetários (SIGNORETTI, 2008: 66; IEA, 2009: 89).

Quadro 3 Consumo de Energia Térmica em Diferentes Configurações de Foros de Cimento (MJ/t de Clínquer)

Müller & Hornisch (2008)			IEA (2009)		
Via seca	Avançado / Grande porte	2.950	Via seca	precalcinadores + preaquecedores com ciclones de 6 estágios	2.900
	Médio	3.300		precalcinadores + preaquecedores com ciclones de 5 estágios	3.000-3.100
	Sem precalcinadores	4.000		precalcinadores + preaquecedores com ciclones de 4 estágios	3.100
Longo	Via úmida	5.000-6.700		preaquecedores com ciclones de 4 estágios	3.300
	Via seca	5.000		preaquecedores com ciclones de 2 estágios	3.800
Lepol	Via semi-seca	3.300-5.200		preaquecedores com ciclones de 1 estágio	4.200
<i>Shaft</i>		3.100-6.500		sem preaquecedores	4.600
<i>Dry Hollow</i>		6.270-8.360	Via úmida		5.900-6.700
			Forno vertical		5.000

Fontes: Indicadas na primeira linha do quadro.

Entre as opções tecnológicas convencionais para reduzir a intensidade energética e as emissões de carbono na produção de cimento, uma das mais simples é a intensificação do uso de adições em substituição parcial ao clínquer. Os materiais mais usados para esse fim são a escória de alto-forno, as cinzas volantes da queima de carvão, as pozolanas naturais ou artificiais – resultantes da queima de argila – e o calcário. A média mundial da razão entre clínquer e cimento já se situa em 80% e as projeções do IEA (2012) indicam que se alcançaria 66% em 2050.

Embora a fabricação de cimento à base de escória de alto-forno requiera algumas modificações na operação do moinho de bolas e consuma mais energia do que a moagem do clínquer, as principais restrições ao aumento do uso das adições em cimentos compostos são de outra natureza. Primeiramente, deve-se ponderar a disponibilidade local de insumos em condições economicamente viáveis. Em escala mundial, a oferta pode ser muito superior à demanda, notadamente no caso das cinzas de carvão, mas, assim como no caso do produto final da indústria do cimento, o baixo valor unitário limita o raio de suprimento de seus insumos.

Outro problema em alguns mercados são as objeções do comprador do produto. O cimento à base de escória é mais claro e apresenta uma reatividade mais lenta. Em contrapartida, a resistência no longo prazo é superior assim como a capacidade de resistir a sulfatos e a aplicabilidade à fabricação de concreto massa, usado em grandes obras, como represas e pontes (LORETI, 2009: 9). De toda maneira, em mercados nos quais o uso de cimentos compostos é menos tradicional,

as diferenças geram objeções ao uso, sobretudo porque o endurecimento mais lento pode prejudicar o ritmo e a produtividade das operações na construção civil. Essa dificuldade é reforçada adicionalmente em alguns mercados por regulamentação pautada na composição do cimento e não em parâmetros de desempenho.

Já no caso das cinzas volantes de carvão, há uma limitação técnica: para não prejudicar a qualidade do produto, o teor residual de carbono não pode exceder 5% (MÜLLER & HARNISCH, 2009: 33). Embora a restrição continue presente, foi atenuada pelo desenvolvimento de tecnologias para reduzir o conteúdo de carbono nas cinzas (IEA, 2009: 94). Uma questão que tem gerado mais preocupação nos últimos anos é o conteúdo de mercúrio presente nesse material. A adoção pelas termelétricas de técnicas que visam controlar as emissões atmosféricas do metal fez aumentar o teor de mercúrio nas cinzas de carvão. Vários estudos revisados por LORETI (2009: 23-25) indicam que não há, todavia, riscos significativos de que o mercúrio venha a vaziar do concreto fabricado com cinzas em substituição ao clínquer.

A terceira forma convencional de reduzir as emissões é substituir o combustível usado nos fornos por fontes alternativas que tenham menor impacto em termos de emissões. O uso no lugar do carvão de outros combustíveis fósseis é uma opção que, exceto em condições específicas de abundante oferta local, não é economicamente viável, dados os preços mais elevados de substitutos como o gás natural (MÜLLER & HARNISCH, 2009: 25; IEA, 2009: 103). Em condições de economicidade, as alternativas se encaixam em duas categorias que podem ser distinguidas pela natureza dos seus benefícios em termos de balanço de carbono: o coprocessamento de resíduos e a biomassa.

A queima de resíduos – pneus, solventes, óleos residuais e plásticos – que teriam de ser incinerados ou dispostos em aterros permite cancelar emissões que, de outra maneira, seriam duplicadas na fabricação de cimento e na destinação final desses mesmos resíduos. No caso da biomassa, o benefício é de outra natureza: as emissões geradas na sua queima são neutralizadas pelo CO₂ absorvido no crescimento das plantas de que se origina.

Entre as iniciativas convencionais para diminuir as emissões de carbono na indústria do cimento, alguns analistas incluem o aproveitamento do calor residual dos gases de processo para a cogeração de eletricidade (MÜLLER & HARNISCH, 2009: 22-25; WILLS, 2010). Em fábricas equipadas com preaquecedores e precalcinadores, a maior parte do calor dos gases de exaustão dos fornos rotativos é reaproveitada no próprio processo, aquecendo o material que se transformará em clínquer. No entanto, os gases são lançados na atmosfera a 350°C. O calor remanescente é importante, mas se situa abaixo do requerido pelas termelétricas comuns, que operam a 550°C na chamada cogeração em ciclo de topo. Ainda assim, estariam disponíveis tecnologias de cogeração em ciclo de fundo, que permitiriam aproveitar o calor residual àquele nível de temperatura¹⁷. Seria possível, assim, recupe-

17 Müller e Harnisch (2009: 22) referem-se a taxas de recuperação que variam de 30% no caso de turbinas a vapor – equipamentos mais baratos, de acordo com Wills (2010) – a 60% no caso do ciclo Kalina e do ciclo Rankine orgânico. Müller e Harnisch (2009: 22) estimaram também que a difusão em escala global dessa forma de cogeração permitiria gerar eletricidade correspondente a ¼ do consumo do setor e evitar 5% das emissões de CO₂ decorrentes da produção de cimento.

rar de 20 a 45 kWh por tonelada de cimento (MÜLLER e HARNISCH, 2009: 22). Existem, porém, dúvidas quanto à viabilidade econômica dos investimentos requeridos para implantar a cogeração. Outras opções para aproveitar o calor residual dos gases de exaustão seriam sistemas de aquecimento e/ou refrigeração de ar, geração de vapor para processos industriais e mesmo preaquecimento do vapor para uso em centrais termelétricas convencionais. Em todos os casos, a proximidade com centros urbanos, fábricas e usinas é ao mesmo tempo uma exigência e uma restrição¹⁸.

Nos cenários traçados pela IEA (2010), o conjunto de iniciativas de corte mais convencional permitiria reduzir em cerca de $\frac{1}{4}$ o coeficiente atual de emissões, mas não chegaria a compensar o acréscimo da produção requerido para atender à demanda crescente, mesmo admitindo alguns avanços tecnológicos adicionais. Segundo as projeções da IEA, para que a redução de 20% das emissões até 2050 seja atingida na indústria do cimento será necessário, sobretudo, adotar amplamente sistemas de captura e sequestro de carbono (CCS).

Duas abordagens diferentes para as tecnologias de CCS podem, em princípio, ser aplicadas ao setor: captura pós-combustão e a oxi-combustão. As tecnologias de oxi-combustão se assentam no uso de oxigênio no lugar do ar no processo de combustão. Isso permitiria aumentar a concentração de CO₂ no fluxo de gases de exaustão, atingindo-se um patamar de 80%, muito acima dos 14% a 33% obtidos nas condições usuais. A maior concentração de CO₂ simplifica os processos de purificação e separação. Tecnologias de oxi-combustão estão sendo desenvolvidas para usinas termelétricas, mas sua aplicação aos fornos de clínquer exigirá adaptações que não são triviais. Não só os queimadores são diferentes, como a operação de calcinação nos fornos rotativos tende a ser afetada pela alta pressão do CO₂. Além disso, não é provável que essa tecnologia possa vir a ser adotada em fornos já existentes, restringindo-se seu uso a novas fábricas de cimento especialmente projetadas para contemplá-la.

As tecnologias de captura pós-combustão, em contrapartida, demandariam mudanças muitos menores no processo de produção de clínquer, o que torna mais viável sua aplicação em fábricas previamente existentes. Há uma variedade de meios para absorver CO₂, mas a absorção química é aquela que melhor combina potencial de abatimento das emissões e estágio de desenvolvimento. Embora em escala muito menor, essa tecnologia tem um histórico de utilização nas indústrias química e de gases. As tecnologias de pós-combustão são compatíveis com as baixas concentrações de CO₂ típicas dos gases de exaustão, mas a eficiência do processo aumenta com a taxa de concentração.

O dispêndio energético com essas tecnologias, ainda não desenvolvidas em escala industrial, é a principal explicação para que nos cenários traçados pela IEA haja uma tendência de aumento do consumo de energia, mas não da emissão de CO₂ (Tabela 5). Da redução total de emissões em relação ao cenário base, as tecnologias de CCS seriam responsáveis por mais da metade no caso de

18 A colocalização com usinas termelétricas a carvão, por exemplo, reduziria perdas na transmissão de energia e custos de transporte entre a fábrica de cimento e a geradora de energia. Da usina para a fábrica seguiriam energia elétrica, cinzas volantes de carvão e gesso, produzido no processo de dessulfurização dos gases emitidos pela termelétrica; em sentido contrário, seriam transportados os gases de exaustão gerados na fabricação do cimento, cujo calor residual seria usado para preaquecer o vapor que move as turbinas para a geração de energia (MÜLLER & HARNISCH, 2009: 24).

baixa demanda e $\frac{3}{4}$ no caso de alta demanda. Para que isso se concretize, uma proporção de até 40% dos fornos terá que ser equipada com a tecnologia em 2050.

A projeção do investimento requerido para obter a redução das emissões embutida nos cenários “blue” está sujeita, naturalmente, às diferenças associadas às duas hipóteses de comportamento da demanda e à grande margem de incerteza que envolve tecnologias ainda não plenamente desenvolvidas. A IEA estima um montante entre US\$ 350 bilhões e US\$ 840 bilhões em escala mundial¹⁹. Cabem duas observações adicionais em relação a esses investimentos: (1) como o crescimento da demanda se dará essencialmente em países em desenvolvimento, a maior parte do investimento terá que ser feita nesses países, o que agrava as dificuldades de financiamento; (2) avalia-se que a tecnologia CCS implica duplicar os custos de investimento numa fábrica de cimento, além de aumentar os custos operacionais (ECRA, 2009 *apud* IEA, 2010). É provável que esse custo elevado tenha relação com a resistência às tecnologias de CCS identificada entre os especialistas brasileiros entrevistados para este estudo.

No caso da indústria do cimento, alcançar um nível de emissões compatível com trajetórias menos dramáticas para o clima do planeta dependeria muito fortemente da ampla difusão de tecnologias de captura e sequestro de carbono. Além delas, as projeções da IEA embutem a difusão das melhores práticas em termos de tecnologia atualmente disponíveis. Não foram incorporadas àquelas projeções, contudo, os efeitos de inovações tecnológicas cujo desenvolvimento futuro esteja nas condições atuais sujeito a incerteza. Entre essas inovações tecnológicas emergentes, devem ser destacadas (a) o desenvolvimento de tipos alternativos de cimento menos intensivos em energia e carbono e (b) a fabricação de cimento em fornos de leito fluidizado.

Alguns novos tipos de cimento têm sido desenvolvidos. Do ponto de vista das emissões de carbono, suas vantagens variam das menores temperaturas e dispêndio de energia em seus processos de produção até a capacidade de absorver CO₂ do ambiente após o uso na construção. Alguns dos cimentos assim fabricados, como é o caso dos geopolímeros, apresentam limitações de desempenho, como a dificuldade de atingir resistências mais elevadas. No caso dos cimentos belíticos, um produto menos inovador, a dificuldade principal é de outra natureza: o tempo mais longo de “pega”, que prejudica a eficiência das operações na construção civil. Há também cimentos mais caros do que os cimentos Portland convencionais, mas que, caso a vantagem em termos de emissões de carbono seja precificada, poderiam se tornar competitivos (MÜLLER & HARNISCH, 2009: 33). Um problema ainda mais geral que dificulta a substituição de um bem de uso tão difundido quanto o cimento Portland é a necessidade de requalificar toda a enorme comunidade de usuários do produto no setor de construção civil. De todo modo, exceto no caso de alguns cimentos belíticos adotados em certos usos específicos na China, a maioria desses cimentos ainda está bem longe de aplicações comerciais em larga escala.

No campo das inovações em tecnologia de processo, destaca-se o forno com leito fluidizado, que poderia substituir o forno rotativo. O processo emprega carvão de baixa qualidade em instala-

¹⁹ As projeções apresentadas na versão mais recente do estudo do IEA (2012) são menos explícitas, mas embutem investimentos um pouco mais moderados, entre US\$ 390 bilhões e US\$ 620 bilhões.

ções que incluem um forno com leito fluidizado e um resfriador em dois estágios. Controlando a granulometria e a dispersão do clínquer em formação, procura-se aumentar a eficiência da combustão e da transferência de calor²⁰. O desenvolvimento dessa tecnologia principiou em 1984, em iniciativa conjunta da Kawasaki Heavy Industries e da Sumitomo Osaka Cement. Dois anos mais tarde, o projeto passou a contar com apoio financeiro do governo japonês. O *scaling-up* do processo tem ocorrido progressivamente ao longo de três fases. Em 2005, uma planta de 1.000 t/dia começou a operar na China. Entre as vantagens propaladas figuram reduções de 32% das emissões de NO₂, 8,5% das emissões do CO₂ e 12% do consumo de energia térmica. De toda maneira, a quantidade de energia requerida para a produção de uma tonelada de clínquer no estágio atual de desenvolvimento da tecnologia (2.993 kJ) não é significativamente inferior ao estado da arte em fábricas convencionais de maior porte, como se pode inferir da comparação com os números do Quadro 3. Além disso, segundo um dos especialistas entrevistados, pesa contra a difusão dessa tecnologia o custo de investimento, que superaria o do processo convencional.

Os oito especialistas no setor do cimento interrogados para este estudo foram chamados a opinar sobre o estágio de desenvolvimento e as perspectivas de difusão em escala industrial de um conjunto de tecnologias. Entre essas tecnologias foram incluídas não apenas as mais inovadoras acima descritas, mas também processos de corte mais convencional que vêm sendo submetidos a melhorias que, conquanto incrementais, são significativas, como a cogeração de energia e ampliação da gama de materiais e de fontes de biomassa passíveis de queima nos fornos rotativos.

No caso das inovações mais radicais, predomina uma opinião coerente com a avaliação de que se encontram em estágios iniciais de desenvolvimento e de que sua difusão não deve ocorrer antes de 2030, exceto no caso dos fornos com leito fluidizado, em que se reconhece a operação em escala comercial. Os resultados deste levantamento sugerem, por outro lado, que inovações relevantes estão em desenvolvimento no campo da cogeração de energia. É também claramente predominante a apreciação de que essas tecnologias não envolvem inovações de caráter proprietário, o que é consistente com a análise da dinâmica tecnológica setorial apresentada na seção 2 deste capítulo.

Para esse mesmo leque de tecnologias, os especialistas foram interrogados sobre as oportunidades para o Brasil se engajar no processo de desenvolvimento tecnológico. As opiniões variaram bastante de acordo com a tecnologia. As perspectivas foram consideradas bem mais favoráveis no caso da ampliação do coprocessamento de resíduos e dos fornos com leito fluidizado. Em contrapartida, predomina uma posição cética sobre as oportunidades para o País participar do desenvolvimento do uso de biomassa como combustível e, sobretudo, dos tipos alternativos de cimento anteriormente discutidos.

Embora as informações disponíveis não permitam formular uma avaliação mais taxativa, as opiniões manifestas em algumas das entrevistas qualitativas realizadas para este estudo sugerem que não é dos mais avançados o estágio de desenvolvimento das competências tecnológicas que

20 As informações sobre essa tecnologia foram obtidas em Wills (2010) e, sobretudo, em www.brain-c-jcoal.info/cctin-japan-files/english/2_3B1.pdf, site acessado em 28/12/2012.

poderiam ser mobilizadas no Brasil para aproveitar essas oportunidades tecnológicas. De um lado, as estruturas tecnológicas das empresas são modestas e voltadas mais a melhorias incrementais do que a inovações tecnológicas de maior alcance. De outro, não parecem ser muito amplas as capacidades específicas à indústria do cimento existentes nas universidades brasileiras.

No Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq foram identificados apenas 17 grupos atuantes em tecnologias de baixo carbono vinculadas ao setor de cimento. Sobre 12 desses 17 grupos estão disponíveis no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq informações que permitem caracterizar sua qualificação e produção acadêmica e tecnológica. Conquanto a massa crítica inferida em termos de recursos humanos (65 pesquisadores com doutorado e nove com mestrado, em 2010) e produção científica (publicação de 12 livros, 61 capítulos de livros e 425 artigos, entre 2007 e 2010) seja relevante, a produção propriamente tecnológica foi muito menos expressiva. No período 2007-2010, contam-se apenas nove processos e cinco produtos com registro.

5. Impacto das Mudanças Institucionais e Tecnológicas no Brasil

As mudanças institucionais que têm ocorrido em resposta ao desafio das mudanças climáticas não exerceram, até este momento, efeitos críticos sobre o setor de cimento. As iniciativas mais ambiciosas – e potencialmente mais onerosas para a indústria do cimento – são os esquemas de comercialização de licenças de emissões (ETS) em discussão em vários países do mundo. Mesmo no caso da experiência europeia, a que mais se destaca em termos de abrangência setorial, espacial e temporal, os setores industriais que, dada sua intensidade em emissões, são mais sensíveis têm conseguido se eximir de boa parte dos ônus, não só porque a conjuntura recessiva tornou as metas de emissões relativamente frouxas, mas também porque foram concedidas licenças gratuitas àqueles setores em que a adoção plena do ETS implicaria riscos de perda de competitividade. Em contrapartida, não há notícia da adoção efetiva de normas específicas com o intuito de proteger a produção doméstica da concorrência de importações de cimento com base em argumentos de *carbon leakage*. Com efeito, a regulação do comércio internacional do produto continua a se caracterizar por um nível relativamente baixo de restrições institucionais, exceto em países que se encontram em estágios iniciais do processo de desenvolvimento e procuram estimular a fabricação local do produto.

Efetivamente, a adoção unilateral de esquemas de tributação ou precificação das emissões de carbono poderia vir a ter efeitos importantes sobre o comércio internacional mesmo numa indústria caracterizada pelo baixo grau de abertura e pela proteção natural decorrente das condições e do custo de transporte de um produto perecível e de baixo valor unitário. De fato, uma taxação de € 40 por tonelada de CO₂ seria bem mais pesada para o setor do cimento do que, por exemplo, para as indústrias siderúrgica e do alumínio²¹.

21 A esse respeito, um exercício revelador é calcular que proporção do preço médio de venda de cada um desses materiais representaria o custo adicional de precificação do carbono. Um ponto de partida conveniente é a projeção para o preço da tonelada de CO₂ que embasou a formulação do ETS europeu, um patamar que é considerado necessário para que o esquema realmente induza à adoção de tecnologias menos intensivas em emissões. De acordo

Nesse contexto, vale a pena avaliar se a difusão de esquemas localizados de ETS poderia viabilizar a formação de um fluxo de exportações importante a partir de países, como o Brasil, que produzam cimento menos intensivo em carbono. As condições para que isso ocorra, no entanto, são muito implausíveis. No caso de exportações para a União Europeia, por exemplo, seria necessário não só que o cronograma de ampliação da proporção leiloadas das licenças de emissão seguisse, a despeito das muitas objeções, o curso planejado, mas também que: (1) o mercado de carbono manifestasse um vigor muito maior do que tem sido observado nos últimos anos e os preços se alçassem ao patamar pretendido quando da implantação do ETS (entre € 25 e € 40); e (2) não fosse definido nenhum esquema de compensação no comércio com países em que a produção esteja isenta desse ônus. Esta última condição, em particular, é de todo improvável. Caso as importações sejam submetidas a uma tributação que precifique o carbono, os diferenciais em termos de intensidade em carbono não são expressivos a ponto de sobrepujar os custos de transporte do cimento e, menos ainda, justificar investimentos em capacidade produtiva orientada diretamente à exportação. De acordo com a Tabela 4, as emissões de CO₂ pela indústria brasileira na fabricação de cimento seriam em 2009 cerca de 50 kg/t inferiores às europeias. Um preço, muito acima do patamar atual, de € 40 para uma tonelada de CO₂ se traduziria, portanto, numa vantagem de custo para o produto brasileiro de apenas € 2 por tonelada de cimento, claramente insuficiente para compensar o custo de transporte.

O grande peso da indústria do cimento no conjunto das emissões de GEE torna indispensável sua participação nas ações de mitigação das mudanças climáticas. Mesmo admitindo para o setor uma redução das emissões até 2050 em torno de 20%, inferior ao corte geral de 50% considerado necessário para manter o aquecimento global dentro de uma faixa próxima a 2°C, os estudos da Agência Internacional de Energia mostram que são requeridas mudanças tecnológicas muito amplas na indústria do cimento para que o objetivo seja atingido. Além de difundir globalmente o conjunto de melhores práticas e tecnologias já disponíveis, seria preciso desenvolver e adotar tecnologias inovadoras de baixo carbono. Como as inovações em produto e processo específicas do setor não parecem suficientemente promissoras ou passíveis de desenvolvimento de forma tempestiva, tecnologias de captura e sequestro de carbono (CCS) são vistas como um componente central da trajetória de ajustamento do setor a uma economia de baixo carbono. De acordo com IEA (2012: 405), “sem a implementação de CCS no setor, as emissões de CO₂ [da indústria do cimento em 2050] serão mais altas do que o nível de 2009, mesmo se todas as outras opções de tecnologia forem implementadas”.

Com efeito, as tecnologias de CCS respondem por mais da metade da redução das emissões setoriais num cenário compatível com um aquecimento global limitado a 2°C. Para que essa traje-

com Grubb (2012: 5), foram projetados preços entre € 25 e € 40 ou, grosso modo, US\$ 30 a US\$ 50. Admitindo-se os níveis médios globais de emissões em cada um desses setores (1.800 kg de CO₂eq/t de aço, 9.700 kg de CO₂eq/t de alumínio e 750 kg de CO₂eq/t de cimento) e o patamar usual de preços para esses materiais (US\$ 1.000/t de aço, US\$ 2.000/t de alumínio e US\$ 100/t de cimento), a precificação das emissões importaria um aumento do custo equivalente a entre 5% e 9% do preço do aço, 15% e 24% do preço do alumínio e 23% e 38% do preço do cimento. O ônus para o cimento é maior, em última análise, porque embora em termos estritamente físicos a produção de uma tonelada de cimento seja menos intensiva em emissões do que a dos outros dois materiais, a intensidade em termos monetários, dado o valor unitário mais baixo do produto, acaba por ser maior.

tória seja viável, a IEA (2012: 406) alerta que é necessário dispor de operação em escala-piloto em 2013, plantas de demonstração em fábricas de cimento em 2015 e operação comercial entre 2020 e 2025. A adoção da tecnologia, contudo, não só aumenta os custos operacionais, como pode duplicar o custo de investimento. Ao contrário de muitas das mudanças propugnadas dentro do campo das tecnologias convencionais, a adoção de tecnologias de CCS não seria economicamente viável sem alterações no marco institucional capazes de mudar a sinalização do sistema de preços e gerar os incentivos requeridos para seu desenvolvimento e implantação.

A discussão sobre as políticas setoriais de ajustamento às mudanças climáticas no Brasil não deve ignorar as especificidades da indústria do cimento e do País. É verdade que o baixo coeficiente de exportações torna pequeno o efeito potencial de eventuais restrições internacionais ao cimento brasileiro. Além disso, o fato de as emissões de GEE brasileiras se concentrarem em efeitos da mudança no uso da terra torna menos críticas as emissões da indústria e do setor de cimento. Não é razoável, de toda maneira, supor que a longo prazo a indústria do cimento brasileira possa ficar à margem dos esforços para reduzir as emissões, ainda mais porque seu próprio crescimento, em conjunto com o controle de outras fontes, reforçará o papel do setor no conjunto das emissões. Com isso, o ambiente político tenderá a mudar, acentuando as pressões internas, que hoje são pouco expressivas. Por outro lado, dados o caráter crítico das emissões setoriais e a expectativa de que ocorra em países em desenvolvimento 95% do aumento do consumo do cimento até 2050 (IEA, 2009: 93), é de se esperar uma intensificação ao longo do tempo das pressões internacionais sobre a indústria do cimento dos países emergentes.

Nesse contexto, um objetivo consequente e desejável para as políticas de ajustamento às mudanças climáticas neste setor deve ser a sustentação da posição relativa favorável que o cimento brasileiro atualmente desfruta em termos de emissões de carbono. Para que isso possa ocorrer sem prejuízo do crescimento da oferta de um produto essencial para a ampliação da infraestrutura econômica e social do País, é necessário adotar medidas que promovam as mudanças tecnológicas requeridas, inclusive a incorporação gradual no futuro de esquemas de captura e sequestro de carbono.

A despeito do bom desempenho atual da indústria do cimento brasileira em termos de emissões de carbono, a heterogeneidade do parque indica que ainda há oportunidades relevantes para ampliar a difusão das melhores tecnologias convencionais disponíveis. Uma iniciativa importante para otimizar o parque produtivo nacional seria realizar um levantamento detalhado da situação atual e das possibilidades de melhoria em cada uma das fábricas de cimento do País. Esse levantamento poderia se concentrar nos equipamentos críticos para o rendimento energético e emissões de carbono – moinhos, resfriadores de clínquer e o conjunto de instalações da etapa de calcinação (preaquecedores, precalcinadores e fornos rotativos) – e cobrir adicionalmente a caracterização da instrumentação de controle.

A substituição do clínquer por adições é uma área em que a indústria brasileira provavelmente enfrentará dificuldades para manter a taxa atual, que se destaca internacionalmente. A colocalização em Minas Gerais dos principais polos siderúrgico e cimenteiro do País gerou dis-

ponibilidade de escória de alto-forno a curta distância das fábricas de cimento. O crescimento da produção de cimento em ritmo mais rápido do que o da produção de aço tem diminuído a disponibilidade relativa desse insumo²², situação que tende a se agravar se a siderurgia brasileira seguir a tendência projetada internacionalmente de expansão mais vigorosa das usinas semi-integradas, que dispensam os altos-fornos.

As dificuldades se acentuam também em função das alterações no padrão espacial do setor. Diferentemente das regiões Sudeste e Sul, que dispõem respectivamente de escórias siderúrgicas e cinzas volantes do carvão, as regiões de maior crescimento do consumo e produção de cimento não são dotadas de fontes tão amplas de insumos. No Nordeste, uma solução que tem sido empregada em algumas fábricas, dependendo da disponibilidade de matéria-prima adequada, é a queima de certos tipos de argila para a produção de pozolanas artificiais. Entre os materiais mais abundantes que poderiam ser empregados com esse fim, desponta o próprio calcário. As normas atuais prescrevem uma proporção máxima de 10% de calcário no cimento, mas especialistas entrevistados para este estudo asseguram que é possível adotar com segurança uma proporção de 15%, como na Argentina, ou até 20%. Mais genericamente, caberia discutir a adoção de normas vinculadas não à composição do cimento, mas ao seu desempenho.

No caso do coprocessamento de resíduos e uso de combustíveis alternativos, a situação é muito diferente e existe um espaço significativo para melhorar o desempenho do setor. Para tanto, é imprescindível ampliar a disponibilidade de insumos. A definição e, sobretudo, implementação de políticas para dar destinação adequada a resíduos sólidos de diferentes origens seguramente permitiria aumentar a oferta de material residual para coprocessamento. Além da aplicação mais efetiva da legislação que trata de resíduos industriais, cabe avançar também no aproveitamento de resíduos urbanos e residenciais. Em outra dimensão, é possível agilizar os processos de licenciamento do coprocessamento, capacitando os órgãos ambientais responsáveis e fazendo uso da experiência internacional. Naturalmente, isso não implica comprometer o rigor da avaliação. Já no caso do uso de biomassa em substituição aos combustíveis fósseis queimados nos fornos, uma restrição importante é a competição com usos alternativos. Nas condições brasileiras, as duas fontes mais frequentemente citadas são o bagaço de cana e a casca de arroz²³. De todo modo, idiossincrasias locais podem gerar disponibilidade de outras fontes de biomassa e um levantamento regionalizado dessas alternativas seria útil para aumentar a taxa de substituição de combustíveis fósseis.

Em relação a tecnologias inovadoras, a análise feita no tópico 4.2.3 indica que não é provável a difusão em horizonte próximo e mesmo no médio prazo de inovações disruptivas. De outra parte, essas

22 Entre 2000 e 2011, a produção brasileira de cimento cresceu 61% e a de aço bruto, afetada pela perda de competitividade internacional, apenas 26%.

23 Note-se que vários estudos têm apontado para a viabilidade de uso das cinzas da queima de bagaço de cana e da casca de arroz como substitutos parciais do clínquer no cimento. A quantidade dessas cinzas que, com base em coeficientes técnicos, pode se estimar esteja disponível anualmente no País não é pequena. Se o bagaço de toda a cana moída nas usinas e a casca de todo o arroz forem queimados, haveria cerca de 4 Mt de cinzas por ano a aproveitar. Mais uma vez, contudo, os custos logísticos em muitos casos podem tornar inviável seu uso em fábricas de cimento (NUNES, 2009; HOFFMANN et al., 2007).

tecnologias não têm, até onde se pode avaliar, um caráter estritamente proprietário. Em vez de dar origem a assimetrias competitivas entre os próprios fabricantes de cimento, tenderiam a seguir os passos característicos da dinâmica tecnológica setorial, difundindo-se por meio da incorporação ao catálogo dos fabricantes de equipamentos. De toda maneira, mesmo uma estratégia tecnológica centrada no monitoramento, adoção e rápida difusão de inovações desenvolvidas no exterior não dispensa o País da necessidade de constituir competências nessas áreas, já que a operação eficiente e a absorção efetiva – com adaptações a circunstâncias específicas e melhorias subsequentes – requerem competências locais.

Nas condições da indústria do cimento, uma estratégia como essa pode ser suficiente para sustentar a posição competitiva atual, mas certamente não seria capaz de enraizar no Brasil os impulsos econômicos da dinâmica inovadora em tecnologias de baixo carbono. Reproduzindo a condição usual do País de usuário de tecnologia desenvolvida no exterior, pode implicar o desperdício de mais uma janela de oportunidade para avançar na hierarquia das competências inovativas.

Considerando (1) a condição crítica das tecnologias de captura e sequestro de carbono em várias indústrias importantes para o Brasil, (2) as economias de escopo que daí podem advir e (3) o estágio pré-paradigmático em que se encontra o desenvolvimento dessas tecnologias, este parece ser um campo particularmente indicado para iniciativas mais ousadas e ambiciosas. Seria preciso, todavia, agir de imediato. Uma busca no Diretório de Grupos de Pesquisa identificou apenas oito grupos de pesquisa engajados no tema. Mesmo um país cuja estrutura econômica não é tão diferente da nossa, como a Austrália, já avançou bem mais nessa área. O ponto de partida de qualquer estratégia nesse campo seria o lançamento de editais indutores por instituições de fomento à pesquisa, como o CNPq e a Finep. De modo a compensar o eventual atraso inicial, os editais poderiam ser desenhados de maneira a promover a interação com pesquisadores e instituições estrangeiras com competência nesse campo.

Por fim, a estratégia aqui esboçada – calcada na difusão das melhores tecnologias disponíveis, monitoramento e adoção de inovações emergentes e aposta num campo mais promissor – requer um ambiente institucional indutor dos investimentos das empresas em iniciativas de baixo carbono. Não faz sentido que um país em desenvolvimento como o Brasil lidere o processo de precificação das emissões, mas acompanhar com uma defasagem prudente a adoção de mecanismos que mudem a sinalização do sistema de preços pode muito bem ser um requisito para um aproveitamento mais amplo das oportunidades geradas pela transição rumo a uma economia de baixo carbono.

Referências Bibliográficas

- ANDRADE, M. L. A., L. M. S. CUNHA & M. C. SILVA (2002) “Desenvolvimento e Perspectivas da Indústria de Cimento”. *BNDES Setorial*, nº 15, março, pp. 35-62.
- BAPTISTA, C. N. (1995) “Medicina do Trabalho na Indústria de Cimento”. In: *Anais do Ciclo de Conferências. Indústria de Cimento: Fabricação, Coprocessamento e Meio Ambiente*, Rio de Janeiro: ABCP/FEEMA, pp: 203-212.

- BATTELLE (2002) *Towards a Sustainable Cement Industry: An Independent Study Commissioned by the WBCSD*.
- BCG (2008) *Assessment of the Impact of the 2013-2020 ETS Proposal on the European Cement Industry*. 49 p.
- CEMBUREAU (2011) *Activity Report - 2010*. Bruxelas: Association Européenne du Cement.
- CEMBUREAU (2007) *Activity Report - 2006*. Bruxelas: Association Européenne du Cement.
- CEMBUREAU (2006) *Green Paper on Energy Efficiency: A View from the European Cement Industry*. Bruxelas: Association Européenne du Cement.
- CEMBUREAU (1999) *Best Available Techniques for the Cement Industry*. Bruxelas: Association Européenne du Cement.
- DAMTOFT, J. S. et alii (2008) "Sustainable Development and Climate Change Initiatives". *Cement and Concrete Research*, nº 38, pp. 115-127.
- DNPM (2009) *Anuário Mineral Brasileiro*. Brasília: DNPM.
- ECRA (2009) *Development of State of the Art Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*. Dusseldorf: European Cement Research Academy.
- EPE (2011) *Balanço Energético Nacional – 2010*. Rio de Janeiro: EPE.
- GRUBB, M. (2012) *Strengthening the EU ETS: Creating a Stable Platform for EU Energy Sector Investment*. Cambridge, UK: Climate Strategies, 39 p.
- HOFFMANN, R. et al. (2007) *Aproveitamento da Cinza Produzida na Combustão da Casca de Arroz: Estado da Arte*. Disponível em: <http://www.ufsm.br/cenergia/arte_final.pdf>. Acesso em: 29/12/2012.
- IEA (2012) *Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System*. Paris: OECD/IEA, 2nd. Edition, 686 p.
- IEA (2010) *Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios & Strategies to 2050*. Paris: OECD/IEA, 706 p.
- IEA (2009) *Energy Technology Transitions for Industry: Strategies for the Next Industrial Revolution*. Paris: OECD/IEA, 321 p.
- LORETI, C. (2009) *Cement Sector Greenhouse Gas Emissions Reduction Case Studies*. Report prepared for the California Energy Commission. 34 p.
- MCT (2010) *Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas por Fontes e Remoções por Sumidouros de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal*. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. Parte 2. Brasília: MCT, 280 p.
- MDIC (2012) *Plano Setorial de Mitigação da Mudança Climática para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação*. Brasília: MDIC, 33 p.
- MILANEZ, B. (2007) "Co-incineração de Resíduos Industriais em Fornos de Cimento: Problemas e Desafios". *Anais do IX ENGEMA - Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente*. Curitiba.
- MÜLLER, N & J. HARNISCH (2009) *A Blueprint for a Climate Friendly Cement Industry*. Report prepared for the WWF-Laforce Conservation Partnership.
- NUNES, I. H. S. (2009) *Estudo da Características Físicas e Químicas da Cinza do Bagaço de Cana-de Açúcar para Uso na Construção*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana. Maringá: UEM.
- OECD (2008) *Environmental Outlook to 2030*. Paris: OECD.
- PINHO, M. (2008) *Indústria do Cimento*. Nota técnica final do projeto "Uma Agenda de Competitividade para a Indústria Paulista". São Carlos: Fipe.
- PINHO, M. & L. G. D. FARIA (2012) *Indústria do Cimento*. Relatório final do projeto "Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas". Ribeirão Preto: Fundace, 105 p.

- PROCHNIK, V., A. PEREZ & C. M. S. SILVA (1998) *A Globalização na Indústria do Cimento*. Relatório técnico. São Paulo, disponível em www.ie.ufrj.br/cadeiasprodutivas, acessado em 20/08/2007.
- SALVO, A. (2004) *Inferring Conduct under the Threat of Entry: The Case of the Brazilian Cement Industry*. PhD Dissertation, London School of Economics.
- SANTI, A. M. M. (2003) *Co-incineração e Co-processamento de Resíduos Industriais Perigosos em Fornos de Clínquer*. Tese de Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos. Campinas: Unicamp.
- SANTI, A. M. M. & SEVÁ Fo., A. O. (2004) "Combustíveis e Riscos Ambientais na Fabricação de Cimento: casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e Possíveis Generalizações". II Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – ANPPAS.
- SIGNORETTI, V. T. (2008) *Controle das Emissões de NO_x, SO_x e Metais Pesados Quando se Utilizam Combustíveis Alternativos e de Alto Teor de Enxofre na Indústria de Cimento*. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. Itajubá: UNIFEI, 205 p.
- SNIC (2011) *Press Kit – 2011*. Rio de Janeiro: SNIC.
- USGS (2011) *2009 Mineral Yearbook*. July.
- WBCSD (2010) *Cement Technology Roadmap 2009*. World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency Technology Roadmaps.
- WILLS, W. (2010) *Indústria de Cimento*. Estudo # 61 do Projeto "Perspectivas dos Investimentos Sociais no Brasil". Disponível em <http://www.cedeplar.ufmg.br/pesquisas/pis/Estudo%2061.pdf>.

Indústria do Alumínio

Clésio Lourenço Xavier

Introdução

Este capítulo apresenta as principais conclusões da análise da indústria de alumínio primário no âmbito do projeto “Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas”. Tendo por objetivo a identificação das tendências das trajetórias tecnológicas e a posição competitiva brasileira em setores intensivos em carbono, a indústria de alumínio primário foi selecionada por se tratar de um setor intensivo em emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Em termos metodológicos, este capítulo faz uso de três fontes principais de informações. Além das fontes bibliográficas, foram realizadas entrevistas e aplicado um questionário junto a importantes empresas/organizações da indústria de alumínio no Brasil.¹ Uma terceira fonte valiosa de informações foi a participação do autor no V Congresso Internacional do Alumínio, realizado entre os dias 24 e 26 de Abril de 2012, onde se estabeleceu contato e interação com diretores de empresas do setor de alumínio, associações internacionais e consultores internacionais.

O presente capítulo subdivide-se em seis partes: a primeira parte contempla os fatores determinantes da competitividade internacional do setor de alumínio no Brasil; a segunda parte aborda os impactos ambientais na indústria de alumínio no mundo; a terceira parte analisa as mudanças climáticas e a regulação setorial internacional na indústria do alumínio; a quarta parte trata da dinâmica tecnológica da indústria do alumínio, incluindo as perspectivas tecnológicas tanto no início da década de 2020 como em 2050; a quinta parte aborda as mudanças climáticas tecnológicas na indústria do alumínio, enquanto a sexta parte prescreve políticas públicas visando uma inserção competitiva virtuosa do setor de alumínio do Brasil em um ambiente futuro de baixo carbono.

1. Fatores determinantes da Competitividade Internacional do Setor de Alumínio no Brasil

O alumínio primário é produzido por meio de um processo de *redução eletrolítica* da alumina, também conhecido como *smelter*, utilizando-se de um processo denominado *Hall-Héroult*, onde uma corrente elétrica passa através de uma solução de alumina dentro de uma cuba eletrolítica, demandando grande quantidade de energia para que haja a *redução*, o que torna o alumínio um metal eletro-intensivo. A reação ocorre num recipiente de carbono que age como catodo e que contém a solução eletrolítica. O ânodo de carbono é parcialmente submerso na solução e consumido ao longo do processo. A eletrólise do óxido de alumínio produz alumínio fundido, que se deposita no catodo, e oxigênio, que se deposita no ânodo e reage com o carbono, produzindo emissões de CO₂. Alguma quantidade de CO₂ é também produzida quando o ânodo reage com outras fontes de oxigênio (como o ar).

¹ O autor agradece a significativa colaboração das seguintes empresas/organizações e seus respectivos diretores e chefes na concessão das entrevistas, isentando-os de eventuais erros e omissões: Alcoa Alumínio SA (Nilson Pereira Souza - Diretor de EHS & S); Norsk Hydro (Luiz Gustavo Correa - Chefe dos Projetos de Expansão, Tecnologia e Exploração de Bauxita); Norsk Hydro (Andreia Reis, Chefe de Relacionamento e Desenvolvimento de Negócios); Votorantim Metais-CBA (Ana Cláudia Lima, Consultora de Meio Ambiente); ABAL (Maurício Born – Coordenador do GT Mudanças Climáticas).

No Brasil, a média de emissões de CO₂ no processo de produção de alumínio primário é de 2,7 t de CO₂eq por tonelada de alumínio, enquanto a média mundial é de 7,1 t de CO₂eq por tonelada de alumínio, segundo o *International Aluminium Institute* (IAI, 2010). O total das emissões de CO₂eq na indústria brasileira do alumínio (em 2008) – desde a mineração até a reciclagem – foi de 4,2 t de CO₂eq por tonelada de alumínio, muito abaixo da média mundial de 9,7 t de CO₂eq por tonelada de alumínio, conforme o *International Aluminium Institute*. Ressalta-se que tais números incluem as emissões de carbono na geração de eletricidade consumida durante o processo, não se restringindo àquelas emissões que ocorrem diretamente no processo de produção.

O processo de produção de alumínio primário pode utilizar dois tipos principais de tecnologia: 1- Tecnologia *Prebaked* – cubas com ânodos pré-cozidos; e 2- Tecnologia *Soderberg* – ânodos cozidos na própria cuba.

Em 1990, 63% da produção mundial de alumínio empregou a tecnologia *Prebaked*. Em 2009, a tecnologia *Prebaked* aumentou sua participação na produção mundial para 89% e a tecnologia *Soderberg* encolheu para apenas 11% (BAYLISS, 2012). No Brasil, aproximadamente 62% da produção de alumínio primário utiliza a tecnologia *Prebaked*, de menor emissão de CO₂, enquanto a tecnologia *Soderberg* é utilizada em um terço da produção de alumínio. Segundo o MCT (2006), o fator de emissão de CO₂ no consumo do ânodo na tecnologia *Soderberg* é 1,8 e o da tecnologia *Prebaked* é de 1,5 tonelada de CO₂ por tonelada de alumínio.

Em nível mundial, são requisitos tecnológicos para a eficiência na fabricação de alumínio a proximidade física e a interação com os clientes e usuários a jusante, seja para atender às suas especificações, seja em função dos altos custos e riscos envolvidos no transporte de um material relativamente frágil (Bunker & Ciccantell, 1994, pp. 50-51). Como consequência, mesmo que uma empresa seja verticalizada, não necessariamente concentrará suas operações em um mesmo lugar. É provável que as plantas de alumina se localizem mais próximas da matéria-prima (bauxita), ao passo que as atividades de manufatura de produtos intermediários e a fabricação de produtos finais sejam instaladas mais próximas do mercado consumidor.

No tocante à estrutura de mercado, os custos de capital relativamente baixos nos países desenvolvidos têm estimulado a entrada de novos concorrentes na etapa final de fabricação de alumínio. De outra parte, e mais importante, os altos custos associados à pesquisa e desenvolvimento e, principalmente, os benefícios de uma integração entre *smelters* e fabricantes dentro da firma têm resultado em integração vertical, concentração da produção e reforço do oligopólio do alumínio em nível mundial, à exceção de poucos entrantes verticalmente integrados.

Em linhas gerais, os fatores de competitividade presentes na cadeia produtiva do alumínio, podem ser decompostos de acordo com os estágios de processamento:

1. Estágio 1 (inicial): a qualidade da bauxita é fator determinante da competitividade. Além disso, os níveis de tributação e de cobrança de *royalties* também são importantes fatores competitivos.

2. Estágio 2 (refino): na produção de alumina, a proximidade das minas de bauxita, as despesas com combustíveis e o custo de capital se constituem nos principais fatores de competitividade.
3. Estágio 3 (redução): na produção de alumínio primário, a disponibilidade e o preço de energia elétrica são os fatores essenciais de competitividade.
4. Estágio 4 (final): na produção de alumínio semimanufaturado, a proximidade do consumidor é o principal fator competitivo.

Portanto, a cadeia produtiva do alumínio primário tende a não ser integrada localmente, pois o início da cadeia envolve proximidade da matéria-prima e o final da cadeia, proximidade com o consumidor de semimanufaturados de alumínio.

Na produção de alumínio primário (*smelter*), a competitividade também é afetada pelos custos de capital, já que se trata de um setor intensivo em capital. Embora menores do que em 2008, o investimento por tonelada de capacidade instalada (*capex*) se situava em 2011 em US\$ 3.500. Adicionalmente, o *capex* do alumínio primário situa-se em torno de 30% dos custos marginais de longo prazo.

Em termos de competitividade internacional, o custo de capital para as empresas produtoras de alumínio primário na China é duas a três vezes menor que no resto do mundo, conforme Macquarie (2011). Os *smelters* chineses replicam o desenho de suas plantas produtivas, diminuindo os custos com mão de obra e reduzindo o tempo médio de construção, em torno de 12 a 18 meses contra 48 meses no resto do mundo.

A cadeia produtiva do alumínio primário no Brasil segue a tendência internacional a não ser integrada localmente, pois o início da cadeia (bauxita e alumina) localiza-se na região norte do país, e o final da cadeia produtiva, que requer proximidade com o consumidor de semimanufaturados de alumínio, situa-se nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Ressalta-se, em primeiro lugar, a qualidade da bauxita metalúrgica extraída no Brasil, com baixo grau de impurezas, um dos fatores determinantes da competitividade nessa etapa da cadeia produtiva por diminuir o dispêndio com energia. Essa é uma diferença importante em relação a outros países, como a China, onde o grau de impureza da bauxita é maior.

Em segundo lugar, considerando os fatores de competitividade apontados acima, a produção brasileira de alumina atende o requisito da proximidade com as minas de bauxita, mas os custos de capital são elevados, como em quase todos os setores da economia nacional.

Além disso, se no plano internacional os principais *players* produzem internamente a alumina de que necessitam, dispondo ainda de excedentes para serem comercializados no mercado (à “exceção” da Rio Tinto Alcan, que produzia internamente 95% da alumina necessária), no Brasil a situação não é diferente. O elevado grau de verticalização reduz os custos de produção significativamente em relação a uma *refinaria não integrada* localmente.

A influência do custo do combustível depende da localização da refinaria de alumina em relação à refinaria de gás (ou às vezes carvão). No Brasil, as refinarias de alumina utilizam energia hidrelétrica, o que constitui uma especificidade da produção brasileira e torna o peso do item combus-

tível menor em comparação com a experiência de outros países. Dado o peso da hidroeletricidade na matriz energética brasileira, isso ajuda a explicar o bom desempenho do alumínio brasileiro em termos de emissões de gases do efeito estufa (GEE).

Existe uma forte orientação exportadora da alumina produzida no Brasil: nada menos que 68% da alumina produzida no Brasil destina-se ao mercado externo, refletindo a ausência de investimentos em expansão da capacidade produtiva de alumínio primário. Se toda a alumina exportada pelo País fosse eventualmente transformada em alumínio, a produção doméstica deste produto seria o triplo da atual.

Na produção de alumínio primário, o fator mais crítico de competitividade é a disponibilidade de energia elétrica a preços competitivos. Os patamares internacionais ultrapassaram o valor de US\$ 40 por MWh em 2011, após um longo período de cerca 20 anos em que os preços internacionais da energia elétrica para os *smelters* ficaram, grosso modo, estáveis em torno de US\$ 20 por MWh (CRU, 2011).

No Brasil, atualmente os preços da energia elétrica para a produção de alumínio situam-se em torno de US\$ 30 por MWh, acima da África, Austrália e Canadá, mas abaixo dos países europeus e China, onde se situam entre US\$ 40 e US\$ 50 por MWh. Os países africanos e a Austrália baseiam sua competitividade na abundância de carvão, (CRU, 2010).

Num cenário de uma economia de baixo carbono, e com a existência de restrições à produção e ao comércio internacional de alumínio originário de matrizes energéticas de alta emissão de CO₂eq, a indústria brasileira de alumínio primário pode buscar uma reinserção exportadora amparada nas vantagens do alumínio brasileiro em termos de emissões de carbono. Note-se que o anúncio pelo governo brasileiro da Medida Provisória nº 579 em 11 de setembro de 2012 de barateamento das tarifas de eletricidade para uso industrial é convergente com essa possibilidade.

Portanto, qualidade da bauxita, capacidade produtiva pré-existente de alumina e matriz energética de baixíssima emissão de CO₂eq se autorreforçam mutuamente como fatores inerentes e específicos à dinâmica competitiva da indústria brasileira de alumínio, essenciais em um ambiente internacional de baixo carbono.

2. Impactos Ambientais na Indústria de Alumínio no Mundo

As emissões de dióxido de carbono ocorrem durante o processo de eletrólise e durante a produção de energia elétrica, se gerada por combustível de origem fóssil. Na eletrólise, a maioria do CO₂ é resultado da reação química entre o ânodo carbono e a alumina, mas alguma quantidade é formada quando o ânodo reage com outras fontes de oxigênio (como o ar).

A produção de eletricidade, usada no processo de fundição, também é responsável por emissões adicionais de gases de efeito estufa. O nível e o tipo das emissões dependem da fonte primária de energia para essa eletricidade.

Em outras etapas da produção de alumínio, tais como mineração e produção do ânodo, também há emissões de CO₂, mas são relativamente pouco significativas (em torno de 5% das emissões

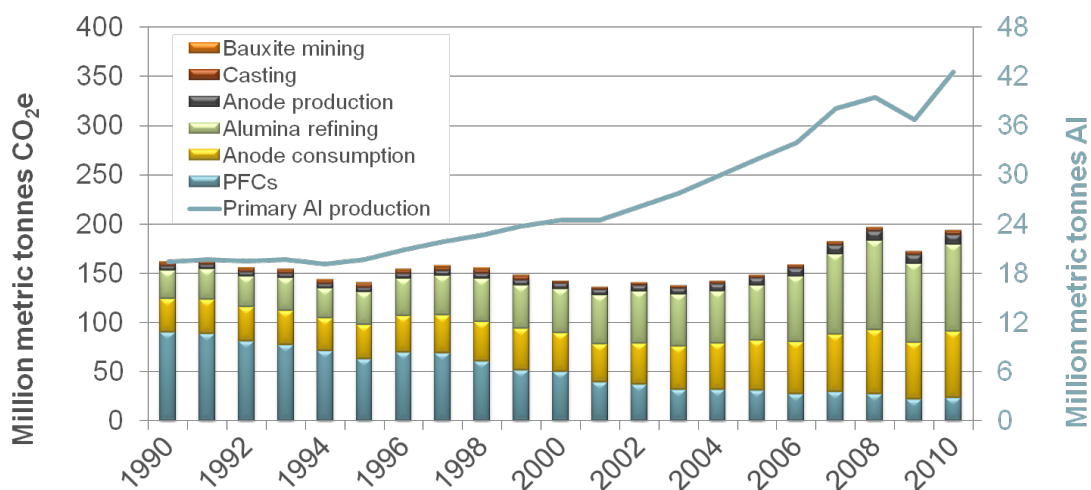
diretas). Portanto, mais de 90% das emissões totais de dióxido de carbono da indústria mundial de alumínio são provenientes do processo de geração de energia e da fundição. **No Brasil, a fonte principal de energia utilizada no processo de fundição é a hidroeletricidade, o que minimiza as emissões de CO₂** (MCT, 2006).

Durante o processo de eletrólise, se o nível de óxido de alumínio na cuba de produção ficar muito baixo, pode ocorrer, dada a dificuldade de controle da relação entre as substâncias na cuba eletrolítica, um rápido aumento de voltagem (efeito anódico), em decorrência da existência uma quantidade insuficiente de alumina (Al₂O₃) dissolvida no banho eletrolítico.

Assim, neste processo a alumina (Al₂O₃) é dissolvida num fluoreto fundido, que consiste principalmente de criolita (Na₃AlF₆). Quando uma célula eletrolítica de alumínio está operando normalmente, não há produção de perfluorcarbonos (PFCs). Contudo, se o óxido de alumínio contido na solução dilui-se muito, abaixo de 1,5%, ocorre um rápido aumento de voltagem e a solução passa a reagir com o carbono, produzindo gases PFCs.

Os perfluorcarbonos (CF₄ e C₂F₆) favorecem o aquecimento global por sua alta capacidade de absorção infravermelha e sua relativa inércia na atmosfera (PINHO, 2010). Essas ocorrências são indesejáveis do ponto de vista ambiental e também do ponto de vista da eficiência produtiva, pois acarretam uma diminuição na produtividade e aumento do consumo de energia.

Gráfico 1 Total de Emissões Diretas de Gases de Efeito Estufa (GEE) pela Indústria Mundial do Alumínio, 1990-2010



Fonte: BAYLISS, 2012 exatamente em baixo do canto inferior esquerdo do Gráfico 1

Apesar das concentrações atmosféricas de PFCs serem relativamente pequenas se comparadas às concentrações de CO₂ e CH₄, os gases PFCs são removidos muito lentamente da atmosfera. O tempo de vida estimado de CF₄ e C₂F₆ na atmosfera é de 50.000 e 10.000 anos, respectivamente, resultando em um potencial de aquecimento global relativamente alto: uma tonelada de CF₄ e C₂F₆

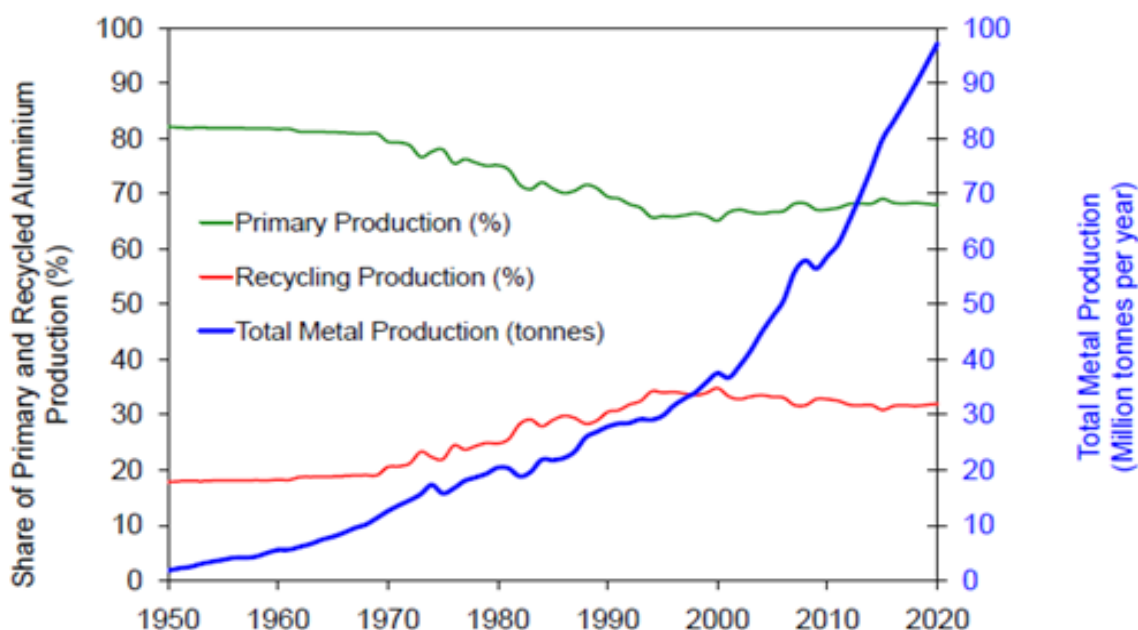
emitida equivale a 6.500 e 9.200 toneladas, respectivamente, de CO₂ quando se considera o aquecimento de um período de 100 anos.

Uma síntese da emissão de CO₂eq por etapa da cadeia produtiva na produção mundial de alumínio pode ser visualizada no gráfico 1, onde se confirma, de um lado, a pequena importância da atividade de mineração da bauxita enquanto emissora dos gases do efeito estufa (GEE) e, sobretudo, a forte diminuição da emissão dos gases PFCs entre 1990 e 2010. De outra parte, constata-se também a contribuição significativa do refino da alumina e do consumo de ânodo, no âmbito da eletrólise, para a emissão de GEE. A contribuição desses itens é crescente, acompanhando os aumentos dos níveis de produção, principalmente a partir do início da década de 2000, mas também reflete a heterogeneidade de rotas tecnológicas ainda presente nas plantas produtivas das empresas líderes no plano internacional.

Finalmente, um fator importante que modera o impacto ambiental no setor de alumínio é a **reciclagem**, pois requer apenas 5% da energia consumida em relação à produção de alumínio primário e emite apenas 5% dos gases de efeito estufa (GEE), diminuindo também os custos de produção. Ademais, uma característica essencial do alumínio que favorece o processo de reciclagem é que ele pode ser reciclado várias vezes sem perder suas propriedades físico-químicas (IAI, 2009).

Como se pode observar no gráfico 2, desde a década de 1970 até o início dos anos 2000, em termos mundiais, a tendência tem sido de redução da proporção de alumínio primário e de aumento da reciclagem de alumínio. A partir dos anos 2000, nota-se certa estabilidade entre a proporção de alumínio primário (68%) e alumínio reciclado (32%), embora isso ocorra sob uma produção total cada vez maior ao longo do período. Em 2010, a reciclagem de alumínio economizou cerca de 170 milhões de toneladas de emissões por ano de CO₂eq (IAI, 2009).

Gráfico 2 Produção de Alumínio Primário e Reciclagem



Fonte: IAI, 2009 exatamente em baixo do canto inferior esquerdo do Gráfico 2.

3. Mudanças Climáticas e Regulação Setorial na Indústria do Alumínio

Os casos mais elaborados de legislações restritivas que atingem os setores intensivos em emissão de CO₂ em geral e a produção de alumínio primário e alumina em particular são recentes: o *Emissions Trading System* (EU ETS) europeu, em vigor desde 2005, mas que incluirá as emissões de alumínio a partir de 2013; e a adoção a partir de julho de 2012 do *Carbon Pricing Scheme* na Austrália.

3.1. Emissions Trading System Europeu

O EU-ETS cobre aproximadamente 10.500 instalações intensivas em energia na Europa, as quais recebem ou compram permissões de emissões anualmente e devem monitorar, auditar e relatar as suas emissões, também anualmente, por meio de procedimentos padronizados. Este esquema teve uma primeira fase de aprendizado de 2005 a 2007 (na qual ao menos 95% das permissões foram alocadas gratuitamente, sendo o restante leiloado), seguido por uma segunda fase com duração de cinco anos, de 2008 a 2012, (na qual ao menos 90% das permissões foram alocadas gratuitamente, sendo o restante leiloado). Já está definida uma terceira fase de oito anos, de 2013 a 2020, na qual o leilão deverá predominar como método para alocação de emissões. Este modelo, com diferenciação no método de alocação de emissões por fases, permite que as empresas se preparem e se adaptem às novas regras (CNI, 2012).

O esquema de comercialização de emissões europeu trata os setores industriais de forma diferenciada. Inicialmente, envolveu empresas de certos setores como energia, metais, minerais, papel e celulose e, gradualmente, a partir de 2013, será expandido, quando incorporará outros setores e também outros gases do efeito estufa (GEE), dentre eles está o setor de alumínio e os perfluorocarbonetos emitidos em sua produção. O objetivo é reduzir em 21% as emissões do bloco até 2020 (com base no nível de 2005), porém, após essa data, o teto para a liberação de GEEs continua caindo 1,74% ao ano, oferecendo maior certeza para os investidores em tecnologias limpas.

REINAUD (2008) procedeu a uma análise dos efeitos do ETS europeu sobre a competitividade (fluxos comerciais) dos setores da indústria europeia e sobre a *fuga de carbono*, ou seja, o aumento das emissões fora da região, como resultado da política de limite de emissões na UE, tendo como referência os dados anteriores e posteriores à implementação da política climática.

No primeiro período de implantação do sistema, além dos esforços diretos de redução das emissões exigida em setores intensivos em energia (efeito direto), ocorreram variações do preço da energia (efeitos indiretos), dependendo do país que se avaliava. Essa fase foi caracterizada pela volatilidade nos preços das licenças e pela apropriação pelo setor industrial de subsídios além de suas necessidades.

Neste período, as emissões de carbono do setor de alumínio primário europeu não foram limitadas. No entanto, avalia-se que ocorrerá uma diminuição das margens de lucro do setor e, possivelmente, diminuição de sua participação no mercado, já que é altamente intensivo em energia e

os preços de eletricidade tendem a aumentar. Fez-se então uma análise dos custos de eletricidade na Europa, para verificar se o aumento do custo foi maior do que em regiões concorrentes e se o EU-ETS foi um fator diferencial.

A análise não confirmou a hipótese de que os preços de CO₂ da UE afetariam os fluxos de comércio de alumínio primário. Além disso, preços mais altos de energia elétrica também parecem não ter afetado o desempenho dos *smelters*, pois a maioria da capacidade instalada da UE opera com contratos de longo prazo e preços pré-estabelecidos da energia. No entanto, deve-se considerar que qualquer aumento dos preços de eletricidade no período analisado seria parcialmente obscurecido pela situação favorável do setor, de elevação da demanda e de elevadas margens de lucro resultante da alta dos preços do alumínio no mercado internacional. Durante o período 2003-2006 o preço do alumínio primário aumentou 82% e as margens médias de lucro operacional dos *smelters* foram em 2005-2006 praticamente o dobro das registradas no biênio 1998-1999.

Quanto às perspectivas futuras, REINAUD (2008) afirma que o setor de alumínio está exposto a um risco elevado de *fuga de carbono*, devido ao preço da energia, dado que após 2010 os contratos de fornecimento de energia iriam expirar para 65% da capacidade instalada europeia. Além disso, em 2016 as fábricas de fundição não poderão se beneficiar de contratos anteriores às reformas no mercado de eletricidade da UE.

Portanto, os efeitos da adoção do EU-ETSs dependem diretamente do ciclo de negócios do alumínio e dos preços da energia, embora seja provável que, com a inclusão das emissões diretas, envolvendo os leilões plenos de licenças, os produtores europeus de alumínio com maiores custos de produção tornem-se mais vulneráveis à concorrência internacional. Visando reduzir essa provável fragilidade competitiva, em julho de 2012, foi aprovada pela Comissão Europeia uma medida em que os países-membros poderão subsidiar até 85% do custo adicional incorrido pelas empresas mais eficientes em cada setor no período 2013-2015, quando novos setores deverão ser incluídos no EU-ETS.

3.2. Carbon Pricing Scheme da Austrália

O governo australiano apresentou em 1º de julho de 2012 um regime de preços de carbono em que cerca de 500 dos maiores poluidores da Austrália terão que comprar uma licença para cada tonelada de emissão de carbono que geram. A cobertura do sistema irá incluir energia elétrica, energia estacionária², processos industriais, as emissões fugitivas (por exemplo, a partir de mineração de carvão), resíduos, e o setor de transportes, incluindo ferroviário, marítimo e aviação doméstica (Citi, 2012).

O governo irá prestar assistência a atividades intensivas em emissões, categoria que inclui usinas de alumínio e refinarias de alumina, e tal assistência governamental vem na forma de fornecimento de licenças de carbono gratuitas com base em parâmetros globais médios de emissões da indústria para o setor de alumínio e alumina. A taxa de assistência, que começa em 94,5% dos níveis de emissão de referência global, diminuirá em 1,3% a cada ano até o ano de 2017, com um limite mínimo de 90%.

² Energia estacionária é a utilização combinada de eletricidade e de gás para fins industriais, comerciais e residenciais.

Assim, se as emissões forem iguais aos níveis de referência global, as fábricas de fundição terão que comprar licenças para a diferença entre a taxa de assistência e a referência global. Obviamente, para os níveis de emissão acima da referência global, mais licenças terão que ser compradas. O preço do carbono por tonelada será fixado para os primeiros três anos a partir de A\$ 23 a tonelada, aumentando em termos reais 2,5% ao ano. A partir de 1 de julho de 2015, o preço do carbono será definido pelo mercado.

Para se ter uma noção do impacto do imposto de carbono sobre os custos industriais, nas tabelas 1 e 2, tem-se a média das emissões de carbono por tonelada de alumínio e alumina da indústria australiana. O custo médio para as fábricas de fundição australianas em 2012 é de A\$ 2060/t.³ No ano fiscal de 2013 o imposto sobre o carbono representa 2% do custo. No caso da alumina, o custo médio para as refinarias australianas é de A\$ 243/t, e o custo do imposto sobre o carbono no ano fiscal de 2013 será de 0,38% do custo. Assim, o impacto da taxa de carbono, com o apoio do governo estará em torno de 2% para o alumínio e de 0,3% a 0,7% para a alumina.

A incidência direta do imposto de carbono sobre os produtores de alumínio implicará A\$ 20-40/t adicionais para os custos de produção de alumínio primário. No entanto, isto não inclui o impacto da taxa de carbono sobre os custos de energia, dado que o imposto sobre o carbono provavelmente irá aumentar o preço da eletricidade também.

Em um contexto de preços deprimidos no mercado de alumínio, a adição de A\$ 20-40/t nos custos de produção implicará um reposicionamento da maior parte das fábricas de fundição australianas à nona posição nos *rankings* mundiais de custos de produção⁴.

De modo semelhante aos *smelters*, as refinarias de alumina na Austrália também foram atingidas pelos efeitos em termos de aumento dos custos, embora isso seja mitigado pelos maiores preços da alumina no mercado internacional no momento de implantação das medidas restritivas à emissão de CO₂ (A\$ 310/t em julho de 2012), permitindo às refinarias australianas a obtenção de lucros sobre os *cash costs*. Com exceção das refinarias *Gladstone* e *Kwinana*, a margem sobre o *cash cost* para as outras refinarias australianas situa-se na faixa de 30% a 50% (Citi, 2012).

A Austrália responde atualmente por 20% da produção de alumina global, mas espera-se que a partir de 2015 seu *market share* comece a declinar em função da ampliação de capacidade produtiva no resto do mundo, mesmo considerando que também na Austrália também deverá expandir-se em 14,6% até 2015. Não obstante, as questões ambientais permanecem decisivas para as refinarias de alumina, pois os preços internacionais estão em queda desde junho de 2012 especialmente em função da alta produção chinesa de alumina. De outro lado, é possível que a proibição de exportação de minério da Indonésia (parcialmente introduzida em maio de 2012

3 O *smelter* Kurri Kurri foi excluído do cálculo. O ministro australiano das Mudanças Climáticas e Eficiência Energética declarou aos meios de comunicação em 23 de maio de 2012 que o encerramento da fábrica de fundição de alumínio *Kurri Kurri* não foi influenciado pela implementação do regime de preços de carbono. Fontes da indústria têm insistido que o principal responsável pela decisão de encerramento foram os custos crescentes da energia, mas que a taxa de carbono também foi um fator relevante.

4 Nesta perspectiva, o acordo do governo de um subsídio para a fábrica de fundição *Point Henry* pode ser visto como uma admissão tácita da pressão adicional de custos criada pela adoção do imposto de baixo carbono.

e com a proibição total até 2014) resulte em uma reversão na queda dos preços da alumina no mercado internacional, mantendo a atratividade de sua produção na Austrália em comparação com as fábricas de fundição de alumínio.

Tabela 1 Imposto de Carbono por Tonelada de Alumínio com Base na Média das Emissões de Carbono da Indústria Australiana

	2013	2014	2015	2016	2017
CO ₂ eq por tonelada de Al	15,62	15,62	15,62	15,62	15,62
Taxa de Assistência	94,5%	93,2%	91,9%	90,6%	90,0%
Ton de Carbono isentas de taxaço	14,8	14,6	14,4	14,2	14,1
Quantidade de carbono a ser paga	0,9	1,1	1,3	1,5	1,6
Preço de Carbono por tonelada(\$/t)	23,2	22,9	22,9	23,5	24,1
Custo Médio por tonelada (\$/t)	20,0	24,4	28,9	34,5	37,6

Fonte: Citi, 2012 exatamente em baixo do canto inferior esquerdo da Tabela 1.

Tabela 2 Imposto de Carbono por Tonelada de Alumina com Base na Média das Emissões de Carbono da Indústria Australiana

	2013	2014	2015	2016	2017
CO ₂ eq por tonelada de Al	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Taxa de Assistência	94,5%	93,2%	91,9%	90,6%	90,0%
Ton de Carbono isentas de taxaço	0,69	0,68	0,67	0,66	0,66
Quantidade de carbono a ser paga	0,04	0,05	0,06	0,07	0,07
Preço de Carbono por tonelada(\$/t)	23,2	22,9	22,9	23,5	24,1
Custo Médio por tonelada (\$/t)	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8

Fonte: Citi, 2012 exatamente em baixo do canto inferior esquerdo da Tabela 2.

4. Dinâmica Tecnológica da Indústria do Alumínio

Em termos mundiais, as tecnologias das várias etapas do processo de produção do alumínio são amplamente difundidas e incorporadas aos equipamentos. As empresas líderes no mercado internacional são as responsáveis pelas inovações tecnológicas, desenvolvendo pesquisas e determinando o ritmo de sua difusão entre as empresas do setor.

Na perspectiva das inovações tecnológicas de médio e longo prazo que produzirão impactos nos processos de produção utilizados na indústria de alumínio, o quadro 1 apresenta as futuras trajetórias tecnológicas que podem ser identificadas no momento.

Segundo o IEA (2010), os desenvolvimentos tecnológicos futuros podem também oferecer oportunidades para redução de emissões diretas de CO₂ nos processos de fundição de alumínio, embora os dois desenvolvimentos tecnológicos mais promissores – ânodos inertes e redução carbotérmica –, que têm sido objeto de pesquisa por muitos anos, não tenham atingido ainda escala comercial.

Quadro 1 Opções Tecnológicas no Médio e Longo Prazo para a Indústria Mundial de Alumínio

Tecnologia	Necessidades de P&D	Demonstração	Etapas de Implantação
Cátodo em Solução Aquosa		Pronto para demonstração	Início: 2015 e Comercialização Total: 2020
Ânodos Inertes	Testes Extensivos em laboratório e em escala	Pronto para ser demonstrada a nível de planta	Início: 2015-2020 e Comercialização Total: 2030
Redução Carbotérmica	Ampla pesquisa em andamento	2020 - 2025	Início: 2030-2040 e Comercialização Total: 2050
Redução Caulínica	Pesquisa em andamento	2025 - 2030	Início: 2035-2040

Fonte: IEA (2010) exatamente em baixo do canto inferior esquerdo do Quadro 1.

Uma síntese das perspectivas tecnológicas do setor de alumínio nos horizontes temporais de 2022 e 2050 pode ser encontrada na tabela 3, que apresenta inclusive os prováveis impactos da adoção de tais tecnologias sobre a economia no consumo de energia e na emissão de CO₂eq.

Em primeiro lugar, a tecnologia do *ânodo inerte* é a inovação tecnológica da indústria do alumínio de maior viabilidade de implantação comercial já no início de 2020, pois já se encontra na fase de protótipo/piloto e possibilitaria uma redução bastante significativa de 41% nas emissões de CO₂, embora os efeitos em termos de economia de energia sejam pouco expressivos (apenas 5%).

As demais inovações tecnológicas da indústria do alumínio (cátodo em solução aquosa, redução carbotérmica e redução caulínica) ainda se encontram em fase de pesquisa e testes em laboratórios e não devem ser implantadas antes de 2030. De qualquer forma, se tais tecnologias vierem a ser viabilizadas e implantadas, possibilitariam significativas economias de energia, em torno de 25% (casos da redução carbotérmica e redução caulínica) e economia de emissões de CO₂, no caso do cátodo em solução aquosa.

Tabela 3 Consumo de Energia e Emissão de CO₂ por Tecnologia na Produção de Alumínio Primário

Energia: kWh/kg Al Emissões de CO₂: kgCO₂/kg Al	Rota Tecnológica Prebaked (Hall- Héroult)	Cátodo em Solução Aquosa	Ânodo Inerte	Redução Carbotérmica	Redução Caulínica
Energia (Matérias Primas)	8,2	8,2	8,36	7,59	8,91
Energia da Reação	14,43	11,38	13,1	9,64	7,91
TOTAL	22,63	19,58	21,46	17,23	16,82
Economia de Energia		13%	5%	24%	26%
Emissões	10,61	7,89	6,29	9,08	9,14
Economia nas Emissões		26%	41%	14%	14%

Fonte: Elaboração própria a partir de U.S. ENERGY (2007) exatamente em baixo do canto inferior esquerdo da Tabela 3.

As perspectivas tecnológicas para a indústria de alumínio primário no Brasil não são alvissareiras, pois as empresas produtoras são multinacionais com laboratórios de pesquisa concentrados no exterior, o que dificulta a participação no desenvolvimento local de tecnologia, mas tende a favorecer a difusão de inovações. Além disso, as plantas locais possuem mais de vinte anos, dificultando a adoção das inovações supramencionadas.

Apesar disso, as empresas produtoras de alumínio no Brasil podem se beneficiar, em algum grau, da presença local das principais empresas multinacionais (exceto Rusal) que estão avançadas no desenvolvimento da tecnologia do ânodo inerte, mais especificamente na fase de protótipo/piloto. Se tal tecnologia for de fato implementada no médio prazo (2020) em outros países, pode ser rapidamente difundida e se tornar acessível às empresas do norte do país, que já adotam tecnologias *prebaked* com ânodo pré-cozido, requerendo apenas o redesenho da célula. No mesmo sentido, as entrevistas sugeriram a possibilidade de adoção de inovações incrementais de controle e diminuição do efeito anódico ou mesmo células eletrolíticas de alta amperagem (acima de 500 kA), indicando a presença de certas competências gerenciais e técnicas nas empresas produtores de alumínio no Brasil.

As entrevistas também indicaram a presença de um esforço por parte das empresas no desenvolvimento de práticas operacionais e lógicas para supressão de efeitos anódicos, além de implantação de diversas iniciativas para aumentar a eficiência no uso de energia. Uma das empresas ressaltou que busca novas reservas de bauxita e o melhor dimensionamento das reservas atuais, visando à diminuição dos graus de impureza e cortes em termos de teores de bauxita mais baixos. Para tanto, utiliza flotação e separação magnética, entre outras técnicas. Na alumina, seus esforços de pesquisa (P&D) visam a melhorias de trocas térmicas. No alumínio, utiliza-se material refratário, cubas mais eficientes e diminuição dos resíduos nas cubas. Uma outra empresa afirmou que possui um departamento de P&D com uma área específica de eficiência energética e meio ambiente, onde projetos de reciclagem e redução de emissões são desenvolvidos permanentemente.

5. Mudanças Climáticas e Mudança Tecnológica na Indústria do Alumínio

No estudo *Scenarios & Strategies to 2050* da Agência Internacional de Energia, doravante IEA (2010), o uso futuro da energia e as emissões de CO₂ na produção de alumínio primário foram analisados através da projeção de dois cenários, *Baseline* e *Blue*, cada um subdividido nos casos de alta e baixa demanda de alumínio no mercado mundial⁵.

Os cenários *Baseline* refletem a evolução que se espera com base no consumo atual de energia e nas políticas climáticas. Os cenários *Blue* examinam as implicações de um objetivo político global de reduzir pela metade, em relação ao nível de 2006, o gasto com energia e emissões de CO₂ em 2050, o que exigiria um incentivo de US\$ 200/tCO₂.

A demanda por alumínio deve crescer substancialmente até 2050 por causa do aumento do consumo em uma ampla gama de setores, especialmente transporte, construção civil e máquinas e equipamentos. A média mundial da demanda per capita quase duplica no cenário *Baseline* de baixa demanda, e cresce mais de 2,5 vezes no cenário de alta demanda. Dado o crescimento populacional, isso significa que a demanda total cresce 2,7 vezes no caso de baixa demanda e 3,7 vezes no de alta demanda. Em termos absolutos, a demanda experimentaria rápido crescimento nas economias da Ásia, África e América do Sul.

Para atender a essa crescente demanda, ocorreria até 2050 uma expansão da produção de alumínio primário no mundo em relação a 2010, discriminado posteriormente segundo as principais regiões produtoras e os cenários de baixa e alta demanda.

A oferta de alumínio reciclado também aumentaria fortemente. Nos cenários *Baseline* a produção de alumínio reciclado sobe para 47 Mt em 2050, no caso de baixa demanda, e 63 Mt, no caso de alta demanda, continuando a representar cerca de um terço da produção total de alumínio. Nos dois cenários *Blue*, a produção total de alumínio é assumida como sendo a mesma em relação aos cenários *Baseline*, mas a produção de alumínio reciclado aumenta para 55 Mt e 76 Mt em 2050 sob baixa e alta demanda, respectivamente, representando cerca de 40% da produção total de alumínio.

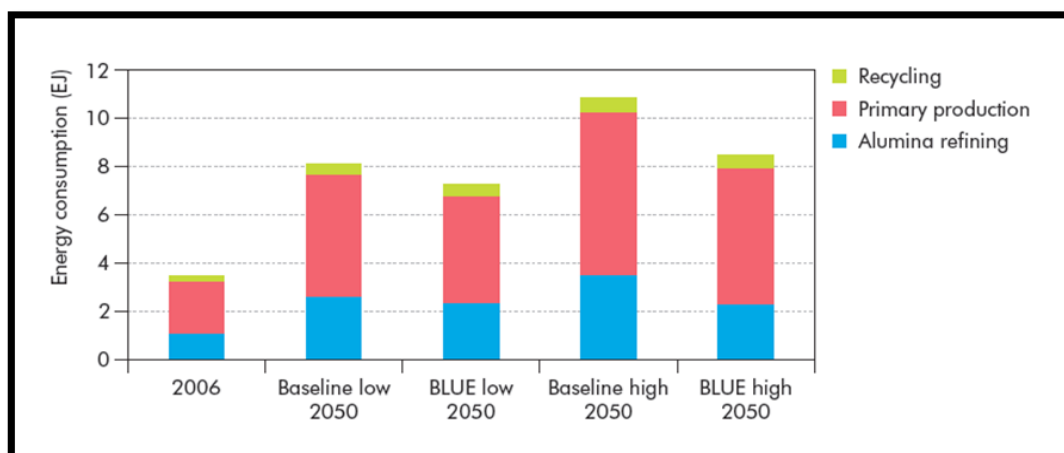
Como resultado deste aumento de produção, o uso final de energia cresce fortemente nos cenários *Baseline*, atingindo 8,1 EJ em 2050, no caso de baixa demanda, e 10,8 EJ, no caso de alta demanda. Ela cresce mais lentamente do que a produção de alumínio devido a melhorias de eficiência na fundição e refino, projetando-se a manutenção das taxas de melhoria dos últimos anos. Isto significa que em 2050 a média global de utilização de energia na refino diminuiria para 14 GJ/t de alumina e nos *smelters*, para 13 MWh/t de alumínio. A distribuição global de uso de energia refletirá a mudança do padrão de produção de alumínio.

Nos cenários *Blue*, o uso de energia em 2050 é de 11% a 22% menor do que no cenário *Baseline*. No caso de baixa demanda, estes ganhos de eficiência energética são em grande parte conseguidos através de desenvolvimentos nas tecnologias existentes, juntamente com alguma implantação de novas tecnologias. No cenário de alta demanda, ocorre a introdução generalizada de *wetted drai-*

⁵ Esta parte do trabalho se baseia fartamente em IEA (2010).

ned cathodes e ânodos inertes a partir de 2015 e de tecnologias de redução carbotérmica a partir de 2030. Assume-se que a média global de intensidade em energia elétrica nos *smelters* será em 2050 de 10,5 MWh/t de alumínio (Gráfico 3).

Gráfico 3 Consumo Final de Energia por Cenário, 2006 e 2050



Fonte: IEA, 2010 exatamente em baixo do canto inferior esquerdo do Gráfico 3.

A tabela 4 apresenta o consumo final de energia por fonte na produção de alumina e de alumínio primário em 2010 e 2050 (nos cenários *Baseline* e *Blue* de Alta Demanda-AD). Pode-se observar que em todas as simulações ocorrerá aumento no consumo de energia nas próximas décadas, embora o cenário *Blue* apresente um crescimento menor do consumo total de energia em relação ao cenário *Baseline*. De outra parte, deve ser ressaltado que, em qualquer cenário, no longo prazo, a eletricidade será a principal fonte de energia na produção de alumina e alumínio primário no mundo.

Tabela 4 Consumo Final de Energia na Produção de Alumina e Alumínio (Mtoe)

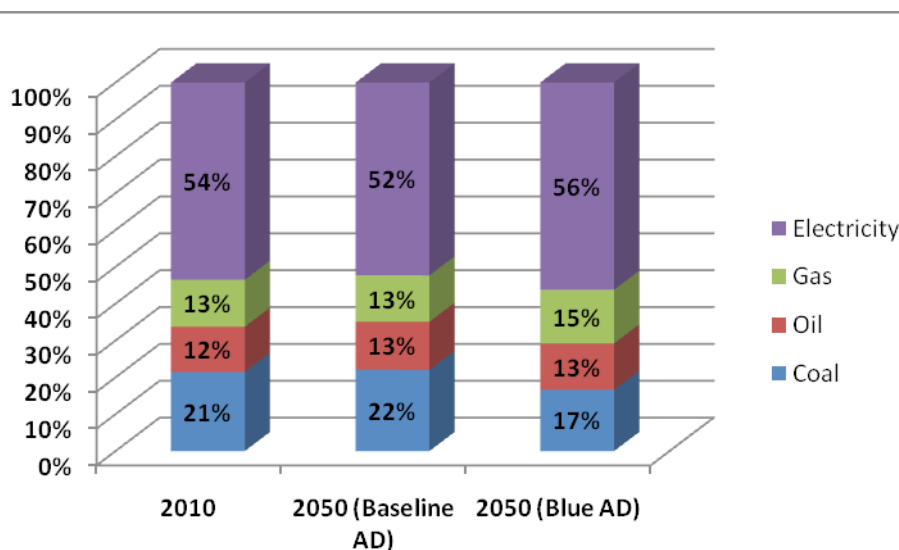
	2010	2050 (Baseline AD)	2050 (Blue AD)
Carvão	21,59	62,27	34,13
Petróleo	12,29	36,93	25,83
Gás	12,82	35,65	29,88
Eletricidade	53,76	147,93	115,32
Total	100,46	282,78	205,16

Fonte: IEA (2012). Tabulação especial.

O gráfico 4 complementa o gráfico anterior e aponta que no cenário *Baseline* 2050 de alta demanda, em termos percentuais, ocorrerá uma pequena redução do uso de energia elétrica e um

ligeiro incremento do uso do carvão enquanto fonte energética utilizada na produção de alumina e alumínio primário. No caso do cenário *Blue* ocorre exatamente o contrário, com ampliação da participação de energia hidroelétrica e diminuição da participação do carvão enquanto fonte energética utilizada na produção de alumina e alumínio primário, ou seja, ocorreria uma ampliação da utilização de energia proveniente de fontes limpas sem emissão de CO₂.

Gráfico 4 Consumo Final de Energia (em %) na Produção de Alumina e Alumínio Primário (Mtoe)



Fonte: IEA (2012). Tabulação especial, exatamente em baixo do canto inferior esquerdo do Gráfico 4.

Quanto às emissões, nos cenários *Baseline*, o total de emissões diretas e indiretas de CO₂ cresce a partir de cerca de 0,4 Gt em 2006 para entre 1,0 Gt e 1,4 Gt em 2050. O aumento das emissões é menor do que o aumento na utilização final de energia, o que reflete uma menor intensidade de emissões de CO₂ no mix de energia, devido à troca de combustível. Nos cenários *Blue*, as emissões de CO₂ são 70% (baixa demanda) e 77% (alta demanda) menores, situando-se em 0,3 Gt em 2050, cerca de 20% abaixo dos níveis de 2006 (Gráfico 5).

A maioria das reduções de emissões de CO₂ adviria do uso de eletricidade de baixo carbono, em vez de medidas diretas para reduzir as emissões da indústria de alumínio em si, onde são maiores os custos de redução de CO₂. No cenário de baixa demanda *Blue*, mais de 80% das reduções de emissões envolvem o uso da eletricidade, enquanto no cenário de alta demanda *Blue* a cifra equivalente é superior a 70%. Isto sugere que uma parte importante da estratégia de redução das emissões deste setor pode estar na localização do processo de fundição perto de fontes de energia limpas em termos de emissão de CO₂, como hidráulica ou centrais nucleares. Assim, as maiores oportunidades de economia de emissão de CO₂ na indústria de alumínio dependem da descarbonização da geração de eletricidade (Gráfico 5).

Se o suprimento de eletricidade obtiver êxito na anulação da emissão de carbono, todas as economias adicionais de CO₂ se originarão apenas de emissões diretas do processo produtivo⁶. As reduções de emissões diretas são, portanto, significativamente maiores no cenário *Blue* de alta demanda do que no de baixa demanda. Neste último caso, a redução de emissões diretas é conseguida basicamente através da reciclagem e de pequenos ganhos de eficiência, tanto em refino quanto em fundição. No cenário *Blue* de alta demanda, a reciclagem contribui muito menos, com a maior parte da redução vindo de melhoria de eficiência energética e de emissões no processo (Gráfico 5).

Gráfico 5 Emissão de CO₂ por Cenário na Produção de Alumínio, 2006 e 2050

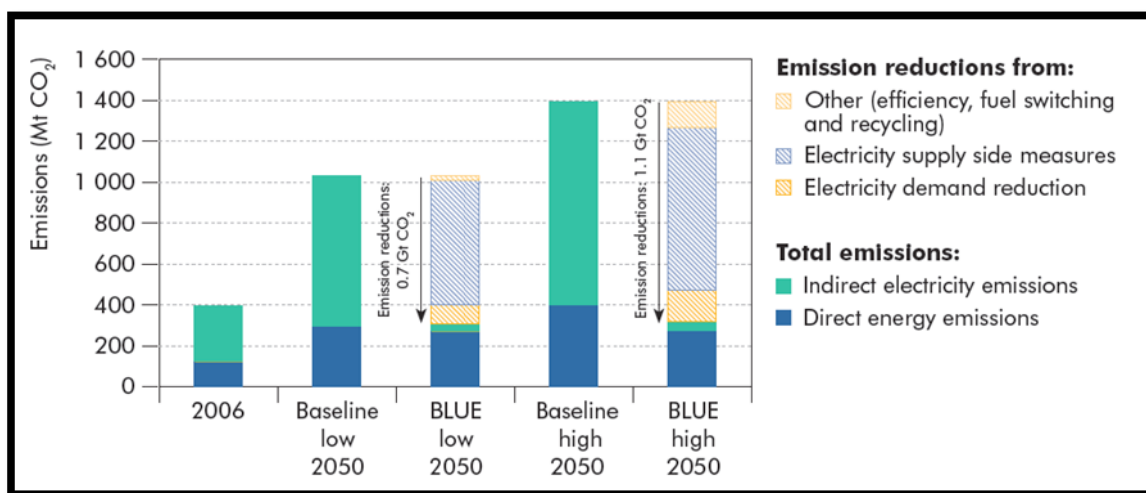
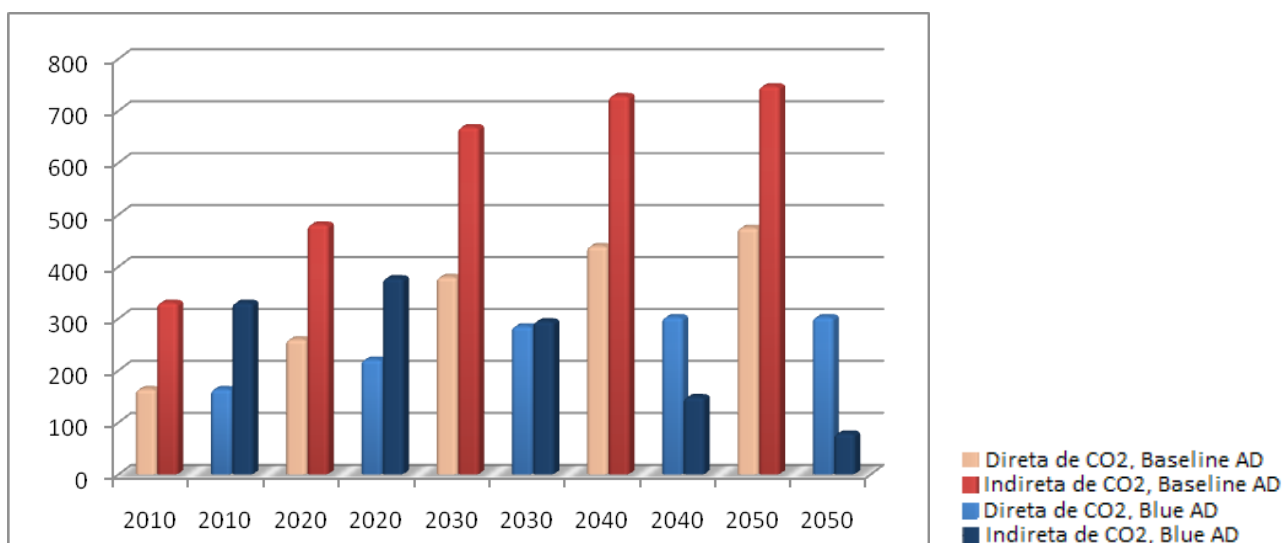


Gráfico 6 Emissões Diretas e Indiretas de CO₂ da Produção de Alumina e Alumínio Primário (Mt CO₂)



⁶ No caso do alumínio, de acordo com IEA (2010, p. 178), as *tecnologias de captura e armazenamento de carbono* estão em uma fase ainda muito inicial e muito pouco tem sido publicado sobre o assunto.

O gráfico 6 apresenta as emissões mundiais diretas e indiretas de CO₂ na produção de alumina e alumínio primário nos cenários *baseline* e *blue* de alta demanda. Como pode ser observado, as emissões indiretas de CO₂ são persistentemente maiores que as emissões diretas em qualquer cenário até 2020. A partir de 2030 até 2050, as emissões indiretas de CO₂ são superiores às emissões diretas apenas no cenário *baseline*. No cenário *blue*, entre 2030 e 2050, pelo contrário, as emissões diretas de CO₂ se tornam superiores às emissões indiretas.

A tabela 5 apresenta o total de emissões diretas e indiretas de CO₂ na produção de alumínio primário desagregado por regiões, para os dois cenários de demanda, tanto em Mt quanto em porcentagem. De forma geral, 81% das reduções de emissão de CO₂ no cenário *blue* são atribuídas à redução das emissões indiretas, ou seja, a descarbonização da eletricidade.

Como pode ser observado, os países asiáticos em desenvolvimento (China e Índia, entre outros) constituem não só a região que já teve a maior participação nas emissões de CO₂ na produção de alumínio em 2010 (57%), mas continuarão a ter uma participação crescente em tais emissões pelo menos até 2030. A partir daí, tal região estabilizará e diminuirá o nível de emissões, principalmente no cenário *blue*, não obstante continue sendo, em qualquer cenário, a maior responsável absoluta (entre 59% a 68%) pelas emissões de CO₂ na produção de alumínio.

De outro lado, tendo como referência o ano de 2010, países como Japão e Coreia do Sul, Estados Unidos, países europeus, economias em transição e países africanos estabilizarão e, na maior parte das vezes, diminuirão seus níveis de emissões de CO₂ no longo prazo em qualquer cenário até o ano de 2050. Apenas os países do Oriente Médio e América Latina aumentarão seus níveis de emissões de CO₂ entre 2010 e 2050 em qualquer um dos dois cenários avaliados.

Deve ser destacado que na América Latina apenas Brasil, Argentina e Venezuela são países com capacidade de produção instalada de alumínio. Mais ainda, o Brasil é responsável por aproximadamente dois terços da produção latino-americana de alumínio primário e também é responsável pela maior parte das emissões de CO₂. Adicionalmente, a diminuição das emissões de CO₂ por parte das empresas produtoras de alumínio instaladas no Brasil apresenta uma grande rigidez e limitação no que se refere às emissões indiretas porque a sua fonte de energia sempre foi e continua sendo proveniente de fonte hidroelétrica, restando apenas o recurso à busca de eficiência nos processos de refino e a ampliação da reciclagem para além do setor de embalagem. O gráfico 7 mostra que nos cenários *Baseline*, quase metade de todas as emissões de CO₂ em 2050 vêm da China. Isso reflete os altos níveis de produção, combinados com baixo nível de eficiência na produção de alumina e uma elevada proporção de uso de carvão, tanto diretamente na indústria do alumínio, quanto indiretamente na geração de eletricidade. As emissões da Índia também crescem fortemente, assim como em outras partes da Ásia em desenvolvimento. Nos cenários *Blue*, todas as regiões apresentam grandes reduções nas emissões. Para China e Índia seriam necessárias maiores reduções de CO₂ em 2050. Isso reflete uma redução na utilização do carvão para geração de energia, combinada com maiores eficiências médias na indústria do alumínio e muito provavelmente *captura e sequestro de carbono* (CCS) na geração de energia. As menores reduções de emissões em 2050 são na América

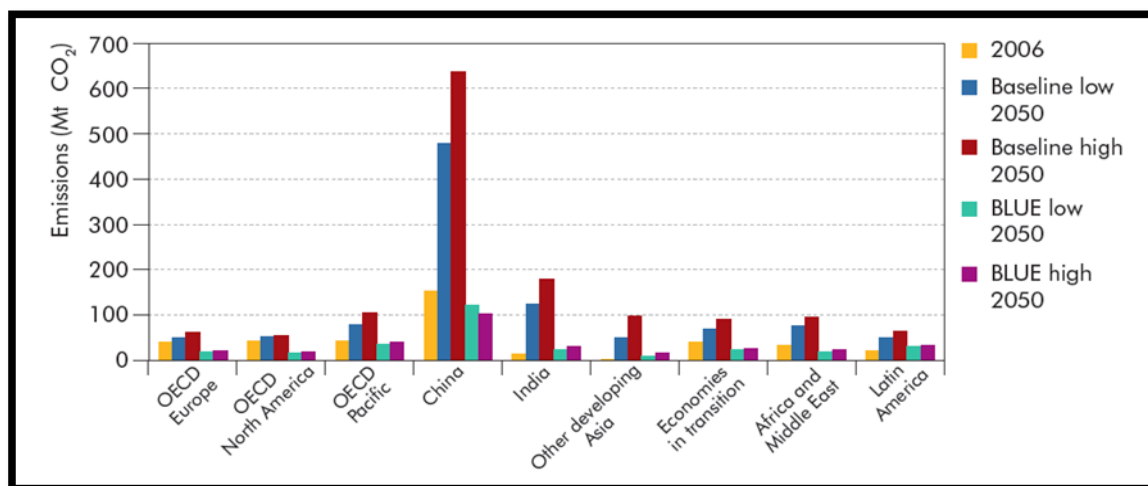
Latina, pois o setor elétrico já tem uma elevada quota de emissão zero de carbono. Assim, há menos espaço para redução da intensidade das emissões de carbono em função da fonte hidroelétrica de energia utilizada na produção de alumínio na região.

Tabela 5 Total de Emissões Diretas e Indiretas de CO₂ na Produção de Alumínio Primário (Mt CO₂ eq %)

Região	2010	2030		2050		2010	2030		2050	
		Baseline	Blue	Baseline	Blue		Baseline	Blue	Baseline	Blue
Ásia em desenvolvimento	280,0	733,3	383,1	834,5	223,1	57%	70%	66%	68%	59%
Oriente Médio	30,3	80,3	48,4	98,9	40,7	6%	8%	8%	8%	11%
Econ. em transição	43,5	58,1	36,6	70,2	28,5	9%	6%	6%	6%	7%
OCDE Pacífico (+ Israel)	45,3	48,0	27,4	56,4	18,9	9%	5%	5%	5%	5%
América Latina	16,5	30,3	22,2	46,6	24,8	3%	3%	4%	4%	7%
OCDE América	34,1	44,8	27,8	46,4	17,1	7%	4%	5%	4%	4%
OCDE Europa	25,4	28,8	22,1	36,3	20,4	5%	3%	4%	3%	5%
África	19,1	24,5	11,6	32,3	7,4	4%	2%	2%	3%	2%
Mundo	494,1	1.048,1	579,2	1.221,6	380,8	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: IEA (2012). Tabulação especial.

Gráfico 7 Emissão de CO₂ por Cenário e por Região, 2006 e 2050



Fonte: IEA (2010) exatamente em baixo do canto inferior esquerdo do Gráfico 7.

É provável que a implementação de novas tecnologias seja rentável se realizada como parte do ciclo natural de substituição da planta. Mas dada a longa vida das plantas de refinaria e de fundição, este ciclo não será suficiente para atingir as reduções de CO₂ que são necessárias nos cenários *Blue*. A estimativa de custos das novas tecnologias, que serão necessárias para atingir os cenários *Blue*, é bastante incerta, uma vez que algumas delas ainda têm que ser postas em operação em escala comercial.

A partir da análise de prováveis custos das tecnologias e do volume de produção em cada cenário, os custos totais de investimento ao longo do período de 2006 a 2050, segundo os cenários *Baseline*, seriam de US\$ 660 bilhões (baixa demanda) e US\$ 910 bilhões (alta demanda). Para os cenários *Blue*, seriam requeridos investimentos adicionais de US\$ 60 bilhões (baixa demanda) e US\$ 90 bilhões (alta demanda), cerca de 10% a mais que no *Baseline*. A tabela 6 procura sintetizar as principais conclusões no que se refere aos impactos ambientais na indústria de alumínio.

Tabela 6 Síntese do Uso de Energia e Emissões de CO₂ na Produção de Alumínio em 2050 em relação a 2006

Parâmetros	Baseline BD	Baseline AD	Blue BD	Blue AD
Cenários	Evolução que se espera com a energia implementada e com as políticas climáticas atuais.		Objetivo político de reduzir pela metade o gasto de energia e as emissões.	
Demanda	2050: Aumenta demanda em setores que utilizam alumínio e aumento da população.			
	Cresce 2.7x	Cresce 3.7x	Cresce 2.7x	Cresce 3.7x
Oferta	2050: Aumenta a produção			
	91 milhões	123 milhões	91 milhões	123 milhões
Reciclagem	47 Mt	63 Mt	55 Mt	76 Mt
Energia 2006 = 3.5 EJ	8.1 EJ	10.8 EJ	7.2 EJ	8.4 EJ
	O uso de energia cresce menos que a produção (melhorias de eficiência de fundição e refino)		Desenvolvimento de tecnologias existentes + novas tecn.	wetted drained cathodes + ânodos inertes + red carbot.
Refino 2006 = 16 GJ/t	14 GJ/t			
Fundição 2006 = 15.2 MWh/t	13 MWh/t		10.5 MWh/t	
Emissão GEE 2006 = 0.4 Gt	1 Gt	1.4 Gt	0.3 Gt	0.3 Gt
	Aumento das emissões é menor do que o aumento final de energia		70% e 80% das reduções são do uso de eletricidade de baixo carbono. Emissões diretas: reciclagem, e aumento da eficiência de refino e fundição.	
Emissão de CO ₂ /t de alumínio	10,98	11,38	3,29	2,43
Investimentos	660 bi	910 bi	720 bi	1000 bi

Fonte: IEA (2010).

6. Políticas Industriais, Tecnológicas e Ambientais para Adaptação às Mudanças Climáticas

Os principais objetivos de médio prazo desejáveis para o setor de alumínio no Brasil deveriam se concentrar no aproveitamento das vantagens competitivas do alumínio brasileiro, principalmente a qualidade da bauxita, a capacidade produtiva pré-existente de alumina e a existência de uma matriz energética de baixíssima emissão de CO₂eq, fatores inerentes e específicos à dinâmica competitiva da indústria brasileira de alumínio, essenciais em um ambiente internacional de baixo carbono. Isso poderia viabilizar uma reinserção exportadora da indústria de alumínio no Brasil.

Uma reconversão da atual orientação exportadora, concentrada em bauxita e alumina, seria um importante objetivo de médio prazo. Conforme visto acima, nada menos que 68% da alumina produzida no Brasil destina-se ao mercado externo, refletindo a ausência de investimentos em expansão da capacidade produtiva de alumínio primário. Cabe reafirmar que se toda a alumina exportada pelo País fosse eventualmente transformada em alumínio, a produção doméstica deste produto seria o triplo da atual.

De outra parte, os objetivos de longo prazo para o pleno desenvolvimento do segmento de alumínio no Brasil com adoção de inovações tecnológicas mais significativas e aceleração de investimentos e produção não apenas em bauxita e alumina, mas também na produção de alumínio primário dependem fortemente de uma variável estratégica: oferta elástica de energia a preços competitivos. Somente assim os principais *players* do segmento de alumínio incluiriam em seus planos de investimentos a ampliação da produção de alumínio ao invés de se concentrarem em bauxita e alumina. Nessa medida, o anúncio pelo governo brasileiro da Medida Provisória nº 579 em 11 de setembro de 2012 de barateamento das tarifas de eletricidade para uso industrial é convergente com essa possibilidade e se constitui numa importante medida de política pública na direção de maiores níveis de produção e de investimentos da indústria local de alumínio.

Outrossim, mesmo diante da persistência dos diferenciais positivos das tarifas de energia elétrica entre o Brasil e o mundo, pois conforme visto no final do primeiro item, os preços da energia elétrica no Brasil para a produção de alumínio situam-se em patamares intermediários em termos mundiais, é possível demonstrar a manutenção da posição competitiva da produção de alumínio no Brasil, em função dos seus baixos níveis de emissão de CO₂eq, bastando para isso que ocorra uma certa difusão dos mecanismos internacionais de precificação das emissões de carbono. Senão vejamos.

Supondo que o Brasil implante capacidade adicional de fundição, a questão fundamental é se a desvantagem no preço de mercado de energia “nova” requerida para implantar tal capacidade adicional seria compensada pelas vantagens em carbono caso as emissões fossem precificadas.

Uma maneira de inferir isso seria calcular qual é o nível de um imposto sobre o carbono que anularia as desvantagens do custo de energia. Supondo que (i) o consumo de energia seja de cerca de 15,2 MWh/t (conforme visto acima); (ii) o diferencial de preço de energia varie em quatro níveis distintos em US\$ 5 MWh, US\$ 10 MWh, US\$ 15 MWh e US\$ 20 MWh; e (iii) o diferencial de emissões entre o Brasil e o mundo seja de 5 t de CO₂eq / t de alumínio (também conforme visto anteriormen-

te), obteríamos as taxações incidentes sobre as emissões de carbono pela indústria do alumínio necessárias à manutenção da posição competitiva do setor no Brasil: US\$ 17,27, US\$ 34,55, US\$ 51,82 e US\$ 69,09 por tonelada de CO₂eq.

Vale dizer, novos investimentos em ampliação da oferta de alumínio no Brasil, mesmo com diferenciais crescentes no preço da energia, poderiam se beneficiar de uma maior precificação das emissões de carbono em um cenário mais restritivo e de maior regulação internacional, garantindo a manutenção da posição competitiva Brasil no setor de alumínio. Portanto, outra importante medida de política pública que deriva desse capítulo e pode ser adotada pelo governo brasileiro, em consonância com as recentes legislações internacionais restritivas que atingem a produção de alumínio (o *Emissions Trading System* europeu e o *Carbon Pricing Scheme* da Austrália), deve ser a defesa nas organizações e negociações internacionais dos mecanismos de precificação das emissões de CO₂eq nas indústrias eletrointensivas como o alumínio. É importante ressaltar também que nas duas recentes experiências internacionais que incidem sobre a indústria de alumínio (*Emissions Trading System* europeu e o *Carbon Pricing Scheme* da Austrália) estão previstos mecanismos de compensação e benefícios, ainda que temporários, como forma de mitigar os custos das medidas sobre o setor de alumínio.

Aliás, nas entrevistas, as empresas do setor de alumínio no Brasil sugeriram também, como medidas de políticas públicas, a prioridade à diminuição da emissão específica de CO₂ (e não o montante agregado de CO₂), medida já prevista no Plano Indústria, coordenado pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), bem como a adoção de eventuais sobretaxas a produtos importados com maior “pegada de carbono”.

Uma importante política pública ambiental para o setor de alumínio no Brasil refere-se à ampliação das atividades de reciclagem, para além do segmento de latas para bebidas. Dadas as enormes e já referidas vantagens energéticas e ambientais da reciclagem no caso do alumínio, justifica-se amplamente a proposição de *tratamento diferenciado para matérias-primas recicladas*, medida também previsto no supramencionado Plano Indústria do MDIC e que pode cumprir um papel central na redução de emissões de GEE.

Finalmente, a elaboração de uma política ambiental que reduza os prazos de licenças ambientais, tornando-as compatíveis com os prazos praticados no mercado internacional e a formulação de uma política tarifária compatível com a competitividade são variáveis estruturantes do investimento e das posições competitivas das empresas da indústria de alumínio no Brasil. Deve ser destacado também que a presença de uma forte *incerteza* acerca de uma eventual elevação dos *royalties para substâncias minerais* presente no novo Código Mineral tem sido um fator inibidor dos investimentos na indústria do alumínio.

No que se refere aos esforços tecnológicos das empresas produtoras de alumínio no Brasil, a despeito das instalações e equipamentos atuais utilizados na produção de alumina e de alumínio no Brasil estarem relativamente atualizados, e das inovações incrementais existentes, o mapeamento e as diversas fontes verificadas (entrevistas, grupos de pesquisa, etc.) indicaram uma ausência de

desenvolvimento de inovações e novos processos em consonância com os esforços das empresas líderes internacionais. Na mesma direção, constatou-se uma interação e cooperação muito fraca entre as empresas produtoras de alumínio no Brasil e as Universidades e centros de pesquisa, também dificultando e limitando o aprendizado e desenvolvimento de inovações tecnológicas no país.

Nas entrevistas, as empresas também manifestaram preocupação quanto ao baixo nível de inovação da indústria local, sugerindo a criação de uma política pública de estímulos e incentivos fiscais para investimentos em P&D e de aproximação das empresas com Universidades e centros de pesquisa no país, o que ajudaria na absorção efetiva de inovações tecnológicas mais significativas, como o ânodo inerte, entre outras, as quais permitiriam reduções adicionais de emissões de CO₂eq.

Referências Bibliográficas

- ABAL (2010). Associação Brasileira da Indústria do Alumínio. *Relatório de Sustentabilidade da Indústria Brasileira de Alumínio*. São Paulo.
- BAYLISS, C. (2012). *The Aluminum Story*. Apresentação realizada no V Congresso Internacional do Alumínio, 24-26 de Abril de 2012, São Paulo.
- BUNKER, S. G. CICCANTELL, P. (1994). The evolution of the world aluminium industry. In: BARHAM, B., BUNKER, S. and O'HEARN, D. (eds). *States, Firms and raw materials*. The world economy and ecology of aluminum. Madison, WI: University of Wisconsin Press, 1994.
- CITI (2012) Citi Research Commodities. Commodities Strategy (Citi). Global. 27 July 2012, 20 pages.
- CNI (2012). Política Nacional Sobre Mudança do Clima: Estratégia da Indústria Brasileira. Sumário Executivo, Brasília.
- CRU (2010). *The Strategic Impact of Changing Energy Markets for the Aluminium Industry*. TMS 2010, Seattle, EUA.
- CRU (2011). *Trends in the Costs of Production throughout the Aluminium Value Chain*. Trabalho apresentado na 15th ARABAL Conference, realizada em Omã entre 13 e 16 de novembro de 2011.
- IAI (2009). *Global Aluminium Recycling: A Cornerstone of Sustainable Development*. Disponível em <http://www.world-aluminium.org/publications>
- IEA (2010). *Scenarios e Strategies 2050*. Paris, França. Disponível em www.iea.org. Consulta realizada em 20 de janeiro de 2012.
- IEA (2012). Tabulação especial, a partir de consulta realizada em julho de 2012 em www.iea.org.
- MACQUARIE (2011). *China' role in global aluminium markets – drivers over the next 10 years*. Londo, UK, Novembro de 2011.
- MCT (2006). Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência: Emissões de gases de efeito estufa nos Processos industriais e por uso de Solventes, 2006.
- PINHO, I. P. R. (2010). Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima, 2010. Relatório de Referência "Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais - Produção de Metais – Alumínio - ABAL". Brasília: MCT, 2010.

REINAUD, J. (2008). Issues Behind Competitiveness and Carbon Leakage. Focus on Heavy Industry. IEA Information Paper. International Energy Agency. OECD/IEA, Paris, France.

U.S. Energy (2007). *U. S. Energy Requirements for Aluminum Production*. Disponível https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/aluminum.html

Siderurgia

Germano Mendes De Paula

Introdução

Este capítulo apresenta as principais conclusões da análise da indústria siderúrgica no âmbito do projeto “Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas”. Considerando-se o objetivo de se identificar as tendências de trajetória tecnológica e a posição brasileira em setores intensivos em carbono, definiu-se a siderurgia como composta de duas estruturas produtivas: a) usinas siderúrgicas (integradas e semi-integradas); b) produtores independentes de ferro-gusa (“guseiros”).

Do ponto de vista metodológico, fez-se uso de três fontes principais de informações: a) fontes bibliográficas; b) questionário respondido por profissionais que são afiliados à divisão de meio ambiente da Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM); c) entrevistas^{1*}. Os questionários e as entrevistas foram essenciais para compreender as perspectivas das empresas e instituições acerca do tema, mas em função do termo de confidencialidade, nenhuma resposta de qualquer respondente será identificada ao longo deste capítulo. Ademais, os conceitos formulados, opiniões e críticas encontradas no presente texto, salvo as manifestadas pelos autores citados nominalmente, são de inteira responsabilidade do autor.

Este artigo é dividido em quatro seções. A primeira aborda os fatores determinantes da competitividade da siderurgia brasileira. A segunda é dedicada à análise das questões ambientais e dos impactos das medidas regulatórias relacionadas às mudanças do clima. A terceira seção examina a dinâmica tecnológica na siderurgia mundial e brasileira, ao passo que a quarta apresenta as propostas de política, além de sintetizar as principais conclusões.

1. Determinantes da competitividade da siderurgia brasileira

Pelo menos ao longo das últimas décadas, vários estudos setoriais – inclusive os da lavra deste autor, tais como DE PAULA (1993, 2002, 2008) – mostraram que a siderurgia brasileira era competitiva em termos internacionais. Tal avaliação era assentada no fato de que as vantagens competitivas da indústria suplantavam as desvantagens. Dentre as principais vantagens, destacavam-se: a) minério de ferro de ótima qualidade, localizado próximo das principais usinas siderúrgicas; b) parque industrial que, além de relativamente novo, recebeu muitos investimentos para a modernização e o

1 O autor agradece à ABM, nas pessoas do Sr. Horacido Leal Barbosa Filho e Sra. Raquel Maria Sturlini, por ter cedido o banco de endereços eletrônicos acima mencionado. Também agradece a valiosa contribuição dos profissionais que responderam ao questionário e as seguintes empresas/organizações e profissionais que foram entrevistados: **ArcelorMittal Longos** (José Otávio Franco, Luciana Corrêa Magalhães, Henrique Savaget Chaves Silva e Sandro de Oliveira Almada); **ArcelorMittal Tubarão** (Dr. Guilherme Correa Abreu); **Aperam** (Glautierre Paiva Gomes); **Gerdau** (Leonardo São Paulo Sambaquy); **Instituto Aço Brasil** (Marco Polo de Mello Lopes e Cristina Yuan); **Lhoist – Bélgica** (José Henrique Noldin Júnior); **RS Consultants** (Dr. Ronaldo Santos Sampaio); **Sinobras** (Clayton Labes e Junimara Chaves); **Sustentabil Soluções Ambientais** (Rubens Oliveira); **ThyssenKrupp Companhia Siderúrgica do Atlântico** (Luiz Claudio Ferreira Castro); **Universidade de São Paulo** (Prof. Dr. Cyro Takano); **Usiminas** (Pedro Luis Pereira Ribeiro); **V&M do Brasil** (Alexandre Valadares Mello e Felipe Ribeiro Curado Fleury); **Viena Siderúrgica** (Rodrigo Kaukal Valladares); **Villares Metals** (Paula Neri); **Votorantim Siderurgia** (Sérgio Alencar de Souza).

enobrecimento do *mix* de produtos no período pós-privatização; c) qualidade da gestão. Por outro lado, as desvantagens primordiais eram: a) inexistência de carvão mineral metalúrgico, agravada pelo fato de que os principais países fornecedores situam-se a longa distância do país; b) custo de capital elevado, como decorrência de altos juros reais; c) cobrança de impostos sobre investimentos.

Ao se cotejar os pontos fortes e pontos fracos, compreendia-se que a siderurgia brasileira era bastante competitiva, tanto pelos baixos custos relativos, quanto pelo desempenho exportador favorável (superávit setorial). Contudo, recentemente, alguns fatores macroeconômicos e setoriais têm diminuído a intensidade das vantagens competitivas da siderurgia brasileira, conforme destacado a seguir.

No âmbito macroeconômico, é notório o impacto da apreciação cambial do real frente a outras moedas. Entre janeiro de 2005 e junho de 2012, o real se apreciou 28% comparativamente a uma cesta representativa de moedas (conceito de taxa de câmbio real efetiva). A apreciação cambial está afetando severamente a competitividade da indústria de transformação brasileira e, obviamente, a siderurgia não passaria incólume a esta situação.

Quanto às questões setoriais, ASSUMPÇÃO *et al.* (2011) sublinham que os preços do carvão mineral metalúrgico aumentaram mais do que os de minério de ferro (que são as principais matérias primas de uma usina integrada a coque, que por sua vez é a principal rota tecnológica do setor), reforçando uma desvantagem competitiva da siderurgia brasileira. Ademais, a importância do frete em relação ao preço do minério de ferro diminuiu num passado recente, mitigando uma vantagem competitiva da siderurgia brasileira. Desta forma, a vantagem de a siderurgia brasileira se localizar próxima de jazidas de ferro de alta qualidade, embora não tenha sido eliminada, se tornou menos relevante. Ademais, algumas siderúrgicas entrevistadas mencionaram o fato de que as maiores mineradoras de ferro do país passaram a adotar o preço de equivalência de exportação China, acrescidos de PIS e COFINS, o que teria eliminado uma vantagem competitiva.

Para o caso das usinas semi-integradas (aquelas que possuem sucata como principal insumo), a energia elétrica representa um importante custo de produção. BONINI (2011) mostra que, numa amostra de 24 países, o Brasil ocupava o posto de quarta maior tarifa média industrial.

Ao se considerar conjuntamente os impactos macroeconômicos e setoriais, não chega a ser uma surpresa o fato de que o custo da produção de produtos siderúrgicos tenha se elevado mais no Brasil do que em outros países desde meados da década passada. Na verdade, os custos de produção de placas (um produto siderúrgico semiacabado, que é o principal produto siderúrgico exportado pelo país) no Brasil cresceram 7% menos do que a média mundial entre 2005 e 2008, mas esta tendência se reverteu a partir de 2009. Assim, no período 2005-2011, os custos brasileiros subiram 20% acima dos custos médios mundiais, com base em dados da WORLD STEEL DYNAMICS (2011).

O custo de construção (*capex*) de novas usinas dedicadas à exportação de placas no Brasil também se elevou consideravelmente. Em 2006, estimava-se que o custo de implantação de uma usina integrada a coque no Brasil, destinada à exportação de placas, exigiria investimentos de US\$ 700/tonelada (BAPTISTA *Fo.*, 2006). Porém, em 2011, este custo já atingia US\$ 1.800/tonelada, em comparação com US\$ 600/tonelada na China e US\$ 1.100/tonelada na Índia (CORREA & ANTUNES, 2011).

Além de reduzir suas vantagens competitivas em termos de custos, a siderurgia brasileira vem diminuindo seu superávit exportador, indicador usualmente considerado como parâmetro da competitividade revelada. De fato, a participação brasileira nas exportações mundiais cresceu de 3,1% em 2000 para 3,9% em 2003, recuando para 2,6% em 2011 (Tabela 1). Não apenas as exportações brasileiras de produtos siderúrgicos regrediram, como também as importações aumentaram. A fatia brasileira nas importações mundiais de produtos siderúrgicos cresceu de 0,3% em 2000 para 0,6% em 2008 e 0,9% em 2011.

Tabela 1 Participação brasileira nas exportações e importações mundiais de produtos siderúrgicos, 2000-2011 (percentual)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Exportações	3,1	3,1	3,7	3,9	3,3	3,4	3,0	2,3	2,1	2,6	2,3	2,6
Importações	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,4	0,6	0,7	1,6	0,9

Fonte: World Steel Association (WSA), Instituto Aço Brasil (IABr).

Mesmo admitindo que 2010 tenha sido um ponto-fora-da-curva, quando a participação brasileira nas importações globais de aço alcançou 1,6%, a verdade é que as importações brasileiras de produtos siderúrgicos mudaram de patamar. Assim, tais importações exercem grande influência na determinação dos preços domésticos e nas margens de lucros (FADEL & LOURO, 2011). Aliás, tanto em escala global, quanto em âmbito nacional, as margens de lucros das companhias siderúrgicas reduziram-se, uma vez que elas enfrentam dificuldade para repassar os aumentos de custos para os preços. Os investimentos necessários para se adequar à economia de baixo carbono terão que ser compatibilizados com as reduzidas margens de lucro do setor. Em seguida, examinam-se as questões ambientais e os impactos das medidas regulatórias relacionadas às mudanças do clima.

2. Questões ambientais e impactos das medidas regulatórias associadas às mudanças do clima

2.1 Questões ambientais

Interrogadas para este estudo sobre as principais questões ambientais enfrentadas pela indústria siderúrgica mundial, as respostas mais frequentes das dez siderúrgicas brasileiras entrevistadas foram: a) poluição atmosférica, incluindo emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE): 90%; b) resíduos: 50%; c) recursos hídricos: 40%. Esta seção, exceto quando explicitamente apontado, é em grande medida baseada no diagnóstico tecnológico elaborado por CGEE (2010).

As emissões atmosféricas continuam sendo a questão ambiental de maior impacto no processo siderúrgico. Elas estão correlacionadas diretamente com a energia e a conservação de recursos,

pois significam perda de materiais e energia que poderiam estar sendo aproveitados de outra forma. Como no processo siderúrgico ainda não é possível evitar a geração de emissões atmosféricas, essas devem ser mitigadas, de forma a minimizar seus impactos ao ambiente.

A siderurgia usa o carbono para geração de energia e, no caso de usinas integradas, como agente redutor do minério de ferro. Posteriormente uma fração deste carbono é incorporada aos produtos e a outra parte é, após a combustão, lançada na atmosfera na forma de dióxido de carbono (CO_2). O processo de produção de ferro-gusa (coqueria, sinterização e alto-forno) é a etapa que mais consome energia em usinas integradas, em grande medida devido ao uso do coque como agente redutor na transformação do minério de ferro em ferro-gusa. No processo siderúrgico as outras fontes de carbono, além do carvão/coque, podem ser óleo diesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural. As usinas semi-integradas não têm a etapa de redução e, conseqüentemente, consomem carbono basicamente para fins de ajustes metalúrgicos e energéticos (IABr, 2010b).

De acordo com CGEE (2010), a taxa de geração de CO_2 situa-se, atualmente, numa faixa de 1.510 a 1.950 kg/tonelada de aço bruto nas usinas integradas a coque e de 450 a 600 kg/tonelada de aço bruto nas usinas semi-integradas. No entanto, existe uma controvérsia acerca do limite inferior para as usinas integradas a coque, que seria exageradamente otimista possivelmente como decorrência da dedução de créditos relativos à produção de energia elétrica. De todo modo, a etapa de redução (composta de sinterização, coqueria e alto-forno) responde por 80%-85% das emissões de CO_2 nas usinas integradas a coque, o que explica a substancial diferença em relação às usinas semi-integradas.

A emissão de CO_2 representa 93% de todas as emissões de GEE da siderurgia mundial. Os demais gases – metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) – são pouco relevantes para essa indústria. Por outro lado, são importantes as emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado. Estima-se que o setor industrial e a siderurgia foram responsáveis, respectivamente, por 20% e 6,5% das emissões mundiais de CO_2 em 2010 (BASSON, 2012). Assim, a produção siderúrgica corresponderia a um terço das emissões industriais de CO_2 . Nesse contexto, as siderúrgicas vêm buscando maior eficiência e nos últimos 50 anos reduziram suas emissões de GEE por tonelada de produto em 55%. Por isso, torna-se difícil o estabelecimento de metas de redução significativa, no curto prazo, dos atuais índices de emissão, em particular em parques mais maduros, como os da Europa Ocidental. De acordo com as estimativas mais recentes da World Steel Association (WSA), a emissão manteve-se estável no patamar de 1,8 tonelada de CO_2 equivalente por tonelada de aço bruto produzida, entre 2007 e 2011 (Tabela 2). Aliás, este é um importante indicador que deveria ser monitorado anualmente.

Na experiência brasileira, a partir de 2009, todas as usinas do setor passaram a realizar o inventário das emissões de CO_2 , com base na metodologia desenvolvida pela WSA. O levantamento realizado indicou que a emissão específica de CO_2 da siderurgia brasileira regrediu de 1,7 (em 2009) para 1,55 (em 2011) tonelada de CO_2 equivalente por tonelada de aço bruto produzida. Deve-se ressaltar que mesmo considerando o fato de que a utilização de aciaria elétrica é menos intensa no país, o índice brasileiro encontra-se abaixo da média mundial.

Tabela 2 Indicadores ambientais e energéticos selecionados, Brasil e Mundo, 2007-2011

	Emissões específica de CO ₂ (tonelada CO ₂ /tonelada de aço bruto)		Consumo específico de energia (GJ/tonelada de aço bruto)		Eficiência no uso de materiais (%)	
	Mundo	Brasil	Mundo	Brasil	Mundo	Brasil
2007	1,8		20,8	19,6	97,9	
2008	1,8		20,8	17,1	98,0	
2009	1,8	1,7	20,1	18,2	97,9	98,5
2010	1,8	1,6	20,7	18,4	97,7	98,1
2011	1,8	1,6	20,7	19,4	94,4	98,1

Fonte: WSA, IABr (2012).

Uma das características marcantes da siderurgia é ser extremamente intensiva em matéria-prima, energia, capital e elementos ambientais. Em relação à energia em particular, é importante destacar que o consumo específico varia consideravelmente conforme a rota tecnológica empregada. A rota usina integrada a coque (alto-forno a coque e aciaria LD) necessita de 17-19 gigajoule (GJ) por tonelada produzida. No caso de usina semi-integrada (cujo processo se inicia no forno elétrico a arco), o padrão típico de consumo é de 8-10 GJ/tonelada. As etapas de matérias-primas e redução das usinas integradas a coque respondem por 80%-85% do total da energia consumida neste tipo de configuração produtiva. Para as usinas semi-integradas, 70%-75% da energia total são despendidas nas fases de matérias-primas e refino (aciaria).

O consumo específico de energia na siderurgia é outro indicador que deveria ser monitorado anualmente. Segundo IABr (2010a; 2012), o consumo específico de energia no Brasil oscilou entre 17,1 e 19,6 GJ/tonelada de aço bruto entre 2007 e 2012 (Tabela 2). Por sua vez, o consumo mundial variou entre 20,1 e 20,8 GJ/t no período 2007-2010. Portanto, mesmo considerando que o país tem uma siderurgia mais intensiva em usinas integradas do que a média mundial, o consumo específico de energia é inferior ao da siderurgia global. Por outro lado, com uma proporção relevante de exportação de semiacabados, o grau de elaboração dos produtos é menor.

A siderurgia a carvão vegetal é um traço peculiar do parque brasileiro. No caso específico do mini alto-forno a carvão vegetal, é viável a operação de redução em nível térmico mais baixo que o do alto-forno a coque (~ 125°C) e com menor geração de escoria (~ 50%). Em compensação, o uso do carvão vegetal não é a solução para a siderurgia brasileira na sua totalidade. Além do menor tamanho dos altos-fornos (comparativamente aos equipamentos que utilizam coque como redutor), ela exige maiores investimentos por capacidade instalada em relação à rota semi-integrada, não apenas na usina, mas também em função das inversões requeridas no desenvolvimento de maciços florestais.

Nas entrevistas realizadas, constatou-se um consenso generalizado de que o desempenho ambiental e energético da siderurgia brasileira é melhor do que a média mundial. Os dados da IEA (2012) ratificam esta percepção. Segundo esta fonte, a adoção das melhores tecnologias disponíveis propiciaria ao Brasil uma melhoria da performance energética (3,9 GJ/tonelada) menor do que a média da siderurgia mundial (4,4 GJ/tonelada), bastante afetada pela China e, em menor proporção, pela Índia. No entanto, o desempenho brasileiro ainda está aquém do verificado no Japão, Coreia do Sul e Europa Ocidental, o que também foi apontado nas entrevistas.

A utilização de carvão vegetal é uma alternativa importante para a mitigação das emissões de CO₂ da indústria siderúrgica no Brasil, pois em usinas integradas a carvão vegetal (considerando a análise do ciclo do produto – LCA, no acrônimo em inglês), a emissão específica de CO₂ é de aproximadamente 200 kg de CO₂ por tonelada de aço bruto. Isto equivale, portanto, a 10% do valor observado para uma usina integrada a coque. O país, além do clima adequado e relativa disponibilidade de terra para plantio do eucalipto, possui uma avançada tecnologia em silvicultura, fabricação do carvão vegetal e seu uso em altos-fornos. É importante mencionar algumas vantagens do carvão vegetal comparativamente ao carvão mineral: a) menor teor de enxofre; b) menor desgaste do alto-forno; c) menor temperatura de operação do alto-forno, acarretando menor perda térmica; d) menor consumo de energia.

De um lado, constatou-se consenso em relação às companhias entrevistadas de que a maior oportunidade para indústria de aço brasileira, no paradigma da economia do baixo carbono, é a produção a partir de carvão vegetal. Por outro lado, elas se mostraram céticas quanto à capacidade do segmento guseiro (ou seja, os produtores independentes) resolver seus problemas mesmo a médio e longo prazos. Nesse sentido, a percepção geral é que haverá uma diminuição do tamanho do parque guseiro, com a sobrevivência apenas das empresas que investirem em maciços florestais e no aprimoramento tecnológico (adoção de injeção de finos de carvão, melhoria dos processos de carbonização e das técnicas de plantio, bem como investimentos em cogeração de energia) num curto espaço de tempo (inferior a cinco anos). Algumas siderúrgicas apostam que cerca de metade do parque guseiro será preservado. Para isto, tais produtores precisam ter maior acesso às fontes de financiamento, inclusive as provenientes de bancos governamentais.

No entanto, é preciso mencionar que a produção de aço via carvão vegetal é limitada por restrição da capacidade de carga no alto-forno. Outro aspecto relevante é o alto investimento em terras, que deve ser feito com pelo menos seis anos de antecedência, comparativamente a um alto-forno a coque, que leva, em média, dois anos para ser construído. Ademais, existem barreiras socioambientais, devido ao fato de parte do carvão vegetal utilizado pelos guseiros ser proveniente de vegetação nativa. O Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia, de acordo com o Ministério de Meio Ambiente, é fortemente baseado na utilização do carvão vegetal sustentável, oriundo de florestas plantadas. De fato, o plano tem dois pilares fundamentais: expansão do estoque de florestas plantadas e melhoria da eficiência e da qualidade ambiental do processo de carbonização (MMA, 2010).

Os tipos de resíduos gerados na indústria siderúrgica são os mais variados e provenientes principalmente do processamento de matérias-primas e dos processos de fabricação (escórias) e controles ambientais (pós e lamas), entre outros. Reciclagem interna ou externa e disposição temporária ou final são os métodos mais utilizados para o gerenciamento dos resíduos sólidos. A seleção do método mais apropriado normalmente se baseia em considerações econômicas e nas tecnologias disponíveis, de acordo com as leis ambientais em vigor.

A gestão de coprodutos tem se tornando uma atividade cada vez mais importante para as siderúrgicas. Nas usinas integradas a coque, cerca de 80% do total de resíduos sólidos gerados são oriundos apenas de duas etapas: redução e refino (aciaria). Nas usinas semi-integradas, as fases de matérias-primas e refino respondem pela quase totalidade da geração. As últimas estimativas da WSA apontam que o indicador de eficiência mundial, que mensura o percentual de materiais convertidos em produtos e coprodutos, manteve-se no patamar de 98% entre 2007 e 2010. Em 2011, ele regrediu para 94%, mas a WSA não explicou os motivos de tal alteração. Uma possível explicação é a participação de novas companhias, com pior performance. Mais importante, o desempenho brasileiro foi superior ao padrão global nos anos em que a comparação é possível (Tabela 2). A eficiência no uso de materiais é um terceiro indicador relevante a ser acompanhado anualmente.

Os índices de recirculação de água nas empresas siderúrgicas, após um processo de aumento, já mostram sinais de estabilização. Na experiência brasileira, este índice para água doce se mostrou estável no patamar de 96% no período 2009-2011. A maior parte da água utilizada no processo produtivo das siderúrgicas decorre da necessidade de refrigeração de equipamentos e materiais. As iniciativas de recirculação envolvem a aplicação de tecnologias de ponta para a implantação de sistemas de reuso de efluentes, o fechamento de circuitos e ações de conscientização dos operadores da unidade produtiva.

2.2 Mudanças do clima e regulação setorial

Os agentes mais críticos nas discussões setoriais acerca de alterações do clima no caso da siderurgia têm sido os governos, as associações empresariais e entidades técnico-científicas. As regulações governamentais sobre mudança climática são bastante distintas entre os países, conforme aponta GUTIERREZ (2010). Dentre os esquemas mais restritivos impostos até agora se destacam os adotados na União Europeia e Austrália.

A União Europeia tem se destacado em termos de adoção de políticas restritivas à emissão de CO₂. O chamado Esquema de Comércio de Emissões (European Union Emissions Trading Scheme – EU ETS) é a principal ferramenta da União Europeia para cumprir as metas do Protocolo de Quioto. Cada país-membro define um plano nacional de alocações (NAP - National Allocation Plan), que determina certa quantidade de “permissões” de emissão de GEE para suas indústrias e usinas de geração de energia. O objetivo é cortar as emissões de CO₂ em 20% abaixo dos níveis de 1990 até 2020.

O EU ETS é um regime obrigatório, que exige relatórios anuais das emissões de GEE e outros dados para verificar seu cumprimento. A primeira fase do EU ETS iniciou-se em 2005 e foi finalizada em 2007. A segunda fase abrangeu o período 2008-2012 e a terceira começou em 2013. O sistema é baseado no conceito de *cap-and-trade*, que corresponde à determinação da quantidade de CO₂ que um setor ou um país pode emitir. Ele permite que as companhias que reduziram suas emissões acima da meta comercializem seus créditos de carbono. Em outras palavras, de acordo com a eficácia das medidas para se manter dentro da cota estabelecida, as indústrias e usinas podem vender ou comprar “permissões” de emissão de GEE, comprando se a cota for ultrapassada e vendendo se o nível de emissões estiver abaixo da cota. Assim, as siderúrgicas europeias são incentivadas a buscar melhores tecnologias para deixar sua produção mais limpa, sob pena de terem de recorrer ao mercado de carbono para compensar suas emissões.

Até 2012, algumas indústrias, incluindo a siderúrgica, receberam permissões grátis para evitar que seus custos aumentem mais do que os das rivais estrangeiras. Muitas vezes, isso é traduzido em lucros extraordinários pela venda de cotas não utilizadas, o que foi inclusive potencializado pela redução da produção siderúrgica – e consequentemente das emissões de CO₂ – devido à recente crise econômica global. A partir de 2013, a União Europeia deseja tornar o EU ETS mais rigoroso para eliminar tais lucros inesperados, e apenas as usinas que se situam entre as 10% mais eficientes, que corresponde à referência de eficiência, receberão todas as suas permissões gratuitamente.

Em julho de 2012, a Comissão Europeia aprovou uma medida segundo a qual os países-membros podem subsidiar os consumidores de energia, que deverão ter seus custos elevados a partir da entrada em vigor a terceira etapa do EU ETS. O regulamento permite subsídios de até 85% do custo adicional incorrido pelas empresas mais eficientes em cada setor no período 2013-2015. Este valor vai regredindo gradualmente até atingir 75% em 2019-2020. A Eurofer (entidade que representa as siderúrgicas europeias) afirmou que a medida é insuficiente para compensar as siderúrgicas, tornando-se uma desvantagem competitiva frente ao aço importado. À primeira vista, os produtores mais afetados serão as usinas semi-integradas e atividades de laminação, que seriam subsidiadas no máximo a 50%-60% do custo indireto da cobrança pela emissão de CO₂. Além disso, em função da precariedade fiscal dos países europeus, é muito provável que os Estados não tenham condições efetivas de oferecer tais subsídios. Parte de diminuição da emissão de CO₂ pela siderurgia europeia no médio prazo será decorrência da diminuição da atividade econômica, até porque em termos de eficiência energética e ambiental, estas empresas já se encontram próximo das melhores práticas atualmente disponíveis.

A Austrália também adotou uma política restritiva à emissão de CO₂ com impactos potenciais sobre a siderurgia. O Clean Energy Bill entrou em vigor em julho de 2012. Nos três primeiros anos, estabeleceu-se a cobrança de US\$ 24 por tonelada de carbono emitido. A partir de julho de 2015, o preço será determinado pelo mercado. Esta lei afeta os 500 maiores poluidores do país.

Para mitigar os impactos da nova lei, o governo australiano propôs o Steel Transformation Plan (STP), com vigência a partir de maio de 2012, com recursos de US\$ 310 milhões ao longo de quatro anos. Desta forma, as siderúrgicas obterão uma proteção temporária de 94,5% dos custos associa-

dos ao novo tributo. Produtores de alumínio e zinco também foram alvo de medida compensatória semelhante. Em suma, a experiência australiana mostra a imposição de cobrança pela emissão de CO₂ para os maiores poluidores, mas ao mesmo tempo um plano de incentivo financeiro que praticamente compensa todos os custos adicionais nos três primeiros anos de vigência da lei. Assim, a cobrança da emissão para as siderúrgicas terá efeitos mais significativos a partir de 2015.

Na África do Sul, em fevereiro de 2012, o governo propôs a cobrança de uma taxa de US\$ 16 por tonelada de emissão de CO₂. A intenção é iniciar a cobrança a partir de março de 2013 com um aumento anual de 10% no valor cobrado. Por outro lado, prevê-se uma redução de 60%-80% para as empresas que operam em setores muito afetados pela medida. No caso da siderurgia, o desconto seria de 80%. Assim, a lógica da cobrança e da mitigação do impacto para a siderurgia na África do Sul é a mesma da verificada na Austrália.

Nos Estados Unidos, de acordo com GUTIERREZ (2010), qualquer tentativa para restringir as emissões industriais de carbono tem enfrentado grande resistência, o que não impediu o estabelecimento de medidas por governos locais. O esquema de *cap-and-trade* ficou restrito a essa esfera, incidindo sobre energia e petroquímica, mas não sobre a siderurgia. Uma proposição para eliminar tal sistema na Califórnia foi derrotada, ao passo que o Novo México o adotará em 2015. De todo modo, esses dois estados não são relevantes em termos de produção siderúrgica.

DE PAULA (2011) observa que o governo, que assumiu o poder no Japão em 2009, propôs que as emissões japonesas de GEE sejam reduzidas em 25% em comparação aos níveis de 1990, o que equivale a uma retração de 30% frente ao patamar atual. No longo prazo, a meta, a ser atingida talvez em 2050, é alcançar uma diminuição de 60% comparativamente aos valores de 1990. Isto requer que a geração de energia solar seja aumentada em 120 vezes a partir de agora e que vários setores industriais adotem novas tecnologias com elevada eficiência energética. No Japão, excluindo as usinas termelétricas, a siderurgia é a indústria que mais emite GEE. No âmbito de dez setores designados, a participação da siderurgia é 33,3%.

Em meio ao debate sobre a imposição do *cap-and-trade*, as siderúrgicas japonesas decidiram adotar uma meta voluntária de redução de consumo energético (retração de 10%) e na emissão específica de CO₂ (queda de 9%), nos anos fiscais de 2009-2012 comparativamente ao nível de 1990. Com os programas de restrição voluntária, as siderúrgicas esperam dissuadir o governo de impor objetivos compulsórios, associados à cobrança de multas e penalidades.

Na verdade, a siderurgia japonesa acabou sendo impactada de forma indireta por incremento dos custos da energia. O congresso japonês promulgou uma lei em agosto de 2011, com vigência a partir de julho de 2012, com vista a ampliar a participação das fontes renováveis (como eólica e solar) no fornecimento de energia dos atuais 9% para 20% no início da década de 2020. Como as energias renováveis são mais caras, a conta será repassada aos consumidores. Todavia, para os usuários muito dependentes em energia, cuja intensidade seja oito vezes superior à média do país, esta sobrecarga será reduzida em pelo menos 80%. A Japan Iron and Steel Federation (JISF) argumenta que nas usinas semi-integradas a intensidade é dez vezes superior à média.

É interessante constatar que na União Europeia e Japão as siderúrgicas à base de aciaria elétrica estão sendo impactadas indiretamente pelo incremento dos custos da eletricidade (ou seja, em função das emissões indiretas de CO₂), contrariando a hipótese inicial de que as usinas integradas a coque seriam as mais afetadas no paradigma da economia de baixo carbono. Ademais, na União Europeia, Austrália e Japão, verifica-se que os governos adotam uma política “morde-e-assopra”. Ao mesmo tempo em que estabelecem mecanismos restritivos, criam subsídios e programas de incentivos compensatórios – a princípio, de caráter provisório – para as siderúrgicas. Com isto, cumprem seus programas de governo e simultaneamente tentam mitigar os impactos sobre o setor. Não menos importante, os governos da Europa, Estados Unidos e Japão financiam inovações radicais (conforme discutido na subseção seguinte) visando ao melhor desempenho energético e ambiental. Tais inovações é que se traduzem em soluções para o médio-longo prazo.

No que diz respeito às negociações e acordos restritivos internacionais que afetem as siderúrgicas, a maioria das empresas brasileiras entrevistadas afirmou desconhecer qualquer mecanismo desta natureza. Além disso, elas acreditam que o emprego de tais instrumentos somente surtirá efeito prático a partir de 2020. Esta questão também fazia parte do questionário respondido por afiliados da divisão de meio ambiente da ABM. Dos 19 respondentes: a) 53% afirmaram que não foi implantada no exterior nenhuma restrição de comércio internacional associada ao efeito estufa; b) 5% sinalizaram que alguma imposição já se encontra em vigor; c) 42% não responderam (Tabela 3).

Ainda em relação à Tabela 3, no que tange à indagação acerca da existência de alguma restrição de comércio internacional associada ao efeito estufa no Brasil, os números foram: a) 79% apontaram a inexistência; b) 5% mencionaram a existência; c) 16% não responderam. No que concerne ao grau de importância de tais restrições, caso venham a ser adotadas, os respondentes assimilaram como de alta relevância (47%), média relevância (37%), baixa relevância (11%) e sem resposta (5%).

De acordo com a percepção das siderúrgicas brasileiras entrevistadas, os impactos do efeito estufa e das mudanças do clima não foram ainda percebidos na prática, em âmbito seja mundial, seja nacional. Embora sejam questões consideradas potencialmente muito relevantes, ainda estão no plano da retórica, no que tange à imposição de restrições à produção e ao comércio exterior. Em geral, esperam que tais medidas tenham implicações mais concretas a partir de 2020 (ou mesmo 2030, na visão dos mais céticos). Todavia, elas advogam que o país venha a taxar produtos importados que tenham sido produzidos com emissão de carbono superior à dos fabricados no Brasil, ou seja, que sejam estabelecidas barreiras aos produtos com alta taxa de CO₂, tão logo isto se torne uma prática frequente no contexto mundial.

Ainda em relação à Tabela 3, a grande maioria dos fatores investigados – a) pagamento por restrições ambientais de caráter local; b) pagamento por permissões de emissões de CO₂; c) pagamento por permissões de emissões de outros GEE; d) regulamentação restritiva sobre os processos produtivos; e) regulamentação restritiva sobre os produtos – segue o mesmo padrão indicado para restrições ao comércio internacional. A única importante exceção diz respeito às mudanças no com-

portamento do consumidor, que já teriam ocorrido, tanto no exterior (89% dos respondentes dos questionários), quanto no Brasil (84%).

Tabela 3 Percepção quanto à adoção de medidas restritivas relacionadas ao efeito estufa e o grau de importância caso tais restrições venham a ser implementadas (%)

Mudanças Institucionais e regulatórias	Já implementada no Brasil?		Já implementada no exterior?		Grau de importância			
	Sim	Não	Sim	Não	Nenhuma	Baixa	Média	Alta
Pagamento por restrições ambientais de caráter local	5	63	5	42	0	0	37	58
Pagamento por permissões de emissões de CO ₂	11	74	5	26	0	0	32	63
Pagamento por permissões de emissões de outros GEEs	11	79	5	42	0	16	21	58
Restrições ao comércio exterior	5	79	5	53	0	11	37	47
Regulamentação restritiva sobre os processos produtivos	0	47	0	21	0	0	37	63
Regulamentação restritiva sobre os produtos	0	63	0	42	0	16	32	53
Mudanças no comportamento do consumidor	84	16	89	5	0	26	26	47

Fonte: elaboração própria.

Obs: A soma não atinge 100% por conta dos respondentes que preferiram não opinar sobre cada item.

Na experiência brasileira, deve-se mencionar o “Plano Indústria”, coordenado pelo Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). Em 2012, estão sendo trabalhadas as indústrias de alumínio, cimento, papel e celulose e química. Em 2013, serão contempladas as indústrias de ferro-gusa e aço, cal e vidro. Em conjunto, elas foram responsáveis, em 2005, por quase 90% das emissões diretas de GEE da indústria de transformação e por mais da metade das emissões derivadas da queima de combustíveis fósseis na indústria. Posteriormente, se procederá à incorporação progressiva de todos os demais setores da indústria de transformação até 2020.

O Plano Indústria adota como referência a meta de redução de emissões de processos industriais e uso de energia de 5% em relação ao cenário tendencial (*business as usual*) projetado para 2020. Assim, trata-se de um programa baseado na emissão específica de CO₂ e não da emissão absoluta de CO₂, que tenderia a ser mais restritivo para a expansão da produção industrial brasileira. Segundo COMIN (2012), o plano de ação contempla as seguintes medidas: a) fomentar a gestão de carbono na indústria; b) promover o aumento da reciclagem e o aproveitamento de coprodutos; c) promover a eficiência energética e a cogeração na indústria; d) facilitar o desenvolvimento e a disseminação de tecnologias de baixo carbono; e) manter a eficiência em carbono. Estas medidas, se levadas a cabo, já correspondem a um bom cardápio de diretrizes para adequar a indústria, em geral, e a siderurgia, em particular, ao paradigma da economia de baixo carbono. A próxima seção retoma a questão tecnológica.

3. Dinâmica e perspectivas tecnológicas

3.1 Inovações radicais visando à redução da emissão de CO₂

Segundo BASSON (2012), as principais iniciativas visando ao desenvolvimento de inovações radicais para a diminuição das emissões de CO₂ na siderurgia estão sendo levados a cabo por: a) União Europeia (projeto ULCOS); b) Japão (projeto COURSE 50, coordenado pela JISF); c) Estados Unidos (esforço coordenado pelo American Iron and Steel Institute/AISI); d) Coreia do Sul (iniciativa da Posco); e) Austrália (esforço da BlueScope e OneSteel e coordenação da Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation/CSIRO); f) Taiwan (iniciativa da China Steel).

Em relação à lista de iniciativas de inovação radical apresentada por BASSON (2012), cabem três comentários. Primeiro, as experiências mais relevantes são os projetos ULCOS, Course 50, o do AISI e o da Posco. Segundo, embora os projetos coletivos sejam os mais importantes, constata-se alguns esforços individuais. Terceiro, na experiência australiana, verifica-se a participação da agência nacional de ciência.

Retomando as quatro principais iniciativas, o Quadro 1 apresenta uma síntese dos projetos. O mais relevante é o Ultra-Low Carbon Dioxide Steelmaking (ULCOS), que compreende um consórcio de 48 empresas, que se dividem em dois grupos: a) membros centrais: ArcelorMittal, Saarsthal, Voest-Alpine, ThyssenKrupp, Tata Steel Corus, Dillinger Hütte, Riva, SSAB, Rataruukki (siderúrgicas, representando cerca de 90% da produção regional) e LKAB (mineradora de ferro); b) membros não-centrais: fornecedoras, universidades e centros de pesquisa. O projeto é coordenado pela ArcelorMittal.

O projeto ULCOS se subdivide em quatro subprojetos, que se encontram em estágios distintos de desenvolvimento: a) alto-forno TGR; b) Hisarna; c) ULCORED; d) ULCOWIN. O objetivo principal é reduzir a emissão de CO₂ em pelo menos 50% frente ao padrão atual. A primeira etapa do projeto custou US\$ 95 milhões e a segunda exigirá investimentos superiores a US\$ 630 milhões (WSA, 2012). O projeto é financiado em 60% pelos participantes do consórcio e 40% pela Comissão Europeia, por meio do Fundo de Pesquisa para Carvão e Aço. Um dos pilares do projeto ULCOS é a tecnologia de captura e estocagem de carbono (CCS). Ademais, apesar de uma das linhas de pesquisa do ULCOS ser o uso de biomassa, o mesmo não conta com nenhuma participação brasileira.

No caso da siderurgia japonesa, atenção especial será concedida ao desenvolvimento de tecnologia que permita o uso do hidrogênio como redutor. Um plano visando esta inovação está em andamento desde o ano fiscal de 2008, no âmbito do projeto nacional denominado “CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking Process by Innovative Technology for Cool Earth 50” (ou apenas “COURSE 50”), liderado pela Nippon Steel. A intenção é que tal tecnologia seja desenvolvida por volta de 2030 e comercializada em 2050, possibilitando uma diminuição de 30% na emissão de CO₂ das usinas integradas. O projeto COURSE 50 conta com a participação das seguintes empresas: Nippon Steel, JFE Steel, Sumitomo Metals, Kobe Steel e Nisshin, que são as maiores siderúrgicas do país. O projeto é

totalmente custeado pelo governo japonês. A primeira etapa (2008-2012) contou com um orçamento de US\$ 126 milhões e a segunda (2013-2017), com US\$ 189 milhões.

Quadro 1 Projetos selecionados visando à inovação radical para redução das emissões de CO₂ na siderurgia mundial

Projeto	Investimento (US\$ milhões)	Tecnologia	Localização	Situação atual	Ganhos potenciais
ULCOS	725	Alto-forno TGR	LKAB Luleå, ArcelorMittal Florange e Eisenhüttenstadt	Planta-piloto em operação, planta escala industrial em desenvolvimento	75% (com captura e estocagem de carbono)
		Hisarna	Tata Steel Europe Ijmuiden	Planta-piloto	80% (com captura e estocagem de carbono)
		ULCORED	LKAB Luleå	Planta-piloto em desenvolvimento	Desconhecido
		ULCOWIN (eletrolise alcalina do minério de ferro)	Laboratório	Estágio de laboratório	Até 100%
COURSE 50	315	Redução a hidrogênio	Nippon Steel Kimitsu	Planta-tese, mini alto-forno piloto em operação em 2012-2013	Desconhecido
		Captura de carbono			Desconhecido
		Uso do calor de escória e resíduos			Desconhecido
Posco	s.d.	Redução a hidrogênio	Desconhecido	Desconhecido	Até 100%
		Captura de carbono	Parceria com Ministério dos Assuntos Marítimos e da Pesca	Captura de carbono a base de amônia, sob água, em desenvolvimento	Desconhecido
AISI	s.d.	Redução a hidrogênio	University of Utah	Testes de laboratório já completados	Até 100%
		Fabricação de ferro primário por eletrolise	MIT	Estágio de laboratório	Até 100%
		Forno de soleira emparelhado	Desconhecido	Planta de 50 mil toneladas anuais em 2015	30%

Fonte: Gutierrez (2010), WSA (2012), ULCOS, COURSE 50.

Em junho de 2012, o AISI, em colaboração com a University of Utah, recebeu US\$ 7,1 milhões do US Department of Energy (DOE) para financiar uma nova tecnologia de produção de ferro primário. Esta pretende utilizar a redução direta (utilizando hidrogênio) de finos de minério de ferro, de forma a diminuir as emissões de CO₂ em até 50%. O orçamento do projeto é de US\$ 8,9 milhões, ao longo de três anos, sendo 80% com recursos do DOE e 20% compartilhado pelos membros do AISI. Ressalte-se que o DOE e as siderúrgicas já investiram mais de US\$ 70 milhões em projetos colaborativos indústria-governo.

No caso da iniciativa da Posco, conforme Quadro 1, constata-se que as linhas de pesquisa (redução a hidrogênio e CCS) são similares às do COURSE 50. Lembre-se que a empresa também vem

desenvolvendo uma nova tecnologia de fabricação de ferro primário: o Finex. O esforço da China Steel (Taiwan) refere-se à concentração de CO₂ e à separação de gases de combustão e CCS. Já o programa australiano privilegia a utilização da biomassa e a recuperação de calor da escória.

O Quadro 2 mostra a expectativa de difusão de algumas destas tecnologias emergentes em 2050, na avaliação do IEA (2012), no chamado cenário “2DS”, que assume um sistema de energia e de emissões compatível com 80% de chance para a temperatura média global aumentar 2 °C até 2050 (ou seja, é um cenário bastante restritivo às emissões de CO₂). Portanto, esta projeção considera o máximo de difusão de novas tecnologias, contemplando os seus desenvolvimentos vindouros.

Quadro 2 Difusão de inovações radicais em 2050 e contribuição para redução das emissões de CO₂ na siderurgia mundial

Tecnologia	Difusão
Fusão redutora	Participação na produção de metálicos de 4,8% a 7,4% em 2050
Alto-forno TGR	Difusão a partir de 2020. Participação de 20% na redução das necessidades de coque em 2050.
Uso de material altamente reativo	Difusão após 2020.
Uso de carvão vegetal e resíduo plástico	Participação de 1% a 4% na redução do consumo energético do setor em 2050
Produção de ferro por eletrólise (óxido fundido)	Difusão após 2030. Participação marginal em 2050.
CCS para alto-forno, redução direta e fusão-redutora	Participação de 75% a 90% dos novos altos-fornos construídos entre 2030 e 2050. Participação de 50% a 80% dos altos-fornos reformados entre 2030 e 2050.

Fonte: IEA (2012), cenário 2DS.

De um lado, no caso do alto-forno TGR, espera-se que ele venha a contribuir com 20% na diminuição das necessidades de coque em 2050. O uso do carvão vegetal e do resíduo plástico seria responsável por no máximo 4% da retração de consumo energético setorial. O emprego de material altamente reativo, derivado de inovações no processo de aglomeração, apenas se difundiria a partir de 2020. A produção de ferro por eletrólise – baseada na dissolução de um óxido de metal por uma mistura de óxidos, sendo que os íons são convertidos em metal e oxigênio por meio da aplicação de uma diferença de tensão – começaria a se disseminar a partir de 2030, ganhando uma fatia marginal até 2050. Por outro lado, vislumbra-se que a tecnologia CCS venha a ser incorporada em 75% a 90% dos novos altos-fornos construídos e em 50% a 80% dos altos-fornos reformados entre 2030 e 2050. Assim, a CCS é a inovação radical com maior potencial de impacto em termos de diminuição do consumo específico de CO₂ por parte da siderurgia mundial. Como será discutido na próxima subseção, as inovações denominadas de fusão redutora não devem ser compreendidas como tecnologias de baixo carbono.

Em linhas gerais, os governos vêm assumindo um duplo papel na discussão da emissão de CO₂ na siderurgia nos países desenvolvidos. De um lado, estimulam o desenvolvimento tecnológico de inovações radicais. De outro, cumprem um papel normativo, relacionado às leis e normas, conforme discutido na subseção anterior. Nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil, o papel do Estado tem sido menos importante nos dois âmbitos.

3.2 Novos processos de redução: características e difusão

As inovações radicais mais relevantes em difusão na siderurgia mundial atualmente são os chamados novos processos de redução, ou seja, relativos à fabricação de ferro primário. Considerando a proeminência da etapa de redução em termos de emissão de CO₂ no processo siderúrgico, esta seção focaliza tais inovações.

Uma primeira qualificação importante é que, na verdade, algumas dessas novas tecnologias já estão em operação há mais de uma década. De um modo geral, a taxa de difusão tem sido lenta, o que revela as dificuldades em substituir um equipamento que vem sendo otimizado a longo tempo (alto-forno) e mesmo tecnologias alternativas já consolidadas (módulo de redução direta).

Os novos processos alternativos ao alto-forno, muitas vezes, são agrupados sob o rótulo genérico de “fusão-redutora”. Apesar das diferenças entre elas, de um modo geral, as principais vantagens dessas novas tecnologias são: a) o aumento de flexibilidade operacional em comparação com o alto-forno, que funciona intermitentemente por período superiores a 15 anos e raramente opera com menos de 80% de sua capacidade nominal; b) a redução da escala mínima ótima de uma usina siderúrgica e a conseqüente diminuição das barreiras à entrada; c) o decréscimo do custo de capital, em grande medida, relacionado à eliminação de coqueria e sinterização; d) a diminuição dos custos energéticos e do impacto ambiental.

No entanto, existem muitas diferenças entre os vários processos, no que tange ao tipo de equipamento, ao estágio de desenvolvimento comercial, ao tipo de minério de ferro utilizado, ao tipo de redutor primário, ao tamanho das plantas e ao desempenho energético e ambiental. O Quadro 3 apresenta informações sobre alguns dos principais processos alternativos de produção de ferro primário. Deve-se atentar ao fato de algumas plantas ainda não operarem em escala comercial, o que afeta o desempenho de tais processos.

Como se observa nas últimas duas linhas do Quadro 3, em geral os novos processos apresentam maior intensidade energética do que o alto-forno. Além disso, na melhor das hipóteses, tais tecnologias possuem uma emissão específica de CO₂ 15% inferior ao alto-forno. Conclui-se, então, que a retração das referidas emissões não se configura como objetivo primordial de nenhuma delas. De fato, o propósito de tais tecnologias é utilizar insumos metálicos e energéticos mais baratos e diminuir a intensidade em capital dos processos de redução. Na mesma direção, as trajetórias tecnológicas que podem ser previstas para a siderurgia – ao menos naquela etapa que é mais intensiva em carbono – não devem contribuir de forma expressiva para a redução das emissões.

Quadro 3 Processos alternativos ao alto-forno

	Corex	OxyCup	Tecnored	Finex	Hismelt	ITmk3
Proprietário da tecnologia	Siemens VAI (Áustria)	Küttner (Alemanha)	Tecnored (Brasil)	Posco (Coreia do Sul) / Siemens VAI (Áustria)	Rio Tinto (Austrália)	Midrex (EUA / Japão)
Tipo de equipamento	Forno de cuba em 2 estágios: redução na parte superior e fusão no reator inferior	Forno de cuba tipo cubilô	Forno de cuba	Leito fluidizado no reator superior de redução e fusão no reator inferior	Forno contendo banho com injeção de finos de minério e carvões (fusão redutora)	Fornos de soleira rotativa (RHF)
Produto gerado	Ferro-gusa	Ferro-gusa	Ferro-gusa	Ferro-gusa	Ferro-gusa	<i>Iron nuggets</i>
Estágio de desenvolvimento comercial	Tecnologia provada	Tecnologia provada	Tecnologia semi-comercial	Tecnologia provada	Tecnologia semi-comercial	Tecnologia semi-comercial
Número de unidades já instaladas	7	5	1	2	1	1
Start-up da primeira planta industrial	1989	1999	2011	2003	2005	2010
Tipo de minério de ferro	Pelota e granulado	Sucata + C-Bricks (mistura de resíduos siderúrgicos e carbono)	<i>Pellet feed</i> aglomerado na forma de briquete auto-redutor	<i>Pellet feed</i>	Finos	Finos aglomerados na forma de pelotas auto-redutoras
Tipo de redutor	Carvão não-coqueificável	Coque fundição	Carvão não-coqueificável	Carvão não-coqueificável	Carvão não-coqueificável	Finos de carvão
Tamanho nominal das plantas (mil ton/ano)	600-1.500	75-400	75	600-2.000	800	500
Geração de energia elétrica para venda	Muita	Não	Não	Muita	Não	Não
Consumo energético (% alto-forno)	115*	140**	120	130	115	100
Emissão CO2 (% alto-forno)	85*	120	90	120	115	85

Fonte: elaboração própria a partir de extensa literatura e entrevistas.

Obs: * considerando cogeração de energia elétrica;

** assumindo 85% de C-Bricks na carga.

Constata-se que a difusão dos novos processos de produção de ferro primário, como seria de se esperar, vem enfrentando dificuldades tecnológicas e mercadológicas. IEA (2012) estima que a participação conjunta de tais processos na siderurgia mundial venha alcançar de 0,5% a 7,4% dos metálicos em 2050, a depender do cenário energético (ver próxima subseção). Assim, não apenas tais inovações não reduzem substancialmente a emissão específica de CO₂, como sua difusão tende a ser relativamente lenta. Conseqüentemente, os impactos sobre os fatores críticos de competitividade, tanto para a siderurgia mundial, quanto para a brasileira, tendem a ser diminutos.

Os profissionais que responderam ao questionário também são relativamente pessimistas quanto ao estágio de desenvolvimento das tecnologias abordadas nesta subseção. Por outro lado, eles se mostram otimistas quanto aos futuros benefícios, pois acreditam que as

inovações radicais em tela geram boas oportunidades para a siderurgia brasileira. Das dez tecnologias avaliadas, as respostas mais pessimistas em termos de criação de boas oportunidades foram a produção de ferro por eletrólise do óxido fundido (MOE) e Rotary Hearth Furnace/RHF, High-Quality Iron Pebble/Hi-QIP, ambas com 47%. De forma não surpreendentemente, a Tecnonored (que está sendo desenvolvida no Brasil) encontra-se entre aquelas com maior proporção de geração de boas oportunidades, com 74%.

No que tange às instituições críticas, guardadas as diferenças entre cada tecnologia, destacam-se as empresas (em média, com 50% das respostas), sendo seguidas de perto por universidade/centro de pesquisa (40%-42%), ao passo que fornecedores (12%) têm um baixo volume de indicações. Ademais, na percepção das siderúrgicas entrevistadas, elas não teriam dificuldade de adquirir equipamentos que incorporassem os novos processos de fabricação de ferro primário. Não existiria assim um risco tecnológico inerente à maior difusão de processos alternativos ao alto-forno. Conseqüentemente, como tais tecnologias estariam disponíveis aos interessados, não se geraria um problema de apropriabilidade. É bem verdade, porém, que o desenvolvimento do processo Finex guarda uma particularidade em relação aos demais, pois a Posco não pretende comercializar a tecnologia. Por enquanto, pelo menos, ela deseja utilizar tal tecnologia de forma exclusiva (McCULLOCH, 2007).

Assim, com exceção do processo Finex, acredita-se que os novos processos alternativos ao alto-forno estarão disponíveis às siderúrgicas interessadas. Ademais, conforme avaliação da IEA, tais processos terão pouca importância, pelo menos até 2050, conforme discutido na próxima subseção.

3.3. Cenários da Agência Internacional de Energia

A Agência Internacional de Energia (IEA) vem divulgando nos últimos anos relatórios sobre o desempenho energético e ambiental mundial até 2050. A última edição do “Energy Technology Perspectives”, publicada em 2012, é baseada em três cenários:

- “2DS”: assume um sistema de energia consistente com uma trajetória de emissões que a pesquisa científica recente indica que teria uma probabilidade de 80% para limitar o aumento da temperatura média global a 2 °C (portanto, é muito restritivo às emissões de CO₂);
- “4DS”: leva em conta os recentes compromissos assumidos pelos países para limitar as emissões e intensificar os esforços para a melhoria da eficiência energética. Ele considera um incremento da temperatura a longo prazo de 4 °C;
- “6DS”: é em grande parte uma extensão das tendências atuais. Em 2050, o consumo de energia seria quase o dobro (em comparação com 2009) e a emissão do GEE subirá ainda mais. Na ausência de esforços para estabilizar as concentrações atmosféricas de GEE, o incremento da temperatura média global está projetado para ser de pelo menos 6 °C a longo prazo (cenário pouco restritivo à emissão de CO₂).

A Tabela 4 apresenta as previsões da IEA para 2050, conforme os cenários 2DS, 4DS e 6DS, combinando situações de baixa e alta demanda. Uma primeira informação muito relevante é que, em termos da produção de aço bruto, a participação do forno elétrico passaria dos atuais 28,5% para surpreendentes 50,2%-51,7%. Se confirmada, trata-se de uma mudança tecnológica de grandes proporções, com impactos substanciais sobre o *mix* de insumos e emissão de CO₂.

Tabela 4 Importância relativa das tecnologias de aciaria e dos metálicos em 2050 conforme diversos cenários (percentual)

		Situação atual	Demanda Baixa 2050			Demanda Alta 2050		
		2010	6DS	4DS	2DS	6DS	4DS	2DS
Aciaria	Forno elétrico	28,5	50,2	51,6	50,6	50,4	51,7	51,0
	Forno oxigênio	71,5	49,8	48,4	49,4	49,6	48,3	49,0
Metálicos	Ferro-gusa	68,6	45,6	44,3	40,8	45,5	44,2	37,9
	DRI a gás	3,5	7,0	7,0	9,5	7,0	7,0	9,7
	DRI a carvão	1,3	4,8	4,8	0,0	4,7	4,7	0,0
	Fusão redutora	0,0	0,5	0,5	4,8	0,4	0,4	7,4
	Sucata	26,6	42,1	43,4	44,8	42,4	43,7	45,0

Fonte: IEA (2012).

A parte de baixo da tabela 5 mostra a importância relativa de metálicos. A fatia do ferro-gusa regressaria dos atuais 68,6% para 45,5% no cenário 6DS, para 44,2% no cenário 4DS e ainda para 37,9%-40,8% no cenário 2DS. A maior parte desta queda seria aproveitada pela sucata, passando de 26,6% para 42%-45%. A tecnologia de redução direta a gás natural aumentaria de 3,5% para 7,0%-9,5%. Por sua vez, a redução direta a carvão poderia tanto expandir de 1,3% para 4,7%, quanto ser simplesmente eliminada, no caso do cenário mais restritivo às emissões.

Já os processos de fusão redutora aumentariam sua importância relativa de 0% para 0,4%-0,5% nos dois cenários mais permissivos às emissões. Para o cenário mais restritivo, sua fatia alcançaria 4,8%-7,4%. Portanto, sua difusão parece depender crucialmente da substituição da redução direta a carvão e, em menor medida, do aquecimento da demanda. De todo modo, a grande transformação não se refere aos novos processos de fabricação de ferro primário, mas simplesmente à produção de aço sem o uso desses processos (pela rota semi-integrada). Para a siderurgia brasileira, que é beneficiada pela disponibilidade de minério de ferro (em quantidade e qualidade), com certeza não se trata de uma boa notícia. Os impactos desta trajetória devem, todavia, ser observados a médio e longo prazo e não necessariamente afetarão todos os tipos de produtos siderúrgicos. Ademais, deve-se recordar que o crescimento do consumo doméstico de aço está contribuindo para a geração de sucata, o que tende a favorecer o incremento da par-

ticipação relativa das usinas semi-integradas no país. É interessante registrar que nas respostas ao questionário, de uma lista de oito linhas de desenvolvimento tecnológico mais importantes, a ampliação da reciclagem e do uso de resíduos foi considerada o fator mais crítico, com 95% de respostas indicando alta importância para o setor.

Ainda com base em IEA (2012), a siderurgia mundial reduziria sua intensidade de energia dos atuais 21 GJ/tonelada de aço bruto para o patamar de:

- 16,6 GJ/tonelada no cenário 4DS, baixa demanda (queda de 21,0%);
- 16,5 GJ/tonelada no cenário 4DS, alta demanda (21,4%);
- 14,1 GJ/tonelada no cenário 2DS, baixa demanda (32,9%);
- 13,5 GJ/tonelada no cenário 2DS, alta demanda (35,7%).

Quanto à emissão, IEA (2012) prevê a mudança de 1,8 tonelada de CO₂/tonelada de aço bruto para:

- 1,1 tonelada CO₂ no cenário 4DS, baixa demanda (retração de 38,9%);
- 1,3 tonelada CO₂ no cenário 4DS, alta demanda (27,8%);
- 0,7 tonelada CO₂ no cenário 2DS, baixa demanda (61,1%);
- 0,6 tonelada CO₂ no cenário 2DS, alta demanda (66,7%).

Deve-se também destacar que, nas entrevistas, a questão que apresentou maior dispersão de respostas, foi aquela que discutia se a siderurgia ganharia ou perderia mercado frente aos sucedâneos no caso de adoção de políticas ambientais mais restritivas. Apesar da falta de consenso entre as entrevistadas, a visão mais frequente (porém não consensual) é aquela que diferencia as emissões diretas e indiretas de CO₂. Ao se contabilizar apenas as emissões diretas, algumas companhias acreditam que o aço tende a perder espaço frente ao alumínio e cimento. Porém, quando são considerados todos os aspectos do ciclo de vida, o que inclui as emissões diretas e indiretas de CO₂, o aço tenderia a ganhar. Todavia, a grande vantagem da siderurgia frente às indústrias de alumínio e cimento é já possuir uma rota tecnológica disponível (semi-integrada) para reduzir a emissão específica de CO₂, que apresenta inclusive a vantagem de necessitar de menor investimento por capacidade instalada no âmbito setorial. Na próxima seção, são apresentadas as recomendações de políticas.

4. Propostas de políticas e posicionamento brasileiro

4.1 Principal alteração tecnológica

A conclusão mais polêmica deste capítulo, com base em estudo da Agência Internacional de Energia (IEA), diz respeito ao drástico aumento da importância relativa da aciaria elétrica na produ-

ção mundial de aço. A sua difusão passaria dos atuais 28,5% para mais de 50%, em 2050, em qualquer dos três cenários analisados. Não deixa de ser surpreendente que isto venha a ocorrer mesmo no cenário energético menos restritivo, que se aproxima da manutenção da trajetória atual. Embora uma fatia de 50% para a aciaria elétrica possa ser considerada controversa, é razoável concordar com a tendência de incremento da sua relevância, principalmente porque a China passará a gerar mais sucata e, por isto, será menos dependente da rota baseada no alto-forno.

A lenta difusão de processos alternativos ao alto-forno, sejam as tecnologias já maduras de redução direta (a gás ou carvão não-coqueificável), sejam as tecnologias ainda emergentes de fusão redutora (incluindo Corex, Finex, Tecnoled, entre outros), parece ser uma tendência menos polêmica. Na verdade, alguns dos projetos de fusão redutora resultaram em grandes perdas financeiras para as companhias envolvidas. Além disso, tendo em vista a elevada vida útil dos altos-fornos, mesmo que tais tecnologias atingissem desempenho superior do ponto de vista tecnológico, seriam necessárias algumas décadas para a completa eliminação dos altos-fornos. Ademais, a siderurgia tem se mostrado uma indústria com poucas inovações radicais, sendo que as principais estratégias empresariais, como fusões e aquisições e internacionalização produtiva, não são guiadas por aspectos tecnológicos ou ambientais.

Por outro lado, a tecnologia de sequestro e estocagem de carbono (CCS) tende a apresentar uma difusão elevada a partir de 2030, sendo incorporada tanto nos processos emergentes de produção de ferro primário, quanto nos altos-fornos (em construção e em reforma). Nesse sentido, o alto-forno tende a manter sua hegemonia em termos de processo de fabricação de ferro primário, até porque a tecnologia CCS tende a otimizar o seu desempenho energético e ambiental.

4.2 Definição de indicadores para monitoramento e avaliação

Ao longo deste capítulo foram mencionados três indicadores principais de acompanhamento: a) emissão específica de CO₂, em termos de tonelada de CO₂ equivalente por tonelada de aço bruto produzida; b) consumo específico de energia (GJ/tonelada); c) indicador de eficiência (percentual de materiais convertidos em produtos e coprodutos).

Estes três indicadores são divulgados anualmente pela WSA e pelo IABr, com base na mesma metodologia. No entanto, é necessário reconhecer que a baixa adesão das siderúrgicas chinesas e indianas para a base de dados da WSA afeta sobremaneira o cálculo da média mundial. Isto acaba subestimando o consumo específico de energia e de emissão específica de CO₂ e, por consequência, distorce a posição relativa da siderurgia brasileira. Outra questão fundamental, que tende a ser aprimorada ao longo do tempo, é que tais indicadores deveriam ser divulgados (e acompanhados) por rota tecnológica e por etapas do processo.

Indicadores de difusão de tecnologias de fusão redutora não são úteis para os objetivos deste projeto, uma vez que não priorizam a diminuição do consumo específico de energia, nem da emissão específica de CO₂. Todavia, é importante acompanhar o desenvolvimento e a difusão da tecnolo-

gia CCS. Quando tal inovação estiver disponível, um índice baseado na proporção de ferro primário que faz uso de CCS será útil como indicador de esforço, embora os seus impactos serão observados no consumo específico de energia e na emissão específica de CO₂, como indicadores de resultado.

4.3 Impactos das mudanças institucionais e tecnológicas

No que tange às políticas mais restritivas de emissão de CO₂, a experiência internacional vem mostrando o que se pode chamar de política “morde-e-assopra”. Na União Europeia e na Austrália, onde as políticas de cobrança por emissão de CO₂ já se encontram em vigor, a siderurgia foi contemplada com benefícios (mesmo que temporários), como forma de mitigar os custos das medidas. A África do Sul mostra indícios de que seguirá o mesmo caminho. Nos Estados Unidos, observa-se forte reação à adoção destas medidas. No Japão, as siderúrgicas adotam medidas voluntárias para tentar convencer o governo a não impor medidas obrigatórias.

Nas experiências recentes da União Europeia e do Japão, as citadas políticas paradoxalmente têm atingido mais intensamente as siderúrgicas semi-integradas (à base de aciaria elétrica). Como estas são intensivas em eletricidade e as geradoras de energia estão sendo oneradas pela tributação sobre emissão de CO₂, tais siderúrgicas estão pagando a conta por meio da emissão indireta de CO₂. Contudo, mais uma vez a política “morde-e-assopra” foi observada, ao menos no Japão. Assim, quanto às regulações e impostos, já existem experiências em curso, mas os efeitos práticos para as siderúrgicas foram atenuados. É razoável acreditar que, superada uma fase de transição (até 2015-2020), as siderúrgicas tendam a ser impactadas de forma crescente ao longo do tempo. Como estas regulações e impostos estão sendo adotadas principalmente em mercados siderúrgicos maduros (União Europeia, Japão e Austrália), para evitar os custos adicionais decorrentes de tais políticas, as empresas tendem a adotar melhorias técnicas. Estas, por sua vez são cada vez mais difíceis, pois tais países se encontram na fronteira tecnológica mundial. Desta forma, as companhias seriam mais afetadas em custos (da política e do investimento necessário para evitar as taxas) do que por restrição ao volume de produção. Contudo, essas políticas e a precificação das emissões podem ser um requisito para viabilizar os investimentos em tecnologias de CCS.

As empresas entrevistadas e os profissionais que responderam os questionários são céticos quanto à imposição de restrições relacionadas ao comércio exterior com base em emissões de CO₂, no curto prazo. Constatou-se um forte consenso entre as companhias de que tais medidas, se vierem a ser aplicadas, somente seriam observadas a partir de 2020. Provavelmente, isto é uma consequência do fato de que a siderurgia global já apresenta uma elevada participação nos processos de defesa comercial no mundo, não sendo assim necessário recorrer àqueles mecanismos para desestimular as importações. Além disso, num contexto de maior pressão para a melhoria dos padrões ambientais e energéticos, as siderúrgicas brasileiras acreditam que conseguirão adquirir tais tecnologias sem dificuldades e, por conta disto, não haveria o imperativo para o incremento substancial dos esforços inovativos, que hoje são relativamente tímidos.

No que concerne às mudanças tecnológicas, conforme discutido no início desta seção, as principais tendências até 2050 são: a) incremento da importância relativa da aciaria elétrica; b) lenta difusão das tecnologias de fusão redutora, com o que o alto-forno se manterá como principal equipamento para fabricação de ferro primário; c) crescente difusão da tecnologia CCS, a partir de 2030, que será incorporada tanto no alto-forno, quanto nos processos emergentes de produção de ferro primário.

4.4 Decisões e caminhos mais promissores para o Brasil

O atual desempenho ambiental e energético da siderurgia brasileira é bom, sendo melhor do que a média mundial, embora ainda aquém das melhores práticas mundiais. O que talvez seja mais preocupante é que os elevados investimentos que estão sendo realizados na China e, em menor intensidade, na Índia tendem a diminuir a desvantagem de performance ambiental e energética de tais parques. Assim, uma das possibilidades é que o referido desempenho mundial melhore mais rapidamente do que no Brasil, acabando por diminuir ou mesmo eliminar a diferença positiva hoje existente a favor das siderúrgicas brasileiras.

Os objetivos de médio e longo prazo para a siderurgia brasileira deveriam ser manter (ou mesmo melhorar) seu desempenho energético e ambiental comparativamente à siderurgia mundial. Não será uma tarefa fácil, tendo em vista os elevados investimentos em ampliação em capacidade instalada nos países asiáticos. O parque siderúrgico brasileiro já é bastante maduro, o que requer investimentos consideráveis em algumas etapas do processo, como as baterias de coque. Tais inversões seriam mais facilmente realizadas se a demanda de aço no Brasil apontasse para uma trajetória sustentável de crescimento, o que não tem ocorrido nos últimos anos. Quando se considera também que a siderurgia brasileira vem perdendo suas vantagens competitivas em termos de custo, chega-se a um cenário bastante desafiador. Assim, é provável que os investimentos e as melhorias na performance ambiental e energético caminhem gradualmente.

Na avaliação dos entrevistados, a gestão ambiental e energética da siderurgia brasileira atende aos melhores padrões globais. Desta forma, um desempenho ambiental e energético aquém dos líderes mundiais pode ser, em grande medida, atribuídas aos equipamentos (e as tecnologias neles incorporadas), ratificando a necessidade de investimentos recorrentes de modernização, e uma legislação menos exigente do que a verificada em países como Japão e União Europeia.

No que tange às políticas tecnológicas e ambientais para adaptação ao paradigma do baixo carbono, três diretrizes são as principais:

1. *A experiência internacional mostra o duplo papel do Estado: normativo* (estabelecimento de condições mais restritivas às emissões industriais de CO₂) *e fomentador* (estímulo aos esforços de P&D de novas tecnologias). No Brasil, mesmo considerando o papel do BNDES como acionista do processo do Tecnored, a atuação governamental tem sido relativamente tímida

nos dois papéis. Corre-se então o risco de o Estado decidir estabelecer padrões muito rígidos, sem fornecer estímulos ao desenvolvimento tecnológico que ajudem a atingir tais referências. Faz-se necessário então uma combinação de políticas públicas, no sentido de contemplar e calibrar o referido duplo papel. Outro risco, oposto ao primeiro, é a adoção de uma política acomodatória, que não gera estímulos regulatórios nem de incentivo à P&D visando à conversão para um padrão tecnológico de baixo carbono.

2. *A siderurgia a carvão vegetal é uma peculiaridade positiva da siderurgia brasileira que contribui para menor emissão específica de CO₂.* É evidente que a siderurgia a carvão vegetal é incapaz de substituir completamente a siderurgia a coque no país. De todo modo, é uma vantagem competitiva nacional que não está sendo devidamente aproveitada, porque o segmento guseiro é muitas vezes associado ao desmatamento e outras condutas empresariais inadequadas. É preciso que o governo apoie as iniciativas das usinas integradas a carvão vegetal, mas também que estimule um plano de modernização dos guseiros. A atuação governamental em relação aos guseiros tem se resumido basicamente às intervenções do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). É preciso uma agenda positiva (contemplando recursos financeiros para expansão das florestas plantadas e aprimoramento tecnológico) visando à melhoria do desempenho ambiental e energético dos guseiros (tais como cogeração de energia nos altos-fornos e na carbonização, injeção de finos de carvão e aproveitamento de resíduos industriais via sinterização dos finos de minério e carvão), sob pena de que uma vantagem competitiva do setor continue sendo percebida no país e no exterior como exemplo de má utilização dos recursos naturais.
3. *A política ambiental e energética da siderurgia brasileira deve levar em consideração o fato de que o consumo de aço no país tende a crescer, o que estimularia o incremento da produção.* A adoção de mecanismos de *cap-and-trade* pode até ser coerente com a experiência de países que mostram sinais de estabilidade ou mesmo diminuição da produção siderúrgica. Nesse sentido, o Plano Indústria, coordenado pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), que prioriza a diminuição da emissão específica de CO₂ (e não o montante agregado de CO₂) é uma decisão acertada. Aliás, as ações que fazem parte do Plano Indústria são positivas para a siderurgia brasileira. Resta apoiar tais medidas para que eles sejam de fato implementadas.

Duas deveriam ser as prioridades em termos de obtenção de recursos para investimentos em inovações siderúrgicas. De um lado, as usinas integradas a coque, que apresentam maior impacto em termos de consumo específico de energia e de emissão específica de CO₂. Além disso, tais usinas possuem alto custo de investimento por capacidade instalada, o que torna seu ajustamento a novos padrões tecnológicos mais oneroso. Os recursos devem ser aplicados na modernização contínua do parque, uma vez que é pouco provável que venham a ocupar um papel de destaque na arena internacional quanto ao desenvolvimento de inovações radicais.

A segunda prioridade – que requer um montante menor de recursos, pela menor capacidade instalada e menor intensidade de capital – é o desenvolvimento da siderurgia a carvão vegetal, seja na rota integrada, seja nos produtores independentes (“guseiros”). Por ser uma peculiaridade nacional, esta é uma vantagem que deveria ser melhor explorada. O objetivo de curto prazo deveria ser a modernização dos guseiros (adotando tecnologias disponíveis) e a médio e longo prazo melhorias dos processos operacionais nas usinas integradas e nos guseiros.

4.5 Modelos institucionais de inovação

As duas principais experiências mundiais em termos de tecnologia de baixo carbono na siderurgia mundial são os projetos ULCOS (União Europeia) e COURSE 50 (Japão). O primeiro caso consiste de consórcio de 48 empresas, congregando as principais siderúrgicas europeias (capitaneadas pela ArcelorMittal), uma mineradora de ferro e ainda fornecedores, universidades e centros de pesquisa. O projeto é financiado em 60% pelos participantes do consórcio e 40% pela Comissão Europeia, por meio do Fundo de Pesquisa para Carvão e Aço.

O projeto COURSE 50 conta com a participação das maiores siderúrgicas do país, sendo coordenado pela Japan Iron and Steel Federation (JISF) e totalmente custeado pelo governo japonês.

As duas experiências são difíceis de replicar no brasileiro, seja pelo volume de recursos requerido (US\$ 725 milhões no caso do ULCOS e US\$ 315 milhões no do COURSE 50), seja pela capacitação tecnológica acumulada. Na primeira experiência, existe uma longa tradição de desenvolvimento tecnológico cooperativo com recursos da Comissão Europeia, e na segunda, as siderúrgicas japonesas participam de várias *joint-ventures* e consórcios não apenas em atividades tecnológicas.

Diante das limitações financeiras e tecnológicas e das dificuldades para organizar consórcios de desenvolvimento tecnológico (ainda mais quando os objetivos são a longo prazo), o modelo brasileiro deveria estimular o aumento da cooperação já existente entre universidades e centros de pesquisa e siderúrgicas. Ou seja, ao invés de buscar esforços entre todos os envolvidos como na União Europeia e Japão, estimular relacionamentos bilaterais, como verificado atualmente. Isto deve ser suficiente para os esforços de modernização, uma vez que os projetos na fronteira tecnológica parecem distantes dos interesses e das capacitações das siderúrgicas brasileiras.

Os dados do diretório de grupos de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) subestimam a cooperação efetiva entre as universidades e centros de pesquisa com as siderúrgicas brasileiras. De fato, informações de cunho qualitativo indicam que tais relações são relativamente intensas para os padrões brasileiros. Vale destacar que os sete programas de pós-graduação *stricto sensu* que receberam notas iguais ou superiores a cinco por parte Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) não apenas representam a elite acadêmica da cadeia minero-metalúrgica, como seu melhor desempenho decorre da mencionada interação.

Papel muito importante é desempenhado pela ABM no que tange ao intercâmbio do conhecimento técnico-científico no âmbito da cadeia minero-metalúrgica. A ABM é um foro privile-

giado para levar adiante as discussões sobre o paradigma da economia de baixo carbono para a siderurgia brasileira, inclusive visando a aumentar a intensidade da cooperação entre a academia e o setor produtivo.

4.6 Apostas do país em termos de desenvolvimento tecnológico e institucionalidade

A siderurgia brasileira não possui escala econômica, nem tampouco capacitação tecnológica, para levar a cabo projetos cooperativos da abrangência do ULCOS (União Europeia) e COURSE 50 (Japão), embora possa vir a participar de projetos cooperativos internacionais, se estes vierem a ser desenvolvidos. Além disso, cerca de 60% de sua capacidade encontra-se em poder de empresas estrangeiras, que tendem a privilegiar o desenvolvimento tecnológico em seus países de origem. Ademais, as empresas de capital local predominam no segmento de aços longos ao carbono, no qual a intensidade tecnológica é menor comparativamente aos demais segmentos.

Nesse contexto, as apostas em termos de desenvolvimento tecnológico deveriam se concentrar na adoção mais rápida possível das inovações desenvolvidas em outros países. Isto tem sido a trajetória histórica da siderurgia brasileira, tanto que as empresas entrevistadas não acreditam que teriam dificuldade para adquirir novos equipamentos com as novas tecnologias incorporadas. Consequentemente, a institucionalidade mais adequada para estimular a transição para uma economia de baixo carbono acaba privilegiando as regulamentações, sendo o Plano Indústria um passo relevante para isto.

Além da necessidade de manter o parque tecnológico atualizado, mesmo baseado em tecnologias desenvolvidas no exterior, duas oportunidades tecnológicas importantes referem-se ao aprimoramento tecnológico do parque guseiro e o desenvolvimento do Tecnored. Duas outras oportunidades, menos relevantes e de caráter mais gradualista, dizem respeito à redução da heterogeneidade intra-setorial (principalmente na etapa de redução) e à ampliação do uso de certos resíduos, como a escória de aciaria e as lamas de alto-forno e de aciaria.

4.7 Possibilidade de o Brasil participar do desenvolvimento e incorporação das novas tecnologias em nível internacional

As principais iniciativas de desenvolvimento de inovações radicais na siderurgia, no que concerne à redução de baixo carbono, são de cunho regional (ULCOS) ou nacional (COURSE 50). Mesmo outros esforços, de menor envergadura, também são de âmbito nacional, como os verificados nos Estados Unidos, Coreia do Sul, Austrália e Taiwan. Assim, no contexto atual, parece pouco provável que as siderúrgicas brasileiras possam participar de tais projetos, embora possam ser beneficiadas indiretamente por meio de suas controladoras (ArcelorMittal, na Europa, e Nippon Steel, no Japão, para citar apenas dois exemplos) ou mesmo de suas subsidiárias no exterior.

Quanto à incorporação de novas tecnologias adequadas ao paradigma da economia de baixo carbono, não se observariam barreiras relevantes, a médio e longo prazos, pois elas tenderiam a es-

tar incorporadas nos equipamentos. Portanto, se trataria mais de uma questão de preço a ser pago, do que de impedimento ao acesso. A única exceção, que confirmaria a regra, é o fato de a Posco estar desenvolvendo o Finex sem o objetivo de comercialização. Desta forma, o Finex seria uma tecnologia proprietária para uso exclusivo. Esta estratégia é ímpar no setor e não se antevê que venha a ser adotada com intensidade por outros competidores.

Conclusão final

1. A principal alteração até 2050 deverá ser o incremento da participação da aciaria elétrica na siderurgia mundial, permitindo a diminuição do consumo específico de energia e da emissão específica de CO₂;
2. A siderurgia brasileira continuará sendo uma indústria com baixa capacidade de levar a cabo inovações radicais, tendo o foco na adoção e otimização de tecnologias adquiridas junto aos fornecedores internacionais;
3. Em geral, no curto e médio prazos, não se vislumbram imposições de barreiras comerciais relevantes à siderurgia brasileira, nem tampouco dificuldades para a compra das novas tecnologias em tela;
4. A manutenção de situação intermediária da siderurgia brasileira em termos de desempenho energético e tecnológico, entre os países desenvolvidos, de um lado, e China e Índia, de outro, requererá grande volume de investimentos, em um contexto de reduzidas margens de lucro;
5. A siderurgia a carvão vegetal é uma peculiaridade da siderurgia brasileira. Embora seja positiva em termos de redução de CO₂, o segmento guseiro enfrenta sérios problemas no curto prazo, requerendo políticas específicas visando à modernização tecnológica de seu parque.

Referências Bibliográficas

- ASSUMPÇÃO, M. *et alii* (2011). Brazilian Iron and Steel Market Review: the financial market's perspective. *2nd CRU's Latin American Iron & Steel Trends Conference*. Rio de Janeiro: CRU;
- BAPTISTA FILHO, B. (2006). Brazil's Vocation as a Steel Supplier: slabs or finished products? *3rd Latin American Steel and Steelmaking Raw Materials Conference*. Rio de Janeiro: American Metal Market & Metal Bulletin;
- BASSON, E. (2012). The steel industry in a sustainable society. *3rd Annual Green Steel Strategies Conference*. Berlin: Steel Business Briefing (SBB);
- BONINI, M.R. (2011). Tarifas de Energia Elétrica: evolução nos últimos anos e perspectivas. *Boletim de Economia FUN-DAP*, v. 8, pp. 19-36;
- CGEE (2010). *Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE);

- COMIN, A. (2012). Plano Indústria. V Congresso Internacional do Alumínio. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio (ABAL);
- CORREA, L. & R. ANTUNES (2011). *Usiminas, Management Meetings: multiple challenges ahead; at current levels, we remain 2-EW*. São Paulo: Barclays Capital;
- DE PAULA, G. M. (1993). Competitividade da Indústria Siderúrgica. *Estudo da Competitividade da Indústria Brasileira*. Campinas e Rio de Janeiro: Instituto de Economia / Unicamp e Instituto de Economia Industrial / Universidade Federal do Rio de Janeiro;
- DE PAULA, G.M. (2002). Cadeia Produtiva de Siderurgia. *Estudo de Competitividade por Cadeias Integradas: um esforço coordenado de criação de estratégias compartilhadas*. Brasília: Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e Instituto de Economia da Unicamp;
- DE PAULA, G.M. (2008). Mineração e Metalurgia de Ferrosos. *Perspectiva do Investimento no Brasil*. Rio de Janeiro e Campinas: Instituto de Economia / Universidade Federal do Rio de Janeiro e Instituto de Economia / Unicamp;
- DE PAULA, G.M. (2011). *Siderurgia Internacional: uma retrospectiva de 100 reflexões*. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2011;
- FADEL, I. & C. LOURO (2011). *LatAm M&M Update #62: inventories down, but there's more to go*. São Paulo: Credit Suisse;
- GUTIERREZ, T. (2010). *Countdown to Carbon*. London: Steel Business Briefing (SBB Insight, 132);
- IABr (2012a). *Inventário das Emissões de CO₂ da Indústria do Aço*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil (IABr);
- IABr (2012b). *Relatório de Sustentabilidade 2010*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil (IABr);
- IABr (2012). *Relatório de Sustentabilidade 2012*. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil (IABr);
- IEA (2012). *Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a clean energy system*. Paris: International Energy Agency (IEA);
- MMA (2010). *Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (Sumário executivo);
- McCULLOCH, R. (2007). *Finex: new dawn or niche option for steelmakers?* London: Steel Business Briefing (SBB Insight, 44);
- WORLD STEEL ASSOCIATION (2012). *Sustainable Steel: at the core of the green economy*. Brussels: World Steel Association;
- WORLD STEEL DYNAMICS (2011). *Truth & Consequences # 63*. Englewood Cliffs: World Steel Dynamics.

Petróleo e Petroquímica

Eduardo Luiz Machado

Introdução

O objetivo dos estudos setoriais é possibilitar um maior detalhamento dos setores potencialmente mais afetados pela imposição de restrições sobre a emissão de gases do efeito estufa e por mudanças tecnológicas em direção a uma economia de baixo carbono. Para tanto, serão identificadas as tendências tecnológicas e produtivas que possam impactar profundamente os setores de petróleo e petroquímica.

Diversos produtos são derivados a partir do petróleo, sejam eles com finalidade energética, tais como gasolina, óleo diesel, querosene, gás natural, gás liquefeito de petróleo (GLP), ou com outras finalidades, como insumos para a indústria petroquímica na produção de polímeros plásticos, ou de utilização final como as parafinas e os asfaltos (Entschev, 2008).

Já o gás natural é utilizado como combustível industrial, veicular e doméstico; ou ainda, como matéria-prima nas indústrias siderúrgica, química e de fertilizantes.

A cadeia produtiva de petróleo e petroquímica engloba o conjunto de atividades econômicas relacionadas a exploração, produção, refino, processamento, transporte, importação e exportação de petróleo, gás natural, outros hidrocarbonetos fluidos e seus derivados. Divide-se em dois grandes blocos complementares: upstream (exploração e produção) e downstream (transporte, refino e distribuição).

A indústria petrolífera baseia-se em um recurso mineral não-renovável que constitui a principal fonte de energia mundial, sem produtos substitutos próximos, ao menos em toda gama de usos e aplicações. Tal fato confere ao petróleo uma demanda inelástica com relação ao preço. Outra característica importante é a tendência a verticalização da cadeia produtiva decorrente das elevadas economias de escala e escopo da atividade de refino e da diluição do risco associado à atividade de exploração e produção, bem como de integração horizontal, em função da distribuição desigual das jazidas no mundo.

A indústria petroquímica congrega a indústria de produtos químicos derivados do petróleo. Especificamente, corresponde à parte da indústria química que utiliza como matéria prima a nafta, gás natural ou hidrocarbonetos básicos extraídos do solo. O setor é um dos pilares de um parque industrial moderno, em função de seu papel como fornecedor de insumos para uma grande diversidade de bens.

O setor petroquímico apresenta a característica de uma indústria de processo¹ formada por uma cadeia de etapas produtivas distintas verticalmente relacionadas. Por meio de uma série de processos produtivos consecutivos, que utilizam como insumos primários os derivados de petróleo e gás natural, são fabricados produtos como parafinas, olefinas, nafteno e hidrocarbonetos aromáticos.

O refino de produtos básicos e intermediários (*crackers*) é conhecido como a 1ª geração da petroquímica. Estas unidades também são conhecidas como centrais petroquímicas. Pela facilidade

¹ Indústrias de processo são aquelas que adicionam valor aos materiais por meio da mistura, separação, conformação ou reações químicas (Fransoo e Rutten, 1994).

de logística de suprimentos, as centrais petroquímicas em geral localizam-se próximas de suas fontes de matérias-primas: refinarias de petróleo e campos de produção de gás natural. Já as unidades processadoras de polietileno, polipropileno, poliestireno, PVC, PET e outros produtos petroquímicos constituem a 2ª geração. No caso dos polímeros, os transformadores plásticos formam a 3ª geração, que fabrica embalagens, peças e componentes plásticos e utensílios domésticos, entre outros bens, para diversos segmentos de mercado.

A estrutura deste texto cobre aspectos relacionados ao quadro internacional (seção 1), quadro nacional (seção 2) e mudanças climáticas, institucionais e tecnológicas (seção 3).

1. Produção, consumo e comércio internacional

O total de reservas provadas de petróleo aumentou cerca de 23% nos últimos 10 anos, elevação esta decorrente principalmente do aumento do volume verificado na América do Sul e Central. Destaque-se que esta evolução é decorrente principalmente do crescimento das reservas da Venezuela, que praticamente triplicaram entre 2001 e 2011, tornando-a o maior detentor de reservas provadas a partir de 2010 (ANP, 2012).

Do ponto vista geopolítico, percebe-se que, em regra, os países produtores apresentam elevadas reservas, pouca tecnologia de ponta, reduzida base industrial, mercado consumidor pequeno e instabilidade política. Por outro lado, os países consumidores, em regra, apresentam baixo nível de reservas, tecnologia de ponta, base industrial consolidada, grande mercado consumidor e estabilidade institucional.

Em 2011, as reservas provadas mundiais de gás natural somaram 208,4 trilhões m³, um crescimento de 6,3% em relação ao ano anterior. A maior concentração de reservas provadas de gás natural está localizada no Oriente Médio, somando 80,03 trilhões m³ (38,4% do total).

No período entre 2002 e 2011, a oferta de petróleo no mundo se manteve relativamente estável, em um patamar próximo a 80 milhões de barris/dia. Por outro lado, a produção de gás natural vem continuamente se expandindo. Não existe uma expectativa para a próxima década de uma situação de escassez mundial destes dois produtos. De acordo com as projeções do Departamento de Energia dos EUA, DOE (2008a), as perspectivas para o consumo futuro de combustíveis líquidos indicam um ritmo de crescimento significativo, cerca de 1,2 % anuais, entre 2005 e 2030, sugerindo um aumento da demanda da ordem de 28,9 milhões de barris de óleo equivalente/dia neste período.

O refino mundial enfrenta atualmente o grande desafio relacionado ao abastecimento de uma demanda crescente por derivados de petróleo, associado ao aumento das restrições de acesso a reservas convencionais de petróleo e a crescente pressão da sociedade para redução do impacto ambiental na utilização dos combustíveis e em seu processo de fabricação (Gomes, 2008).

Em 2010, o tamanho do setor químico, em escala mundial, foi estimado em US\$ 3,3 trilhões, dentro do qual a petroquímica é o maior segmento com US\$ 1,3 trilhões (40%). Para os próximos

quatro anos, a taxa de crescimento da capacidade de produção de eteno é inferior ao crescimento esperado da demanda. Sua demanda cresce regularmente enquanto a oferta avança aos saltos, gerando desajustes estruturais que afetam a rentabilidade das empresas. Ao longo do tempo, o setor vem ocupando maior importância na economia do mundo moderno, já que sua base científica e seu dinamismo tecnológico permitem o barateamento constante dos produtos, a substituição de materiais tradicionais e a incorporação de novos usos e mercados.

1.1 Estrutura de mercado e concorrência

A indústria do petróleo e gás natural se caracteriza por ser um oligopólio, no qual as empresas precisam estar bem posicionadas quanto às reservas e protegidas da concorrência por barreiras à entrada, que em geral são de natureza estritamente legal, como *royalties*, direitos de propriedade mineral, monopólios de empresas estatais, de serviços ou de categorias profissionais (CECCHI, 1998).

As atividades dos vários segmentos da indústria petrolífera são intensivas em capital. No entanto, por ser uma indústria baseada na exploração e produção continuada de um recurso mineral não renovável, a intensidade de capital é mais significativa nestas duas fases, devido ao alto risco associado à atividade. Destaque-se também que os investimentos são elevados, de longa maturação e não podem ser fracionados facilmente. (Alveal, 2002).

A indústria petrolífera apresenta uma forte concentração e verticalização com atividades de amplitude mundial, multiprodutos, processos contínuos, intensivas em capital e escala. É tecnologicamente madura e a competitividade na indústria está associada fundamentalmente ao controle das reservas de óleo bruto e ao controle de seus mercados e da tecnologia de toda a cadeia.

Diante do crescimento da demanda mundial e da restrição de oferta de petróleos leves, as operações de refino tornaram-se mais complexas, com implantação de unidades de conversão de resíduos e de hidrotreatamento / hidrocrackeamento, que vêm permitindo a conversão de cargas mais pesadas (e mais baratas) em produtos de boa qualidade (Gomes, 2008).

Já o setor de gás natural possui uma dinâmica distinta da cadeia produtiva dos demais combustíveis fósseis em decorrência principalmente de seu elevado custo de transporte e armazenagem. Por possuir densidade muito inferior ao petróleo, para se obter conteúdo energético equivalente, o gás requer um volume centenas de vezes maior. O fato de ser encontrado em estado gasoso exige infraestrutura própria para seu manuseio. Estes dois atributos elevam o custo de transporte e de armazenamento. Além disso, a infraestrutura de dutos necessária envolve elevadas economias de escala e é específica. Desta forma, o custo de transporte do gás pode representar cerca de 50% do seu preço final, enquanto que, no caso do petróleo, esse percentual varia entre 5% e 10% (Guedes *et al.*, 2008).

Já a indústria petroquímica é caracterizada por grandes empresas e grandes unidades produtivas. O padrão competitivo do setor está vinculado a elevadas escalas de produção e ao uso intensivo do capital. Caracteriza-se pela elevada elasticidade-renda decorrente da incorporação de novos usos e consumidores à grande variedade de produtos existentes, bem como da contínua ampliação da

gama de produtos criada pelo desenvolvimento tecnológico. É um caso clássico de oligopólio concentrado, ao menos nas atividades de 1ª e 2ª geração.

Há uma inerente ligação entre o refino e a petroquímica, tendo em vista o encadeamento das atividades. Assim, a dinâmica do mercado de petroquímicos básicos afeta tanto a petroquímica quanto o refino. Deste modo, algumas empresas do setor seguem a lógica da integração vertical, atuando tanto no *upstream* quanto no *downstream*, buscando obter benefícios tais como alavancar as margens de refino, promover a otimização global das refinarias e produzir derivados de maior valor agregado. A alta interdependência entre os agentes envolvidos faz com que as unidades produtivas de 1ª e 2ª geração sejam geograficamente próximas.

A indústria petroquímica de 1ª e 2ª geração é intensiva em capital e recursos naturais, utiliza processos contínuos com pequenos graus de flexibilização da produção e tem necessidade de níveis de ocupação elevados. Assim, apresenta importantes barreiras à entrada de novos agentes, em função do elevado volume de investimentos necessários, do longo prazo de maturação, das economias de escala² e da exigência de matéria-prima a custos competitivos. Além disso, os investimentos ocorrem em ativos específicos, que não podem ser transacionados sem perda parcial ou total de seu valor. Ou seja, os elevados custos irrecuperáveis (*sunk costs*) dependem de retorno a longo prazo. A 1ª e 2ª geração petroquímicas caracterizam-se por serem fabricantes de produtos padronizados com especificações bem definidas e, predominantemente, classificados como commodities.

Nos segmentos de primeira geração, o amadurecimento da indústria e a existência de tecnologias consolidadas disponíveis para compra no mercado internacional fizeram a inovação perder espaço como componente central de competitividade (Bastos, 2009).

Os produtos das empresas de segunda geração podem ser divididos em três categorias: *commodities* (por exemplo, o óxido de eteno), *pseudo-commodities*, as resinas plásticas (PVC, polietileno, polipropileno, PET, etc) e as especialidades (resinas especiais e os plásticos de engenharia). As resinas plásticas são diferenciadas por diversas características tais como: resistência mecânica e química, resistência à luz e temperatura, facilidade de transformação, brilho e transparência, etc. Parte dessas características são intrínsecas ao composto químico. Outra parte é obtida ou aprimorada pelo processo de polimerização, enquanto uma terceira parte dessas características é introduzida ou melhorada pelo uso de aditivos durante a transformação das resinas puras em compostos finais. Algumas características ainda podem ser melhoradas (ou pioradas) no processo de transformação dentro das empresas de terceira geração.

O setor petroquímico engloba grandes grupos com presença internacional que têm nos produtos químicos a sua principal atividade ou, pelo menos, obtêm desses produtos parcela substancial de seu faturamento.

As grandes empresas internacionais são líderes em seus mercados, apresentam um perfil integrado e possuem em geral base sólida na produção de petroquímicos básicos (Furtado et al., 2002).

² A escala produtiva mínima economicamente viável de uma central petroquímica na década de 60 era de 180 mil toneladas/ano de eteno. Na década de 80, falava-se de 400 mil toneladas e na atualidade os números apontam para 700 mil toneladas do produto.

A estratégia comercial dessas empresas se caracteriza, por um lado, pelo domínio do mercado de produtos menos diferenciados por meio de uma política agressiva de preços e, por outro lado, pelo avanço em direção aos produtos mais diferenciados, cuja margem é mais atrativa.

Além dos grandes grupos, destacam-se ainda algumas empresas de menor porte, que derivam suas vantagens competitivas do domínio tecnológico ou do desenvolvimento de competências específicas. Essas empresas dedicam esforços expressivos nas atividades de desenvolvimento de produto e combinam uma forma de inserção calcada em mercados de menores dimensões e na atuação global nesses segmentos diferenciados

A petroquímica apresenta importantes particularidades em termos dos seus padrões de comércio internacional. Pode-se dizer que o seu padrão de comércio é desigual ao longo das diversas etapas da sua longa e diferenciada cadeia: acanhado nas etapas iniciais, reduzido nas etapas intermediárias (em função da complexidade logística de transporte de alguns produtos intermediários) e maior nas etapas a jusante, com os produtos finais ou mais específicos. Nestes, os coeficientes de comércio (medidos pela relação entre comércio e produção) tendem a ser bastante elevados para especialidades e para produtos mais novos, mas reduzidos para produtos mais padronizados (ECCIB, 2003).

1.2 Fatores críticos para a competitividade internacional

Em uma indústria integrada como a petrolífera, a estrutura e o comportamento de cada um dos setores podem influenciar o comportamento e os resultados dos demais. A integração vertical permite o planejamento de investimentos de acordo com as demandas do mercado, sendo mais necessária na determinação do nível de capacidade requerido para estabilizar preços e produção a longo prazo.

Nas atividades a jusante da cadeia petrolífera, destacam-se três características com papel fundamental na decisão de investimento: as economias de escala, a interdependência de operação e economias de escopo. Estes três fatores contribuem para as grandes empresas terem vantagem de custo sobre as empresas menores, levando no longo prazo à formação de um oligopólio ou até mesmo um monopólio em base local ou nacional (Cecchi, 1998).

Adicionalmente, o acesso aos recursos naturais (reservas) e tecnologia própria são fatores cada vez mais difíceis de serem conciliados na indústria, gerando gargalos para o crescimento de empresas e países. Kupfer *et al.* (2010) destacam como entraves a serem superados pela cadeia produtiva:

- i. Aumento dos custos relacionados à produção petrolífera;
- ii. Dificuldade de descobertas de grandes campos; e
- iii. Reduzida disponibilidade de reservas com formas contratuais favoráveis às empresas privadas.

De forma geral, o terceiro aspecto representa o conjunto de arranjos institucionais que condicionam o processo de investimento no setor de *upstream*, ao impor limites para a apropriação da renda petrolífera pelas empresas. Há dois tipos preponderantes de arranjo institucional: sistema de

concessões e sistema contratual. A principal diferença entre os dois sistemas refere-se ao direito da propriedade do óleo após a extração. No sistema de concessões, a propriedade do óleo é da empresa concessionária. Neste modelo o direito de propriedade é transferido do Estado para a empresa concessionária, como forma de compensá-la pelos gastos incorridos com as atividades de E&P, e com o pagamento da parcela governamental³. No sistema contratual, a propriedade do petróleo é do Estado, que pode compensar a empresa por meio da repartição da produção (partilha de produção) ou conceder um ressarcimento financeiro à empresa (prestação de serviços) (Kupfer *et al.*, 2010).

Em suma, o ambiente de investimentos na indústria petrolífera envolve desafios importantes no campo tecnológico, pautados pela perspectiva de manutenção de preços elevados, aumento da segurança nas atividades relacionadas à exploração e produção em reservas de petróleo não convencionais e crescimento das pressões para a utilização de técnicas de refino que levem à produção de derivados mais limpos.

Além das eficiências técnicas no plano da planta, quatro fatores são fundamentais para a competitividade da indústria petroquímica:

- i. Acesso a insumos e mercados consumidores com custos competitivos;
- ii. Ganhos de eficiência com pesquisa e desenvolvimento (P&D);
- iii. Economias de escopo e governança;
- iv. Custos do capital.

O primeiro desses fatores está diretamente associado à localização geográfica da planta industrial. Neste caso é preciso buscar um equilíbrio logístico entre o local de obtenção de matéria-prima e os centros consumidores, buscando minimizar os custos envolvidos.

A padronização dos produtos petroquímicos de 2ª geração aumentou a competição e reduziu as margens de lucro prevalentes no setor, levando as empresas a buscar inovações que permitam diferenciar seus produtos. Tal estratégia de diferenciação requer investimentos elevados em P&D. Dentro deste contexto, os processos de fusões e aquisições intensificaram-se a partir da década de 90, buscando a redução do risco e criando grandes conglomerados com atuação global.

A opção pela diferenciação da produção tornou as economias de escopo e de governança no processo produtivo de 2ª geração um fator chave para a competitividade dentro do setor. Por fim, em virtude do grande volume de investimentos em ativos específicos e P&D, o custo do capital é um fator de competitividade relevante na indústria petroquímica.

Assim, os aspectos competitivos para as firmas de 2ª geração estão relacionados a custos de produção/escala, a identificação de oportunidades tecnológicas, além de aspectos macroeconômicos (câmbio, tributação e incentivos fiscais) (ABDI, 2009).

O novo ciclo internacional de investimentos no setor baseia-se na grande seletividade, busca de escala e na integração da cadeia visando à otimização de capacidade e de processos, com

³ Tributos, royalties ou outras formas de participações governamentais.

maior utilização do gás natural e tecnologias que promovem maior integração do refino e da petroquímica (Moreira, 2008).

1.3 Dinâmica tecnológica

Existe uma grande variedade de alternativas tecnológicas para responder aos desafios atuais da indústria petrolífera, que podem ser sintetizados em três fatores principais: ambientais, em particular a resposta ao aquecimento global; fatores ligados à garantia e segurança do abastecimento energético; e fatores relacionados à perspectiva de esgotamento do petróleo (UFRJ, 2006).

O avanço dos requisitos ambientais, em todas as etapas do processo produtivo e na quantidade de poluentes emitidos pela queima de derivados, bem como a necessidade de se avançar sobre reservas não convencionais são os principais desafios tecnológicos impostos para a indústria petrolífera. Observam-se cinco importantes tendências em nível internacional:

- a. Aumento do volume de processamento de óleos não convencionais;⁴
- b. Crescimento da necessidade de processos de tratamento à base de hidrogênio (hidrotreatamento), como desnitrificação e dessulfurização⁵, em função do caráter restritivo das regulações ambientais;
- c. Aumento da competitividade por meio da redução dos custos operacionais e melhoria da qualidade dos seus produtos;
- d. Garantia de sustentabilidade ambiental⁶;
- e. Ampliação da participação de combustíveis renováveis na matriz energética.

Há uma tendência de exploração de áreas geológicas desfavoráveis, como no Golfo do México, águas ultraprofundas⁷ no Brasil, petróleo ultra pesado na Venezuela, depósitos de areia betuminosa no Canadá e gás de xisto nos Estados Unidos. Tal fato tem como consequência direta o aumento da complexidade dos projetos produtivos, exigindo o uso de tecnologias ainda imaturas e custos crescentes de exploração e desenvolvimento. Adicionalmente, percebe-se que a exploração e produção de óleos não convencionais terá impacto de reduzir a expectativa do preço futuro do barril de petróleo, bem como se espera um aumento da emissão de gases do efeito estufa.

Com efeito, a qualidade do petróleo, principalmente sua densidade e teor de enxofre, condiciona sua oferta futura e a estrutura de refino (Ernest & Young Terco, 2011).

4 A composição da oferta futura irá incorporar o petróleo não convencional (recuperação ampliada, areias petrolíferas e petróleo extra pesado) e a conversão de gás natural em combustíveis líquidos (*gas-to-liquids* - GTL), e conversão de carvão em combustíveis líquidos (*coal-to-liquids* - CTL).

5 Instalações de tratamentos de efluentes gasosos que diminuem, respectivamente, as emissões de óxidos de azoto e dióxidos de enxofre.

6 Utilização racional dos recursos naturais, sob a perspectiva do longo prazo. É caracterizada pela manutenção da capacidade do meio ambiente de prover os serviços ambientais e os recursos necessários ao desenvolvimento da sociedade de forma permanente.

7 Lâmina d'água de 1.500 a 3.000 metros.

Com a tendência de redução da produção de petróleo leve e ultraleve, projeta-se que o crescimento esperado da demanda será atendido pelo aumento gradual do volume de petróleo pesado. Tal situação acarreta a necessidade de aumento da capacidade de conversão nas refinarias para ampliar a oferta de derivados leves. Adiciona-se que, pelo menos no curto prazo, as fontes de petróleo não convencional apresentam custo de produção elevado (Ernest Young Terco, 2011).

Neste sentido, existe a necessidade da indústria petrolífera superar os desafios tecnológicos de incorporação e recuperação de reservas. A manutenção de preços elevados do barril de petróleo pode favorecer a adoção e o desenvolvimento de novas tecnologias. Novas tecnologias permitem a exploração de petróleo em águas profundas, o aproveitamento do petróleo de areias betuminosas e a exploração de gás de xisto. Estima-se a existência de 9 trilhões de barris de combustível fóssil não convencional no mundo, o que coloca dúvidas sobre o preço futuro do petróleo, além de reduzir os problemas geopolíticos atuais.

Desde a década de 1990, têm ocorrido inovações incrementais nos processos de prospecção e produção, por meio da utilização de novos instrumentos, computadores de alto desempenho e aplicação de técnicas avançadas de processamento de dados. Tais inovações permitiram a identificação de reservatórios de petróleo e gás natural em águas ultraprofundas no Brasil, Golfo do México e Costa da Guiné. (Ernest Young Terco, 2011). A exploração e o desenvolvimento em águas ultraprofundas consolidam um novo padrão tecnológico de produção de petróleo e gás natural, que utiliza sondas de elevado desempenho, com capacidade de perfuração de até 10.000 metros de profundidade total (Ernest Young Terco, 2011).

O petróleo não convencional produzido no Canadá encontra-se sob a forma de areia betuminosa, estando disponíveis duas tecnologias de produção de betume: *mining* e *in situ*. A primeira corresponde à mineração da areia betuminosa “a céu aberto”, sendo efetiva para o caso da extração em depósitos localizados próximos a superfície. A extração do petróleo nas areias betuminosas *in situ* emprega a tecnologia conhecida como drenagem gravitacional auxiliada por vapor (SAGD). Tal técnica consiste na injeção de vapor superaquecido para esquentar os depósitos de betume, tornando-o suficientemente líquido para ser coletado e bombeado para reservatórios de coleta na superfície. A técnica *in situ* é eficaz para depósitos localizados no subsolo (80% dos depósitos). Vale destacar o relativo avanço destas tecnologias, tendo em vista a tendência recente de redução dos seus custos médios.

Terminado o processo de extração do betume da areia, por qualquer uma das duas técnicas acima comentadas, é possível adicionar hidrocarbonetos leves ao betume e processá-lo para gerar óleo sintético mais leve, chamado syncrude, que pode ser vendido para refinarias convencionais.⁸

Duas tecnologias foram cruciais para viabilizar a exploração do gás de xisto: perfuração horizontal e fraturamento hidráulico. A primeira técnica permite o aproveitamento de reservas pouco

⁸ Os depósitos de betume no Canadá cobrem uma área total comparável ao tamanho da Escócia, sendo previsto que a produção de cru sintético e betume representem mais que 50% da produção do país até 2015 (Tavares, 2005).

profundas espalhadas por grandes áreas geográficas, por meio da perfuração horizontal do subsolo até se alcançar as formações de xisto. Já segunda consiste no bombeamento a alta pressão nos túneis escavados de uma mistura de água, areia e produtos químicos que rompem a rocha. O impacto produzido por esse jato de alta pressão produz pequenas fissuras nas rochas, liberando o gás que é posteriormente canalizado por dutos. Destaque-se que o gás de xisto era uma fonte de energia praticamente inexistente nos Estados Unidos em 2000, e que representa em 2013 mais de 25% da oferta de combustível no país.

Apesar dos avanços tecnológicos no processo de produção de óleos não convencionais, o preço elevado do petróleo constitui ainda uma variável central e restrição importante para viabilizar a produção. Note-se também a dependência em relação ao gás natural, pois o processo de separação do betume e o processamento do óleo sintético demandam, além de água, grandes quantidades de gás natural, configurando uma relação de dependência ao preço do gás. Por fim, é relevante a deterioração das condições ambientais, pois a produção e o processamento de óleos não convencionais ocasionam efeitos deletérios em relação à poluição do ar, desperdício de água, e devastação das superfícies (Kupfer, 2010).

Outro meio de ampliar as reservas é o avanço tecnológico no processo de recuperação do petróleo existente, hoje limitado a cerca de 35% do volume presente nos campos.

Em suma, a qualidade do petróleo mundial vem se deteriorado paulatinamente. Se por um lado a matéria-prima se torna mais pesada e com teor de enxofre mais elevado, por outro lado, a demanda por derivados leves/médios – gasolina e diesel – com teores de enxofre reduzidos vem aumentando. O aumento das restrições força a indústria petrolífera a investir em unidades de refino mais complexas para atender as novas especificações (Tavares, 2005).

A quantidade de processos de refino era pequena e de pouca complexidade, mas com o passar do tempo novas tecnologias foram incorporadas visando melhorar o rendimento da conversão das frações de petróleo, bem como alcançar níveis mais elevados de qualidade dos derivados e reduzir a geração de resíduos. Com a expectativa de elevação do preço do barril do petróleo e o aumento da importância dos óleos não-convencionais no cenário mundial, observa-se também um intenso esforço tecnológico para melhorar a sua conversão. Destaque-se que o aproveitamento economicamente viável dos óleos não convencionais só será possível com o aprimoramento de processos físicos e químicos que purificam esse petróleo de baixa qualidade.

A dificuldade de adequação da oferta à demanda na indústria do refino deve-se a baixa flexibilidade de uma refinaria. Uma vez construída para a utilização de determinados tipos óleos, modificações nas características para as quais foi projetada implicam em custos significativos (MASSERON, 1990).

Em função da baixa flexibilidade, o processamento do fundo de barril⁹ é considerado o estágio central das operações de refino, sendo o FCC (craqueamento catalítico em leito fluidizado) um importante processo, tanto do ponto de vista econômico quanto do ambiental, visto que utiliza como

9 Os processos de fundo de barril têm como objetivo utilizar algumas frações mais pesadas do petróleo e com seu processamento conseguir produtos com maior valor agregado e de maior utilidade para mercado consumidor (Corradi, 2008).

carga os gasóleos pesados de petróleo. Existe um número crescente de unidades em construção no mundo destinadas ao processamento de resíduos (Corradi, 2008).

Por outro lado, a cadeia petroquímica é impactada em escala mundial pelo cenário de elevado preço das matérias primas, que afeta principalmente a rota baseada em nafta, e pelo deslocamento do principal mercado consumidor de produtos petroquímicos para a China, direcionando o fluxo de investimentos em expansão da capacidade para o Oriente Médio e Ásia.

As inovações tecnológicas da indústria petroquímica ocorrem em geral nas empresas da 2ª geração. As empresas da 2ª geração são intensivas em escala e em capital e apresentam elevados investimentos em P&D e tendem a se instalar próximas às empresas da 1ª geração.

Tecnologias para o pré-tratamento do cru promovem uma melhora de qualidade do óleo antes mesmo que ele seja processado em uma refinaria, facilitando a obtenção de derivados mais leves. Da mesma forma, tecnologias para ampliar a conversão de gasóleos em petroquímicos são direcionadas a variações do FCC convencional (voltado para a produção de combustíveis), conhecidas como FCC petroquímico. Tal fato deve-se ao aumento da demanda por eteno e propeno. (Santos, 2006).

Pode-se citar como tecnologias emergentes: FCC petroquímico, *methanol to olefins* (MTO), acoplamento oxidativo de metano, metátese e *methanol to propylene* (MTP) (Pereira *et al*, 2007).

Além do processo de craqueamento da nafta e a separação do etano e propano do gás natural, tem-se atualmente a tecnologia de conversão do gás natural em olefinas, conhecida como GTO (*Gas to Olefins*). Nela, primeiramente é feita a conversão do gás natural em metanol e, posteriormente, a conversão do metanol em olefinas, principalmente eteno, propeno e buteno. O processo específico a partir do metanol é conhecido como MTO (*Methanol to Olefins*), e inclui o processo MTP (*Methanol to Propylene*).

Desde a década de 1970, o consumo energético específico do processo de produção de eteno diminuiu quase pela metade, graças a avanços tecnológicos como uma maior recuperação de calor dos vários efluentes do processo, uso integrado de super-aquecedores do vapor, emprego de máquinas rotativas de maior rendimento, bombas de calor e esquemas de refrigeração em múltiplos estágios e utilização dos gases efluentes de turbinas a gás como ar de combustão no reator de pirólise. Só esta última técnica tem produzido reduções no consumo energético total das plantas entre 10 e 20%. O emprego destas tecnologias pode propiciar em média, cerca de 20% de economia na seção de pirólise e mais 15% nas seções de compressão e separação (IEA, 2007).

Apesar de o polietileno ser o polímero de maior produção, o polipropileno vem apresentando as maiores taxas de crescimento, sendo obtido pela polimerização do propeno. Para a complementação da produção do propeno existem rotas alternativas, como o processo de metátese do eteno com o 2-buteno ou pelo processo MTO.

Percebe-se que as regulamentações governamentais em relação à qualidade dos derivados e a tentativa de redução da dependência dos combustíveis fósseis fizeram com que os refinadores enxergassem uma oportunidade de negócios nos produtos petroquímicos derivados do FCC (Santos, 2006).

2. Quadro nacional

2.1 Estrutura de mercado e concorrência

2.1.1 Setor petróleo e gás natural

A atividade petrolífera brasileira é marcada pela presença da Petrobras, que detém parcela significativa do mercado brasileiro em todas as atividades do setor. É a maior empresa de exploração e produção brasileira, sendo responsável pela estruturação da indústria de petróleo e gás natural no país. Até 1997, deteve o monopólio do setor.

A Lei 9.478, também conhecida como “Lei do Petróleo”, dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio de petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo (ANP). Retirou também o monopólio da Petrobras, autorizando outras empresas a atuarem nas atividades de exploração e refino. A partir de então, qualquer empresa, independente da origem do seu capital, poderia realizar atividades de exploração, produção, transporte, refino, importação e exportação de petróleo. A abertura total do mercado se concretizou em 2002, quando as distribuidoras se beneficiaram também da flexibilização da importação de derivados de petróleo.

As atividades *upstream* passaram, com a flexibilização do setor, a ser exercidas por meio de contratos de concessão entre o órgão regulador e os concessionários. A relação contratual implica para o concessionário a obrigação de explorar e produzir petróleo ou gás natural em determinado bloco, conferindo-lhe a propriedade desses bens, depois de extraídos, com encargos relativos ao pagamento dos tributos incidentes e das participações legais ou contratuais correspondentes (Campos, 1998).

Mudanças relevantes ocorreram também a *downstream* na cadeia produtiva:

- i. Alteração da estrutura de formação dos preços dos derivados nas refinarias;
- ii. Extinção do mecanismo de equalização de preços ao consumidor no território nacional;
- iii. Introdução de livre acesso a oleodutos, tanques e terminais.

Com a reforma da política energética brasileira, o setor de petróleo experimentou novo formato a partir da presença de outras empresas, com ampliação da participação do setor privado.

Por outro lado, a abertura do mercado brasileiro atraiu outras empresas, promovendo o aumento da concorrência na atividade de distribuição e comercialização de derivados de petróleo.

O gás natural deve tornar-se mais relevante na oferta de energia no Brasil ao longo do tempo. Em geral associado à produção de petróleo, sua utilização será ampliada com a entrada em operação dos campos do pré-sal e a expansão das redes de distribuição do produto. Parte do gás associado ao petróleo não é aproveitada, sendo queimada, por falta de infraestrutura de escoamento. Observa-se

que a regulação da ANP estabelece um limite para queima, que não pode exceder 3% da produção, de modo a favorecer a implantação de infraestrutura de escoamento do gás natural nos sistemas de produção do pré-sal (Ernest & Young Terco, 2011).

Até 1995, o mercado de gás natural possuía uma única empresa (Petrobras) operando em toda a cadeia do gás. Desde então, as Emendas Constitucionais nº 5 e 9 transferiram aos estados o controle da atividade de exploração, que pode ser feita de forma direta ou mediante concessão dos serviços locais de gás canalizado. Tal fato permitiu a entrada de empresas privadas na geração de energia e na importação, exportação e transporte de gás natural (Guedes *et al.*, 2011).

Apesar de o monopólio legal da Petrobras ter sido eliminado, ele ainda ocorre a montante na cadeia produtiva, na produção e no transporte. A empresa detém a maioria das concessões de explorações de campos existentes e a totalidade da infraestrutura de gasodutos entre os campos de exploração e os mercados consumidores. Adicionalmente, a Petrobras detém 51% de participação na TBG, empresa controladora do gasoduto Brasil-Bolívia. Ou seja, é a única companhia a operar na exploração e transporte de gás natural para comercialização, sozinha ou em parceria com a iniciativa privada e ainda possui forte participação em diversas empresas de distribuição do produto aos consumidores finais (Guedes *et. al.*, 2011).

A regulamentação da Lei 11.902 (Lei do Gás) em 2010 criou um novo marco regulatório que irá contribuir para atrair investidores privados para a construção e ampliação da rede nacional de dutos em virtude do aumento da segurança jurídica. A lei prevê o regime de concessão para os novos dutos, bem como o regime de autorização (que dispensa licitação)(Ernest & Young Terco, 2011).

2.1.2 Setor petroquímico

Na construção do parque petroquímico brasileiro, além do Estado (via Petroquisa) foram mobilizados vários grupos econômicos nacionais e estrangeiros. O modelo geral previa que as plantas de 2ª geração seriam construídas com aportes iguais de grupos privados nacionais e estrangeiros, e do Estado. Por sua vez, a construção das centrais (1ª geração) foi liderada pelo Estado, mas com participações das firmas de 2ª geração.

O setor petroquímico brasileiro encontra-se distribuído em três polos principais. São eles:

- a. Polo de Camaçari, localizado no Estado da Bahia;
- b. Polo de São Paulo, localizado em Capuava, no Estado de São Paulo; e
- c. Polo de Triunfo, no Estado do Rio Grande do Sul.

Os três polos utilizam nafta, produzida pela Petrobras (cerca de 70%) ou importada de fabricantes de produtos de primeira geração. Um quarto polo petroquímico existe em Duque de Caxias, no Estado do Rio de Janeiro, gerando etano e propano derivados do gás natural extraído pela Petrobras na Bacia de Campos.

As empresas nacionais mais relevantes do setor petroquímico concentram-se na fabricação de resinas termoplásticas e no estágio a montante da cadeia, especificamente nas centrais de matérias-primas¹⁰. Embora o país tenha alcançado a autossuficiência na produção de petróleo, ainda depende da importação de cerca de um terço da nafta consumida e da importação de petroquímicos intermediários não produzidos no país (Bastos, 2009).

2.2 Competitividade internacional

A cadeia produtiva de petróleo e gás natural brasileira enfrentará nas próximas décadas alguns desafios. Destaca-se a necessidade de reconstruir e expandir a cadeia local de fornecedores, internalizando a indústria de bens e serviços e agregando valor ao produto final.

Com vistas à exportação de produtos mais elaborados, necessita-se retomar os investimentos em refino e petroquímica. Conseqüentemente espera-se um maior desenvolvimento do parque industrial do país, em decorrência do aumento nas encomendas de equipamentos e serviços.

Oliveira (2008) conclui que a principal fragilidade das empresas brasileiras é a menor capacidade tecnológica. De modo geral, são licenciadoras de tecnologias de empresas líderes internacionais, ou então, filiais de empresa multinacional. As empresas domésticas ocupam os segmentos de menor complexidade tecnológica, sendo a parte restante importada de fornecedores internacionais.

Por outro lado, o Brasil possui algumas vantagens competitivas importantes neste contexto, uma vez que o país desenvolveu tecnologia e conhecimento para operar em águas profundas, possui base industrial consolidada e diversificada, apresentou descobertas recentes de grandes reservas na região do pré-sal, além de desfrutar de estabilidade econômica e política, economia em crescimento com um grande mercado consumidor e regras de mercado bem definidas.

A descoberta de novas jazidas em águas ultraprofundas das Bacias de Santos, Campos e Espírito Santo criou uma nova fronteira para a indústria de petróleo e gás natural. A camada pré-sal colocou o país em um novo patamar no mercado internacional de petróleo e gás natural, ampliando suas reservas provadas e criando a expectativa de duplicação da capacidade de produção até 2020 (Ernest & Young Terco, 2011).

Por outro lado, o desafio tecnológico e a complexidade da operação de extrair petróleo a profundidades elevadas fazem com que a exploração sob estas condições geológicas amplie o número de unidades de produção em cada campo. Paralelamente, a infraestrutura logística para o transporte do produto a distâncias de cerca de 300 km da costa consiste em um grande desafio a ser vencido. Estima-se que US\$ 400 bilhões serão investidos até 2020, incluindo toda a infraestrutura de transporte necessária. Entre os investimentos divulgados estão: Petrobras, US\$ 33 bilhões (2010-2014); BG Group, US\$ 30 bilhões; Repsol YPF, US\$ 14 bilhões (Ernest & Young Terco, 2011).

¹⁰ Cada polo industrial possui uma só produtora de produtos de primeira geração, conhecida como “central de matérias-primas”. O objetivo é produzir os petroquímicos básicos que servirão de matérias-primas para a produção dos produtos intermediários petroquímicos.

Por outro lado, para o Brasil aumentar a competitividade em produtos petroquímicos, torna-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias no sentido de se conseguir obter a nafta a partir das reservas existentes de óleos pesados e ultra pesados e, futuramente, aumentar a oferta de gás natural, devido à descoberta da camada do pré-sal.

No primeiro caso, está prevista a geração de produtos petroquímicos básicos, as olefinas geradas a partir da nafta e/ou do gás natural e os aromáticos da nafta. Ao entrar em operação, o Comperj deverá levar a uma substancial expansão da oferta destes produtos a partir do petróleo nacional pesado e também do gás natural.

2.3 Perfil tecnológico

A indústria do petróleo e gás natural apresenta um sistema setorial de inovação composto por um grupo heterogêneo de atores, a saber, governo, instituições de pesquisa e empresas articulados entre si (Silva, 2006).

Com relação à capacitação tecnológica, a partir da análise de dados da PINTEC (IBGE), verificou-se que as empresas para-petrolíferas desenvolvem, em média, inovações de produto e processo em ritmo superior à média da indústria. Porém, tais valores estão abaixo dos patamares de empresas para-petrolíferas no mundo. Além disso, as firmas adotam o modelo *“learning by doing”* para adquirir informações tecnológicas, relegando as atividades de P&D a um segundo plano.

Em suma, há um déficit significativo de competitividade no Brasil, vinculado à fragilidade da engenharia nacional e à baixa capacidade tecnológica de inovação. Tal déficit distribui-se de forma diferenciada entre os segmentos, visto que alguns apresentam competitividade em nível internacional, enquanto outros possuem lacunas produtivas relevantes que restringem a capacidade de suprir de forma adequada o mercado doméstico.

2.3.1 Setor petróleo e gás natural

As perspectivas trazidas pelas descobertas do pré-sal colocam um enorme desafio tecnológico para a indústria petrolífera brasileira, na medida em que se faz necessário não somente acessar os hidrocarbonetos, mas, sobretudo, efetivar a sua extração a custos viáveis em termos econômicos (Kupfer *et al.*, 2010).

A exploração e o desenvolvimento da produção do pré-sal vão demandar imensa quantidade de recursos financeiros, humanos e tecnológicos. Além de localizados em grande profundidade, os reservatórios são constituídos por rochas formadas por carbonatos, mais heterogêneas e instáveis do que nas perfurações em camadas pós-sal. Há ainda a dificuldade de cruzar dois quilômetros de sal para alcançar os reservatórios. Em função da natureza plástica do sal, a coluna de perfuração pode ser fechada, danificando o aço usado na operação. Novas ligas mais resistentes vêm sendo desenvolvidas para superar este problema. Adicionalmente, o petróleo extraído do pré-sal apresenta

alto teor de dióxido de carbono, o qual combinado com a água forma ácido carbônico, que ataca o revestimento dos equipamentos, corroendo o aço (Ernest & Young Terco, 2011).

De todo modo, segundo Kupfer *et al.* (2010) as atividades de exploração e prospecção na camada do pré-sal não constituem propriamente uma novidade na indústria petrolífera mundial. Nos últimos 10 anos, experiências bem sucedidas na exploração de óleo em camada do pré-sal no Golfo do México indicam a relativa viabilidade em lidar com os desafios impostos por esta fronteira exploratória.

Apesar do histórico positivo da indústria em nível global, algumas particularidades dos reservatórios do pré-sal brasileiro indicam, para a indústria nacional especificamente, um contexto repleto de desafios, que segundo Kupfer *et al.* (2010) podem ser agrupados em cinco grandes áreas:

- i. *Caracterização e engenharia de reservatórios*: interpretação da sísmica; caracterização interna dos reservatórios; factibilidade técnica da injeção de gás, água e CO₂ para recuperação secundária; e geomecânica das rochas adjacentes em estágio de depleção.
- ii. *Completação e perfuração de poços*: desvios de poços na zona salitre e gerenciamento do CO₂, altamente corrosivo para os materiais.
- iii. *Engenharia submarina*: qualificação dos *risers* (tubulações flexíveis que levam petróleo e gás do poço às plataformas) para operação em profundidade de 2.200 metros, considerando o CO₂ e a elevada pressão;
- iv. *Unidades flutuantes de produção*: ancoramento das unidades, considerando profundidade de 2.200 metros e conexões com o sistema de *risers*;
- v. *Logística para o gás associado*: desenvolvimento de materiais para equipamentos expostos a fluxos gasíferos com elevadas concentrações de CO₂, e de dutos com mais de 18" em profundidade de 2.200 metros.

Os desafios elencados impõem a indústria petrolífera nacional a necessidade de buscar soluções inovadoras, buscando aproveitar as oportunidades para o retomada dos investimentos na indústria para-petrolífera brasileira (Kupfer *et al.*, 2010).

Outro desafio tecnológico abrange à área de tecnologia da informação (TI), mais especificamente envolvendo as operações de recuperação de petróleo dos reservatórios, engenharia de poços, detecção de CO₂ em rochas, escoamento do petróleo e a longa distância da costa. Tais processos requerem o acompanhamento de redes de computadores, buscando minimizar o risco da atividade como um todo. Além da gestão de conhecimento, a área de TI é responsável pela armazenagem e transmissão de informações e por garantir o relacionamento colaborativo entre profissionais (Ernest & Young Terco, 2011).

A localização dos blocos de exploração exigirá soluções inovadoras de logística para a movimentação de pessoas, materiais e equipamentos. A Petrobras avalia a construção de bases em alto-mar para abrigar postos de abastecimento, armazéns, heliportos e alojamentos. Da mesma

forma, a infraestrutura de apoio *offshore* e marítimo exige investimentos em ampliação de portos e aeroportos e nos setores naval, hoteleiro e imobiliário. No caso da estrutura portuária, a sua ampliação depende de investimentos também nas malhas rodoviária e ferroviária e na desburocratização (Ernest & Young Terco, 2011).

Outros segmentos da indústria de petróleo e gás (de refino e comercialização de combustíveis) também vão necessitar de modernização e construção de novas refinarias, rodovias, ferrovias e gasodutos. A ampliação do parque de refino nacional é fundamental para agregar valor à indústria petrolífera.

Para ter sucesso na superação dos desafios, exige-se que a base de conhecimento tecnológico se consolide de forma permanente no país. Neste sentido, destaque-se as Redes Temáticas e Núcleos Regionais da Petrobrás, que identificaram temas estratégicos na área de petróleo e gás, conseguindo formar uma rede de colaboração com instituições espalhadas por todo o país.

2.3.2 Setor petroquímico

Segundo a ABDI (2009), a taxa de inovação do setor petroquímico é semelhante à da indústria brasileira. Tal comportamento é refletido pelas taxas de inovação de produto novo para o mercado (13%, contra 5% da média da indústria) e de processo novo para o mercado (2%, contra 3%). O padrão de inovação do setor, baseado em aquisição de máquinas e equipamentos, se reflete nos reduzidos níveis de investimento em P&D, que representam apenas 0,55% do faturamento, em contraste a uma taxa de 0,66% na média industrial.

Observam-se, duas fortes tendências na indústria petroquímica nacional relacionadas entre si: a integração com o refino e a busca de alternativas para a nafta, como matéria-prima cada vez mais cara e escassa no Brasil e no exterior (VIGLIANO, 2008). Culminando com esta tendência, planeja-se a entrada em operação do Comperj, em 2014, onde refinaria e petroquímicas de 1ª e 2ª gerações estarão fundidas em uma única planta: os produtos serão fabricados diretamente a partir do petróleo, sem a necessidade de se craquear a nafta e o etano. O complexo deverá produzir 3,3 milhões de t/ano de resinas termoplásticas.

As empresas de primeira geração são produtoras de *commodities*. Nessas empresas o esforço tecnológico atual é fortemente voltado para o aumento de eficiência de processo, tanto para aumento de produtividade como para melhoria no grau de pureza do produto, através principalmente do desenvolvimento de melhores catalisadores e do controle de processo. A inovação nessas empresas está localizada principalmente em esforços de melhoria de processos: eficiência energética e redução de efluentes e controle de processos. Para essas atividades, elas empregam corpo técnico reduzido, que divide seu tempo entre a operação e o desenvolvimento, e lançam mão com certa frequência de acordos com universidades e centros de pesquisa para o desenvolvimento de novas soluções.

No que tange ao desenvolvimento de novos produtos, as empresas de segunda geração mantêm seu olhar em dois pontos: no mercado final que consome os produtos plásticos, e nas empresas de terceira geração, seus clientes, que têm demandas específicas. A inovação nessas empresas está

centrada em três aspectos: desenvolvimento do processo, desenvolvimento de catalisadores e desenvolvimento de aditivos. Parte do esforço tecnológico é interno, enquanto outra parte é obtida de fontes externas. As empresas de segunda geração funcionam como líderes ou coordenadores do processo de desenvolvimento. Levam as necessidades levantadas junto às empresas de terceira geração para os fornecedores de aditivos, coordenam esforços com os fornecedores de equipamentos e fornecem insumos, instalações e pessoal especializado para a busca das soluções.

Por meio de vultosos investimentos, o parque brasileiro de refino vem aumentando significativamente a sua capacidade de utilização de petróleo nacional e se adapta para uma maior produção de destilados médios (diesel e querosene) com baixo percentual de enxofre. Os principais investimentos realizados foram dirigidos à adaptação das unidades e à instalação de unidades de conversão profunda (coqueamento retardado) para aumentar a utilização e o rendimento de petróleos pesados e ácidos em produtos de alta qualidade, aprimorada em unidades de hidrotreatamento (Gomes, 2008).

3. Mudanças Climáticas, Institucionais e Tecnológicas

A evolução da matriz energética mundial nas próximas décadas é fator crucial para o entendimento da transformação que a cadeia produtiva de petróleo e gás irá enfrentar no curto e longo prazos em direção a uma economia de baixo carbono. Atualmente, o sistema energético internacional é fortemente dependente do uso de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás). Cerca de 80% do consumo mundial de energia se originam dessas fontes, que apresentam uma taxa de crescimento anual de cerca de 2% (média em 20 anos).

Dentro do contexto mundial de emissão de gases de efeito estufa (GEE), o Brasil encontra-se em uma situação diferenciada em relação ao resto do mundo, consequência direta da matriz energética altamente renovável. Entretanto, apesar da matriz energética favorável do ponto de vista ambiental, o Brasil ocupa o terceiro posto entre os maiores emissores de GEE do mundo, totalizando 2,2 bilhões de tCO_{2eq} , que representa 5,0% das emissões globais, em virtude de mudanças do uso da terra, mais especificamente do desmatamento. (Instituto Acende Brasil, 2012).

3.1 impactos ambientais setoriais

A questão ambiental¹¹ se coloca como fundamental na atividade industrial em todo o mundo, com particular ênfase nas indústrias de petróleo e petroquímica, ambas potencialmente muito agressivas ao meio ambiente.

A exploração de um novo campo de petróleo altera significativamente as características socioeconômicas de uma região. Ao mesmo tempo, tem efeitos acentuados no meio ambiente. A exploração, prospecção e produção em terra provocam alterações que levam ao aumento da degrada-

11 Segundo Silva Júnior (2006) a questão ambiental refere-se aos impactos ambientais causados pelos serviços prestados, seja por sua atuação direta, seja pelo repasse desse impacto para os seus stakeholders.

ção do solo. No mar, há o risco permanente da ocorrência de vazamentos do óleo, que afetam toda a fauna e a flora marinha. Por fim, na fase de combustão dos derivados para a geração de energia, o grande fator de impacto ambiental é a emissão de gases poluentes, alguns deles responsáveis pelo efeito estufa. Tais fatos fazem com que toda a cadeia produtiva do petróleo seja submetida a forte controle por meio de legislações ambientais cada vez mais rígidas no mundo.

Estima-se que cada barril de petróleo extraído produza cerca de 536 kg de CO₂, o que faz com que a indústria de petróleo seja uma grande emissora de CO₂ na atmosfera. Destaque-se que 83 kg de CO₂ são diretamente emitido pelo setor, sendo o restante proveniente do uso dos derivados.

As emissões de CO₂ representam a maior quantidade de gases no âmbito da indústria do petróleo e gás, provenientes principalmente do processo de queima e de combustão. Cerca de 96% das emissões totais de CO₂ vem de processos de tratamento, enquanto atividade como perfuração representam somente 3% do total de CO₂ emitido. Por outro lado, quando se utiliza como base de comparação o volume total de CO_{2,eq} emitido, observa-se que a atividade de exploração e produção é responsável por 37% das emissões, o refino por 40% e o restante decorrente da distribuição, exploração e transporte do gás natural e outros.

Já as emissões de CH₄ representam 5% do total emitido na indústria de petróleo e gás. Elas são provenientes principalmente de fugas e descargas e da combustão incompleta de hidrocarbonetos, representando 98% do total emitido. Atividade de perfuração é responsável por apenas 2% do total de emissões de CH₄.

Com a relação à exploração do pré-sal, não se tem informação precisa sobre o potencial de emissões durante o processo de extração e transporte do petróleo para a costa e nem da concentração de CO₂ presente nos novos poços. Adicionalmente, as novas plantas de processo do pré-sal podem tratar, separar e reinjetar o CO₂ no próprio reservatório produtor para armazenamento geológico.

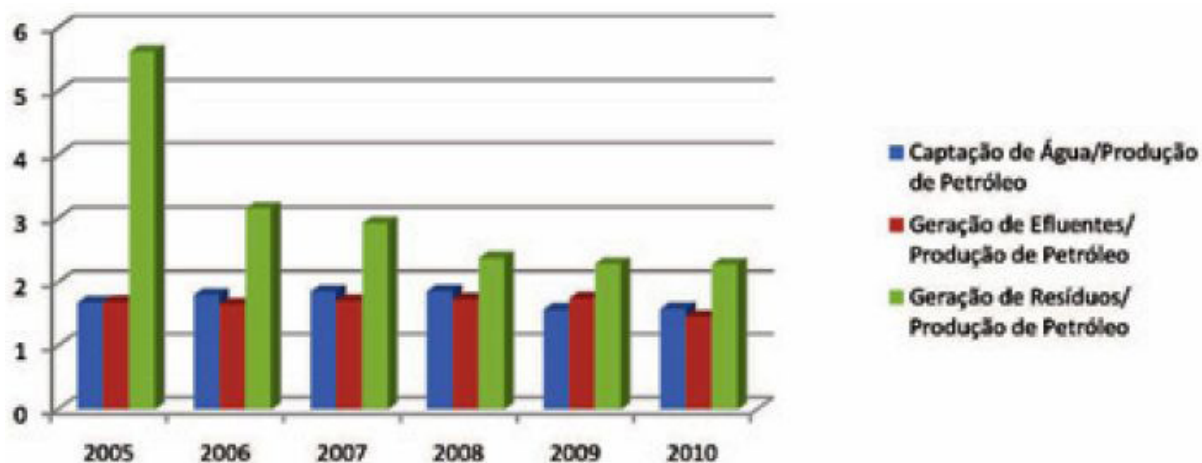
Um elemento importante é o fato de o setor utilizar matéria-prima fóssil que gera impacto ambiental em sua extração. Suas operações geram efluentes que contribuem para a poluição do ar, do solo e da água.

O Gráfico 1 apresenta a evolução de indicadores do desempenho da indústria de petróleo e gás no Brasil. Com relação à água, observa-se que a relação captação de água/produção de petróleo declinou ao longo do período. Mesmo resultado pode ser observado quanto à geração de efluentes e geração de resíduos (CNI,2012).

Por esse motivo, as empresas do setor sofrem com desconfiança e críticas da opinião pública e são constantemente monitoradas pelos órgãos governamentais e organizações da sociedade civil preocupadas com o meio ambiente. Ademais, o crescimento dos centros urbanos fez com que instalações de produção anteriormente isoladas se encontrem hoje em meio a áreas densamente povoadas¹², o que impõe restrições quanto à emissão de efluentes.

12 Polo petroquímico de Capuava, em Santo André, SP.

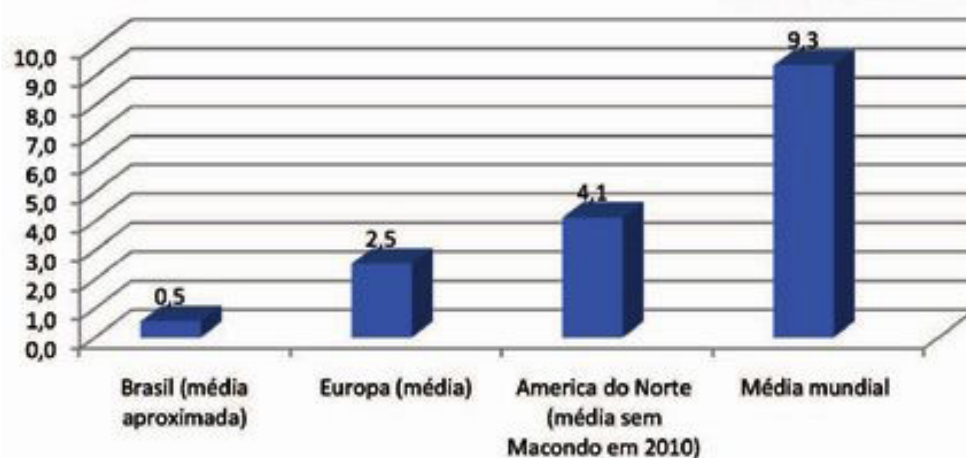
Gráfico 1 Índice de desempenho ambiental do setor petróleo e gás
(água e efluentes – m³/103 m³; resíduos – t/103 m³)



Fonte: CNI (2012)

Alguns dos últimos acidentes e episódios de dano ambiental de grande repercussão na mídia, tanto no Brasil como no Exterior, estão associados à indústria petroquímica e a seu principal fornecedor, a indústria do petróleo¹³. Com relação aos derrames de petróleo e derivados para o meio ambiente, o segmento de E&P da indústria brasileira de petróleo e gás é inferior à média mundial, como apresentado na Gráfico 2.

Gráfico 2 Volume derramado na atividade de E&P
(t vazadas/106 t de produção de hidrocarbonetos)



Fonte: CNI (2012)

¹³ Por exemplo, Bophal em 1984, Exxon-Valdez em 1989, Baía da Guanabara, Rio Iguaçu em 2000, Shell-Paulínia em 2001, Golfo do México – BP em 2010 e Bacia de Campos – Chevron em 2011.

As refinarias de petróleo são fontes de poluição aérea, emitindo, principalmente, compostos aromáticos, material particulado, óxidos nitrogenados, monóxido de carbono, ácido sulfídrico e dióxido de enxofre. As emissões podem ser provenientes de vazamentos de equipamentos, processos de combustão a altas temperaturas, aquecimento de vapor e de outros fluidos e transferência de produtos.

A contribuição à emissão de GEE dos processos de extração, transporte e processamento de petróleo e gás natural é contabilizada no capítulo de Emissões Fugitivas do Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). As emissões incluem as fugas de metano (CH_4) durante os processos de extração (*venting*), transporte e distribuição por dutos e navios e durante o processamento nas refinarias. São também consideradas as emissões de CO_2 por combustão não útil (*flaring*) nas plataformas de extração de petróleo e gás natural e nas refinarias (CNI, 2012).

Além disso, as refinarias contribuem para a contaminação de lençóis freáticos, pela emissão de rejeitos líquidos contaminados (amônia, sulfetos e outras substâncias). Já a contaminação de solos decorrente do refino do petróleo é pouco significativa quando comparada com o potencial de contaminação do ar e da água.

Assim como outras indústrias estão sujeitas a limites de emissões mais rígidos, as especificações relacionadas à emissão de poluentes por parte de fontes móveis (carros, ônibus, etc.) e fontes fixas (indústrias) estão se tornando cada vez mais restritivas, e, conseqüentemente, encarecendo os derivados de petróleo que devem ter menor percentual de enxofre e emitir menos material particulado.

Uma refinaria ultramoderna, com capacidade elevada de conversão, que produz produtos de elevada qualidade e que gera pouca quantidade de emissões, requer um investimento maior. Especificações mais rígidas de derivados de petróleo, ao exigirem adaptações nas instalações de refino, comprometem, muitas vezes, a sobrevivência das refinarias, o que eleva a margem das que permanecem no mercado (Tavares, 2005).

A questão ambiental impacta não somente a operação das empresas do setor, mas ameaça também seus produtos. Esses são matérias-primas para a produção de plásticos, materiais não-biodegradáveis, que assim produzem problemas em seu descarte. Por esse motivo, existem hoje pesquisas de materiais plásticos produzidos a partir de substâncias de origem vegetal, com velocidade de degradação muitas vezes superior aos plásticos de origem petroquímica. Os novos materiais apresentam duas vantagens importantes: são provenientes de fontes renováveis de matéria-prima e são biodegradáveis. Devido às preocupações ambientais, a médio e longo prazo os bioplásticos poderão substituir os plásticos petroquímicos em diversas aplicações, particularmente nas embalagens descartáveis.

Muitas empresas petrolíferas têm investido na minimização dos impactos ambientais causados pela extração do petróleo, com iniciativas como: o sequestro geológico de carbono (RAVAGNANI, 2007), a eliminação da queima do gás (conhecido por *flaring*) nas plataformas; e o desenvolvimento de energias que possam, mesmo em pequena escala, substituir o uso de combustível fóssil em algumas aplicações.

Pensando no conjunto da cadeia de suprimentos e das companhias de petróleo, um ponto fundamental é incluir requisitos de sustentabilidade nas operações dos fornecedores locais que serão chamados a operar para que a atividade cumpra as exigências de conteúdo local. As atuais regras de conteúdo local não mencionam o tema sustentabilidade ambiental. Uma iniciativa interessante seria dispor de instalações para destruição e tratamento dos resíduos adicionais gerados com a operação do pré-sal. As instalações atuais não comportam mais resíduos da atividade, formados principalmente por petróleo e toda sorte de produtos químicos. Outra é o monitoramento ou controle sobre emissões de resíduos de toda a cadeia do pré-sal (Ernest & Young Terco, 2011).

Quanto ao risco de acidentes, a gestão de risco deve considerar mais o impacto do acidente do que a chance de ocorrência, que é em geral baixa. Então, mesmo com baixa probabilidade, o impacto eleva muito o risco da atividade. Assim, as empresas deverão tomar medidas efetivas para evitar que eles ocorram, sem economizar, por exemplo, na manutenção dos equipamentos. O custo dessa manutenção é alto e nem sempre prioritário (Ernest & Young Terco, 2011).

Por fim, uma iniciativa também recomendável às empresas é o fortalecimento das parcerias com as comunidades do entorno do negócio e organizações não governamentais dedicadas à proteção do meio ambiente, para ações mais efetivas. (Ernest & Young Terco, 2011).

Algumas companhias petrolíferas já partiram para a criação de departamentos para cuidar de áreas contaminadas, eficiência energética e mudanças climáticas. Essa é uma tendência que deve se consolidar, assim como a inclusão da questão da responsabilidade socioambiental e de saúde pública no planejamento estratégico da empresa, considerada indissociável dos negócios (Ernest & Young Terco, 2011).

As emissões atmosféricas das refinarias incluem emissões fugitivas dos compostos voláteis presentes no óleo cru e nas suas frações, emissões decorrentes da queima de combustíveis nos aquecedores de processo e caldeiras, além das emissões geradas nas unidades de processo. O primeiro tipo, emissões fugitivas, acontece em toda a refinaria, sendo provenientes de válvulas, bombas, tanques, válvulas de alívio, flanges, entre outros. Apesar de individualmente ocorrerem em pequeno volume, a soma total dessas emissões em uma refinaria pode ser extremamente elevada (Garcia, 2010).

Existem diversas técnicas para reduzir essas emissões, que incluem o uso de equipamentos com maior resistência a vazamentos, diminuição do número de tanques de armazenamento e de outras fontes potenciais, utilização de tanques com teto flutuante, e o estabelecimento de programa de detecção e reparo de vazamentos (Mariano, 2001).

O segundo tipo de emissões decorre do aquecimento das correntes de processo ou da geração de vapor nas caldeiras para aquecimento ou retificação com vapor. Tal atividade pode levar a emissão de CO, SO_x, NO_x, material particulado e de hidrocarbonetos. Em geral, quando operado de maneira adequada ou quando são queimados combustíveis limpos (gás de refinaria, óleo combustível ou gás natural) e quando os equipamentos são construídos com as especificações corretas e mantidos de maneira adequada as emissões são relativamente pequenas. Caso contrário, as emissões podem se tornar significativas (Garcia, 2010).

A maior parte das correntes gasosas que deixam as unidades de processo das refinarias contém quantidades variáveis de gás de refinaria, gás sulfídrico e amônia. Tais correntes são usualmente coletadas e enviadas para as unidades de tratamento de gás e de recuperação de enxofre, com a finalidade de se recuperar o gás de refinaria, que é usado como combustível, e o enxofre elementar, que pode ser posteriormente vendido.

As emissões da recuperação de enxofre normalmente contém algum sulfeto de hidrogênio, assim como óxidos de enxofre e de nitrogênio. Outras fontes de emissão provêm da regeneração periódica dos catalisadores de processo. A regeneração dos catalisadores gera correntes gasosas que podem conter monóxido de carbono, material particulado e hidrocarbonetos voláteis. Antes de serem descartadas para a atmosfera, tais correntes precisam ser tratadas, primeiro, passando por uma caldeira de CO, que queima não apenas o monóxido de carbono, levando-o a dióxido, mas também quaisquer hidrocarbonetos presentes. Depois, é necessário que elas passem por precipitadores eletrostáticos ou ciclones, que são equipamentos que têm como finalidade remover o material particulado presente no gás (Mariano, 2001).

De um modo geral, pode-se dizer que os principais poluentes atmosféricos emitidos pelas refinarias são os óxidos de enxofre e nitrogênio, o monóxido de carbono, os materiais particulados e os hidrocarbonetos. Tais poluentes são liberados nas áreas de armazenamento (tancagem), nas unidades de processo, nos eventuais vazamentos e nas unidades de queima de combustíveis fosseis (fornos e caldeiras) que geram calor e energia para consumo da própria refinaria.

Outra tendência importante é a substituição por outros combustíveis, como o gás natural e GLP. A queima de GLP ou gás natural é em média 5% mais eficiente que a queima de óleo combustível, ocorrendo um melhor aproveitamento do recurso natural. Outra vantagem está na questão ambiental, visto que a queima do óleo combustível é um processo com elevado teor de emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Sua substituição por gás natural ou GLP pode reduzir as emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ em cerca de 25%.

No caso a emissão de SO_2 e SO_3 possibilita formação de H_2SO_4 na atmosfera que culmina em chuva ácida. De forma similar à emissão de material particulado afeta a vegetação pela deposição nas plantas e pode alterar a composição química do solo (Corradi, 2008). Da mesma forma a substituição do óleo combustível por gás natural ou GLP permite reduzir consideravelmente estes poluentes de efeito local.

Já a indústria petroquímica se caracteriza pela ampla variedade de bens, intermediários e finais, rotas tecnológicas e fontes de emissões de GEE. É, em termos de impacto sobre o meio ambiente, responsável por 30% do uso mundial de energia na indústria, sendo mais de 50% proveniente do uso do petróleo e gás natural como matéria-prima. Consequentemente, o setor emite 18% das emissões diretas de CO_2 pela indústria, sendo a terceira maior fonte industrial, depois das indústrias siderúrgica e de cimento (Gielen *et al.*, 2007). Já no Brasil, o setor consome 9% da energia consumida pela indústria e é responsável por cerca de 13% das emissões de GEE.

O setor vem adotando um amplo conjunto de medidas direcionadas à sustentabilidade ambiental como parte do objetivo estratégico de se posicionar entre as cinco maiores indústrias petroquímicas do mundo, reverter a balança comercial e liderar em química verde.

Com relação à mudança climática, destacam-se as seguintes iniciativas:

- substituição de óleo combustível por gás natural e biomassa;
- economia de energia térmica (caldeiras mais eficientes, cogeração, isolamento térmico, reaproveitamento de fontes térmicas etc.);
- abatimento de emissões de NO_x na produção de ácido adípico e de ácido nítrico.

Como resultado, a intensidade de emissões de GEE da indústria petroquímica brasileira reduziu-se em 47% entre 2001 e 2010 (de 580 para 306 kg CO₂ eq/t produto). Em 2007 o nível brasileiro foi 57% da média global de dióxido de carbono, em decorrência de inovações no setor.

3.2 Mudanças climáticas e regulação setorial

A cadeia produtiva de petróleo e gás é afetada praticamente por toda a legislação ambiental brasileira aplicável às atividades industriais. A maior parte da mesma é de caráter geral, ou seja, aplicável a qualquer tipologia industrial, existindo, entretanto, alguns instrumentos legais específicos para o setor, como é o caso de algumas resoluções e portarias específicas sobre licenciamento, a própria lei do petróleo e regulações sobre contingência (CNI, 2012).

De um modo geral, pode-se dizer que a legislação ambiental que atinge a atividade de refino de petróleo se divide em duas categorias: a primeira, que se refere à redução dos impactos ambientais das refinarias em si, e a segunda que se refere às especificações da composição dos produtos que a refinaria produz, e que operam no sentido de estabelecer a qualidade de tais produtos, a fim de que seu uso afete minimamente o meio ambiente. As exigências ambientais demandam significativas alterações nos processos e nos equipamentos, o que requer investimentos consideráveis. Por outro lado, na medida em que os derivados produzidos na refinaria têm a sua composição especificada, os refinadores precisam se adequar, o que, na maioria das vezes também significa alterações substanciais nos processos produtivos, assim como a necessidade de grandes investimentos de capital nas refinarias. Além disso, o uso mais severo para alcançar as especificações mais restritivas dos produtos, enquanto utilizando petróleos mais pesados, implica em maior dispêndio de energia no refino e, conseqüentemente, provoca um aumento das emissões de CO₂ por unidade de derivado produzido.

A exploração de petróleo e gás natural no Brasil é objeto da Lei 9.478/97 que define dentre os seus princípios e objetivos a proteção do meio ambiente. Cabe a ANP fazer cumprir as boas práticas de conservação e uso racional do petróleo, dos derivados e do gás natural e de preservação do meio ambiente.

Complementarmente, existem as convenções e protocolos internacionais relativos à poluição marinha e à responsabilidade e à compensação dos danos causados por poluição por óleo. O Brasil ratificou a Marpol (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973*), com as modificações introduzidas no Protocolo de 1978 e a OPRC (*International Convention on Oil Pollution Preparedness, Response and Co-operation, 1990*), além da CLC (*International Convention on Civil*

Liability for Oil Pollution Damage, 1969) que foi alterada em 1992, e da “*International Convention for the Control and Management of Ships’ Ballast Water and Sediments, 2004*”, mediante o Decreto Legislativo no 148/2010 (CNI, 2012).

As atividades de exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e gás natural são exercidas mediante contratos de concessão, precedidos de licitação pública, e a outorga de concessão não dispensa o licenciamento ambiental.

O licenciamento ambiental é instrumento de gestão instituído pela Política Nacional do Meio Ambiente, de utilização compartilhada entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios em conformidade com as respectivas competências. Objetiva regular as atividades e empreendimentos que utilizam os recursos naturais e podem causar degradação ambiental no local onde se encontram instalados, proporcionando ganhos de qualidade ao meio ambiente e à vida das comunidades numa melhor perspectiva de desenvolvimento.

Toda cadeia produtiva do setor de petróleo e gás é sujeita a controle por parte dos órgãos ambientais. A Resolução Conama nº 237/97 determina o Ibama como órgão responsável pelo licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades potencialmente capazes de gerar impacto ambiental significativo localizadas ou desenvolvidas conjuntamente no mar territorial e na plataforma continental (CNI, 2012).

Para as atividades de sísmica, exploração e produção *offshore*, a responsabilidade é do Ibama, enquanto tais atividades, quando desenvolvidas no continente, estão sob o controle dos respectivos órgãos ambientais estaduais. Os órgãos ambientais estaduais têm sido responsáveis também pelo licenciamento e controle dos demais empreendimentos da cadeia de petróleo e gás, com exceção dos dutos, que, quando atravessam mais de um estado, estão também sob a responsabilidade do Ibama, ou dos postos de combustíveis que, mediante convênio, podem ser repassados para a responsabilidade dos municípios (CNI, 2012).

O licenciamento ambiental das atividades relacionadas à exploração e lavra de jazidas de combustíveis líquidos e gás natural tem procedimento específico, regulamentado pela Resolução CONAMA nº23/94, dispondo em seu art. 3º que “*a exploração e lavra das jazidas de combustíveis líquidos e gás natural dependerão de prévio licenciamento ambiental nos termos desta Resolução.*” Considera esta Resolução em seu art. 2º, as seguintes atividades:

- perfuração de poços para identificação das jazidas e suas extensões;
- produção para pesquisa sobre a viabilidade econômica; e
- produção efetiva para fins comerciais.

Nesse contexto, são avaliados, a cada projeto, os impactos ambientais significativos, positivos e negativos, decorrentes das atividades dessa indústria. No processo de avaliação de impactos ambientais, no âmbito do processo de licenciamento, além da identificação de impactos negativos, tem-se a indicação de medidas de correção desses impactos, isto é, a definição de

medidas mitigadoras. A expressão “medidas mitigadoras de impactos negativos” deve guardar obediência ao sentido de que as avaliações de impacto devem permitir estabelecer a confiabilidade da solução a ser adotada.

Com relação à contingência em águas sob jurisdição federal, outras entidades de governo, além dos órgãos ambientais, têm papel de destaque, de acordo com a Lei nº 9.966/00, notadamente a ANP, como órgão regulador, e a Marinha, como autoridade marítima (CNI, 2012).

3.3 Mudanças climáticas e mudança tecnológica

As reservas de combustíveis fósseis são exauríveis e devem ser consumidas com a clara noção de sua inerente e irreversível exaustão. Assim, na busca de uma perspectiva sustentável para a indústria do petróleo e do gás natural, além de se requerer o maior cuidado com as práticas de proteção ambiental e mitigação dos efeitos ao meio ambiente ao longo da cadeia de produção, processamento e consumo, é importante que se considerem as possibilidades de transição para fontes energéticas mais brandas. No caso do Brasil algumas destas alternativas já estão identificadas e devem ser reforçadas, especialmente aquelas associadas ao uso das bioenergias, em que o potencial brasileiro é reconhecido (Horta, 2002).

As novas tecnologias para explorar petróleo e gás irão alterar o mapa geopolítico da energia. Destacam-se as que permitem a exploração de petróleo em águas profundas e o aproveitamento das areias petrolíferas. Além disso, há o aprimoramento de processos físicos e químicos que purificam o petróleo de baixa qualidade. Por fim, a técnica de exploração do gás de xisto tem se mostrado bastante promissora.

A produção e o processamento de fontes não convencionais de petróleo apresentam problemas ambientais únicos que incluem poluição do ar e da água e devastação de áreas superficiais (Tavares, 2005).

Há algumas ressalvas importantes na exploração desses combustíveis fósseis não convencionais. Em primeiro lugar, ainda apresentam elevados custos, inviabilizando sua utilização a menos que os preços, no mercado de seus produtos, se mantenham elevados. Um segundo aspecto refere-se à eventual diminuição do esforço tecnológico na busca de fontes de energia renováveis e usos mais eficientes de energia, decorrente do aproveitamento de jazidas de petróleo não convencional. Por fim, no caso da exploração de gás de xisto, não há clareza a respeito dos riscos de contaminação do lençol freático pelos produtos químicos utilizados em sua exploração. Há também dúvidas relacionadas à possibilidade de o gás liberado no processo de extração provocar pequenas explosões subterrâneas e tremores (CNI, 2012).

Os “Cenários de Baixo Carbono” do estudo publicado recentemente pelo Banco Mundial (DE GOUVELLO, 2010) mostram algumas medidas para redução das emissões de GEE na indústria petrolífera. As medidas contemplam refinarias novas e existentes e a introdução de plantas de GTL (*gas-to-liquids*). Já para as plantas existentes, as alternativas consideradas são: integração energé-

tica, redução de formação de incrustações e controle avançado de processos. Em relação às novas refinarias, considerou-se um modelo otimizado em que se foca na produção de diesel integrada à produção de petroquímicos. As plantas GTL são capazes de produzir combustíveis líquidos (com destaque para o diesel de alta qualidade) a partir do gás natural, aproveitando eventualmente o gás que seria queimado em *flares* nas plataformas de petróleo *offshore* (CNI, 2012).

A combinação dessas diversas medidas permitiria evitar um volume médio de emissões de GEE de 12,3 Mt CO₂eq por ano. Segundo o estudo do Banco Mundial, a medida mais custo-efetiva é a introdução da tecnologia GTL, que também proporciona o maior volume de emissões evitadas.

A introdução de *Carbon Capture and Storage* (CCS) também é uma medida de mitigação de emissões, entretanto, o estudo do Banco Mundial mostra que um custo elevado de mitigação, que pode ser superior a 100 US\$ / tCO₂eq. Destaque-se que ainda existem questões tecnológicas não resolvidas, que precisam ser equacionadas para viabilizar a utilização da técnica CCS (CNI, 2012).

Conclusão

Não existe no curto prazo uma expectativa de escassez mundial petróleo e gás natural. Por outro lado, a qualidade do petróleo se deteriorou, sendo mais pesado e com teor de enxofre mais elevado. Tal fato tem como consequência direta o aumento da complexidade dos projetos produtivos, exigindo o uso de tecnologias ainda imaturas e custos crescentes de exploração e desenvolvimento.

As novas tecnologias para explorar petróleo e gás irão alterar o mapa geopolítico da energia. Destacam-se as que permitem a exploração de petróleo em águas profundas e o aproveitamento das areias petrolíferas. Além disso, há o aprimoramento de processos físicos e químicos que purificam o petróleo de baixa qualidade. Por fim, a técnica de exploração do gás de xisto tem se mostrado bastante promissora. Adicionalmente, percebe-se que a exploração e produção de óleos não convencionais poderá reduzir a expectativa de elevação do preço futuro do barril de petróleo, bem como se espera um aumento da emissão de gases do efeito estufa.

A exploração de combustíveis fósseis não convencionais ainda apresentam elevados custos, inviabilizando sua utilização a menos que os preços, no mercado de seus produtos, se mantenham elevados. Especificamente no caso da exploração de gás de xisto, o risco de contaminação do lençol freático por produtos químicos utilizados na sua exploração ainda é presente, bem como o associado a pequenas explosões subterrâneas e tremores.

No Brasil, a cadeia produtiva de petróleo e gás natural necessita reconstruir e expandir a cadeia local de fornecedores, internalizando a indústria de bens e serviços e agregando valor ao produto final. Com relação à capacitação tecnológica há um déficit significativo de competitividade, vinculado à fragilidade da engenharia nacional e à baixa capacidade tecnológica de inovação. Tal déficit distribui-se de forma diferenciada entre os segmentos, visto que alguns apresentam competitividade em nível internacional, enquanto outros possuem lacunas produtivas relevantes que restringem a capacidade de suprir de forma adequada o mercado doméstico.

Empresas petrolíferas têm investido na minimização dos impactos ambientais causados pela extração do petróleo, com iniciativas como: o sequestro geológico de carbono (*Carbon Capture and Storage*), eliminação da queima do gás (*flaring*) nas plataformas; e o desenvolvimento de novas fontes energias que possam, substituir o uso de combustível fóssil em algumas aplicações.

As medidas de redução das emissões de GEE na indústria petrolífera contemplam a introdução de plantas de GTL (*gas-to-liquids*). As plantas GTL são capazes de produzir combustíveis líquidos (com destaque para o diesel de alta qualidade) a partir do gás natural, aproveitando eventualmente o gás que seria queimado em *flares* nas plataformas de petróleo *offshore*. Já para as plantas existentes, as alternativas consideradas são: integração energética, redução de formação de incrustações e controle avançado de processos.

Algumas particularidades dos reservatórios do pré-sal brasileiro indicam para a indústria nacional um contexto repleto de desafios nas áreas de caracterização e engenharia de reservatórios; perfuração de poços; engenharia submarina; unidades flutuantes de produção e; logística para o gás associado.

Para o Brasil aumentar a competitividade em produtos petroquímicos, torna-se necessário o desenvolvimento de novas tecnologias para obter a nafta a partir das reservas existentes de óleos pesados e ultra pesados. Com vistas à exportação de produtos mais elaborados, necessita-se retomar os investimentos em refino e petroquímica. O esforço tecnológico é fortemente voltado para o aumento de produtividade e para a melhoria no grau de pureza do produto, por meio do desenvolvimento de melhores catalisadores e do controle de processo. A substituição de óleo combustível por gás natural e biomassa e a economia de energia térmica (caldeiras mais eficientes, cogeração, isolamento térmico, reaproveitamento de fontes térmicas etc) são outras iniciativas importantes no setor petroquímico.

As reservas de combustíveis fósseis são exauríveis e devem ser consumidas com a clara noção de sua inerente e irreversível exaustão. Assim, uma perspectiva sustentável para a indústria do petróleo e do gás natural requer que se considerem as possibilidades de transição para fontes energéticas mais brandas. No caso do Brasil algumas destas alternativas são associadas ao uso das bioenergias.

Referências Bibliográficas

ABADIE, E. Apostila sobre processos de refinação. PETROBRAS/RH/UC/DTA. 2003.

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Relatório Setorial: Transformados Plásticos. Estudos Setoriais de Inovação, 2009

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Estudo Setorial – Plásticos. São Paulo: ABDI, 2008. v.4 (Série Cadernos da Indústria, 4).

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Rio de Janeiro, 2012.

BASTOS, V. D. Desafios da petroquímica brasileira no cenário global. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 29, p. 321-358, mar. 2009.

- BRITISH PETROLEUM. Statistical Review of World Energy. June 2011. Disponível em embp.com/statisticalreview.
- CAMPOS, A.F. Petrobrás: a caminho da privatização? (A quebra do monopólio estatal e suas implicações). Dissertação de Mestrado em Economia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.
- CAMPOS, A. F. Transformações recentes no setor petrolífero brasileiro Perspectiva Econômica online, 1(1): 68-81, jan./jun., 2005.
- CANELAS, A. Investimentos em Exploração e Produção após a Abertura da Indústria Petrolífera no Brasil: Impactos Econômicos. Monografia de Graduação em Ciências Econômicas. Rio de Janeiro: Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro- UFRJ, 2004.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Contribuição do setor brasileiro de petróleo, gás e biocombustíveis para o desenvolvimento sustentável no país / Confederação Nacional da Indústria. Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis. Brasília: CNI, 2012.
- CORRADI, S.R. Ecoeficiência na Indústria de Petróleo: O Estudo do Craqueamento Catalítico na Petrobrás. Escola Brasileira de Administração Pública e Empresas. Dissertação de mestrado, 2008.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço Energético Nacional 2011 – Ano base 2010: Resultados Preliminares Rio de Janeiro: EPE, 2011.
- ERNEST & YOUNG TERCO. Brasil sustentável: perspectivas dos mercados de petróleo, etanol e gás natural. Ernest & Young Terco Brasil, 2011
- ENTSCHEV, E. Análise econômica do HBio como biocombustível em substituição parcial no diesel mineral. Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2008
- FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). Panorama Energético das Américas e Caribe. FIESP, 2010
- FRANSOO, J. C.; RUTTEN, W. G. M. M., 1994, A Typology of Production Control Situations in Process Industries, *International Journal Of Operations & Production Management*, v. 14, n. 12, p. 47-57.
- FURTADO, J.; HIRATUKA, C.; GARCIA, R. e SABBATINI, R. La nueva petroquímica brasileña: limites para la competitividad sustentable. Comercio Exterior, v. 52, n. 8, p. 736-745, 2002
- GARCIA, F. A. P. Marcadores metálicos como avaliação de impacto de emissões petroquímicas em zona urbana. Dissertação do programa de pós-graduação em oceanografia física, química e geológica. Rio Grande, 2010.
- GUEDES FILHO, E. M., FARINA, E. M. M. Q. e BRASIL, E.U. Efeitos anticompetitivos da participação da Petrobras nos leilões de venda de energia gerada por termoeletricas. Tendências Consultoria Integrada, 2011.
- GUERRA, O. Competitividade da indústria petroquímica: nota técnica da indústria petroquímica. In: COUTINHO, Luciano et al. coords. Estudo da competitividade da indústria brasileira. Campinas: MCT/ FINEP/ PAC/ DCT, 1993.
- GIELEN, D. et al. IEA petrochemical scenarios for 2030-2050: energy technology perspectives. Paris: International Energy Agency, 2007. Disponível: http://www.iea.org/textbase/work/2006/petrochemicals/Discussion_Paper.pdf.
- GOMES, G.L. CONFIGURAÇÕES ALTERNATIVAS DE REFINO E INTEGRAÇÃO COM PETROQUÍMICA NO BRASIL. *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2008*, Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis, 2008
- GONÇALVES, A. M. Melhorias no desempenho ambiental do Setor de Transformação de Plásticos decorrentes de aperfeiçoamento tecnológico realizado pelo PRUMO/Plásticos do IPT. Dissertação de mestrado profissional em Tecnologia Ambiental. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2011.

- HORTA, L. A. Produção e processamento de petróleo e gás natural no Brasil: perspectivas e sustentabilidade nos próximos 20 anos. [S.l.]; ANP, 2002
- INSTITUTO ACENDE BRASIL. Mudanças Climáticas e o Setor Elétrico Brasileiro. White Paper 6, São Paulo, 2012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Energy technology perspectives 2006: Scenarios and Strategies to 2050. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2006.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Tracking industrial energy efficiency and co2 emissions. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2007.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Worldwide trends in energy use and efficiency. Paris: Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), 2008.
- IHS (2008), Upstream Capital Costs Index. Disponível em <http://www.ihs.com/info/cera/ihsindexes/index.aspx>. 05 novembro de 2012
- KIMURA, R. M. Indústria brasileira de petróleo: uma análise da cadeia de valor agregado. Monografia de Bacharelado em Economia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- KUPFER, D., LAPLANE, M.F. e HIRATUKA, C. (Coords.). Perspectivas do investimento no Brasil: Rio de Janeiro: Synergia: UFRJ, Instituto de Economia; Campinas: UNICAMP, Instituto de Economia, 2010.
- LÉO, S. É tempo de pensar no combustível do futuro. Valor Online, São Paulo, 11 dezembro 2006. Disponível em: http://www.valoronline.com.br/valor_economico/285/
- MARIANO, J. B.; Impactos ambientais do refino de petróleo. Dissertação de mestrado no programa de pós-graduação de engenharia. UFRJ Rio de Janeiro, 2001, 289p.
- MOREIRA, F. S. A Integração refino petroquímica como alternativa para atendimento do crescente mercado de petroquímicos. Dissertação de mestrado do programa de processos químicos e bioquímicos. UFRJ Rio de Janeiro, 2008, 135p
- MOREIRA, C., FERNADES, E., GOMES, G.L., DVORSAK, P., HEIL,T.B.B., BASTOS, V.D. Potencial de investimento no setor petroquímico brasileiro 2007-2010, BNDES, 2007.
- MONTENEGRO, R. S. P.; MONTEIRO FILHA, D. C.; GOMES, G.L. Indústria petroquímica brasileira: em busca de novas estratégias empresariais BNDES Setorial, n.9, 1999
- OLIVEIRA, A. *Indústria Para-Petrolífera Brasileira Competitividade, Desafios e Oportunidades*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro e PROMINP, 2008.
- OLIVEIRA, G., GUEDES FILHO, E. M., FERRES, J.P. e VALLADARES, F.E.C. Parecer sobre questões econômicas e concorrenciais decorrentes da constituição da Braskem. Tendências Consultoria Integrada, 2003.
- PEREIRA, R. A., ALVES, T.B, FURTADO, L. R., ANTUNES, A.M.S. E SÁ, L. G. Tendências tecnológicas e mercadológicas dos principais produtos petroquímicos básicos: eteno e propeno. 4o PDPETRO, Campinas, SP 2007
- PINTO JR et al (2007) Economia da Energia: Fundamentos Econômicos, Evolução Histórica e Organização Industrial. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Campus, 2007.
- QUIJADA, Raul (1993). Os novos materiais: vantagens técnicas e econômicas. Indicadores Econômicos FEE, Porto Alegre, v.21, n.1, p. 160-164.
- RAVAGNANI, A. T. G. Modelagem Tecno econômica de Sequestro de CO2 considerando Injeção em Campos Maduros. Tese (Doutorado) – Unicamp. Campinas, 2007.

- RIBAS, R. P. Estratégias de empresas petróleo no cenário de mudanças climáticas globais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- SANTOS, P. C. Desafios para a implantação de uma refinaria petroquímica no Brasil. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível. Programa EQ-ANP, Monografia em Engenharia Química, 2006
- SILVA, C. R. S; FURTADO, A. T. Uma análise da nova política de compras da PETROBRAS para seus empreendimentos *offshore*. Revista Gestão Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2006.
- SOARES, A.C., LEAL, J. E. e AZEVEDO, I.R. Diagnóstico da rede de distribuição de derivados de petróleo no Brasil e sua representação em um SIG. XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Ouro Preto, 2003
- TAVARES, M. E. E. Análise do Refino no Brasil: Estado e Perspectivas - Uma Análise "Cross-Section". Tese de Doutorado. Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ. Março, 2005.
- TSALIK, S. & SCHIFFRIN, A. Reportando o petróleo. Open Society Institute, Nova Iorque, 2005.
- UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Projeto: Matriz Brasileira de Combustíveis. Rio de Janeiro: GEE/IE/UFRJ, 2006, 170p.
- World Resources Institute. Climate Analysis Indicators Tool, 2011.

Indústria Aeronáutica

Claudio Ribeiro de Lucinda

Introdução

O presente capítulo é fruto de um projeto desenvolvido em parceria entre o BNDES e a FEA-RP/USP com o intuito de analisar a transição para uma economia de baixo carbono, com um foco especial para o setor aeronáutico e, mais especificamente, o segmento de jatos comerciais de passageiros. Para tanto, foram realizadas pesquisas em bases de dados bibliográficos e entrevistas com especialistas no setor.

Inicialmente, são analisados os fatores críticos para a competitividade internacional, apresentando quais são os principais pontos que o setor precisa enfrentar para conseguir se tornar competitivo em um mercado que é claramente internacional em sua dimensão geográfica.

A seguir é feita uma análise do perfil tecnológico do setor e de sua dinâmica, em que são detalhadas as principais inovações que estão em desenvolvimento no setor em termos de redução de emissões de CO₂, incluindo desde aperfeiçoamento da aeronave até as alternativas de biocombustíveis.

A terceira seção retoma o tema das duas anteriores, ampliando a discussão para o caso da indústria integradora de aeronaves brasileira, enquanto a quarta analisa os impactos ambientais causados pelo setor aeronáutico do ponto de vista de emissões locais e globais, além de apresentar o balanço de carbono do setor. Posteriormente é feita uma revisão sobre a regulação ambiental que envolve o setor.

A última parte, que inclui as quinta e sexta seções, apresenta as perspectivas tecnológicas para o setor nos próximos anos, bem como sugestões de políticas industriais, tecnológicas e ambientais, levando em consideração as características do sistema de inovação brasileiro.

Especificamente em termos de objetivos desejáveis, na sexta seção temos entre os objetivos, em primeiro lugar, a criação de uma indústria nacional de biocombustíveis aeronáuticos, importante para o uso no transporte aéreo nacional e internacional. Em segundo lugar, a manutenção da importância da empresa nacional integradora de estruturas aeronáuticas, a Embraer no mercado em que ela se encontra e, finalmente, conseguir fazer frente ao aumento na demanda por transporte aéreo nos próximos com a incorporação das classes C e D sem ocasionar um grande aumento nas emissões de CO₂.

1. Fatores Críticos para a Competitividade Internacional

Os fatores críticos para a competitividade internacional do setor podem ser classificados naqueles que são internos às empresas e nos que são externos a elas. Os fatores internos são controlados em grande medida pelas próprias empresas. Exemplos são os gastos com Pesquisa & Desenvolvimento e a estratégia empresarial.

Um dos primeiros fatores críticos para a competitividade internacional é a estratégia da empresa. Ainda que todas as empresas tenham objetivos similares – oferecer aeronaves modernas,

eficientes em termos de custos operacionais, ter uma base comum nas suas linhas de produtos e um sistema global de manutenção –, as várias formas pelas quais as diferentes empresas encaram estes objetivos determinam diferenças importantes em sua competitividade.

Uma linha segundo a qual as estratégias das empresas do setor diferem marcadamente é em quais linhas são privilegiadas em resposta a mudanças efetivas (ou previstas) na demanda de mercado. Esta estratégia de curto prazo costuma ser mais bem servida quando a empresa possui uma ampla linha de diferentes tamanhos de aeronave.

Por exemplo, a *Airbus* afirma que as sinergias entre as linhas A380, A340 e a A320 permitem economias entre US\$ 800 mil e US\$ 1 milhão ao longo da vida útil da aeronave adicional para a companhia aérea. Também se estima que, para uma companhia aérea aceitar aeronaves diferentes do restante da frota, o preço deve ser aproximadamente 10% menor do que o competidor.

A razão para esta preferência é que homogeneidade da frota oferece várias vantagens para companhias aéreas, como economia em treinamento da equipe de voo, menor tempo para a rotação das equipes de voo em solo, economias associadas aos estoques de peças e aos custos de treinamento de equipes de manutenção.

No entanto, cada tipo de aeronave na linha de produtos de uma empresa é o resultado de investimentos grandes e, em grande medida, irreversíveis. Isso faz com que a capacidade de se levantar grandes quantias se torne um elemento importante na competitividade das empresas, e ela é influenciada pelos compromissos financeiros, *rating* de crédito e a reputação da empresa.

Neste sentido, para o lançamento bem-sucedido de um novo avião é necessário que o produtor identifique um segmento de mercado que ainda não é adequadamente servido pelos modelos existentes no mercado – tanto seus quanto dos seus concorrentes.

Além disso, as “vantagens do pioneiro” costumam ser grandes neste mercado, e costumam ser ampliadas com estratégias agressivas de precificação no momento de lançamento dos modelos.

Estes fatores tornam a produção de aeronaves um empreendimento arriscado, fazendo com que os produtores se apoiem cada vez mais em parcerias para o compartilhamento de riscos. Tais parceiros, originalmente escolhidos primordialmente pela complementaridade de competências e geralmente fornecedores da empresa ou outros produtores de aeronaves, passaram a assumir parte do risco do desenvolvimento e produção da aeronave.

Outro fator crítico de competitividade internacional é a presença de longo prazo na indústria, que pode fornecer importantes vantagens de custo às empresas integradoras. Tais eficiências de custo podem ser derivadas de longos ciclos de produção, que permitem a divisão dos elevados custos de desenvolvimento da aeronave em mais unidades, além de gerar um efeito de curva de aprendizado que faz com que os custos unitários de produção declinem quando a produção aumenta.

Segundo Mowery (1987), uma duplicação da produção reduz os custos unitários em até 20%. Tais fatores impõem que a empresa faça bom uso das instalações produtivas, uma vez que existem limites para se alcançar economias de escala por meio do investimento em maior capacidade produtiva. Neste sentido, um elemento chave é a produtividade do trabalho, que também é melhorada

quanto maior for a homogeneidade da linha de produtos, o que reduz a necessidade de retreinamento da força de trabalho para atender novos produtos.

Outra forma de redução de custos é por meio da produção de aeronaves derivadas da mesma plataforma, que permitem que o custo inicial de desenvolvimento seja diluído em mais unidades. Usando componentes, sistemas e instalações de um programa antigo em um novo, os custos de desenvolvimento do novo programa são reduzidos. A experiência cumulativa no desenvolvimento de novas aeronaves também permite maior eficiência no desenvolvimento de novas aeronaves no futuro.

A incorporação de novas tecnologias também é um fator crítico de competitividade internacional. As mudanças nas características dos produtos são impelidas pelo mercado e/ou iniciativas do setor público com respeito a padrões ambientais e de segurança. Geralmente, as melhoras nas características dos produtos geralmente recaem em três categorias: (1) menores custos operacionais para as linhas aéreas; (2) melhor desempenho ambiental e de segurança e (3) maior apelo ao consumidor, em termos de conforto de viagem, ambiente interior e facilidade de embarque/desembarque.

Em resumo, temos como fatores críticos da competitividade internacional a amplitude e homogeneidade da linha de produtos, pois isso permite o aproveitamento de economias de aprendizado, reduz os custos do desenvolvimento de novas aeronaves e aumenta o interesse dos clientes (companhias aéreas) nos produtos da empresa.

Outro fator crítico para a competitividade internacional é a capacidade de incorporar inovações tecnológicas que se traduzam ou em menores custos operacionais, melhor desempenho ambiental e de segurança, ou ainda melhor apelo ao consumidor.

Finalmente, dados os elevados custos de se ampliar a linha de produtos e incorporar as inovações tecnológicas, outros dois fatores críticos são a qualidade da rede de fornecedores – que permite um melhor compartilhamento de riscos no desenvolvimento de aeronaves – e a qualidade do acesso ao crédito por parte da empresa.

Em termos da transição para uma economia de baixo carbono, um elemento chave para as empresas do setor é a compreensão da dinâmica tecnológica do setor. Este será o tema da próxima seção.

2. Dinâmica Tecnológica

Como discutido no item anterior, a incorporação de inovações no produto há muito tempo é um fator crítico para a competitividade internacional na indústria aeronáutica. Esta incorporação acaba se refletindo também em avanços técnicos nos campos da ciência e engenharia.

De uma forma geral, as inovações podem ser classificadas de incrementais a radicais (Davenport, 1993; King e Anderson, 2002). As inovações incrementais são mudanças de escala pequena, baseadas no conhecimento atual. O seu impacto é mínimo e previsível, em contraposição às inovações radicais, que são caracterizadas por mudanças em larga escala. Esta distinção tende a fornecer uma nova forma de compreender um fenômeno e de formular abordagens à solução de problemas. Por definição, inovações radicais são muito raras.

Especificamente com relação ao setor aeronáutico, nem sempre é fácil a comparação sem ambiguidade entre diferentes modelos de aeronaves para caracterizá-las como mais ou menos tecnologicamente avançadas. Isto ocorre porque os avanços em tecnologia e projeto não são realizados isoladamente, mas ao mesmo tempo, e diferentes produtos podem incorporar combinações distintas de inovações dos dois tipos.

Devido às fortes interações e as relações não lineares entre os componentes, o ótimo do ponto de vista de aeronaves não é obtido apenas pela combinação do ótimo em cada um dos componentes individuais. O projeto de um componente específico tem que ser ligado aos benefícios após a integração com o restante da aeronave. Conseqüentemente, o desempenho é melhorado com um sistema integrado de projeto, levando em consideração asas, cauda, fuselagem, motor, superfícies de controle e outros componentes. Ou seja, nem sempre é eficiente que todas as inovações sejam incorporadas ao mesmo tempo dentro de um mesmo projeto.

Independentemente da comparação específica entre aeronaves e de como as inovações se refletem nos diferentes tipos de aeronave, existem alguns aspectos chave que tendem a melhorar o desempenho global da mesma:

- Menor peso básico da aeronave, para aumentar a carga transportável pelo mesmo volume de empuxo e queima de combustível.
- Melhora da aerodinâmica da aeronave, para reduzir o arrasto e aumentar o empuxo resultante.
- Melhora do desempenho específico do motor, para reduzir a queima de combustível por unidade de empuxo efetivo.

Em cada uma destas dimensões, existem algumas inovações incrementais, que serão discutidas mais adiante.

A questão de redução de peso é importante em todas as gerações de aeronaves., Neste sentido houve reduções importantes com a introdução progressiva de novas tecnologias, tais como ligas, materiais compósitos e metais avançados. Além disso, processos e técnicas de produção mais avançados (incluindo integração e simulação de avaliação global) permitiram a produção de estruturas mais leves.

Por exemplo, os aviões projetados nos anos 90 eram baseados em estruturas metálicas, tendo até 12% de materiais compósitos e avançados. Para fins de comparação, o A380, que foi lançado em 2005, incorpora 25% de materiais compósitos leves, gerando uma economia de peso de 8%, comparativamente ao uso dos materiais metálicos em usos similares. Os aviões que entrarão na frota nos próximos anos terão porcentagens ainda maiores em materiais avançados, incluindo asas e partes da fuselagem, aumentando a economia de peso em até 15%.

A fricção e o arrasto com a subida são os fatores mais importantes para o arrasto aerodinâmico. Avanços nos materiais, bem como inovações em estruturas e aerodinâmica não apenas são importantes em termos de peso, mas atualmente permitem importantes reduções no arrasto com

a subida. As estruturas de ponta de asa fornecem um aumento na envergadura aerodinâmica das asas, especialmente quando os comprimentos de asa são limitados pelos tamanhos dos portões dos aeroportos (e/ou hangares).

O arrasto de fricção é uma área que promete ser das mais importantes em termos de melhora potencial na eficiência aerodinâmica ao longo dos próximos 10 a 20 anos. Abordagens possíveis para isto são¹:

- Redução de fricção local de superfície, mantendo o fluxo laminar por meio do NLF (*Natural Laminar Flow* – Fluxo Laminar Natural) e HLFC (*Hybrid Laminar Flow Control* – Controle Híbrido de Fluxo Laminar), reduzindo assim a fricção de turbulência na superfície (por exemplo, usando *riblets*²).
- Minimização da área de contato direto com o fluxo de ar externo, controlando a separação do fluxo de ar e otimizando as intersecções, junções e a forma da fuselagem.
- Minimização de excrescências (incluindo antenas), otimizando as entradas e saídas do fluxo de ar.

Há aplicações potenciais do NLF e do HLFC nas asas, naceles, empenagens e *winglets*. Os benefícios em termos de queima de combustível dependem do volume de fluxo laminar alcançado em comparação com o peso adicional necessário para manter o fluxo laminar.

Para se alcançar um nível ótimo de fluxo laminar são necessárias estruturas, materiais e mecanismos que permitem a produção, manutenção e reparo de superfícies de fluxo laminar.

A terceira linha de inovação tecnológica envolve os conjuntos propulsivos. Os produtores de conjuntos de propulsão investem em tecnologia para fornecer potência limpa (em termos de emissões), silenciosa, barata, confiável (reduzidos custos de manutenção) e eficiente.

Em termos de novos produtos, os motores e APU (*auxiliary power units* – Unidades de Força Auxiliares) para novos projetos de aeronaves tendem a gerar pelo menos 15% de economia de combustível em relação à aeronave que substituem. Tais tecnologias terão impacto positivo em:

- Eficiência Térmica: Maiores OPR (*operating pressure ratios* – Razões de Pressão em Operação) têm por objetivo melhorar a combustão, e se preveem algumas melhoras nos ciclos dos motores. Por outro lado, isto leva a maiores custos de manutenção, peso e arrasto e risco de maior complexidade dos motores tendo que manter máxima confiabilidade.
- Eficiência de Transmissão: por intermédio de novos componentes e arquitetura avançada do motor.
- Eficiência de Propulsão: as arquiteturas do motor estão evoluindo e novos conceitos estão surgindo (*advanced geared turbofans, open rotors, hybrids*), já havendo planos para produtos novos em cada um dos conceitos emergentes.

1 Discussão mais detalhada sobre o tema encontra-se na seção 04 do Relatório Final.

2 Pequenos sulcos na superfície alinhados ao fluxo de ar.

Em paralelo a estas três linhas, uma potencial inovação disruptiva especialmente importante para a transição para uma economia de baixo carbono é o desenvolvimento de biocombustíveis aeronáuticos. Para que possamos entender o papel dos biocombustíveis aeronáuticos como alternativa redutora de emissões de gases de efeito estufa, é necessário entender como eles podem se colocar como alternativas aos combustíveis tradicionais.

Para que um combustível seja amplamente utilizado para propulsão de aeronaves, três tipos de requisitos devem ser atendidos. O primeiro tipo é de ordem físico-química, relacionado com a capacidade de armazenamento de energia no combustível para o uso em altas altitudes. O segundo tipo está relacionado com as exigências de operação em turbinas a jato e o terceiro diz respeito às considerações de segurança.

A capacidade de energia primária armazenada no combustível é restrita tanto pela massa quanto pelo volume do mesmo dentro da aeronave, o que acaba levando a um valor mínimo de energia assim como restrições sobre a densidade do combustível. Como a operação da aeronave costuma ocorrer em altas altitudes, também existem exigências de ponto de congelamento e de viscosidade para que seja possível o bombeamento do combustível para as câmaras de combustão. Existem também restrições sobre a proporção de compostos aromáticos e enxofre no combustível, para limitar a formação de resíduos sólidos na combustão.

Do ponto de vista de operação em turbinas a jato e de segurança, restrições adicionais são colocadas sobre a volatilidade – facilidade com que o combustível sai do estado líquido e vai para o estado gasoso – além de ponto de ignição, condutividade elétrica e compatibilidade com materiais variados³.

Todas estas especificações e exigências estão descritas em algumas normas internacionais, sendo as principais a DEF-STAN 91-91 e ASTM D1655, que foram complementadas pela norma ASTM D7566. Esta última normatiza a utilização de SPK (Querosene Sintética Parafínica – *Synthesized Paraffinic Kerosene*), também conhecida como combustíveis baseados no processo Fischer-Tropsch, além de permitir que no futuro os óleos hidroprocessados – HVO e HRJ – sejam utilizados. No Brasil, a RBAC 21.191 aplica esta norma internacional.

Estas normas não definem a composição exata do combustível, mas limitam os valores para as propriedades descritas acima, bem como a natureza geral do produto e o seu processo de produção. No âmbito do presente marco regulatório para combustíveis, é importante notar que nenhum dos biocombustíveis atualmente em uso é capaz de, sozinho, atender as exigências colocadas nas normas acima. Mesmo os combustíveis SPK ou HVO ou HRJ precisam de processamento adicional para uso em aeronaves.

Apenas recentemente observou-se a aprovação de uma família de combustíveis baseada em biocombustíveis, ainda que com uma mistura de 50% com combustível tradicional. Esta família é a dos combustíveis SPK, elaborados a partir de carvão, gás ou biomassa. Os óleos hidroprocessados, também chamados de Bio-SPK ainda não foram aprovados, mas já realizaram muitos testes de voo.

³ Aqui é importante fazer uma distinção entre biocombustíveis aeronáuticos e o etanol, para aplicações aeronáuticas. Devido às exigências em termos de características físico-químicas para que um combustível seja aprovado para uso em turbinas aeronáuticas, o etanol não se coloca como uma opção para este segmento de mercado.

Uma das maiores restrições impostas aos combustíveis alternativos é a falta da propriedade chamada de “drop-in”, que implicaria a construção de infraestrutura paralela em todos os aeroportos. Tais custos são claramente proibitivos, se compararmos com a atual infraestrutura para os combustíveis existentes.

Para que possamos ter aeronaves que operem em combustíveis alternativos que não sejam “drop-in”, é necessário que um grande número de aeroportos já tenha infraestrutura para o suprimento desses combustíveis. Tudo isso indica que dificilmente teremos mais de uma família de combustíveis que não seja “drop-in”. No caso brasileiro, existem pesquisas tecnológicas nas seguintes linhas:

- Gaseificação – IPT. Espera-se o funcionamento de uma planta comercial para a gaseificação de biomassa a partir de 2020. A estratégia do IPT envolve a elaboração de um projeto para construção de uma planta piloto de gaseificação de biomassa que, a partir de 2017, começará a funcionar no núcleo do IPT em Piracicaba. Espera-se que esta planta possa processar cerca de 400 mil toneladas anuais de bagaço e palha de cana-de-açúcar.
- Reações Biológicas/Químicas – Amyris. Esta empresa já trabalha em uma planta piloto em Campinas e uma planta de demonstração. Esta planta de demonstração possui dois fermentadores de 5.000 litros e busca replicar as condições reais de produção.
- Hidrogenólise – Curcas. Esta empresa informou que está prevista para o ano de 2013 a instalação de uma unidade produtora de bioquerosene em Guaratinguetá/SP, junto à unidade industrial da Basf. Em termos de matéria-prima, a empresa está pensando em utilizar o pinhão-mansão.

Abaixo a tabela resumo com as principais tecnologias:

Tabela 1 Tecnologias Aerodinâmicas

Tecnologia	TRL	Progresso	Função	Observações
Riblets	Baixa/ Média (4-6)	L/D: 1% a 2%	RJ, SA, TA	Material em desenvolvimento: material do riblet precisa ter mais durabilidade que a apresentada nos testes. Precisa resolver problemas de instalação e manutenção.
Natural Laminar Flow	Média (4-6)	L/D: 5% a 10%	RJ, SA, TA	Qualidade de superfície: design do projeto, integração. Necessário considerar questões de fabricação, operacionais e de manutenção.
Hybrid Laminar Flow Control	Baixa/ Média (3-5)	L/D: 5% a 10+%	SA, TA	Necessário design para sistema simples de sucção. Necessário considerar questões de fabricação, operacionais e de manutenção.

continua

Excescence Redution	Alta (8)	L/D: 1%	RJ, SA, TA	Trade-off entre benefícios e custo de manutenção e fabricação.
Variable Camber	Média/ Alta (6-8)	L/D: 2%	RJ, SA, TA	Curvatura variável pode afetar arrasto induzido.

Notas: Foram consideradas apenas tecnologias com nível de TRL de no máximo 3; Benefícios não podem ser simplesmente adicionados (pode haver interdependência aerodinâmica). Fonte: ICAO Environment Report 2010

3. Competitividade Internacional da Indústria Integradora de Aeronaves Brasileira

Como vimos na seção 1, temos quatro fatores centrais para a competitividade internacional das empresas aeronáuticas: a extensão e homogeneidade da linha de produtos, a extensão da rede de parcerias e a capacidade de incorporação de inovações tecnológicas na linha de produtos.

Com relação à linha de produtos, em face do elevado preço do petróleo, da redução do salário dos pilotos de aeronaves de grande porte e das equipes de terra (manutenção), há uma maior atratividade para aeronaves de maior capacidade. Isto provavelmente vai se refletir nos próximos anos na estratégia de desenvolvimento e ampliação da linha de produtos das empresas. Certamente, a nova geração desse tipo de aeronaves deverá sofrer considerável redução do custo direto operacional. No entanto, especificamente com respeito à indústria brasileira, existem alguns desafios referentes à absorção destas inovações na cadeia produtiva⁴.

Em especial, o papel das pequenas e médias empresas dentro da cadeia produtiva do setor no Brasil provoca maior preocupação. No segmento aeronáutico, a organização e o funcionamento de MPMEs (micro, pequenas e médias empresas) em sistemas produtivos inovadores, a exemplo do que foi feito em Toulouse (França), Seattle (Estados Unidos) e Montreal (Canadá), mostrou-se um caminho importante para a consolidação dessas indústrias.

No entanto, as MPMEs nos clusters não ficam completamente independentes das empresas âncora. Nas economias desenvolvidas, com a forte presença de setores tecnológicos, há uma diversificação maior dos clientes destas MPMEs. No caso brasileiro, ainda há uma grande dependência da empresa âncora – a Embraer.

Além disso, o perfil dos produtos da principal integradora brasileira não foi acompanhado pela cadeia produtiva nacional, o que reduziu seu crescimento (tanto do ponto de vista estratégico quanto do volume de negócios) e impediu a manutenção de um nível satisfatório de competitividade. O único exemplo de programa de encomendas do setor público que era do interesse da integradora e que buscava incentivar o crescimento da cadeia produtiva foi o Programa AMX, que contemplou o desenvolvimento e o estabelecimento de uma cadeia de fornecedores qualificados no Brasil.

⁴ Referências importantes são ABDI (2009) e Montoro e Migon (2009).

Diferentemente dos grandes tomadores, que negociam diretamente com as instituições governamentais de financiamento, as MPMEs fornecedoras não recebem esse tratamento. A exigência de que as empresas possuam Certidão Negativa de Débitos (CND) impossibilita a tomada de crédito pelas empresas por junto à Finep e ao BNDES (Montoro e Migon, 2009: p. 177).

Em termos da capacidade de absorção de tecnologias vamos ter algumas fraquezas adicionais. Por um lado, segundo a ABDI (2009), as pesquisas, laboratórios e formação da mão de obra no Centro Tecnológico da Aeronáutica e nas universidades paulistas foram, e continuam sendo, fundamentais para a consolidação do setor aeronáutico no Brasil e a manutenção da sua competitividade no mercado mundial.

A criação do cluster de aeronaves da Embraer⁵ é um exemplo clássico de integração entre pesquisadores e empresa, diretamente relacionada com o setor aeronáutico e aeroespacial, a despeito das limitações mencionadas acima. É em grande medida o resultado dos esforços governamentais na criação de uma infraestrutura científica e governamental com o objetivo de fornecer as competências necessárias para a indústria aeronáutica. O Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA) e o Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE) são as principais instituições na área. O CTA, que é parte do Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Ministério da Aeronáutica, consiste em quatro institutos: o Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), o Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), o Instituto de Estudos Avançados (IEA) e o Instituto de Fomento e Ligações Industriais, além de outros órgãos.

Simulações computacionais, um túnel de vento e testes em solo e em vôo complementam a pesquisa básica. No sentido de enfatizar as ligações da pesquisa com a indústria, o CTA adquiriu competências em metrologia, qualidade, padronização, confiabilidade e gestão de P&D. Além disso, oferece cursos de graduação e pós-graduação, sendo que o INPE possui programas de pesquisa em satélites e subsistemas, incluindo testes e integração de controles.

Especificamente com relação a tecnologias de baixo carbono, a tabela 2 a seguir mostra os grupos de pesquisas em tecnologias de baixo carbono ligados ao setor aeronáutico. Esse levantamento foi feito no diretório dos grupos de pesquisa do CNPq (DGP) e no Censo 2010 do DGP.

As áreas de Química e Engenharia mecânica são as que possuem maior número de pesquisadores e juntamente com a Física são responsáveis por 85% da produção acadêmica no setor aeronáutico. Todas as áreas que estão na tabela acima desenvolveram produtos tecnológicos, contribuindo de forma concreta para a integração entre a academia e setor privado. Além disso, a área de engenharia mecânica teve forte participação no desenvolvimento de softwares para o setor.

Contudo, tal complexo de grupos de pesquisa ainda possui carências, o que dificulta o seu poder de competição na vanguarda mundial das tecnologias aeronáuticas, assim como a incorporação destas inovações nos produtos. Exemplos importantes estão em Castanho e Migon (2009, p. 176), que mostram que cerca de 60% das empresas do setor desconhecem a existência dos programas governamentais voltados à área tecnológica. Isso é um exemplo do tipo de dificuldades que se enfrentam quando se fala da interação entre o setor público e o setor privado na pesquisa.

5 O material aqui apresentado é originário de Cassiolato, Bernardes e Lastres (2002).

Tabela 2 Grupos de pesquisa do setor aeronáutico - 2010

Área	Pesquisadores	Técnicos	Produção acadêmica	Produto tecnológico (2007-2010)	Desenvolvimento de software
Ciência da Computação	10	0	213	8	3
Engenharia de Materiais e Metalúrgica	11	0	290	5	0
Engenharia Elétrica	12	3	561	4	0
Engenharia Mecânica	49	2	2783	10	21
Engenharia Química	11	1	561	4	0
Física	42	6	2491	16	5
Química	73	6	4133	34	2
Total geral	208	18	11032	81	31

Fonte: Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq

Além disso, o impacto da pesquisa do capital humano em aeronáutica é ainda pequeno. Segundo Bernardes e Catharino (2011), o número de patentes depositadas por residentes no Brasil referentes aos campos de engenharia não alcançava uma centena. O número equivalente no Canadá, apenas para a área de sensoriamento e monitoramento, alcançava uma centena.

Um fator importante para a competitividade internacional, mas que depende pouco da estratégia de negócios é a navegação por parte das empresas da miríade de barreiras (em sua maioria não tarifárias) ao comércio internacional de aeronaves. Tais barreiras incluem⁶:

- Pressão governamental sobre companhias aéreas domésticas para a preferência de compras de aeronaves de uma marca em particular;
- Exigências de contrapartidas das empresas em troca de importações de aeronaves;
- Restrições quantitativas às importações de aeronaves (quotas);
- Exigências de licenciamento doméstico de aeronaves para a importação;
- Uso de créditos à exportação e medidas governamentais de apoio a empresas instaladas nos países.

Note-se que o uso de todas estas medidas é regido em escala internacional pelo *Aircraft Agreement*⁷, originalmente assinado na Rodada Uruguai do GATT e incorporado nos tratados constituintes da OMC – Organização Mundial do Comércio.

⁶ Note-se, todavia, que nem todas são permitidas pelo arcabouço legal de regulação do comércio internacional, sendo expostas aqui apenas com o fim de comparação.

⁷ Referência original no site http://www.wto.org/english/docs_e/legal_e/air-79_e.htm (acesso em 10/9/2012).

Ainda que o *Aircraft Agreement* tenha um foco pronunciado sobre as barreiras tarifárias e não tarifárias note-se que ainda hoje o comércio internacional de aeronaves é bastante regulamentado, tendo uma grande gama de barreiras essencialmente não tarifárias. Dada a variedade de barreiras não tarifárias, fica difícil sumariá-las de forma consistente entre países, apenas restando apontar o fato de que tais barreiras são importantes e generalizadas entre os países.

Finalmente, dentre os fatores críticos de competitividade do setor, podemos notar que grande parte dos desafios está na estruturação da cadeia produtiva do setor, especialmente dando maior densidade tecnológica ao conjunto de pequenas e médias empresas na cadeia produtiva da Embraer.

Tendo visto a estrutura do setor, os fatores de competitividade e a dinâmica tecnológica, a seguir será visto o padrão de emissões do setor.

4. Mudanças Climáticas, Institucionais e Tecnológicas

4.1 Efeito das emissões e balanço de carbono

Em termos de impactos ambientais, podemos fazer distinções entre os impactos de natureza eminentemente local, em torno de locais em que ocorrem as operações de pouso e decolagem das aeronaves, e os impactos de natureza global, entre os quais se incluem a geração de gases de efeito estufa. Tais impactos – tanto locais quanto globais – são mais relacionados com a operação dos produtos e não com sua produção.

Do ponto de vista de efeitos ambientais locais, a principal preocupação da operação de aeronaves é o ruído. No entanto, muitos aeroportos já consideram a qualidade atmosférica como algo equivalente à poluição sonora. Em termos de qualidade atmosférica, os principais elementos poluidores são: óxidos de nitrogênio (NOx); monóxido de carbono (CO); hidrocarbonetos não queimados (UHC); material particulado (PM).

Ainda que, comparadas a outras fontes de recursos, as emissões referentes ao transporte aéreo sejam relativamente pequenas, dadas as restrições de peso e segurança que o setor enfrenta para a implementação de medidas para reduzir emissões, é de se esperar que a aviação seja responsável por uma parcela crescente destas emissões, considerando o crescimento da renda nos próximos anos e o fato que viagens de avião costuma ser um bem com elasticidade-renda bastante superior à unidade.

De qualquer maneira, espera-se que a evolução tecnológica seja capaz de levar a cabo importantes reduções nas emissões de poluentes. Ao longo dos últimos 35 anos, a queima de combustível por passageiro-km caiu mais de 60%. Mais da metade desta redução deve-se à melhora na tecnologia do conjunto propulsivo e o restante à melhora na aerodinâmica, no peso e nas operações (Lee, 2000). Evidentemente, a demanda por transporte aéreo cresceu bastante ao longo deste período, o que impediu que esta melhora nas emissões por passageiro/km se transformasse em menores emissões de poluentes.

Em termos de perspectivas tecnológicas mais concretas, a União Europeia tem projetos ambiciosos de redução de mais de 80% nas emissões de NOx até 2020, em relação aos níveis de 2000 (ACARE, 2001). Além disso, há oportunidades de economia na emissão de NOx na operação dos aeroportos, com iniciativas tais como a operação de manobra da aeronave com apenas uma turbina, procedimentos modificados de decolagem e pouso, além de melhoras no sistema de gestão aeroportuária para a redução de atrasos em rota e em solo.

Outra questão de poluição local que vem ganhando mais relevância nos últimos anos é a do Material Particulado (PM). O grande problema com relação às iniciativas de controle deste poluente é a dificuldade em se medir as emissões de material particulado devidas diretamente ao transporte aéreo.

Já é reconhecido internacionalmente que as aeronaves emitem elementos químicos e produzem efeitos físicos, como trilhas de condensação que afetam o clima. Além disso, estudos afirmam que a natureza do transporte aéreo é tal que, ainda que o montante de emissões seja relativamente reduzido, tais emissões possuem um efeito desproporcional sobre o aquecimento global em relação a emissões baseadas em terra. Segundo o IPCC, a aviação seria responsável por 3,5% dos efeitos climáticos devidos à ação humana em 1992, indicando um efeito aproximadamente duas vezes maior do que o de emissões equivalentes localizadas em superfície.

Desde então, o entendimento dos processos pelos quais este efeito é tão maior avançou bastante. Segundo um relatório da Royal Commission on Environmental Protection (RCEP) no Reino Unido, o efeito das trilhas de condensação sobre a geração de nuvens do tipo *cirrus* causa efeitos sobre o aquecimento global de três a quatro vezes maiores do que a emissão de CO₂ (RCEP 2002). Caso o crescimento no transporte aéreo se mantenha dentro do previsto, mais de 5% da mudança climática devida ao comportamento humano em 2050 será atribuível ao transporte aéreo.

Uma vez que ainda não está absolutamente claro quais são os impactos da aviação no clima, as políticas mais adequadas para a mitigação dos efeitos ainda são incertas, principalmente as focadas na redução de consumo de combustível. Uma medida que parece ter sido bastante utilizada é a introdução de tarifas ambientais para o transporte aéreo – por exemplo, Mirrlees et al (2011, cap. 10 pg. 233) atribuem uma receita de 1,9 bilhão de libras às tarifas ambientais sobre o transporte aéreo. De fato, a elevação do preço por meio de taxas ambientais, ao desencorajar o transporte aéreo, tende a reduzir as emissões. No entanto, tais recursos poderiam ter efeitos mais profundos sobre os impactos ambientais do transporte aéreo caso os recursos sejam aplicados no desenvolvimento de tecnologias mais eficientes na geração de CO₂.

Ainda que a diminuição na queima de combustível seja desejável e um dos focos das iniciativas de redução de poluição, as projeções para a redução tendencial (ou seja, na ausência de mudanças tecnológicas mais marcadas) no consumo de combustíveis, da ordem de 2% ao ano (ICAO 2010 - Achieving Climate Change Goals for International Aviation), tendem a ter um efeito menor sobre as emissões de CO₂, devido ao crescimento no número de passageiros nos próximos anos.

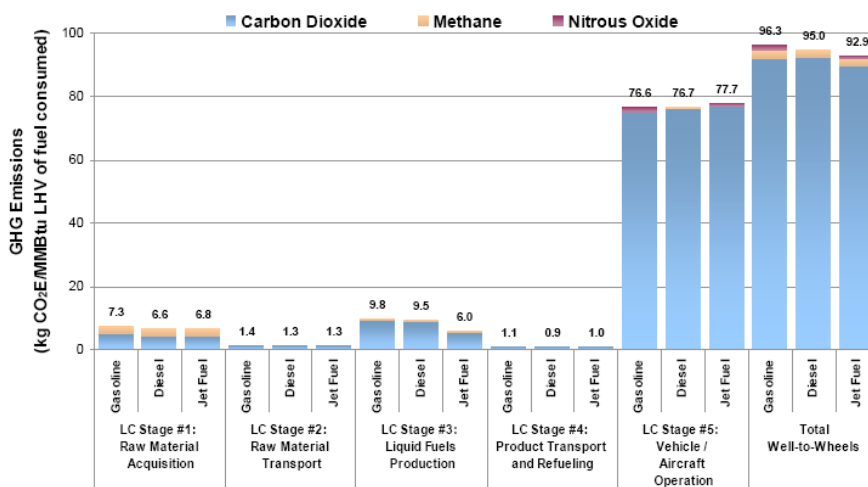
No presente texto, iremos tratar do balanço de carbono especificamente relacionado à queima de combustível no transporte aéreo, sem levar em consideração a parcela de carbono associada com a construção das aeronaves, por exemplo. Duas fontes interessantes sobre o assunto são Skone e Gerdes (1998) e Allen et al. (2010).

Em termos de ciclo de vida do produto, iremos considerar cinco estágios para a produção e consumo do combustível: aquisição da matéria-prima; transporte e armazenamento da matéria-prima; produção do combustível líquido; transporte e abastecimento do combustível; e operação do veículo. Impactos associados com o final da vida útil do produto não serão considerados, uma vez que o produto (combustível) é consumido na etapa de operação do veículo.

No entanto, usando diretamente a emissão de combustível aeronáutico, chegamos a uma emissão de 92,9 kg de CO₂ por milhão de BTU, com 84% atribuído à combustão do combustível. A principal diferença entre as duas análises está na fase de produção e refino.

O gráfico a seguir, retirado de Skone e Gerdes (2008), mostra a emissão de CO₂ com diferentes tipos de combustíveis.

Gráfico 1 Emissão de CO₂ - do Poço até a Roda (Well to Wheels)



Fonte: Skone e Gerdes (1998)

Em termos de imprecisão associada a estas estimativas, as principais fontes de variação estão associadas à qualidade do óleo cru e à forma pela qual o combustível aeronáutico é refinado.

Mais especificamente, Allen et al. (2010)⁸ reportam que uma equipe do MIT, usando dados similares, chega a uma estimativa de 87,5g de CO₂/MJ, com a combustão respondendo por 73,2% deste total. Esta mesma equipe reporta que a incerteza associada à emissão de CO₂ diretamente ligada com a queima de combustível é da ordem de 1%, mas existe uma variação grande associada com as etapas anteriores, da ordem de até 7%.

⁸ UDRI_FT_GHG_Final_Report_Jan_25_2010.pdf

O último estágio – que, segundo a figura acima, é o mais importante em termos de emissões – começa quando o reabastecimento da aeronave está completo e continua à medida que o combustível é queimado para a geração de energia. O principal foco da análise são as emissões criadas durante o processo de queima. Skone e Gerdes (2008) fornecem valores para as emissões de gases geradores de efeito estufa para aeronaves:

Tabela 3 Emissões de Gases Geradores de Efeito Estufa - Aeronaves

Fonte	Emissões (kg/MMBtu ² LHV)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Operações de Voo Média (LTO + Voos)	77,1	0,0005	0,002

Fonte: Skone e Gerdes (1998)

Evidentemente, os resultados calculados e mostrados em uma base por milha percorrida são dependentes da eficiência de combustível de cada classe de veículos e são sujeitos à variação. Finalmente, nesta etapa, as emissões são dadas por:

Tabela 4 Emissões Gases Geradores de Efeito Estufa - Etapa de Combustão

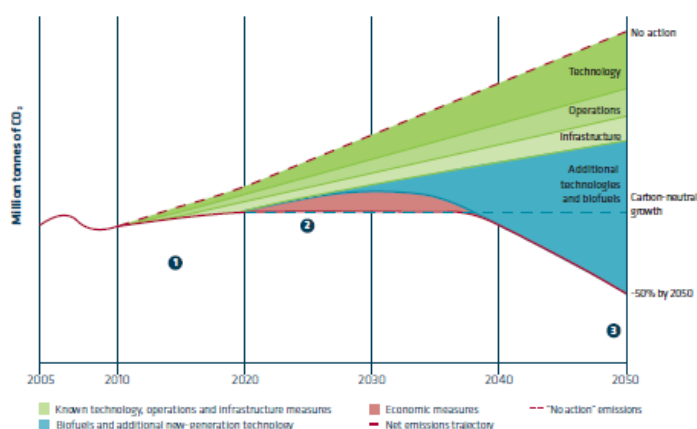
Derivado de petróleo	Emissões (kg/MMBtu LHV)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gasolina	75	4,88E-03	4,99E-03
Diesel	76,6	8,00E-05	1,75E-04
Querosene	77,1	5,00E-04	2,00E-03

Fonte: Skone e Gerdes (1998)

Comparativamente aos valores acima, desenvolvidos e calculados para o mercado americano, existem algumas diferenças no perfil de emissões no mercado brasileiro. Em termos de efeitos globais sobre a emissão de gases, a principal diferença deve estar na etapa de queima, com um maior peso dos ineficientes procedimentos de gestão aeroportuária brasileira.

Do ponto de vista de perspectivas futuras de emissões, e de como elas dependem de diferentes soluções tecnológicas, a figura a seguir mostra os cenários de redução de emissões de CO₂ pelo setor aeronáutico.

Figura 1 Emissões de CO₂



Fonte: ICAO Environment Report 2010

Segundo o ICAO, o setor tem uma estratégia baseada em quatro pilares para o alcance das metas de redução nas emissões de carbono até 2050. Destas quatro, a primeira, *tecnologia*, é a que tem maior potencial para transformar a redução em realidade. Boa parte das inovações incrementais discutidas na segunda seção estão incluídas nesta categoria.

A segunda e terceira categorias, as *melhoras na infraestrutura e operações*, também são medidas com alto potencial de concretização nos próximos anos. A implementação de técnicas mais eficientes de gestão de tráfego aéreo e de infraestrutura aeroportuária pode levar a reduções substanciais. No caso brasileiro, os investimentos em infraestrutura aeroportuária nos próximos anos também levarão a grandes reduções de emissões de gases de efeito estufa.

Como podemos notar na figura acima, as três medidas anteriores não conseguem reverter a tendência para o aumento nas emissões de CO₂ para as próximas décadas, a menos que tenhamos inovações radicais e nos biocombustíveis. A regulação setorial tem um papel importante para a concretização destas tendências.

4.2 Mudanças climáticas e regulação setorial

Existem muitos regulamentos que restringem as emissões aeronáuticas⁹. As fontes de emissão de gases geradores de efeito estufa são reguladas de forma independente por meio de regras específicas aos equipamentos, que por sua vez são atribuições de várias organizações. Como os equipamentos e processos aeronáuticos serão operados em vários países, estão sujeitos aos regulamentos de cada um deles. Por exemplo, a certificação da FAA (Departamento de Aviação Federal, na sigla em inglês) nos Estados Unidos é necessária para o uso de quase todos os equipamentos e processos aeronáuticos naquele país.

⁹ Uma fonte concisa destas regulações está em http://avstop.com/aviation_emissions/How_are_aviation_emissions_regulated.htm

A FAA impõe mais de 60 padrões que cobrem projeto de motores aeronáuticos, materiais de construção, durabilidade, instrumentos e controle, além da segurança. Além disso, tais padrões devem estar de acordo com os parâmetros impostos por outras agências.

No caso brasileiro, a regulação é atribuição da ANAC (Agência Nacional da Aviação Civil), responsável pelos RBAC (Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil). Em termos de certificação de tipo de aeronave, os regulamentos de engenharia, projeto e construção são os 21, 23, 25, 27, 29, 33 e 35, enquanto os regulamentos ambientais são os 34 e 36. Já os regulamentos operacionais – também importantes do ponto de vista de emissões – são os 91, 121 e 135. O processo de certificação de aeronaves no Brasil é longo e caro, durando aproximadamente quatro anos e com um custo de R\$ 4 a R\$ 5 milhões.

De um ponto de vista internacional, a *International Civil Aviation Organization* (ICAO) é um órgão afiliado às Nações Unidas que tem a responsabilidade de coordenar, planejar e auxiliar na implementação dos serviços de transporte aéreo pelo mundo. Tal órgão estabelece os padrões globais de emissão para motores aeronáuticos, que acabam influenciando as regulações nacionais.

Além disso, a ICAO desde há muito tempo é o fórum principal para a avaliação do desempenho dos motores aeronáuticos do ponto de vista ambiental. A abordagem geral da ICAO para a avaliação de equipamentos propulsivos é de incentivar o progresso tecnológico, elevando gradativamente as exigências ambientais dos produtos já em atividade.

Em termos das companhias aéreas, a principal entidade é a *International Air Transport Association* (IATA), que representa 230 companhias aéreas em 118 países e coordena os pontos de vista das companhias com relação ao aquecimento global. Atualmente, a IATA tem clara a necessidade de mitigação das emissões de carbono por meio dos *offsets* como uma das formas de reduzir as emissões de carbono. Outra iniciativa importante da IATA foi a criação de diretrizes e ferramentas para o uso de mercados de carbono, permitindo uma medida mais precisa das necessidades de compensação de carbono.

Estima-se que 90 milhões de toneladas de CO₂ terão de ser eliminadas com o uso de mercados de carbono até 2025 para manter o mesmo consumo de 2020. Estima-se que US\$ 7 bilhões por ano, serão gastos para compensar essas emissões. (é bom lembrar que os mecanismos de mercado não prescindem de gastos com iniciativas de redução de CO₂).

Uma grande mudança regulatória em curso atualmente é a incorporação das companhias aéreas no esquema europeu de negociação de créditos de carbono (ETS). Em outubro de 2008, o Conselho da União Europeia – o terceiro órgão europeu envolvido na medida – decidiu que o transporte aéreo seria integrado ao ETS. De acordo com esta decisão, as companhias cujos voos decolam ou pousam na União Europeia (além da Islândia, Liechtenstein ou Noruega) a partir de 2012 terão de provar que adquiriram créditos de carbono em montante suficiente para cobrir as emissões de CO₂ do voo.

As companhias aéreas europeias terão uma quota de créditos de carbono, permitindo um determinado volume de emissões de CO₂. Caso uma companhia gere menos CO₂ do que o permitido pela quota, ela poderá vender o excedente para companhias que geram mais emissões do que a quota. Isto faz com que as emissões sejam utilizadas da forma mais eficiente, o que

torna estes créditos mais eficientes do que impostos sobre a emissão de carbono. Note-se que as companhias aéreas também podem comprar os créditos de companhias fora do setor, o que faz este ser um sistema “semi-aberto”. Além disso, as companhias podem acumular os créditos excedentes ao longo do tempo.

O montante da quota vai ser determinado com base na razão entre a média de emissões anuais de CO₂ entre 2004 e 2006 e o total de transporte aéreo realizado em 2010. 82% dos créditos serão fornecidos sem custo, 15% leiloados e o restante reservado para companhias entrantes ou de alto crescimento. Uma vez que o montante gerado por aquela razão é menor do que as companhias aéreas atualmente emitem, isto implica que elas necessariamente terão de ir ao mercado para adquirir o que falta, criando incentivos para economia na emissão de CO₂.

No entanto, este mecanismo encontrou resistências, especialmente entre as companhias aéreas norte-americanas. Elas entraram com uma ação junto à Corte de Justiça Europeia contra esta medida, argumentando que a inclusão do setor no ETS é uma violação da Convenção de Chicago¹⁰ e do *Open Skies Agreement*¹¹ entre os EUA e a União Europeia¹².

Este é um exemplo de um problema regulatório sério, que voltará a ser importante nos próximos anos. De acordo com o artigo 2.2 do Protocolo de Kyoto, as partes signatárias do documento são obrigadas a buscar iniciativas de redução de emissões de gases de efeito estufa no âmbito da ICAO.

Além disso, a Convenção de Chicago obriga que não apenas os países signatários do Protocolo de Kyoto terão de ser envolvidos no processo. Isto ocorre porque esta Convenção exige que quaisquer medidas impostas em um determinado país tenham de ser aplicadas uniformemente para todos os países signatários da mesma. Além disso, medidas colocadas em um país não podem ser aplicadas em outros países.

A harmonização dos dois diplomas legais é um desafio importante que precisa ser enfrentado nos próximos anos, uma vez que a adoção de mecanismos de mercado para a mitigação de emissões é essencial para que se consiga atingir as metas de redução de emissões previstas na seção sobre as perspectivas tecnológicas.

5. Análise do impacto das mudanças institucionais e tecnológicas

5.1 Perspectivas tecnológicas e Impactos sobre o Setor

O setor tem uma estratégia baseada em alguns pilares para o alcance das metas de redução nas emissões de carbono até 2050. Destes três, o primeiro, **tecnologia**, é o que tem maior potencial para a transformar a redução em realidade. Boa parte das inovações incrementais discutidas anteriormente estão incluídas nesta categoria.

10 Acordo internacional que reconhece a soberania que cada país possui sobre o espaço aéreo acima do seu território, assinado por mais de 190 países.

11 Acordo que regulamentou a abertura do espaço aéreo das duas regiões em 2008, dando às companhias aéreas das duas jurisdições direitos iguais, com o objetivo de incentivar a competição nas rotas transatlânticas.

12 Mais informações ao final da seção 06 do Relatório Final disponível em www.ebc.fearp.usp.br

A segunda e terceira categorias, as **melhoras na infraestrutura e operações**, também são medidas com alto potencial de concretização nos próximos anos. A implementação de técnicas mais eficientes de gestão de tráfego aéreo e de infraestrutura aeroportuária pode levar a reduções substanciais. No caso brasileiro, os investimentos em infraestrutura aeroportuária nos próximos anos também levarão a grandes reduções das emissões de gases de efeito estufa.

As três medidas anteriores, todavia, não são suficientes para reverter a tendência de aumento nas emissões de CO₂ para as próximas décadas, a menos que tenhamos inovações radicais e a difusão do uso de biocombustíveis.

Podemos analisar os efeitos sobre o setor com base no ponto de vista dos especialistas. O questionário em anexo, baseado nas principais linhas de pesquisa, foi respondido por representantes das duas maiores empresas de transporte aéreo de passageiros do Brasil: TAM e Gol.

Em termos de perspectivas para os próximos anos, temos, do ponto de vista do representante da TAM, que os principais ganhos se fundamentarão em melhorias incrementais de materiais e aerodinâmica. O representante da Gol, por sua vez, enfatiza o papel das melhorias nos procedimentos operacionais nos aeroportos.

A importância dos procedimentos aéreos também se mantém no médio prazo para o representante da Gol. No entanto, esta mesma empresa considera que os biocombustíveis começarão a ser importantes já em médio prazo, diferentemente do caso da TAM, que coloca maior ênfase nos novos desenhos de motores. Os pontos de vista das duas empresas, no longo prazo, apontam para uma predominância dos efeitos de novas tecnologias de motores e biocombustíveis.

Em termos de envolvimento no desenvolvimento de inovações disruptivas, o Brasil está próximo da fronteira tecnológica no caso dos biocombustíveis aeronáuticos. No entanto, apesar de iniciativas integradas – tais como a ação da Amyris com a Azul para um avião movido a querosene gerado na planta daquela empresa – ainda existem riscos.

Em primeiro lugar, existem problemas na coordenação entre os diferentes agentes, institutos de pesquisa, donos da infraestrutura aeroportuária, setor público e empresas de transporte aéreo. Para estas, não parecem existir muitos incentivos para o uso de biocombustível no transporte aéreo.

Além disso, o investimento continua arriscado – boa parte dos investimentos descritos anteriormente são para o desenvolvimento de plantas piloto ou passagem para a fase de produção comercial, o que impõe riscos maiores do que simplesmente a operação de uma refinaria já estabelecida.

Outro ponto importante é a necessidade de integração ao longo da cadeia produtiva. Para que se tenha capacidade de atendimento da demanda por biocombustíveis aeronáuticos, deve-se superar os limites à expansão de oferta, similares aos observados no caso do etanol combustível. Por exemplo, no Brasil, há uma dificuldade com a biomassa de cana porque a produção deste material está encaixada em uma cadeia produtiva que tem por objetivo a produção e venda de dois produtos para o mundo, o açúcar e o etanol (tanto como combustível automotivo quanto etanol industrial).

Ou seja, a produção de biocombustíveis para a aviação tem que levar em conta as peculiaridades destes dois outros mercados, o que torna essencial o desenvolvimento de uma

estrutura de governança sólida e voltada para a competitividade e atendimento das demandas dos produtos que oferta, articulando toda a cadeia produtiva. Em especial, deve-se focar em garantir o fornecimento continuado dos produtos, conseguir o cumprimento de todos os direitos trabalhistas e amadurecer as relações internas e aumentar a confiança mútua de longo prazo ao longo da cadeia.

Um grande risco no desenvolvimento desta integração é o comportamento oportunista por parte de algumas empresas, visando o lucro de curto prazo e limitando o potencial para coordenação.

Os dois primeiros pontos são os mais perigosos em termos de ameaças à proeminência do Brasil no segmento de biocombustíveis aeronáuticos. Outro risco, de ordem mais regulatória, são as negociações no ICAO e nos órgãos encarregados de certificação de combustíveis.

5.2 O Sistema de Inovação Brasileiro

Iremos discutir brevemente quais são as características do sistema de inovação brasileiro e como ele se integra com os outros sistemas de inovação ao longo do mundo. Em termos de base científica, os profissionais formados no Brasil conseguem colocação em empresas estrangeiras (Airbus, Bombardier e Boeing, por exemplo). Em termos de quantidade de mão-de-obra, Bernardes e Catharino (2011) em 2005 existiam 24 cursos especializados em Engenharia Aeronáutica, sendo que 20 deles tinham sido criados no século XXI.

O investimento em Pesquisa e Desenvolvimento é mais baixo no setor em relação aos países mais desenvolvidos. Mesmo que consideremos a diferença entre as definições de setores industriais pelas classificações dos diferentes países, a diferença é importante. Note-se, todavia, que isso também se deve ao maior nível de investimento em P&D em todos os setores da economia. Isto também faz com que o volume de investimentos em ativos intangíveis seja bem mais baixo do que o observado em países desenvolvidos.

Em termos de condições de financiamento, o Brasil se mostra como um caso intermediário em relação aos países desenvolvidos. Por exemplo, como mostra ABDI (2009b), temos mais de 2,5% do PIB em investimentos alocados no Brasil por parte de empresas de Private Equity e Venture Capital. Da mesma forma, a importância dos bancos de desenvolvimento no Brasil indica que a limitação de crédito é um problema menos importante do que em outros países da América Latina, por exemplo.

Todos estes fatores contribuem para que o Brasil tenha potencial para se tornar um centro de inovação global, à medida que o país vai diminuindo a distância em relação aos países mais desenvolvidos. Uma característica chave desta nova polarização está no crescimento da colaboração científica internacional, facilitada por redes internacionais.

A colaboração internacional não acontece apenas por meio da academia; a inovação também força cada vez mais as empresas a compartilhar os custos, buscar experiência complementar, ganhar acesso rápido a tecnologias e conhecimentos diferentes, colaborando assim em redes que se estendem por várias economias.

Além de colaboração entre as empresas, boa parte da internacionalização das inovações acontece por meio das atividades internacionais de P&D das empresas. À medida que os países emergentes passam a ser atraentes em termos de localização, as companhias também começam a investir em Pesquisa e Desenvolvimento nestes países.

Evidentemente, até pelo próprio grau de desenvolvimento do país, o Brasil ainda apresenta importantes diferenças com relação a países desenvolvidos. Mesmo com algumas iniciativas, mais notadamente a FAPESP, em que existem iniciativas em várias esferas governamentais para o desenvolvimento de ciência e tecnologia, o grau de integração entre as diferentes esferas governamentais para a inovação ainda é baixo em comparação àquele país.

Em resumo, o que temos no Brasil é um ambiente de inovação que, com base no seu tamanho e crescimento, possui elementos importantes que fazem com que seja visto como chave para algumas iniciativas de inovação. Neste sentido, ele está mais bem posicionado para lidar com a transição para a Economia do Baixo Carbono do que outros países da América Latina.

6. Arcabouço de Política – Transição para uma Economia de Baixo Carbono

O desenvolvimento de um sistema de inovação adequado para a transição para uma economia de baixo carbono tem muitas implicações de política. De uma forma geral, falhas de mercado são as principais circunstâncias que incitam a ação de política governamental. Nesta seção iremos detalhar quatro formas específicas de falhas de mercado.

Os negócios não são capazes de se apropriar dos benefícios completos resultantes dos seus investimentos, o que leva a um grau de inovação menor do que o socialmente ótimo. Neste caso, o apoio público pode ser importante para a geração de investimentos no nível socialmente ótimo. O conhecimento produzido pelas universidades e institutos de pesquisa públicos é um bem público que contribui de forma importante para os esforços nacionais de inovação. Especificamente no caso de tecnologias de baixo carbono para o setor aeronáutico, o desenvolvimento de tecnologias para a formação de querosene por meio de biomassa no IPT, discutido anteriormente, seria um bom exemplo deste tipo de bem público. Uma ênfase especial deve ser dada à pesquisa pré-competitiva (ou seja, aquela realizada com relação nos estágios anteriores ao desenvolvimento de plantas piloto), pois esta tem um menor grau de apropriabilidade.

Note-se, todavia, que as externalidades também podem ser resolvidas por meio da criação de direitos de propriedade que podem ser negociados em novos mercados. Um exemplo deste tipo de inovação é o mercado de créditos de carbono.

O segundo dos problemas é composto pelas assimetrias informacionais. Tais problemas são especialmente agudos no caso de mercados financeiros. Neste caso, fornecedores de financiamento podem ter dificuldade em conseguir todas as informações sobre a inovação e as probabilidades de sucesso.

Se a ação governamental for necessária para criar tais mercados ou se o governo é um grande consumidor neste mercado, a incerteza sobre a ação governamental pode levar a pro-

blemas informacionais adicionais. Isso é especialmente importante nos mercados com características de bem público tais como mercados de bens e serviços ambientais, alguns serviços de saúde e educação.

O terceiro dos problemas é a existência de deficiências institucionais, quando as regras existentes inibem ou previnem o investimento em inovação. Os direitos de propriedades imperfeitos ou mal definidos, padrões ou regulamentos específicos, regimes de competição com elevados custos de entrada ou de mudança para novas tecnologias podem criar barreiras específicas à inovação. Além disso, ambientes inadequados de governança corporativa também podem ser especialmente daninhos à inovação.

O próximo dos problemas são as falhas de coordenação, quando o sistema de inovação não possui organização suficiente para reunir, compartilhar e analisar as informações relativas às oportunidades de inovação. Por exemplo, em muitos mercados de alta tecnologia é necessária a criação de novas parcerias envolvendo o desenvolvedor de tecnologia e todos os elementos ao longo da cadeia de fornecimento.

Além disso, os investimentos em infraestrutura são especialmente complexos nesta dimensão, pois requerem uma combinação de instituições e organismos do setor privado e público e, do ponto de vista privado, este conjunto de instituições pode parecer fragmentado e de difícil navegação. Falhas de coordenação são especialmente ruins quando se adota uma abordagem sistêmica para a inovação, contexto em que elas são chamadas de falhas do sistema.

Estas falhas de sistema dificilmente são resolvidas sem a ação governamental. Um dos caminhos de política governamental mais bem sucedidos para a resolução destas falhas é o fortalecimento de interdependências complexas.

O primeiro passo neste fortalecimento é a identificação dos elos pelos quais se dá esta inter-relação. Eles podem ser econômicos, envolver a transmissão de conhecimento, o uso compartilhado de infraestruturas, assim por diante. As conexões precisas podem não ser especificadas antecipadamente, e frequentemente necessitam de uma investigação empírica detalhada para ocorrer.

Todavia, quando uma nova tecnologia tem uma natureza disruptiva, a coordenação pode ser muito difícil. Algumas inovações, tais como as envolvidas com a transição para uma economia de baixo carbono, são radicais com respeito a procedimentos estabelecidos, capacidades de engenharia ou bases de conhecimento – elas envolvem grandes descontinuidades e choques aos sistemas existentes.

Uma abordagem importante para se resolver as falhas de sistema sugere de maneira clara que a identificação de falhas de coordenação, o desenho de instrumentos de política para superá-las e o desenvolvimento de atores relevantes podem ser uma motivação importante para a política pública. Um modelo interessante de interação entre governo, empresas e universidade é o dos Estados Unidos, mencionado no apêndice 2 do Relatório final.

Mais especificamente, uma política baseada nos pontos a seguir tem um excelente papel em termos de incentivar e assegurar o desenvolvimento de biocombustíveis:

1. Incentivar a pesquisa em novas fontes de matérias-primas e processos de refinamento das mesmas em direção à querosene aeronáutica. Esta medida é importante tendo em vista o caráter de bem público das inovações discutido anteriormente. Um cuidado adicional deve ser que este incentivo não deve ser discriminatório em termos de tecnologia. Um exemplo bastante interessante neste sentido é o da CleanSky, uma parceria entre a Comissão Europeia, as empresas do setor e instituições acadêmicas. Mais especificamente, deveríamos ter como objetivos:
 - a. Incentivo à criação de consórcios envolvendo mais de uma instituição de pesquisa, empresas privadas e agências governamentais para o desenvolvimento de tecnologias.
 - b. Incentivo aos grupos de pesquisa existentes (tanto no setor privado quanto no público).
2. Reduzir o risco percebido com os investimentos – públicos e privados – para a produção de combustíveis aeronáuticos. Note-se que neste ponto o foco é sobre o risco de investimento propriamente dito – riscos regulatórios e de demanda serão abordados mais adiante. Existem vários mecanismos para a redução de riscos de investimento, desde o incentivo a parcerias de longo prazo, até mecanismos financeiros de diversificação de risco. A importância deste ponto reside na questão de falha de mercado decorrente de assimetria de informações mencionada anteriormente.
3. Fornecer incentivos para as companhias aéreas consumirem em quantidade os biocombustíveis em um momento inicial da produção – mitigando o risco de demanda associado com o investimento nesta tecnologia. Talvez o uso de tarifas ambientais, com os recursos sendo reinvestidos para os outros pontos, seria interessante – a depender da relação com o restante do setor público a respeito da destinação dos recursos.
4. Trabalhar para um compromisso global de sustentabilidade internacional, enfrentando questões como as de conflito potencial entre as medidas do Protocolo de Kyoto e a Convenção de Chicago no âmbito da ICAO. Uma iniciativa importante neste sentido é envolver as instituições de pesquisa para mapear e reconhecer padrões de diferentes organismos para incentivar a sustentabilidade no setor aéreo. Este trabalho tem por objetivo mitigar o risco regulatório associado com o investimento nesta tecnologia.
5. Estabelecer coalizões englobando todas as partes da cadeia de suprimentos do setor. Esta medida tem por objetivo mitigar os riscos associados com o suprimento de matérias-primas, considerando o problema potencial de biomassa de cana-de-açúcar mencionado anteriormente.

Em termos de apostas tecnológicas, é natural que o Brasil aproveite esta vantagem na produção de biocombustíveis. Ou seja, em termos de tecnologias disruptivas, esta seria mais importante do que investimentos em desenhos alternativos de turbinas aeronáuticas, por exemplo. No entanto, a transição da tecnologia para o fornecimento em larga escala ainda apresenta alguns pontos obscuros – como, por exemplo, qual seria a fonte de biomassa a ser utilizada. Desta forma, uma política que evitasse a escolha de tecnologias específicas, privilegiando algumas tecnologias em detrimento de outras, seria desejável.

Em termos de objetivos desejáveis para o Brasil, podemos elencar os seguintes:

- Criação de uma indústria nacional de biocombustíveis aeronáuticos, importante para o uso no transporte aéreo nacional e internacional.
- Manutenção da importância da Embraer no mercado em que ela atua.
- Aumento no transporte aéreo com a incorporação das classes C e D com um aumento pequeno das emissões de CO₂.

Concluindo, a transição para uma economia de baixo carbono vai colocar desafios para a economia como um todo. Em se tratando de um país de renda média como o Brasil, em que a capacidade de geração de tecnologia é mais baixa, isto coloca perigos adicionais para o setor. A grande força está em dois pontos: (1) o conhecimento acumulado da experiência da Embraer e (2) a base de conhecimento no Brasil com biocombustíveis.

Referências Bibliográficas

- ACARE, Strategic Research Agenda 1-Volume 2, Section 3. "The Challenge of the Environment," ACARE Report, October 2002. Disponível em: <http://www.acare4europe.org/docs/es volume1-2/volume2-03-environment.pdf>
- Advisory Council for Aeronautical Research in Europe, "European Aeronautics – A Vision for 2020", Janeiro, 2001, disponível em http://ec.europa.eu/research/growth/aeronautics2020/pdf/aeronautics2020_en.pdf (acesso em 29/07/2012)
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL Estudo prospectivo aeronáutico: relatório geral. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, - Brasília: Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2009. Série Cadernos da indústria ABDI, v.XII.
- _____ A Indústria de Private Equity e Venture Capital – 2º Censo Brasileiro. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, - Brasília: Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2009b. 420pp
- Allen, David T., Murphy, C., Rosselot, K. S., Watson, S., Miller, J., Ingham, J. e Corbett, W. "Characterizing the Greenhouse Gas Footprints of Aviation Fuels from Fischer-Tropsch Processing", Relatório Final University of Dayton Research Institute - Agreement No. RSC09006- Account No. 2919890002 - Prime Agreement No. F33615-03-2-2347 awarded to The University of Texas at Austin, Center for Energy and Environmental Resources. Disponível em http://www.utexas.edu/research/ceer/biofuel/pdf/UDRI_FT_GHG_Final_Report_Jan_25_2010.pdf (Acessado em 29/7/2012).
- BERNARDES, R. e CATHARINO, M *Relatório Setorial – Avaliação do Fundo Setorial para o Setor Aeronáutico* (CT Aero). 2010.
- BIS – DEPARTMENT FOR BUSINESS INOVATION & SKILLS (2011) *Innovation and Research Strategy for Growth*. BIS Economics Papers nº 15.
- BITTENCOURT, P.F., RAPINI, M. S., BRITTO, J. N. P., PÓVOA, L.M.C.,e ANTUNES, P.C.(2008) *Patterns of Universities-Firms Interaction in Brazil in four industrial sectors*. Paper presented at the VI Globelics Conference.

- CASSIOLATO, J. E., BERNARDES, R. e LASTRES, H. (2002) *Transfer of technology for Successful Integration into the Global Economy: A case study of Embraer in Brazil*. UNCTAD/ITE/IPC/Misc. 20.
- CGEE (2010) *Biocombustíveis aeronáuticos: progressos e desafios* – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.
- CHARLES RIVER ASSOCIATES *Innovation in Aerospace and Defense*. Disponível em http://www.google.com/url?sa=t&rc=t=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.crai.com%2FuploadedFiles%2FPublications%2Finnovation-in-aerospace-and-defense.pdf&ei=KQaGT_K4JtGhtweG7ZHRBw&usg=AFQjCNHrW-37Go3XJMz7YB4aQD_2XMkB4WQ.
- Clearwater Corporate Finance LLP “*Aerospace Global Report 2011*” Disponível em http://www.imap.com/imap/media/resources/Aerospace_8_1FED752787A1E.pdf
- Davenport, T. (1993) ***Process Innovation: Reengineering Work Through Information Technology***, Harvard Business School Press, Boston
- Davenport, T. (1993) ***Process Innovation: Reengineering Work Through Information Technology***, Harvard Business School Press, Boston
- FAA *Aerospace Forecasts 2011-2031*. Disponível em http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/apl/aviation_forecasts/aerospace_forecasts/2011-2031/
- GOUVELLO, C. Setor de Transportes: Cenários de Referência e de Baixo Carbono. In: CHRISTOPHE DE GOUVELLO. *Estudo de Baixo Carbono para o Brasil*. Washington: Banco Mundial, 2010. Cap. 5, p. 110-132.
- Lee, J. J., Lukachko, S. P., Waitz, I. A., and Schafer, A., “Historical and Future Trends in Aircraft Performance, Cost and Emissions,” *Annual Review of Energy and the Environment*, Volume 26, 2001.
- IBGE. *Pesquisa de Inovação Tecnológica: 2008*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- ICAO, *ICAO ENVIRONMENT REPORT 2010*. Disponível online em: <http://www.icao.int/environmental-protection/Pages/EnvReport10.aspx>
- ICAO (2010) “*Achieving Climate Change Goals for International Aviation*” (Apresentação disponível em <http://www.icao.int/Newsroom/Presentation%20Slides/Achieving%20Climate%20Change%20Goals%20for%20International%20Aviation.pdf>)
- Intergovernmental Panel on Climate Change, “*Special Report on Aviation and the Global Atmosphere*”, edited by J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, and M. McFarland, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, 1999
- INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. *CO2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION: HIGHLIGHTS*. Paris, 2011.
- King, N. and Anderson, N. (2002), ***Managing Innovation and Change: A Critical Guide for Organizations (2nd Ed)***, Thomson, London.
- McCollum, David L, Gould, Gregory and Greene, David L, (2010), *Greenhouse Gas Emissions from Aviation and Marine Transportation: Mitigation Potential and Policies*, Institute of Transportation Studies, Working Paper Series, Institute of Transportation Studies, UC Davis.
- Mirrlees, J.; Adam, S.; Besley, T.; Blundell, R.; Bond, S.; Chote, R.; Gammie, M.; Johnson, P.; Myles, G. & Poterba, J. (2011), *Tax by design*. Disponível em www.ifs.org
- Moshe Givoni & Piet Rietveld, 2006. “*Choice of Aircraft Size - Explanations and Implications*”, Tinbergen Institute Discussion Papers 06-113/3, Tinbergen Institute.

- Mowery, David. (1987) *Alliance Politics and Economics: Multinational Joint Ventures in Commercial Aircraft*.
- MONTORO, GCF e MIGON, MN (2009) *Cadeia produtiva aeronáutica brasileira: oportunidades e desafios*, 552p. Rio de Janeiro: BNDES, 2009.
- Neiva Embraer, 2008, “*Aeronave Ipanema - Vantagens do Motor a Álcool*”, disponível em: <http://www.aeroneiva.com.br/pt-BR/Aeronave-Ipanema/Vantagens/Paginas/Conheca-as-Vantagens.aspx>, acessado em 29/07/2012.
- PISANO, G., & SHIH, W. *Restoring American competitiveness*. Harvard Business Review, 87, 3–14, 2009.
- PRITCHARD, D. e MACPHERSON, A. Outsourcing US commercial aircraft technology and innovation: implications for the industry’s long term design and build capability. CANADA – UNITED STATES TRADE CENTER OCCASIONAL PAPER NO. 29. 2004.
- PLATZER, M. D. “*U. S. Aerospace Manufacturing: Industry Overview and Prospects*” *CRS Reports for Congress*, Disponível em <http://www.fas.org/sgp/crs/misc/R40967.pdf>
- Royal Commission on Environmental Pollution, “*The Environmental Effects of Civil Aircraft in Flight*”, Londres, Reino Unido, 2002, disponível em http://www.aef.org.uk/uploads/RCEP_Env__Effects_of_Aircraft__in__Flight_1.pdf (acesso em 29/07/2012)
- REDE DE TECNOLOGIA DO RIO DE JANEIRO. P&D e Inovação para Micro e Pequenas Empresas do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CGMQ-FjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.redetec.org.br%2Fpublico%2Ftemplates%2Fhtm%2Fredetec%2Fimg%2Fflivro_pd.pdf&ei=u-qjT_b-J4SE8ATdv_23CQ&usg=AFQjCNFjJuAaDB-CRHVhcsH8sUCqF0N5dg. 2009.
- ROMERO, J.M. The development of Aerospace Clusters in Mexico. Globelics Working Paper Series nº 2010-03.
- Skone, Timothy J., and Kristin Gerdes. “*Development of Baseline Data and Analysis of Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Petroleum-Based Fuels.*” *US Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, Office of Systems, Analysis and Planning*. November 26, 2008. <http://www.netl.doe.gov/energy-analyses/pubs/NETL%20LCA%20Petroleum-Based%20Fuels%20Nov%202008.pdf> (Acesso em 29/07/2012).
- SWAFEA (2011) *Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy in Aviation – Final Report*. Disponível em <http://www.swafea.eu/LinkClick.aspx?fileticket=IIISmYPFNxy%3d&tabid=77> (Acessado em 29/7/2012)
- US Department of Commerce – International Trade Administration “*The U.S. Jet Transport Industry Competition, Regulation, and Global Market Factors Affecting U.S. Producers*”. Disponível em http://trade.gov/static/aero_rpt_jet_transport.pdf
- U.S. EPA, “*Evaluation of Air Pollutant Emissions from Subsonic Commercial Jet Aircraft, Final Report*,” Engine Programs and Compliance Division, Office of Mobile Sources, Ann Arbor, MI, elaborado para EPA por ICF Consulting Group, Abril 1999, EPA-420-R-99-013.
- USITC “*Competitive Assessment of the U. S. Large Civil Aircraft Aerostructures Industry*”. Disponível em <http://www.usitc.gov/publications/332/PUB3433.PDF>
- USITC “*The Changing Structure of the Global Large Civil Aircraft Industry and Market: Implications for the Competitiveness of the U. S. Industry*” Disponível em <http://www.usitc.gov/publications/332/pub3143.pdf>
- Weitz, I., Townsend, J., Cutcher-Gershenfeld, J., Greitzer, E. e Kerrebrock, J. (2004) ***Aviation and the Environment: A National Vision. Report to the United States Congress***. Disponível em http://web.mit.edu/aeroastro/partner/reports/congrept_aviation_envirn.pdf (Acesso em 29/07/2012).

Indústria Automobilística

Claudio Ribeiro de Lucinda
Rodrigo Mantaut Leifert

Introdução

O presente capítulo é fruto de um projeto desenvolvido em parceria entre o BNDES e a FEA-RP/USP com o intuito de analisar os impactos de uma transição para uma economia de baixo carbono com um foco no setor automotivo.

O capítulo analisa primeiro os fatores críticos para a competitividade internacional, apresentando quais são os principais pontos que o setor automotivo brasileiro enfrenta para conseguir se tornar competitivo perante os outros países. A seguir, é feita uma análise do perfil tecnológico do setor e de sua dinâmica, considerando que o investimento em P&D se mostra chave para o desenvolvimento desse setor.

Logo após, mas ainda na segunda seção, são analisados os impactos ambientais causados pelo setor automobilístico, tanto do ponto de vista de emissões quanto do fim da vida útil do veículo, seguida de uma revisão sobre a regulação ambiental do setor e uma revisão das mudanças tecnológicas que visam à redução de emissões.

A terceira seção apresenta as perspectivas de mudança tecnológica do setor para o caso brasileiro, embasadas por uma pesquisa de campo realizada com os membros da indústria automotiva. Após esta revisão das perspectivas, a quarta seção apresenta sugestões de políticas que podem ser adotadas para a transição de uma economia de baixo carbono no país, tanto de políticas setoriais quanto políticas para grandes centros urbanos com alta densidade de veículos.

A indústria automotiva é uma das mais desenvolvidas na indústria brasileira, porém ainda tem muitos desafios do ponto de vista institucional, tecnológico, industrial e político para se tornar mais competitiva e eficiente. Apenas assim será possível produzir um veículo menos poluente, com tecnologias desenvolvidas por centros de pesquisa nacionais e mais barato para o consumidor.

1. Fatores Críticos para a Competitividade Internacional

O setor automotivo passou nos últimos trinta anos por um processo de reestruturação significativo em função de dois fenômenos: a saturação dos mercados nos países centrais (EUA, Japão, União Europeia) e a emergência de um novo paradigma produtivo (Bahia e Domingues, 2010)¹.

Devido à saturação dos mercados centrais, o fluxo de investimento direto externo (IED) em direção a países em desenvolvimento aumentou, além de ocorrer uma busca intensa de diferenciação de produto. Para o setor a escala de produção é decisiva para a lucratividade, produtividade e incorporação de inovações (Bahia e Domingues, 2010).

O segundo fenômeno foi a mudança no processo produtivo, com o sistema toyotista, caracterizado por buscar uma produção flexível e compacta, aplicando técnicas de controle de produção que visam reduzir os custos da matéria prima e evitar desperdícios ao longo da cadeia. Os estoques foram drasticamente reduzidos, assim como a complexa e custosa logística a eles associada. Como

1 Referências detalhadas sobre o mercado, estrutura de oferta e demanda, encontram-se no relatório final do projeto.

esse sistema é intensivo em capital e tecnologia, o uso de mão de obra é menos intenso. A produção nesse setor é marcada pela internacionalização, as empresas buscam implantar unidades produtivas nos principais mercados e nas principais regiões produtoras. Dessa maneira é possível se diferenciar pela qualidade, produzindo de modo mais eficiente e com preço menor ao consumidor.

A fim de avaliar os fatores críticos para a competitividade dentro de um determinado setor, Coutinho e Ferraz (1993) dividem esses fatores em três grupos: internos à empresa, estruturais e sistêmicos.

Os fatores internos à empresa são aqueles sobre os quais as firmas possuem poder de decisão e por meio deles irão buscar se diferenciar de seus competidores. No caso das montadoras, isso ocorre por meio de investimentos em ampliação do parque industrial, capacitação da mão de obra e desenvolvimento de novos produtos e tecnologias. A Anfavea (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores) prevê para o período 2011–2015 um investimento de US\$ 22 bilhões por parte das montadoras.

Como a indústria automobilística depende de constantes inovações em tecnologia e engenharia, é necessário aumentar o grau de automação das linhas de montagem e a eficiência na gestão e organização do processo produtivo.

Os fatores estruturais sofrem influência indireta das empresas e caracterizam a relação de competição do setor. Isso engloba o mercado consumidor, a configuração da indústria e a concorrência. No caso do setor automobilístico, temos que o mercado consumidor se encontra em expansão, com o crescimento do poder aquisitivo da população e facilidade para obter financiamentos longos, o que acarretou um aumento do número de licenciamentos de novos veículos, que saltou de 1,4 milhões de unidades em 2003 para 3,5 milhões de unidades em 2010.

Já a configuração do setor apresenta uma descentralização espacial das montadoras pelo país, sendo que há plantas em SP, MG, RJ, GO, RS, PR e BA. Esse processo foi decorrente de um aumento da concorrência no setor com a entrada de novas empresas, que aproveitaram os benefícios oferecidos pelo governo via incentivos fiscais e doação de terrenos para construir plantas fora da Grande São Paulo. Segundo Barros e Pedro (2011), a indústria apresenta uma cadeia de valor integrada, devido a forte interação entre os fornecedores de primeira ordem e as montadoras, o que permite que o veículo seja produzido e desenvolvido localmente.

Os fatores sistêmicos seriam aqueles sobre os quais as empresas não possuem controle, como a conjuntura macroeconômica, a qualidade do capital humano, os órgãos reguladores e a infraestrutura. O atual cenário econômico em que a taxa de câmbio se encontra apreciada e a demanda interna, aquecida levou a uma forte entrada de veículos importados. A fim de proteger a indústria, o governo anunciou um novo RAB (Regime Automotivo Brasileiro). Dentre as medidas pretendidas está a exigência de 65% de conteúdo nacional nos veículos produzidos aqui. Aqueles que não cumprirem essa exigência terão um aumento de 30 pontos percentuais do IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) Também haverá medidas que obrigam as empresas a investirem em pesquisa e desenvolvimento.

O governo também reavaliou o acordo comercial com o México, pois o Brasil os veículos vindos daquele país entram no Brasil isentos de imposto de importação e com alíquotas de IPI reduzidas, o

que poderia minar as medidas já citadas no parágrafo anterior. Essas ações do governo visam atrair investimentos para ampliar a capacidade de produção, desenvolver a capacidade tecnológica das empresas instaladas no País e aumentar a oferta de emprego.

A infraestrutura se mostra um entrave para as exportações do setor automobilístico. O transporte rodoviário é o principal meio para deslocar cargas dentro do país e encontra-se em uma situação preocupante. Segundo o instituto ILOS (Instituto de Logística e Supply Chain), a malha rodoviária brasileira apresenta apenas 13% das rodovias pavimentadas. Os portos, por estarem defasados em termos de tamanho e tecnologia, também representam um ponto de estrangulamento. Isso afeta a logística das empresas e contribui para diminuir a competitividade das exportações das montadoras. Todavia, alguns subsetores como o de autopeças, por se concentrarem em São Paulo e relativamente perto dos principais portos, não sofrem tanto com esse problema.

A Anfavea divulgou em julho de 2011, o resultado de um estudo feito pela PwC, em que o custo da cadeia automotiva no Brasil chega a ser 60% superior à China, 20% à Índia e 5% superior ao México². Apesar de contar com aspectos positivos como o mercado interno aquecido, taxas de juros em queda e as novas medidas do governo para o setor visando o aumento de investimentos no país, ainda há grandes desafios para aumentar a competitividade no setor em relação aos demais países emergentes.

É possível apontar dentro do setor automotivo três fatores críticos para a competitividade internacional:

- Aproximação entre as montadoras e os seus fornecedores, de modo que os principais fornecedores ganhem importância no processo de desenvolvimento do produto.
- Grande investimento em P&D, visando aumentar o esforço tecnológico e a capacidade de articular eficientemente toda a cadeia de produção para conseguir criar produtos mais modernos e eficientes onde se possa aplicar o conceito de diferenciação de produtos.
- Ter uma estratégia global de forma a atingir diferentes mercados consumidores, seja por meio de uma maior coordenação entre as diversas subsidiárias, ou realizando alianças, ou por meio de fusões e aquisições, otimizando o uso de recursos e desenvolver projetos que atendam as preferências regionais.

Nestas três dimensões, a indústria automobilística brasileira se posiciona bem na primeira e na terceira, uma vez que todas as empresas aqui instaladas são subsidiárias de grupos multinacionais e são integradas às cadeias globais de fornecedores. No entanto, o desafio aqui é no segundo ponto, o do investimento em P&D, uma vez que grande parte desta pesquisa é realizada no exterior, nos centros globais das respectivas empresas. Na seção seguinte, iremos detalhar os aspectos da dinâmica tecnológica atual.

² Informação retirada do jornal Estado de São Paulo, disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/negocios+industria,custo-da-industria-automotiva-no-brasil-e-60-maior-que-na-china,73805,0.htm>>

2. Dinâmica tecnológica

O *U.S. Bureau of Census* (BOC) considera o automóvel como uma plataforma hospedeira de tecnologias de ponta e a indústria como produtora dessas tecnologias (Carvalho, 2008). O setor utiliza e desenvolve internamente componentes de quatro áreas avançadas: Computadores e telecomunicações, eletrônica, manufatura integrada por computadores e design de materiais (Carvalho, 2008).

A eletrônica se mostra cada vez mais importante na composição dos veículos automotores. Carvalho (2008) mostra que a parcela da eletrônica no custo corrente, que era de 10% em 2000 e passou para 20% em 2006, pode chegar a 40% em 2015.

Para fazer frente a este aumento, as montadoras estão buscando parcerias com empresas do setor de informática para desenvolver sistemas multimídia, como por exemplo, a Ford com a Microsoft e a Toyota com a Intel. Esses sistemas centralizam as funções de entretenimento, conectividade e navegação do veículo. (Valor Setorial – Indústria Automobilística, 2011).

Outra tendência do setor é o desenvolvimento de materiais mais leves e resistentes, como aços de alta resistência, ligas de magnésio, alumínio, fibra de carbono, cerâmica e polímeros, implicando processos avançados de manufatura (Carvalho e Pinho, 2009). Esses materiais diminuem o peso do veículo, possibilitam uma economia de combustível e podem ser recicláveis, como é o caso do alumínio, dos polímeros e do aço. Outro impacto importante desses novos materiais é que ocorre a diminuição do número de componentes e de fases de produção de peças, representando no final um tempo menor da montagem dos veículos (Medina e Naveiro, 1998).

Além disso, tem-se observado uma importância crescente do desenvolvimento de novas tecnologias de propulsão dos veículos automotivos como arma competitiva (Carvalho e Pinho, 2009). Outro fator destacado pelo Valor Setorial – Indústria Automobilística (2011), é a busca pelo *downsizing* dos motores, que seria a redução do tamanho, mas com preservação ou melhora do desempenho.

Nos Estados Unidos, o V8 está sendo substituído pelo V6, e os modelos V6 pelo de 4 cilindros em linha. A FIAT, por sua vez, já fabrica um motor de dois cilindros com uma tecnologia chamada MultiAir, em que o comando de válvulas é acionado por um sistema hidráulico-elétrico ao invés dos eixos de cabeçote.

Um das grandes áreas de pesquisa do setor é o desenvolvimento de veículos com baixa emissão de carbono e que utilizem combustíveis de forma mais eficiente. Dentre as alternativas disponíveis estão os biocombustíveis como o etanol, que funcionam em motores especialmente desenhados para este combustível ou em motores com a tecnologia flex-fuel, que aceitam também gasolina. Contudo, essa tecnologia ainda pode evoluir no sentido de tornar-se mais eficiente, porque apesar de aceitar dois tipos de combustíveis, o motor flex-fuel é menos eficiente no uso de cada combustível do que os motores especializados.

Existem também pesquisas para produção de combustíveis sintéticos, obtidos com a síntese de gás natural (Gas-to-Liquids, GTL), carvão (Coal-to-Liquids, CTL) e biomassa (biomass-to-liquid, BTL) (Casoti e Goldenstain, 2008)

As montadoras também estão investindo na pesquisa de novos sistemas de propulsão, dentre eles podemos destacar três tipos: Híbrido, Plug-in e Fuel-Cell³. O veículo híbrido (Hybrid Electric Vehicle, HEV) contém dois motores, um movido à combustão de baixa cilindrada e outro elétrico. Em baixas rotações, apenas o motor elétrico é acionado. Caso seja necessária maior velocidade, entra em ação o motor a combustão, sendo que ambos operam conjuntamente. Durante as frenagens, o motor elétrico opera como gerador, recarregando a bateria por meio de energia cinética (tecnologia KERS). Essa dinâmica leva a um melhor desempenho do motor a combustão, de modo a utilizar menos combustível. Chan (2007) aponta que apesar das vantagens apresentadas, os HEV's ainda têm pontos que podem ser melhorados, como o custo de introdução dos motores, o tamanho das baterias e a sua autonomia.

Os veículos Plug-in (PHEV), por sua vez, funcionam de modo similar ao HEV, porém a bateria pode ser recarregada na tomada. Existem também versões do Plug-in que fazem uso apenas do motor elétrico, dispensando a gasolina e o motor à combustão. Porém, há uma perda de autonomia, limitada a apenas quilômetros.

A alternativa ao HEV são os veículos movidos à célula de combustível (Fuel Cell Vehicle, FCV), que geram eletricidade por meio de hidrogênio. A energia gerada é utilizada para rodar ou pode ser estocada em baterias e ultracapacitores. Como não faz uso de combustíveis fósseis, o resíduo produzido pela reação química não é poluente. No caso, é gerada apenas água (Chan, 2007).

Apesar de o FCV se mostrar uma excelente alternativa, apresenta entraves. O custo de fabricação da célula de combustível ainda é muito elevado e, além disso, é necessário ampliar sua durabilidade e potência. Outra dificuldade para a adoção da tecnologia diz respeito ao combustível. O hidrogênio não é encontrado em forma natural no ambiente, tendo de ser produzido com base em outras substâncias⁴. Além disso, será necessário montar toda uma infraestrutura de produção e abastecimento de hidrogênio, a exemplo do que já existe para os combustíveis tradicionais (Casoti e Goldestein, 2008).

O investimento em P&D para novas tecnologias de combustíveis e motores não é apenas um campo muito promissor para o setor automobilístico, mas também estratégico. Segundo Carvalho (2008), as empresas temem ficar alijadas da competição caso não dominem esses processos. O autor acredita que esse campo pode permitir a entrada de novos competidores na montagem final dos veículos, mas vê com maior probabilidade o ingresso em estágios intermediários da cadeia produtiva, já que o advento de uma nova tecnologia que altera uma característica básica do automóvel deve provocar alterações no processo competitivo.

No setor automobilístico, a Pesquisa e Desenvolvimento é organizada cada vez mais em escala mundial, sendo que diferentes empresas adotaram diversas estratégias de organização destas atividades. Algumas empresas passaram a delegar mais autonomia para as filiais, outras preferem centralizar as decisões do desenvolvimento de projetos apenas nas matrizes. Bahia e Rodrigues (2010) detalham as estratégias de P&D entre matriz e filiais:

³ Para mais informações, ver seção 3.3 do Relatório Final.

⁴ Atualmente, o hidrogênio é produzido com base no gás natural e ainda não possui custo atrativo em relação à gasolina. (Casoti e Goldestein, 2008).

- P&D centralizado etnocêntrico
- P&D centralizado geocêntrico
- P&D descentralizado policêntrico
- P&D em hub
- Rede integrada de P&D

As matrizes vão procurar adotar a estratégia que for mais conveniente, de acordo com sua forma organizacional. Devido à reestruturação da cadeia de suprimentos, os fornecedores de primeiro grau passaram a ganhar importância no desenvolvimento de produto, principalmente a partir da fase de engenharia do produto e na fase de engenharia de processo.

3. Perfil tecnológico brasileiro

No Brasil, a taxa de inovação do setor automotivo, divisão entre o número de empresas que apresentaram inovação em produto ou processo pelo número total de empresas do setor, apresentou uma evolução ao longo dos últimos anos, passando de 37% em 2005 para 45% em 2008, segundo dados da Pesquisa de Inovação Tecnológica do IBGE- PINTEC. Enquanto isso, a indústria de transformação como um todo apresentou uma taxa de 34% em 2005 e 38% em 2008.

Negri et al. (2008) sugerem que sejam analisados os investimentos em atividades inovadoras e em P&D, pois estes devem ser menos afetados pelo número de empresas na base industrial brasileira. Os gastos com inovação incluem desde pesquisa até investimentos em máquinas e equipamentos. Já os investimentos em P&D compreendem o trabalho criativo sistemático, que visa aumentar o estoque de conhecimento, sendo um conceito mais restrito.

Os autores sugerem de que o processo de inovação do setor automotivo brasileiro é mais ligado à aquisição de tecnologia por meio de máquinas e equipamentos em detrimento do P&D. É um indicador de subordinação dos centros de pesquisa das filiais brasileiras na estruturação do P&D das montadoras.

Negri et al. (2008) analisam também o desempenho inovativo das empresas líderes, que são responsáveis por 60% dos investimentos em P&D do setor e investem 1,6% do faturamento em P&D. Com isso, conseguiram introduzir novos processos, visando redução de custos e novos produtos no mercado brasileiro. Elas seriam, ao menos em certa medida, inovadoras no mercado mundial: 22% das empresas líderes no setor teriam criado produtos inexistentes no mercado mundial.

As estratégias de inovação, segundo Negri et al. (2008), variam de acordo com o subsetor em que a empresa se encontra: as montadoras buscam, em geral, desenvolvimento com P&D interno e aquisição de novas tecnologias, enquanto as empresas de carroceria e de autopeças inovam predominantemente via compra de máquinas e equipamentos. Entretanto, as líderes no setor de autopeças se comportam de maneira diferente em relação às demais empresas desse segmento, apresentando um padrão de inovação mais próximo das empresas líderes do setor automotivo.

Outro ponto importante é que o processo de inovação ocorre em geral com parcerias. No caso das montadoras, essa relação se dá preferencialmente com as matrizes. Segundo estudo de Negri et al. (2008), 39% das montadoras declaram que o principal responsável pela inovação foi outra empresa do grupo no exterior. Essa relação é evidenciada também ao se analisar as remessas para o exterior referentes a serviços de tecnologia feitas pela indústria: 20% correspondem ao setor automotivo. Além disso, metade das montadoras inovadoras desenvolveram parceiras com seus fornecedores em projetos em inovação.

Algo que é pouco explorado pelo setor automotivo nacional é a parceria com universidades ou institutos de pesquisa para o desenvolvimento de novas tecnologias e produtos. Apenas 2% das empresas do setor fazem uso desse tipo de cooperação, contra 19% na indústria brasileira em geral. Um grande entrave a esse tipo de parceria é a questão do segredo industrial, pois as empresas têm receio de compartilhar informações estratégicas.

A tabela abaixo mostra os grupos de pesquisas em tecnologias de baixo carbono ligados ao setor automobilístico por área do conhecimento, esse levantamento foi feito no diretório dos grupos de pesquisa do CNPq (DGP) e no Censo 2010 do DGP.

Tabela 1 Grupos de estudos de economia do baixo carbono para o setor automobilístico

Área	Pesquisadores	Técnicos	Produção acadêmica 2007-2010	Produto Tecnológico 2007-2010	Desenvolvimento de software 2007-2010
Engenharia de Materiais e Metalúrgica	14	1	1.688	11	6
Engenharia Elétrica	61	11	3.688	36	33
Engenharia Mecânica	26	18	358	2	0
Engenharia Nuclear	4	2	203	1	0
Engenharia Química	74	10	6.287	37	0
Engenharia Sanitária	3	1	508	0	0
Física	8	1	509	8	1
Imunologia	8	3	956	4	0
Medicina	17	4	1.483	1	3
Química	75	8	6.535	60	4
Total geral	290	59	22.215	160	47

Fonte: Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq

Os grupos de pesquisa de baixo carbono para o setor automotivo são em geral ligados a universidades, abrangendo 36 universidades brasileiras com um total de 290 pesquisadores e 59 técnicos. A produção acadêmica total foi de 22.215 trabalhos levando ao desenvolvimento de 160 produtos tecnológicos entre 2007 e 2010.

Interessante notar que além das áreas ligadas às engenharias, há grupos da área de saúde como imunologia e medicina. O que mostra que há uma interdisciplinaridade para estudar o setor automobilístico como um todo, desde a concepção do veículo até os impactos sobre a saúde da população.

Tendo em vista esse quadro, é possível admitir que o setor privado poderia estabelecer mais parcerias com a academia com o intuito de aproveitar mais o conhecimento gerado nas universidades. Por exemplo, em países como Alemanha, Espanha, França e Itália há taxas mais elevadas de cooperação entre empresas do setor automotivo e as universidades. Parcerias entre concorrentes também acontecem com uma frequência muito baixa no Brasil.

O financiamento da atividade inovativa, segundo Carvalho e Pinho (2009), para investimentos em P&D foi feito, em grande medida, com recursos das próprias empresas do setor (89%), mas também houve participação do setor público (11%)⁵.

A estruturação do P&D no setor automobilístico brasileiro pode ser dividida em dois grupos. As montadoras consolidadas, que se instalaram antes dos anos 90, apresentam uma autonomia relativa, participando do desenvolvimento de novos produtos, e possuem estrutura de pesquisa e desenvolvimento em hub. Já as entrantes mais recentes têm pouca autonomia e uma estrutura de P&D centralizada etnocêntrica.

Segundo Negri et al. (2008), o processo de reestruturação do setor automotivo levou à diversificação de modelos de automóveis aliado a baixos custos de produção. Para tanto, a estratégia adotada tem sido a de padronizar partes centrais e diferenciar outras por meio de projetos em plataformas, que podem ser definidas como um conjunto de componentes comuns presentes em vários produtos distintos, gerando assim ganhos de escala no processo produtivo e no desenvolvimento de produtos. Isso representou uma oportunidade para as filiais das grandes empresas aumentarem a participação no processo de P&D, devido à necessidade de adaptação dos produtos a mercados regionais.

Um exemplo disso é que, segundo Cassoti e Goldenstein (2008), as quatro montadoras com maior tempo de presença no país construíram e expandiram seus centros de tecnologia locais nos últimos anos, havendo relativamente poucos centros desse tipo no mundo. Essas empresas estão inclusive utilizando o serviço de engenharia das subsidiárias brasileiras em produtos que serão fabricados em outros países.

Cassoti e Goldenstein (2008) destacam também a introdução da tecnologia flex-fuel, que foi concebida nas unidades brasileiras das empresas Bosch e Magneti Marelli, e contribuiu para a retomada do uso do álcool como combustível na frota brasileira. Basset e Consoni (2007) afirmam que a tecnologia do flex levou o setor automobilístico a desenvolver o uso de produtos compatíveis com o álcool combustível, como plásticos, ligas e componentes para motor, mais baratos e adequados à necessidade local.

⁵ Em um contexto mais geral de financiamento de investimentos, Negri et al. (2008) afirmam que 50% das empresas do setor automotivo declararam utilizar recursos do BNDES para financiamento de investimento.

Em resumo, o grau de interação entre a universidade e a empresa no setor automotivo ainda são baixos comparativamente aos países mais desenvolvidos e que possuem matrizes de montadoras. Além disso, nos últimos anos observamos a concentração das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento fora do país, ainda que as montadoras ou as suas parceiras sejam rápidas em internalizar estas tecnologias desenvolvidas fora, caso a oportunidade se apresente – como no caso do motor flex-fuel. Ou seja, a possibilidade dentro do *status quo* de se incorporar as filiais das grandes montadoras – ou as fornecedoras de autopeças – ao esforço de desenvolvimento de alternativas ao motor a combustão é baixa. Este também é um limitador para o desenvolvimento de alternativas puramente nacionais a um custo eficiente de um ponto de vista econômico⁶.

4. Mudanças climáticas, institucionais e tecnológicas.

4.1 Impactos ambientais setoriais

Segundo o relatório de 2011 da Agência Internacional de Energia (IEA, na sigla em inglês), ocorreu um aumento de 48,3% nas emissões mundiais na área de transporte rodoviário provocadas por combustão de derivados de petróleo de 1990 a 2009 (IEA, 2009). Esse setor foi responsável por 16% do total mundial de emissões antrópicas em 2009. Entre os maiores poluidores no setor de transporte rodoviário em 2009 estão: Estados Unidos, responsáveis por 29% do total das emissões, União Europeia (18%), China (7%) e Japão (4%). O Brasil responde por 3%.

Os principais poluentes são: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), compostos de nitrogênio (NO_x, NH₃, HNO₃), compostos de enxofre (SO₂ e SO₃) e material particulado, que são misturas de compostos no estado líquido e sólido que se mantém em suspensão na atmosfera. O efeito desses poluentes para a saúde da população é apresentado na tabela abaixo:

Tabela 2 Efeitos sobre a saúde dos principais poluentes veiculares locais

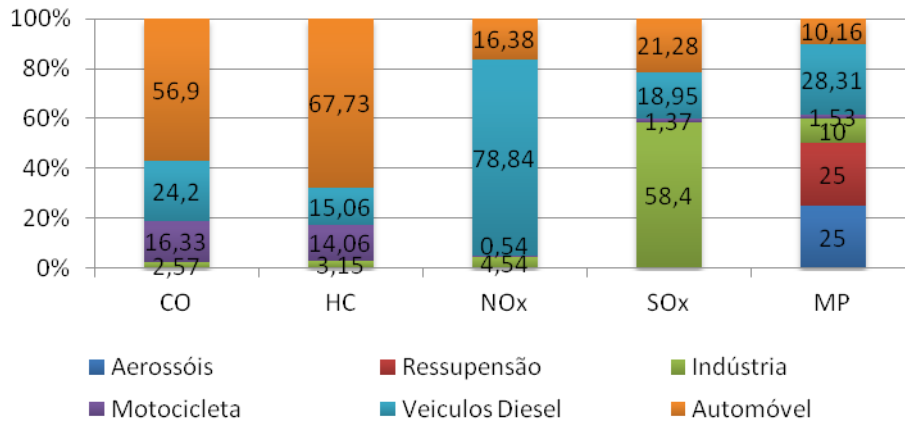
Poluente	Impacto
CO	Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar morte após determinado período de exposição
NOx	Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do smog fotoquímico e chuva ácida. É um precursor do ozônio
HC	Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados, formam o smog e compostos cancerígenos. É um precursor do ozônio
MP	Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte
SOx	Precursor do ozônio, formando a chuva ácida e degradando vegetação e imóveis, além de provocar uma série de problemas de saúde

Fonte: Carvalho (2011)

⁶ Não podemos esquecer da controversa experiência de criação de montadora nacional, a Gurgel Motores.

Carvalho (2011) analisa também quem são os responsáveis pelas emissões desses poluentes na região metropolitana de São Paulo:

Gráfico 1 Poluentes na Região Metropolitana de São Paulo -2006

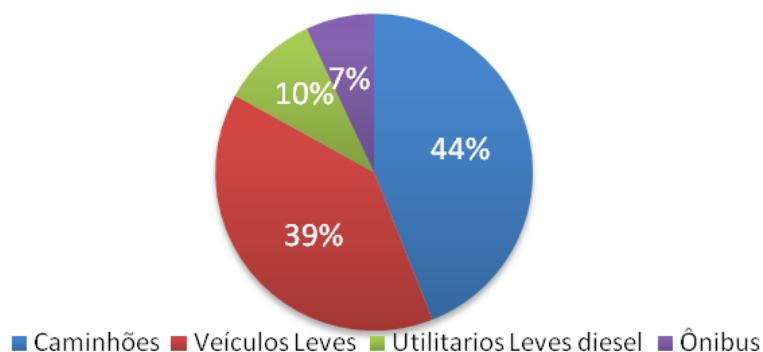


Fonte: Carvalho (2011)

Os veículos de ciclo Otto (automóveis e motocicletas) foram responsáveis por grande parte das emissões de CO e Hidrocarbonetos, por sua vez a indústria respondeu pela maior parte das emissões de óxidos de enxofre. Os veículos a diesel, em geral são pesados (ônibus e caminhões), foram responsáveis por grande parte das emissões de óxidos de nitrogênio e por parte significativa de materiais particulados.

Carvalho (2011) analisa que a emissão de CO₂ no Brasil em 2006 teve apenas 9% com origem no setor de transportes, as maiores emissões provem de desmatamento e queimadas. Dentro do setor de transportes a divisão ocorre segundo o gráfico abaixo:

Gráfico 2 Emissões de CO₂ no transporte brasileiro em 2006



Fonte: Carvalho (2011)

Os automóveis e utilitários leve responderam conjuntamente por 49% das emissões de CO₂ em 2006, sendo que essas categorias foram responsáveis por menos de 30% da participação no total de viagens realizadas, segundo Carvalho (2011). Por sua vez os ônibus que respondem por apenas 7% das emissões, realizaram 60% dos deslocamentos urbanos e 95% dos deslocamentos intermunicipais. Carvalho (2011) sugere que o sucesso de políticas ambientais no setor de transporte deve incentivar a substituição do transporte individual pelo coletivo.

O Brasil apresentou um crescimento considerável da sua frota de veículos. Segundo dados da ANFAVEA, o número de licenciamentos de veículos leves passou de cerca de 1,5 milhões em 2001 para cerca de 3,5 milhões em 2011, a razão de veículos por habitante era de 10 habitantes por carro há vinte anos, caiu para 5 em 2012⁷. Porém, a frota brasileira continua com muitos veículos antigos em circulação, produzidos até 1989, que, segundo Merli et al (2008), são os maiores responsáveis pelas emissões de CO₂ da frota nacional. A frota envelhecida pode indicar que além do problema de emissões, há outras questões ambientais para se considerar, tais como o que fazer com os veículos após o término de sua vida útil.

A reciclagem de automóveis passou a ser considerada uma questão importante pelos governos. Em 2000, a legislação da União Europeia (2000/53/CE) sobre os veículos em fim de vida (VFV), buscou prevenir e limitar os resíduos e melhorar sua reutilização, reciclagem e recuperação. Dentre os objetivos estão: responsabilizar as montadoras pelo ciclo de vida dos automóveis da montagem à reciclagem, fixar em 95% a taxa de reciclabilidade até 2015 e proibir o uso de substâncias perigosas como chumbo, cádmio, mercúrio e cromo para veículos novos a partir de 2013, com exceção de peças onde esses materiais sejam essenciais (Salla e Cadioli, 2007).

Para isso, foram desenvolvidas duas ferramentas que são relevantes para o diagnóstico e a execução dessas mudanças. A primeira é a Análise do Ciclo de Vida (LCA, na sigla em inglês). Marques e Meirelles (2007) a descrevem como uma ferramenta que visa a avaliar os impactos ambientais em todas as etapas envolvidas com a produção do bem, desde sua concepção até o destino final, o que inclui o planejamento do produto, a extração de matéria prima, os gastos energéticos, a fabricação, o transporte do produto, seu uso e o descarte.

A segunda ferramenta é o Eco-Design, que incorpora a questão ambiental na concepção do projeto, por meio de escolhas de materiais que possam ser reciclados, substituindo as peças de metal por polímeros e utilizando a matéria prima de forma racional quando possível.

A discussão sobre reciclagem e uso eficiente de recursos passou, portanto, a ganhar destaque dentro do planejamento das empresas do setor. Marques e Meireles (2007) mostram que entre os anos 1990 e os anos 2000, houve uma redução do peso dos automóveis de aproximadamente 25%.

Tal redução aconteceu porque matérias como aço e ferro fundido tiveram seu uso racionalizado e substituído por polímeros (plásticos) e ligas de alumínio, que, além de leves, possuem um maior valor mercado na reciclagem. Dessa forma, os veículos gastam menos combustível e conseqüentemente diminuem a emissão de CO₂.

⁷ Fonte: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/economia,pais-tem-1-carro-para-cada-5-habitantes,109273,0.htm>> acessado em 16/06/2012.

Outro aspecto importante decorrente dessa mudança é a redução do uso de matérias primas primárias, ou virgens, substituídas por matérias primas secundárias, oriundas do processo de reciclagem. Marques e Meireles (2007) ilustram esse fato, por meio do alumínio: na sua reciclagem gasta-se dez vezes menos energia do que a produção da mesma quantidade a partir da bauxita (matéria prima virgem).

Outros elementos dos veículos que podem ser reciclados são os pneus. Kiperstok (2000) destaca que eles podem ter sua vida útil estendida e posteriormente sua carcaça pode ser reaproveitada em outras funções, como em contenção de encostas e muros de arrimo.

No caso do setor automobilístico brasileiro, o processo de reciclagem é mais limitado. Medina e Gomes (2002) atribuem esse fato ao baixo número de recicladores especializados em materiais automotivos, uma vez que falta planejamento para a formação de uma rede voltada para desmontagem, coleta e trajeto final desses materiais.

A cadeia de fornecedores do setor automotivo também teve que se adequar à nova realidade. Segundo Epelbaum e Aguiar (2011), as montadoras passaram a exigir requisitos ambientais de seus fornecedores.

Os requisitos ambientais para a cadeia automotiva se dividem em três tipos:

- Associados ao produto (p.ex. eliminação de substâncias perigosas, menor geração de resíduos no pós-uso, menor dispêndio energético etc.);
- Associados ao desempenho ambiental no processo produtivo do fornecedor, o que inclui certas preocupações com o cumprimento dos requisitos legais e licenças, e com impactos ambientais específicos (geração e destinação de resíduos, emissões atmosféricas etc.);
- Associados à gestão ambiental, para assegurar o cumprimento das políticas, objetivos e metas ambientais elaborados pela empresa.

Os principais certificados são ISO 14001, ISO TS 16949 e o QS 900. Eles visam garantir o comprometimento com questões como redução da emissão de poluentes, destinação adequada dos resíduos e gestão ambiental eficiente, exigências válidas também para a indústria nacional.

5. Mudanças climáticas e regulação setorial

As principais economias do mundo também possuem regulamentações para emissão de poluentes em veículos automotores. Os Estados Unidos possuem um programa de eficiência energética desde 1975: o *Corporate Average Fuel Economy* (CAFE na sigla em inglês). O objetivo inicial desse programa era diminuir a dependência em relação ao petróleo importado ao tornar o consumo de combustíveis mais eficiente. Dessa forma, também se diminuiria a emissão de poluentes. O CAFE institui metas de eficiência energética para cada fabricante em milhas por galão (EPA, 2010; Smith, 2010).

Os órgãos que administram o CAFE são o *Environmental Protection Agency* (EPA, na sigla em inglês) e o *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA, na sigla em inglês). O EPA verifica se a regulamentação está sendo seguida e NHTSA aplica as penalidades em caso de descumprimento.

O CAFE enfrentou problemas, como a falta de reajuste dinâmico das metas. Por duas décadas as metas de eficiência energética do CAFE não sofreram aumento, entre outros motivos devido à pressão das montadoras. A falta de ajuste do padrão e a diminuição do preço da gasolina a partir de meados da década de 80 foram os principais motivos para a estagnação dos níveis de economia de combustível da frota norte-americana na década de 90 (NCR, 2002; Smith 2010).

Após um longo período de estagnação, as metas do CAFE foram revistas em 2007, quando o Congresso americano aprovou a Lei de Independência e Segurança Energética (EISA, na sigla em inglês). A meta da frota de novos veículos leves foi revisada para 14,88 Km/l (35,0 milhas/galão) a ser atingida até 2020 (GAO, 2010; Smith 2010).

Ocorreu uma nova revisão por meio da lei AB1493, estabelecendo a meta de eficiência energética para veículos leves em 15,09 km/l (35,5 mpg) para ser atingida em 2016. As metas abrangem os automóveis comerciais leves e comerciais médios, e são discriminadas de acordo com o seu tamanho (*footprint*). (Smith, 2010). O EPA projeta que as emissões de CO₂ devem ser de 183 gCO₂/km (295 g CO₂/milhas) em 2012 e 155 g/km (250 gCO₂/milhas) em 2016. A expectativa é de reduzir 960 milhões de toneladas métricas de CO₂ anuais e economizar 1,8 milhões de barris de petróleo por dia (EPA, 2010; Smith, 2010).

Em julho de 2011, o presidente Barack Obama anunciou um acordo⁸ com as treze principais montadoras para aumentar a eficiência energética média da frota americana para 22,95 Km/l (54 milhas/galão) até 2025. Isso deve reduzir a emissão de CO₂ para 101 gCO₂/Km (163 gCO₂/milha).

Apesar do longo período de estagnação, a questão da eficiência energética e consequentemente da emissão de poluentes foi revista pelo governo americano, algo relevante, uma vez que os EUA estão entre os maiores emissores de CO₂.

A União Europeia durante os anos 1990 criou o padrão europeu de emissões (EURO). São diretivas que determinam o limite de poluentes que os veículos poderão emitir. Os gases que estão incluídos nas diretivas são: NO_x, THC, NMHC, CO e materiais particulados. O CO₂ não tem suas emissões regulamentadas pelo EURO, e sim por um acordo voluntário entre a União Europeia e a associação fabricantes europeus de automóveis (ACEA, na sigla em inglês).

A primeira diretiva é a EURO-1 de 1994 e apresenta os seguintes limites de emissões para veículos leves. Ao longo dos anos os limites foram sendo revisados, diminuindo a cada diretiva. A versão mais recente é a EURO-6 que deve entrar em vigor 2015:

8 Fonte: <<http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/2011/President+Obama+Announces+Historic+54.5+mpg+Fuel+Efficiency+Standard>> acessado em 02/07/2012

Tabela 3 Limite de emissões da EURO 1 e 6 para veículos leves (g/km)

Legislação	EURO-1		EURO-6		EURO-1		EURO-6		EURO-1		EURO-6	
	menores 1305Kg		menores 1305Kg		1305Kg - 1760Kg		1305Kg - 1760Kg		1760Kg - 3500Kg		1760Kg - 3500Kg	
Combustível	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina	Diesel	Gasolina
CO	2,72	2,72	0,5	1	6,9	6,9	0,63	1,81	5,14	5,14	0,74	2,27
THC	-	-	-	1	-	-	-	0,13	-	-	-	0,16
NMHC	-	-	-	0,068	-	-	-	0,09	-	-	-	0,108
NOx	-	-	0,08	0,06	-	-	0,105	0,075	-	-	0,125	0,082
HC+NOx	0,97	0,97	0,17	-	1,7	1,7	0,195	-	1,4	1,4	0,35	-
Mat. Part.	0,14	-	0,005	0,005	0,25	-	0,005	0,005	0,19	-	0,005	0,005

Fonte: Elaborado com base no Official Journal of the European Union^{3e4}

Os veículos pesados também estão sujeitos a limites de emissões. A EURO-6 para essa categoria entrará em vigor no final de 2013, com os seguintes limites em g/KWh:

Tabela 4 Limites para veículos pesados EURO-6 (g/KWh)

Tipo de Ciclo	CO	HC	NOx	Mat. Particulado
ESC/ELR	1,5	0,13	0,4	0,01

Fonte: Elaborado com base no Official Journal of the European Union⁵

As diretrizes europeias para veículos pesados influenciaram as regulamentações adotadas no Brasil. A fase P-7 do PROCONVE, que entrou em vigor em 2012, segue os padrões do EURO-5.

As emissões em CO₂ são regulamentadas segundo o “ACEA agreement”⁹, firmado entre a União Europeia e a ACEA em 1998¹⁰, que estabelece como meta a emissão de 165 g CO₂/Km para a frota de veículos novos fabricados e registrados na União Europeia em 2003, 140 g CO₂/Km em 2008 e 120 g CO₂/Km como meta final para 2012.

Em 2002, o monitoramento das metas do acordo voluntário ACEA de 1998 mostrou que a média intermediária de emissões de CO₂ dos novos veículos para 2003 (165 g CO₂/Km) foi cumprida, mas em 2006, a Comissão Europeia concluiu que as metas para 2008 (140 gCO₂/km) e 2012 (120 gCO₂/km) não poderiam ser atingidas pela indústria automobilística, e assim em 2009, o regulamento nº443/2009 estabeleceu oficialmente um novo padrão, desta vez compulsório (Smith, 2010).

9 Além do acordo com as fabricantes europeias, a UE firmou acordos com a Associação de Fabricantes Japoneses de Automóveis (JAMA), e a Associação de Fabricantes Coreanos de Automóveis (KAMA) para atingir o padrão de 140 gCO₂/km em 2009. (Smith 2010)

10 < http://www.acea.be/news/news_detail/reducing_co2_emissions/>

A nova legislação definiu uma curva limite de valores das emissões permitidas para os novos veículos em função da massa do veículo de acordo com a função linear¹¹ Desta forma, as metas dos fabricantes são diferenciadas de acordo com o peso médio dos automóveis que produzem a cada ano, ou seja, de acordo com o seu portfólio de produtos (Fontaras e Zamaras, 2010; Smith 2010). No entanto, os fabricantes poderão produzir veículos de passageiros que apresentam maior consumo de combustível desde que a média total dos novos modelos vendidos de sua frota esteja abaixo da sua meta de emissões. Foi fixada como meta para o ano de 2015 uma média das emissões de CO₂ de veículos novos de 120g/Km. (Smith 2010).

Em termos de resposta das montadoras, há certo movimento em direção do uso de automóveis elétricos e híbridos como forma de se atender a estas demandas, sendo que o Nissan Leaf – o veículo elétrico puro da Nissan – já vendeu mais de 40 mil unidades¹². Todavia, para uma produção mundial da ordem de 75 milhões de veículos leves, dos quais 8 milhões apenas nos Estados Unidos, esta iniciativa ainda é incipiente.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) se tornou o espaço para se debater essas questões. É um órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). O seu conselho é composto pelo governo federal, estadual e municipal, o setor empresarial e a sociedade civil. Dentre as competências do CONAMA esta discutir normas e critérios para o licenciamento de atividades efetivas e potencialmente poluidoras. O resultado das reuniões leva a resoluções, em que são divulgadas diretrizes e normas técnicas, critérios e padrões relativos à proteção ambiental e ao uso sustentável dos recursos ambientais.

A resolução do CONAMA nº18 criou em 1986 o Programa de Controle da Poluição por Veículos Automotores (PROCONVE), em que os veículos são divididos em duas categorias: veículos leves, que transportam até 2,8 toneladas, e pesados, acima desse valor. Os procedimentos para medição de emissão nas duas categorias são diferentes, assim como os limites de emissões. Os limites para cada categoria são os mesmos para qualquer tipo de combustível.

A cada fase do PROCONVE os limites de emissão de poluentes foram reduzidos conforme mostram as tabelas abaixo.

A sexta fase do PROCONVE para veículos leves entrará em vigor a partir de 2014¹³ e a sétima para veículos pesados entrou em vigor em 2012. Podemos observar que ao longo das fases do programa o nível de tolerância com a emissão de poluentes se mostrou cada vez menor.

A fim de avaliar o resultado das políticas públicas voltadas para a melhoria da qualidade de ar e mitigação das mudanças climáticas, o Ministério do Meio Ambiente (MMA) publicou em 2009 o inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores. Nesse relatório o MMA apresenta a evolução das emissões de poluentes, o gráfico abaixo ilustra o caso do CO.

11 Emissões de CO₂ = 130 + a * (M-M₀), onde a = 0,0457; M₀ = 1.372 kg e M = média da massa em kg dos novos veículos produzidos pela montadora.

12 Agradecemos ao Prof. Dr. Rodrigo Sabatini pela informação.

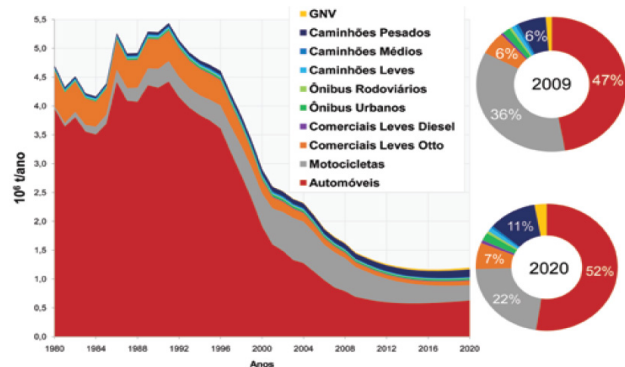
13 A fase L6 entrará em vigor para veículos a diesel em 2013. Já para veículos leves do ciclo Otto, que corresponde a maioria dos frota nacional de veículos leves, entrará em vigor a partir de 2014 (Resoluções do CONAMA, p. 656).

Tabela 5 Limites de emissão de CO e HC em (g/km)

Poluentes	CO (g/km)			HC (g/km)	
	Veículos Leves	Veículos Pesados (ciclo ELR ⁶ e ESC ⁷)	Veículos Pesados (ciclo ETC ⁸)	Veículos Leves	Veículos Pesados (ciclo ELR e ESC)
L1/P1	24	11,2	-	24	-
L2/P2	12	4,9	-	12	2,45
L3/P3	2	4	-	2	1,23
L4/P4	2	2,1	-	2	1,1
L5/P5	2	1,5	5,54	2	0,66
L6/P6	1,3	1,5	4	1,3	0,46
P7	-	1,5	4	-	0,46

Fonte: CONOMA

Gráfico 4 Evolução e projeção das emissões totais de CO



Fonte: 1º inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (MMA, 2010)

O gráfico sugere que houve uma queda acentuada das emissões do poluentes, que estão regulados pelo PRONCOVE desde de seu início até 2009¹⁴. Os maiores responsáveis pelas emissões são os veículos leves de ciclo Otto (os automóveis menores que 1.700 kg). Essa categoria abrange os carros populares, que são maioria na frota brasileira, logo acabam impactando mais o meio ambiente. As projeções indicam que até 2020 o nível de emissões deve se estabilizar e os veículos leves devem continuar sendo os principais emissores.

O CONAMA, com o intuito de fiscalizar a emissões dos veículos nos centros urbanos publicou em 2009 a resolução 418, em que especifica critérios para a elaboração de programas de inspeção e manutenção de veículos em uso pelos órgãos estaduais e municipais de meio ambiente. Um dos resultados dessa resolução foi a criação do CONTROLAR na cidade de São Paulo.

14 Importante notar que CO₂ não consta no PRONCOVE.

O CONTROLAR inspeciona todos os veículos registrados no município, medindo os níveis de CO, CO₂ e HC em automóveis e os valores de opacidade e de material particulado nos veículos a diesel¹⁵. Aqueles não fazem a inspeção estão sujeitos a multas.

O Ministério de Meio Ambiente, por meio do IBAMA, buscando incentivar o consumo consciente criou a Nota Verde, que possibilita a classificação dos automóveis em relação aos níveis de emissão de poluentes. Os veículos são avaliados em três categorias: emissão de poluentes tradicionais (CO, NMHC, NOx), emissão de CO₂ e -se utiliza combustível renovável. A primeira categoria fornece até três pontos e as outras duas fornecem um ponto cada, dessa forma a nota máxima é cinco, indicando que o veículo adota tecnologias ambientalmente adequadas. As notas podem ser conferidas pelo consumidor no site: http://servicos.ibama.gov.br/ctf/publico/sel_marca_modelo_rvep.php

O INMETRO em parceria com a ANFAVEA, CONPET e CETESB criou em 2009 o programa brasileiro de etiquetagem veicular (PBEV). Esse programa busca zelar pela “eficiência energética para os veículos leves de passageiros e comerciais leves com motores de ciclo Otto” (Portaria no 391 do INMETRO; Smith 2010). Os veículos foram avaliados quanto o seu consumo energético e classificados em uma escala de “A” (mais eficiente e menor consumo) a “E” (menor eficiente e maior consumo). Ao final ganham uma etiqueta indicando sua classificação e sua quilometragem por litro na cidade e na estrada em cada tipo de combustível.

A nota verde e o programa brasileiro de etiquetagem vão fornecer aos consumidores mais informações na hora de tomar a decisão de qual veículo comprar.

O governo também estimulou o uso de combustíveis menos poluentes. O caso de maior sucesso é o etanol. O PRO-ALCOOL criado nos anos 70 para estimular uma alternativa aos combustíveis fósseis, possibilitou a criação do veículo movido a etanol. Iniciativas como a mistura de etanol à gasolina e posteriormente o desenvolvimento dos motores *flex-fuel*, resolveram o problema de oferta e viabilizaram o etanol como um combustível menos poluente que a gasolina e que teve grande aceitação no mercado consumidor brasileiro.

A Petrobras para minimizar o impacto da emissão de SO_x e material particulado nas grandes metrópoles desenvolveu o diesel S500, com 500 ppm de enxofre contra 2000 ppm da versão anterior. (Carvalho, 2011). A empresa já começou a disponibilizar também o diesel S10 com apenas 10 ppm de enxofre.

Além de desenvolver o diesel com teor reduzido de enxofre, outra política que colabora com a redução de emissões é a adição de biodiesel ao diesel mineral. A mistura está na proporção de 5% de biodiesel e 95% de diesel mineral. Esse combustível reduz a emissão de monóxido de carbono e as plantações de oleaginosas utilizadas na produção colaboram na reabsorção do CO₂ emitido como produto da queima do diesel. (Carvalho, 2011).

Um dos problemas da política de biocombustíveis no caso do diesel é o aumento do preço devido ao custo de produção, isso pode requerer subsídios por parte do governo para manter essa política. Há estudos para a produção de biodiesel a 20%, mas só seria viável se houvesse um apoio do governo.

15 Informações retiradas do site: <http://www.controlar.com.br/OPrograma_SobreOPrograma.aspx>

Outros combustíveis alternativos já foram testados, porém sem sucesso, como no caso do gás natural veicular (GNV) para a frota de ônibus regular, uma dos motivos do fracasso foi que a frota ficava restrita apenas a esse combustível, o que poderia causar problemas caso houvesse desabastecimento. O GNV também não teve muita aceitação no setor de veículos leves, por causa da baixa oferta do combustível nas cidades.

6. Mudanças climáticas e mudanças tecnológicas

As inovações tecnológicas do setor automobilístico para reduzir as emissões de GHG (gases do efeito estufa, da sigla em inglês) estão voltadas para tornar o veículo mais eficiente no consumo de combustível e à busca por fontes alternativas de energia e novos sistemas de propulsão.

A eficiência energética é uma questão em que o veículo deve ser entendido como um sistema, levando em conta todo o funcionamento do veículo, não apenas o quanto é gasto em combustível. Cerca de dois terços da energia disponível no veículo é perdida na forma de calor durante a conversão da energia química do combustível em energia mecânica no motor do veículo (NRC, 2002; Smith, 2010).

Outras perdas ocorrem no sistema de transmissão, no uso dos acessórios do veículo (ar condicionado, direção hidráulica/automática etc.), no sistema de refrigeração e na frenagem. O restante da energia do combustível transmitida para as rodas (em torno de 13 a 20%) deverá ainda superar a inércia (peso), a resistência do ar (arraste aerodinâmico) e a resistência por atrito dos pneus (NRC, 2002; Smith 2010).

Outro detalhe importante é que as perdas energéticas são maiores no tráfego urbano que na estrada, devido ao fato do veículo ficar em ponto morto e ser obrigado a fazer diversas paradas ao longo do percurso, enquanto que na estrada o motor opera de forma mais eficiente, consequentemente uma porcentagem maior da energia do combustível irá para as rodas (Smith 2010).

A indústria automobilística busca melhorar a eficiência energética de duas maneiras: pelo aumento da eficiência do conjunto de tração, também conhecido como *powertrain*¹⁶; e diminuição do esforço para movimentar o veículo, por meio de alterações no peso, aerodinâmica, atrito e acessórios.

As principais tecnologias desenvolvidas para aumentar a eficiência do *powertrain* do ciclo Otto convencional foram elencadas por Smith (2010):

- Downsizing do motor
- Injeção direta
- Motor de ignição por compressão de carga homogênea
- Comando variável de válvula.
- Razão de compressão variável

¹⁶ *Powertrain* é definido como todos os subsistemas necessários para produzir potência e transmiti-la às rodas (KASSERIS, 2006; Smith, 2010).

As tecnologias descritas acima foram desenvolvidas para melhorar a eficiência do *powertrain*, mas Smith (2010) ressalta outras partes do veículo também passaram por inovações, como a aerodinâmica e mecânica:

- Redução do coeficiente de arraste aerodinâmico.
- Redução da massa do veículo.
- Parte integrada/gerador

Além de buscar melhorar a eficiência do consumo de combustível, estão em desenvolvimento tecnologias de novos sistemas de propulsão de veículos. Esses novos sistemas buscam utilizar energia elétrica, pilha combustível de hidrogênio ou uma combinação entre motor a combustão interna e motor elétrico, conforme foi apresentado anteriormente.

Smith (2010) apresenta as possíveis trajetórias tecnológicas dos sistemas de propulsão. Segundo o cenário de Bandivadekar et al, (2008), Kasseris (2006), Kasseris e Heywood (2007) e Nas (2009), nos próximos 25 anos os motores a combustão interna (MCI) continuarão sendo o principal sistema de propulsão, por meio do qual as inovações incrementais poderão ser o caminho para aumentar a eficiência do consumo de combustível na frota de veículos leves. Uma vez que o consumo dos motores do ciclo Otto e diesel vão ficar com consumo próximo. Isso é devido ao *downsizing* do motor a gasolina e as regulamentações mais rígidas em termos de emissões do motor a diesel, que pode levar a uma queda de eficiência do consumo. (Smith, 2010).

Em um período de 20 a 30 anos os veículos elétricos híbridos (VEH) vão oferecer ganhos cada vez maiores em termos de redução do consumo de combustível. Os veículos elétricos (VE) e os veículos elétricos híbridos a pilha combustível (VEHPC) continuaram apresentando alto custo e limitações técnicas e de infra-estrutura, o que vai impedir sua alta penetração no mercado (Smith, 2010).

O cenário proposto pela Agencia Internacional de Energia (IEA, 2009) assume que haverá até 2050 uma redução em 50% das emissões de CO₂ em relação ao nível de 2005. Além disso, projeta que a partir de 2010 a venda de veículos híbridos plug-in e elétricos começaria aumentar. Em 2020 haverá uma rápida difusão dos VE e dos VEH devido ao ganho de experiência na fabricação de novas tecnologias e o estabelecimento de políticas públicas (Smith, 2010).

As projeções do IEA (2009) são plausíveis desde que políticas energéticas eficazes sejam estabelecidas, incluindo a provisão de infraestrutura de abastecimento destes veículos. Governos estão buscando incentivar a produção de VE e VEH. A China, os Estados Unidos e a França estão entre os governos que mais farão investimentos em P&D nos próximos cinco anos, além do estabelecimento de incentivos aos consumidores que adquirirem tais veículos (Smith, 2010).

Na Europa, a Comissão Europeia está patrocinando vários programas de pesquisa de desenvolvimento de VEs e outros sistemas de propulsão alternativos. A Associação de Veículos Rodoviários Elétricos europeus (AVERE) e a Associação das Cidades Interessadas no Uso de Veículos Elétricos

(CITELEC) receberam fundos da Comissão Europeia para a pesquisa de novos sistemas de propulsão (T&E, 2009; Smith 2010).

Nos Estados Unidos, o governo norte-americano destinou um fundo de US\$ 2 bilhões para a fabricação de baterias de íon-lítio, sistemas híbridos elétricos e softwares relacionados. A administração deste fundo está a cargo do Departamento de Energia (DOE) (GAO, 2009; Smith 2010).

Em 2007, o congresso norte-americano estabeleceu o programa de empréstimo subsidiado para tecnologias avançadas de veículos (*Advanced Technology Vehicle Manufacturing - ATVM*) para as montadoras e indústria de autopeças visando reequipar linhas de produção obsoletas ou construir novas linhas de produção que levarão a produzir automóveis 25% mais eficientes dos que os veículos produzidos em 2005 (GAO, 2009; Smith 2010).

Algumas dessas tecnologias já estão disponíveis ao público, especialmente no caso dos países desenvolvidos, como por exemplo, os veículos híbridos. Outras estão em desenvolvimento e são apenas projetos para o longo prazo, como no caso do veículo movido a pilha combustível hidrogênio.

O Brasil como já foi dito anteriormente, está ampliando sua participação no P&D das montadoras, principalmente nas que estão a mais tempo no país. As montadoras que se instalaram no país após 1990 adotam um modelo distinto de P&D, com menor participação das subsidiárias brasileiras.

Dentre as tecnologias voltadas para baixa emissão de carbono desenvolvidas no país, a mais importante foi o motor bicombustível, que permite o uso de etanol e gasolina em qualquer quantidade. Essa tecnologia foi amplamente aceita sendo que a maioria dos veículos produzidos no Brasil são bicombustíveis.

7. Análise do impacto das mudanças institucionais e tecnológicas sobre o setor no Brasil

7.1 Pesquisa de campo junto ao setor automobilístico

A fim de avaliar as perspectivas para o setor automotivo brasileiro em relação às tecnológicas de baixo carbono no curto, médio e longo prazo. Foi elaborado um questionário com 19 perguntas sobre as principais inovações tecnológicas do setor. As perguntas consideram temas que se mostraram pertinentes ao longo da pesquisa e que representam as principais inovações dentro de um contexto de economia do baixo carbono. O questionário enviado a diversos representantes do setor, captando a visão das montadoras (Toyota, Volkswagen Caminhões. FIAT), das fabricantes de autopeças (Magneti Marelli e Bosh), do setor público (Secretaria municipal de transportes) e de outras empresas ligadas ao setor de transportes urbanos (Metra, Eletra).

No curto prazo, os participantes não esperam grandes inovações no desenvolvimento de veículos com relação às tecnologias de baixo carbono. A maioria das respostas apontou para o aumento da eficiência energética, decorrente do aprimoramento dos motores via redução de cilindradas (*do-*

winsizing), diminuição do atrito, redução de perdas de energia e maior uso de materiais recicláveis. Outro ponto levantado foi o aumento da eficiência dos motores *flex fuel* e o uso de combustíveis alternativos nos transporte público.

A visão dos entrevistados no médio prazo, é que os veículos híbridos apresentarão maior difusão no mercado e serão responsáveis pela redução de emissões. Foi citado também o aprimoramento dos motores de combustão interna e dos bicombustíveis com o desenvolvimento do sistema de injeção direta.

No longo prazo, os participantes esperam uma difusão de veículos elétricos *plug-in* devido o aumento de sua autonomia, o desenvolvimento da tecnologia da pilha combustível de hidrogênio e a melhora do desempenho dos veículos híbridos, com o aprimoramento do sistema de aproveitamento de energia da frenagem (KERS).

No questionário, os entrevistados puderam escolher entre três políticas públicas para redução da emissão de carbono que achassem importantes considerando o impacto da medida e a probabilidade destas serem levadas a cabo, as medidas são: Pedágio urbano, exigências mais fortes de redução de CO₂, exigência de frota mínima/redução de impostos para veículos com baixa emissão de CO₂ e caso desejassem sugerir outra política.

No curto e médio prazos a exigência de frota mínima/redução de impostos para veículos com baixa emissão de CO₂ foi vista como a alternativa mais adequada para estimular a indústria automobilística produzir automóveis menos poluentes e estimular o uso de outros meios de transporte. A médio e longo prazos foi apontada a necessidade de exigências mais fortes de redução de CO₂ e uma política governamental que apoie a produção de veículos elétricos.

Os participantes analisaram o veículo elétrico híbrido (VEH) como uma tecnologia já disponível nos mercados dos países desenvolvidos. O VEH é um avanço do ponto de vista de redução de emissões, mas ainda é considerada uma solução intermediária se comparada ao veículo elétrico *plug in* ou ao movido a pilha combustível de hidrogênio. Os participantes acreditam que a médio prazo o VEH desempenhará um papel importante na diminuição da redução de carbono, porém a longo prazo essa tecnologia será superada por outras.

Essa tecnologia apresenta alguns problemas que podem ser superados a médio e longo prazo, como o descarte da bateria após o fim de sua vida útil. O principal entrave para essa tecnologia ser difundida no Brasil é o alto custo, que necessita de incentivos governamentais para que o VEH se torne competitivo e atraente em relação aos outros veículos.

O veículo elétrico puro (VEP) é apontado pelos entrevistados como a tecnologia promissora para o médio e longo prazo, apesar de já existirem alguns modelos disponíveis nos países desenvolvidos, como por exemplo, o i-Miev da Mitsubishi.

Essa tecnologia ainda apresenta entraves para conseguir se difundir em massa e assim ter um papel relevante na redução de emissões de carbono. Os principais problemas apontados são: A bateria que é pesada, possui baixa autonomia e um alto custo de produção. A necessidade de desenvolvimento de uma infraestrutura adequada para reabastecimento e que suporte o aumento da

demanda por energia elétrica e por fim o alto custo do veículo que precisa de um incentivo governamental para ser competitivo no mercado.

O veículo elétrico movido a célula combustível de hidrogênio (VEPH) é tido pelos entrevistados como uma tecnologia de longo prazo que está em fase de pesquisa e desenvolvimento nas montadoras. O hidrogênio é um combustível que apresenta excelentes propriedades físico-químicas do ponto de vista ambiental, principalmente por gerar apenas água como resíduo.

Um grande entrave a essa tecnologia e que precisará ser equacionado é a questão do desenvolvimento de uma rede de produção e armazenamento do hidrogênio, além da implementação de uma infraestrutura adequada para o reabastecimento e também descarte da célula de combustível.

8. Políticas industriais, tecnológicas, comerciais e ambientais

O governo federal após discussões com diversos membros do setor automobilístico promulgou, em outubro de 2012 por meio do decreto 7819, o novo regime automotivo – Inovar Auto, que entrará em vigor a partir de 2013.

O novo regime automotivo estabelece critérios e exigências para que as montadoras possam ter acesso a incentivos fiscais, como a redução no IPI (imposto sobre produtos industrializados). Em abril de 2012 foi instituído um aumento de 30% no IPI para os veículos comercializados entre 2013 até 2017. As empresas que aderirem ao novo regime automotivo poderão ter redução desse tributo.

A primeira exigência é obrigatória para todas as montadoras, elas deverão cumprir um número mínimo de etapas de fabricação no país. Em 2013 serão seis etapas para automóveis e comerciais leves, passando para sete no biênio 2014-2015 e para oito no biênio 2016-2017. Para produção de caminhões, a exigência é de oito etapas em 2013, nove no biênio 2014-2015 e dez no biênio 2016-2017. Empresas que fabricam chassis com motor, as exigências são cinco etapas em 2013, seis em 2014-2015 e sete em 2016-2017.

Outra exigência obrigatória é o aumento da eficiência energética dos automóveis, o objetivo é conseguir um aumento de 12,08% até 2016. Dessa forma o consumo médio passaria dos atuais 14 Km/L nos veículos a gasolina e 9,71 Km/L nos veículos a etanol para 15,69 km/L e 10,88 Km/L respectivamente. Os veículos a diesel não possuem metas obrigatórias no novo regime.

Além disso, com o intuito de incentivar que as metas sejam extrapoladas nas áreas de P&D e eficiência energética, o governo vai conceder benefícios adicionais na seguinte forma:

Para incentivar investimentos crescentes em pesquisa e desenvolvimento, as empresas receberão um crédito presumido de IPI correspondente a 50% do valor dos dispêndios em P&D, limitados a 2% da Receita Operacional Bruta (ROB) menos encargos tributários.

O estímulo ao investimento adicional em eficiência energética, será por meio de um benefício de até dois pontos percentuais do IPI para os fabricantes que ultrapassarem a meta de habilitação, fixada em 12,08%. Válido para o período entre 2017 e 2020, esse desconto na alíquota do IPI será de um ponto percentual no caso de um aumento de eficiência energética de 15,46%, e de dois pontos

percentuais, no caso de um aumento de eficiência energética de 18,84%. A meta-alvo de 18,84% equivale à meta europeia de 2015 de 130 g de CO₂ /Km.

A pesar de não haver exigência de 65% de conteúdo nacional ou regional, como existia anteriormente, pois isso fere normas da OMC (Organização Mundial do Comercio), o novo regime vai conseguir aumentar a participação das montadoras no país e o conteúdo regional, pois há obrigatoriedade de utilizar nos veículos um conjunto de produtos previamente listados, classificados como insumos estratégicos.

O Inovar-Auto busca aumentar a eficiência energética e adensar a cadeia produtiva do setor, o novo regime é uma política industrial que contempla o desenvolvimento tecnológico e também políticas que visam reduzir emissões de carbono, aplicando metas para tornar os veículos movidos à combustão interna mais eficientes e conseqüentemente menos poluidores coordenando isso com outras iniciativas governamentais como o Programa Brasileiro de Etiquetagem para Veículos.

Todavia, há questões importantes em relação à economia de baixo carbono que não foram contempladas nessa política industrial para o setor automobilístico. A principal delas é a criação de um programa de desenvolvimento e incentivo a produção de veículos híbridos e elétricos não foi considerada no novo regime. Como visto na pesquisa aplicada a membros do setor, foi constatado que esse tipo de tecnologia necessita de apoio governamental para se viabilizar e difundir o carro híbrido e elétrico.

O setor automotivo a médio e longo prazo pode desenvolver tecnologias que reduzam as emissões de poluentes. Conforme os integrantes da indústria responderam no questionário, é esperado que no médio prazo o veículo híbrido e a longo prazo o veículo elétrico puro, já estejam difundidos no mercado brasileiro. Contudo como foi ressaltado é preciso uma ação conjunta, como foi feita para elaborar o novo regime automotivo, entre o setor público e privado para viabilizar um veículo menos poluente. Será necessária uma adaptação da infraestrutura para responder ao aumento de demanda por energia elétrica e benefícios fiscais que tornem o veículo competitivo.

O novo regime automotivo já contempla iniciativas para aumentar a eficiência energética dos veículos do ciclo Otto, possuindo validade até 2020, até lá o governo deve fiscalizar o setor para garantir o cumprimento das metas e após esse período é necessário revê-las. É interessante integrar as metas estabelecidas para incentivar as montadoras a aumentar a eficiência energética, com as metas do PROCONVE, que limita a emissão de poluentes pelos veículos.

Os veículos pesados não contam com uma solução como o motor elétrico para médio e longo prazo, porém para mitigar as suas emissões, é necessário que o programa de incentivo a produção de biodiesel seja continuado e ampliado, aumentando a quantidade de biodiesel na mistura com diesel mineral e buscando reduzir o teor de enxofre na sua composição.

O programa brasileiro de etiquetagem de veículos deve se consolidar em médio prazo, e poderá ser usado como um instrumento para educar o consumidor, estimulando o consumo consciente e tornando informações importantes como o rendimento por litro e a comparação entre diferentes modelos mais acessíveis.

Para conseguir viabilizar essas políticas o governo brasileiro precisa buscar o apoio de centros de pesquisas e com as montadoras, pois elas estão desenvolvendo as principais tecnologias para o baixo carbono.

As políticas públicas para o setor automobilístico visando uma economia de baixo carbono contemplam inovações e tecnologias que irão reduzir as emissões e mitigar o impacto ambiental do uso de veículos. Entretanto o governo também pode apresentar políticas de estímulo ao uso do transporte coletivo e dessa forma reduzindo o tráfego de veículos e emissão de poluentes.

Os grandes centros urbanos como a região metropolitana de São Paulo, necessitam de um plano de investimentos para lidar com o crescente número de automóveis. A região possui 22% da frota do país, com densidade de 1,42 habitantes por veículo. O governo possui um plano de expansão da rede metroviária e de trens para médio e longo prazo, dessa forma será possível oferecer mais opções ao usuário que poderá migrar para o transporte público.

O investimento em mobilidade urbana por meio de transportes públicos permitirá a criação de outras iniciativas que visam reduzir a emissão de poluentes e o uso do transporte individual, como por exemplo, o pedágio urbano.

O pedágio urbano foi implantado em Singapura, Londres e cidades da Noruega (Bergen, Oslo, Trondheim). Os esquemas de tarifas são diferentes para os cada país, no caso da Noruega como o objetivo era gerar receitas para financiar para investir no sistema de transportes, as cobranças eram baixas. No caso de Londres e Singapura onde a meta era reduzir o uso de automóveis as tarifas foram mais elevadas. (Câmara e Valente de Macedo, 2004).

O pedágio urbano em Londres foi implementado em fevereiro de 2003 em uma área de 22km² que abriga áreas comerciais e de lazer. A tarifa é 5 libras, o equivalente a 16 reais, residentes da área pedagiada tem desconto de 90% no valor da tarifa. O pagamento pode ser realizado em diversos locais como bancas de jornal, lojas, internet e até via SMS pelo celular. A fiscalização é feita por câmeras e as imagens são enviadas a um sistema que consegue identificar se o veículo pagou ou não a tarifa. Caso seja descumprida a lei, os infratores são multados.

Após a instituição do pedágio em Londres houve uma redução de 30% nos congestionamentos e redução do número de veículos na área pedagiada e no seu entorno. A qualidade do ar melhorou com redução em 16% da emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) e de material particulado (MP) na área pedagiada. A região de entorno ao pedágio teve redução de 4% para NOx e 7% para MP. 75% dessas mudanças são atribuídas a implantação do pedágio e 25% a mudança tecnológica dos veículos. (Câmara e Valente de Macedo, 2004)

A cidade de São Paulo adotou outra medida para reduzir o trânsito e a poluição: A “operação horário de pico” que teve início em 1997 e se popularizou com o nome de “rodízio”. Os veículos são impedidos de trafegar uma vez por semana útil durante duas faixas de horários (7:00 – 10:00 e 17:00 – 20:00), na região denominada centro expandido.

No começo a operação conseguiu retirar cerca de 20% da frota que circulava diariamente, e houve um aumento de até 24% na velocidade média durante o horário de pico. Ainda, com o

passar dos anos a frota teve um aumento de 50% o que levou a velocidade média a nível similar ao período pré-rodízio, anulando os ganhos da operação (Carvalho, 2011).

Câmara e Valente de Macedo (2004) comparam as medidas adotadas em Londres e em São Paulo. Os autores classificam as ações adotadas na capital inglesa como inseridas dentro de um contexto de estratégia global de planejamento de transportes, que teve outras medidas adotadas em conjunto como investimento em transporte público, e estímulo ao uso de bicicletas e a caminhar. O processo contou com consultas a população, incluindo-as no processo de decisão.

O rodízio em São Paulo foi visto como uma medida isolada, o setor precisa de maior coordenação de políticas públicas para enfrentar as questões ambientais e de mobilidade urbana. Os autores citam que já existe um esforço por parte da Secretaria Municipal de Transportes para mudar a cultura de operação passando da gestão voltada para o fluxo veicular, para gestão voltada para mobilidade urbana integrada a outras estratégias de transporte local.

O pedágio urbano em São Paulo é uma medida que precisa ser debatida com a sociedade e merece estudos mais aprofundados sobre a sua viabilidade, uma vez que obteve sucesso em grandes metrópoles com Londres e Singapura. É um tema polemico que deve contar com rejeição de parte da população devido ao pagamento de mais uma taxa, todavia ela se mostra necessária já que a poluição do ar pelo veículo representa uma externalidade negativa do seu uso, sendo assim pode-se com essa medida internalizar esse problema.

Referências Bibliográficas

- ACARE, Strategic Research Agenda 1-Volume 2, Section 3. "The Challenge of the Environment," ACARE Report, October 2002. Disponível em: <http://www.acare4europe.org/docs/es volume1-2/volume2-03-environment.pdf>
- BANDIVADEKAR et al, 2008. *On the Road: Reducing Transportation's Petroleum Consumption and GHG Emissions*. Massachusetts Institute of Technology.
- BAHIA, Luiz Dias; DOMINGUES, Edson Paulo. ESTRUTURA DE INOVAÇÕES NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA BRASILEIRA. *Texto Para Discussão*, Brasília, n. 1472, p.1-26, fev. 2010.
- BALCET, Giovanni; CONSONI, Flávia L.. Global technology and Knowledge Management: product development in Brazilian car industry. *International Journal Of Automotive Technology And Management*, v. 7, n.2/3 , p.135-152, 2007.
- BARROS, Daniel Chiari; PEDRO, Luciana Silvestre. As mudanças estruturais do setor automotivo, os impactos da crise e as perspectivas para o Brasil. *Bndes Setorial: Automotivo*, Rio de Janeiro, n. 34, p.173-202, set. 2011
- CARNEY, D., 2008. "Combustão Interna: a próxima geração". *Revista Engenharia Automotiva e Aeroespacial*, edição 34, ano 2008.
- CÂMARA, Paulo; VALENTE DE MACEDO, Laura. *RESTRICÇÃO VEICULAR E QUALIDADE DE VIDA: O PEDÁGIO URBANO EM LONDRES E O 'RODÍZIO' EM SÃO PAULO*. 2004. Disponível em: <http://nossasaopaulo.provisorio.ws/portal/files/RestricaoVeicular.pdf>. Acesso em: 27 out. 2012.

- CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro de. *EMISSÕES RELATIVAS DE POLUENTES DO TRANSPORTE MOTORIZADO DE PASSAGEIROS NOS GRANDES CENTROS URBANOS BRASILEIROS*. IPEA - Texto para discussão 1606. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/sites/000/2/publicacoes/tds/TD_1606_WEB.pdf>. Abr.2011 Acesso em: 27 out. 2012.
- CARVALHO, Enéas Gonçalves de; *Inovação tecnológica na indústria automobilística: características e evolução recente*. Economia e Sociedade, Campinas, v. 17, n. 3 (34), p. 429-461, dez. 2008.
- CARVALHO, Enéas Gonçalves De; PINHO, Marcelo. *PROJETO PERSPECTIVAS DO INVESTIMENTO NO BRASIL: DOCUMENTO SETORIAL: Automobilística*. Rio de Janeiro: Fundação Universitaria José Bonifácio, 2009.
- CASOTTI, Bruna Pretti; GOLDENSTEIN, Marcelo. *PANORAMA DO SETOR AUTOMOTIVO: AS MUDANÇAS ESTRUTURAIS DA INDÚSTRIA E AS PERSPECTIVAS PARA O BRASIL*. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/Publicacoes/Consulta_Expressa/Setor/Complexo_Automotivo/200809_set2806.html>. Acesso em: 20 mar. 2012.
- CHAN, C. C. *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles*, Proc. IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 704–718, Apr. 2007.
- CONAMA. Resoluções do Conama.: Resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012.
- COUTINHO, L.G. e FERRAZ, J.C. (coordenadores). *Estudo da Competitividade da Indústria Brasileira – relatório final 1993 – Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT)/Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP)/Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PADCT)*.
- Davenport, T. (1993) *Process Innovation: Reengineering Work Through Information Technology*, Harvard Business School Press, Boston
- EPA, 2010a. New and upcoming hybrids. Disponível em <www.fueleconomy.gov>.
- EPA, 2010b. Regulatory Announcement. Office of Transportation and Air Quality.
- EPELBAUM, Michel; AGUIAR, Alexandre. *A INFLUÊNCIA DA GESTÃO AMBIENTAL NA COMPETITIVIDADE NA CADEIA AUTOMOBILÍSTICA*. Disponível em: <<http://www.setecnet.com.br/ambiental/includes/Cadeia%20automobilistica.pdf>>. Acesso em: 25 mar. 2012.
- FONTARAS, G. SAMARAS, Z., 2010. “On the way to 130 g CO₂/km – estimating the future characteristics of the average European passenger car”. Energy Policy 38, 1826- 1833.
- FREYSSENET, Michel. *Transformation and Choices of European Automobile Industry Post-Global Financial Crisis*. Disponível em: <<http://www.freyssenet.com/files/Transformation%20and%20Choices%20of%20European%20Automobile%20Industry%20Post%20Global%20Financial%20Crisis%20-%20site.pdf>> Acesso em: 23 mar. 2012.
- GAO, 2009. *Plug-in vehicles offer potential benefits, but high costs and limited information could hinder integration into the federal fleet*. United States Government Accountability Office. Relatório de junho de 2009.
- GOUVELLO, C. Setor de Transportes: : Cenários de Referência e de Baixo Carbono. In: CHRISTOPHE DE GOUVELLO. *Estudo de Baixo Carbono para o Brasil*. Washington: Banco Mundial, 2010. Cap. 5, p. 110-132.
- IBGE. *Pesquisa de Inovação Tecnológica: 2008*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- INMETRO, 2009. *Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE*. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br>.
- INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. *CO₂ EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION: HIGHLIGHTS*. Paris, 2011.
- JACINTHO, José Carlos. *Proposta de modelo para análise dos fatores críticos de competitividade: inoção, conhecimento e sustentabilidade*. 2010. 239 f. Tese (Doutorado) - Unicamp, Campinas, 2010.

- King, N. and Anderson, N. (2002), *Managing Innovation and Change: A Critical Guide for Organizations (2nd Ed)*, Thomson, London.
- KASSERIS, E. 2006. *Comparative analysis of automotive powertrain: choices for the near to mid-term future*. Dissertação de Mestrado, M.Sc.. Massachusetts Institute of Technology.
- KASSERIS, E., HEYWOOD, J. B., 2007. “*Comparative analysis of automotive powertrain: choices for the next 25 years*”. 2007 SAE World Congress. SAE technical paper series nº 2007-01-1605, Detroit, abril de 2007.
- KIPERSTOK, Asher. *Tendências ambientais do setor automotivo: prevenção da poluição e oportunidades de negócio*. Nexos, Salvador, set. 2000.
- MARQUES, Flávio de Oliveira; MEIRELLES, Luiz Antonio de. *Tendências da reciclagem de materiais na indústria automobilística*. Rio de Janeiro: Cetem, 2007. (Série Estudos e Documentos).
- McCollum, David L, Gould, Gregory and Greene, David L, (2010), *Greenhouse Gas Emissions from Aviation and Marine Transportation: Mitigation Potential and Policies*, Institute of Transportation Studies, Working Paper Series, Institute of Transportation Studies, UC Davis.
- MEDINA, H.V., GOMES, D.E.B. *Gestão Ambiental na Indústria Automobilística: O Caso da Reciclagem de Materiais*. Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia, Rio de Janeiro, Maio de 2002
- MEDINA, Heloisa V. de; NAVEIRO, Ricardo Manfredi. *Materiais Avançados: Novos Produtos e Novos Processos na Indústria Automobilística*. *Produção*, Belo Horizonte, v. 8, n. 1, p.29-44, jul. 1998.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *1º INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2010.
- NAS - National Academy of Sciences, 2009. *Real prospects for Energy efficiency in the United States*. National Academy Press, Washington, DC
- NEGRI, Fernanda De et al. *DETERMINANTES DA ACUMULAÇÃO DE CONHECIMENTO PARA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA NOS SETORES INDUSTRIAIS NO BRASIL: SETOR AUTOMOTIVO*. Brasília: Agência Brasileira De Desenvolvimento Industrial, 2008. (Estudo Setorias de Inovação).
- NHTSA – National Highway Traffic Safety Administration, 2010 a. *Summary of fuel performance*. Relatório de abril de 2010. Disponível em : < <http://www.nhtsa.com/fueleconomy>>.
- NHTSA, 2010 b. *NHTSA and EPA establish new national program to improve fuel economy and reduce greenhouse gas emission for passenger cars and light trucks*. CAFE and GHG emission fact sheet. Disponível em: < <http://www.nhtsa.com/fueleconomy>>.
- NRC, 2002. *Effectiveness and Impact of Corporate Average Fuel Economy Standards*. National Academy Press, Washington, DC.
- NRC, 2006. *Tires and passenger vehicle fuel economy*. Transportation Research Board, Special Report 286. National Academy Press, Washington, DC
- NRC, 2008. *Assessment of Technologies for improving light duty vehicle economy*. National Academy Press, Washington, DC.
- PINHEIRO, Ivan Antônio; MOTTA, Paulo Cesar Delayti. *O REGIME AUTOMOTIVO BRASILEIRO (RAB) COMO INSTRUMENTO DE MODERNIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARQUE INDUSTRIAL NACIONAL: uma análise crítica*. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENESEP2001_TR81_0042.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2012.

- PISANO, G., & SHIH, W. *Restoring American competitiveness*. Harvard Business Review, 87, 3–14, 2009.
- SALLA, Luzia Dizulina; CADIOLI, Luiz Paulo. Reciclagem de automóveis: um novo conceito na produtividade ambientalmente correta. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, Valinhos, v. 2, n. 2, p.77-86, 2007.
- SMITH, Cristina Bastin. *ANÁLISE DA DIFUSÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS AUTOMOTIVAS EM PROL DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA FROTA DE NOVOS VEÍCULOS LEVES NO BRASIL*. 2010. 278 f. Tese (Doutorado) - Ufrj, Rio de Janeiro, 2010.
- T&E - Transport and Environment, 2009. *Reducing CO2 Emissions from New Cars: A study of Major Car Manufacturers Progress in 2008*. European Federation for Transport and Environment, Brussels.
- UNIÃO EUROPEIA. *REGULAMENTO (CE) N.º 715/2007 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO*. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:171:0001:0016:PT:PDF>>. Acesso em: 20 jun. 2012.
- UNIÃO EUROPEIA. COMMISSION REGULATION (EU) No 582/2011. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:167:0001:0168:EN:PDF>>. Acesso em: 20 jun. 2012.
- VALOR SETORIAL: Indústria Automobilística. São Paulo: Valor Econômico, dez. 2011.
- WORLD ECONOMIC FORUM. *The Global Competitiveness Report 2010–2011*. Genebra, 2010.

Uso da Terra, Grãos e Pecuária¹

Geraldo B. Martha Jr.

Elisio Contini

¹ O relatório completo, bem como as contribuições para outros setores da economia, podem ser encontrados em www.ebc.fearp.usp.br. O trabalho foi coordenado pela Universidade de São Paulo, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto”, e contou com o apoio financeiro do BNDES.

Introdução

Este capítulo é uma síntese de um trabalho mais amplo sobre soja, milho, carnes e uso da terra desenvolvido no âmbito do projeto “Economia de baixo carbono: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas”. Dentre os diferentes temas abordados no assunto, chama-se a atenção para as barreiras comerciais e para as novas tecnologias. O trabalho contou com a análise da literatura disponível e entrevistas/consultas eletrônicas com especialistas setoriais.

Os temas abordados na agropecuária refletem sua importância setorial no contexto brasileiro. O produto interno bruto (PIB) do agronegócio, de R\$ 648,2 bilhões, em 1994, passou para R\$ 917,7 bilhões em 2011, representando um crescimento de 41,6% (em R\$ 2011; Cepea/ESALQ/USP, 2013). No período, o agronegócio respondeu por 21,8% a 26,5% do PIB brasileiro. Em 2011, o PIB do agronegócio respondeu por 22,2% do PIB do país, sendo 30% desta contribuição atribuída à pecuária e os 70% restantes às lavouras (Cepea/ESALQ/USP, 2013).

Pela ótica de mudanças do clima, as emissões brasileiras de gases de efeito estufa, em 2005, foram estimadas em 2187 milhões de toneladas de CO₂-e (MCT, 2010).¹ Desse montante, as mudanças no uso da terra, representadas em quase a sua totalidade pelo desmatamento, responderam por 61%, o setor agropecuário por 19%, o setor energético por 15%, e a indústria e resíduos por 5%. Considerando um cenário tendencial para 2020, as emissões brasileiras atingiriam 2704 M t de CO₂-e. Entretanto, com base nas ações de mitigação (NAMAs)² propostas pelo Governo Brasileiro, na COP-15, realizada em dezembro de 2009 (Copenhague), que constam da Política Nacional sobre Mudança do Clima, as emissões para 2020 devem ser diminuídas em 36% a 39% frente ao cenário tendencial, passando para a faixa de 1652 a 1728 M t de CO₂-e.

Nas “NAMAs” propostas pelo Governo Brasileiro tem-se a redução nas taxas de desmatamento (redução de 80% da taxa de desmatamento na Amazônia e de 40% da taxa de desmatamento no Cerrado), que responde por cerca de dois terços do atendimento da meta. Outros 15% centram em ações focalizadas no setor agropecuário, a saber, recuperação de pastagens de baixa produtividade, integração lavoura-pecuária, expansão da área com plantio direto de qualidade e ampliação da área com fixação biológica de nitrogênio.

De modo crescente, as exportações brasileiras serão analisadas pelos nossos competidores internacionais, também, por uma ótica ambiental. Embora a expansão da produção de alimentos continue sendo meta prioritária na agenda agropecuária, outras questões, como os modelos de produção adotados, a produção de alimentos *vis-à-vis* biocombustíveis e os impactos da produção sobre o meio ambiente, marcadamente sobre o uso da terra, já mostram claros sinais que crescerão rapidamente em importância na inserção do produto brasileiro no exterior. Ganha importância, também, a dimensão da agricultura como catalizador de ações na bioeconomia, como a química verde e produtos para nutrição e saúde.

1 MCT. Ministério de Ciência e Tecnologia. Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: MCT, 2010.

2 NAMAs – National Appropriated Mitigation Actions.

Nos modelos de produção, o foco é nas “boas práticas”. Espera-se, ainda, o fortalecimento na geração e adoção de tecnologias do tipo “poupa-recursos”, de caráter (bio)químico, como fertilizantes, defensivos, animais e sementes melhoradas, etc., que possibilitam expandir a produção (1) sem aumento proporcional na área cultivada e (2) com maior eficiência no uso de recursos e insumos.

No que tange às pressões sobre o meio ambiente, em nível regional, a qualidade do solo e da água, e a questão da biodiversidade, são obviamente importantes. Entretanto, no âmbito internacional, a preocupação mais evidente é com as emissões de gases de efeito estufa pelas atividades do agronegócio, com destaque para potenciais efeitos diretos e indiretos do uso da terra e para as emissões de metano pelos bovinos.

Há crescente demanda para a adoção de tecnologias de baixa emissão de carbono, i.e., com menores emissões de gases de efeito estufa por unidade de produto, tanto na agropecuária como na agroindústria. Deve-se notar, porém, que a comunidade internacional tem freqüentemente desconsiderado a contribuição das atividades agropecuárias no país na mitigação de gases de efeito estufa. O aumento no teor de matéria orgânica do solo, resultante de melhores práticas de manejo, equivale à captura do CO₂ da atmosfera e a sua estocagem no solo, mecanismo importante para mitigar o aquecimento global. Avançar nesse sentido implica harmonizar as discussões em torno de métricas e, obviamente, assegurar o monitoramento periódico dos estoques de carbono no solo.

Nesse contexto, cabe ressaltar que as ações para uma agropecuária de baixa emissão de carbono lançadas pelo Governo brasileiro (“Programa ABC – Agricultura de Baixa Emissão de Carbono”), e que estão sendo efetivamente apoiadas pelo setor privado, alinham-se com essa tendência de baixa emissão de carbono, quer seja pela geração de efeitos poupa-terra, pela redução na intensidade das emissões ou ganhos nas eficiências dos processos. No presente estudo, discutiu-se sobre o uso atual e potencial de algumas dessas tecnologias.

1. Competitividade setorial

A agricultura tradicional prevaleceu no país até a década de 1970. Naquela época, o crescimento ocorria na margem extensiva e o aumento da produção implicava necessariamente na expansão de área. Tal condição foi progressivamente transformada nas décadas seguintes para uma moderna e competitiva agricultura baseada em ciência.

No início do desenvolvimento da agricultura brasileira, o grande vetor de mudança foi o processo de industrialização. A partir de meados dos anos 1990, a maior estabilidade macroeconômica, a ampliação da abertura dos mercados e os melhores preços relativos das commodities agrícolas no mercado mundial, concomitantemente à maturação de tecnologias em agropecuária tropical geradas nas duas décadas anteriores, estabeleceram as bases para uma nova era do agronegócio brasileiro.

O setor avançou rapidamente para uma agropecuária de elevada competitividade, sustentada no tempo, e impulsionada de modo crescente pelas exportações (este último ponto é discutido em outra seção). Identificam-se diversos fatores que contribuíram nesse processo de transformação da

agropecuária brasileira: (1) empreendedorismo dos produtores rurais brasileiros; (2) comprometimento do Governo;³ (3) disponibilidade de infraestrutura básica; (4) condições climáticas favoráveis a uma agricultura produtiva; (5) grandes extensões de terra disponíveis, adequadas à mecanização; (6) características físicas dos solos adequadas e disponibilidade de recursos minerais (calcário e fósforo); (7) internalização da necessidade de uma agricultura baseada em ciência, centrada na adaptação e no desenvolvimento de tecnologias para o ambiente tropical.

A Tabela 1 resume o processo de expansão dos setores focalizados, por meio do aumento na produção, área e produtividade. A produção dessas *commodities* cresceu fortemente nas últimas décadas, particularmente a soja e a carne de frango, com taxas anuais de aumento de 9,3% e 12,3%, respectivamente.

Em razão da base inicial pequena, para os padrões do país, a área de soja avançou a uma taxa de 5,9% ao ano no período de 1970 a 2012, o que contrasta com a pequena taxa de expansão de área para a cultura do milho (0,68% ao ano) no período. Note-se, porém, que no caso do milho a área com safrinha vem crescendo de maneira expressiva e, na safra 2011/2012, o milho proveniente da segunda safra representou cerca de metade da produção.

A taxa de aumento na área com pastagens, medida pelos Censos Agropecuários do IBGE, foi muito baixa. Como resultado, o crescimento na produtividade da pecuária bovina de corte foi expressivo, da ordem de 3,6% ao ano entre 1970 e 2006, e inclusive suplantou as taxas de crescimento nas produtividades de soja e de milho entre 1970 e 2012.

Tabela 1 Produção, área e produtividade da soja, milho e carnes em 1970 e 2012.

	Produção (10 ³ toneladas)			Área (10 ⁶ hectares)			Produtividade (kg/ha)		
	1970	2012	Var.(%aa)	1970	2012	Var.(%aa)	1970	2012	Var.(%aa)
soja	1,88	77,34	9,25%	2,19	24,27	5,89%	862	3187	3,16%
milho	12,77	58,55	3,69%	10,67	14,17	0,68%	1197	4132	2,99%
carne bovina(1)	1,85	6,89	3,72%	154,14	160,04	0,10%	11,97	43,03	3,62%
carne suína(2)	0,77	3,50	3,67%	-	-	-	-	-	-
carne de frango(3)	0,09	11,65	12,28%	-	-	-	-	-	-

(1) Produção e produtividade em equivalente-carcaça. Dados de área de pasto e produtividade referem-se a 2006. Esses valores estão de acordo com a revisão de 2012 do Censo Agropecuário de 2006, do IBGE. Para o ano que se estende de outubro de 2011/setembro de 2012, a produção de carne bovina foi de 7,14 milhões de toneladas de equivalente-carcaça.

(2) Produção em equivalente-carcaça, ano que se estende de outubro de 2011/setembro de 2012.

(3) Ano que se estende de outubro de 2011/setembro de 2012.

Fonte: Martha Jr. (2012), Martha Jr. et al. (2012a), a partir de estatísticas do IBGE. Dados recentes da produção de carnes são da Pesquisa Trimestral do Abate, do IBGE.

Cabe notar que neste processo de transformação da agropecuária brasileira verificaram-se significativos ganhos de produtividade total dos fatores, em adição aos ganhos na produtividade da terra e do trabalho (Gasques et al., 2010). Ressalte-se, também, que os progressos tecnológicos ainda trouxeram benefícios sócio-econômicos e promoveram externalidades ambientais positivas importantes (Pereira et al., 2012).

3 Em adição aos Programas de Desenvolvimento Regional, três políticas foram centrais a esta transformação da agropecuária brasileira: o crédito rural (compra de insumos e maquinário/equipamentos modernos), os investimentos em pesquisa agropecuária e a extensão rural.

Ademais, o Governo e o setor privado estão engajados em ampliar o uso de tecnologias capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Como exemplo, citam-se as políticas públicas e o comprometimento do setor com a recuperação de pastagens degradadas, a integração lavoura-pecuária (ILP), a fixação biológica de nitrogênio e o plantio direto, que constituem a base do plano ABC do Governo Federal.⁴ A agroindústria – de insumos e de processamento – também paulatinamente se modernizou e ganhou competitividade. Entretanto, há espaço para a ampliação no uso de tecnologias poupa-recursos.

2. Impactos Ambientais do Setor

Impactos podem ser de natureza positiva ou negativa. Por uma perspectiva de impactos positivos, as cadeias de valor de soja, milho e carnes contribuem positivamente com objetivos socioeconômicos. Contudo, os agroecossistemas também podem ser relacionados com potenciais impactos negativos sobre o ambiente. De modo geral, no caso da soja, milho e carnes, os potenciais impactos negativos podem ser agrupados em quatro grandes vertentes: uso da terra, uso da água, uso de nutrientes/resíduos e emissão de gases de efeito estufa (este último tópico é abordado em outra seção).

Uma das principais questões ambientais relacionadas à agropecuária diz respeito às implicações diretas e indiretas sobre o uso da terra. Importante notar que ganhos modestos de produtividade na pecuária, da ordem de 5% a 10% são capazes de gerar efeitos poupa-terra suficientes para absorver a demanda de expansão de área de lavouras, minimizando a pressão para abertura de novas áreas de terra (Martha Jr. et al., 2012a).

O principal impacto da revisão do Código Florestal está ligado às Áreas de Preservação Permanente (APPs) em beiras de cursos d'água, nascentes e áreas úmidas. Na legislação anterior as APPs ripárias exigiam a preservação de uma faixa de 30 metros em cada margem para rios com até 10 metros de largura. A nova regra divide as propriedades em categorias de acordo com os módulos fiscais e permite que a APP seja computada como parte da reserva legal (Agroanalysis, 2012; Tabela 2).

A implantação do Novo Código Florestal pressupõe medidas de aumento de produtividade (geração de efeito poupa-terra) de modo a sustentar uma trajetória crescente na produção agropecuária e adequação à legislação. Ganhos de produtividade, por sua vez, implicam em investimentos consideráveis por parte dos produtores rurais. No caso dos pecuaristas, parcela importante parece não ter capacidade financeira para tais investimentos, conforme se depreende de análises de custo de produção na atividade (Martha Jr. et al., 2011). A esperada volatilidade de preço e de renda para os próximos anos, e os investimentos consideráveis para se adequar às obrigações do Novo Código Florestal, podem sinalizar dificuldades para os produtores rurais se ajustarem à nova legislação.

4 Na safra 2011/2012, R\$ 3,1 bilhões foram ofertados no ABC, dos quais, cerca de R\$ 1,7 bilhões foram contratados. Dos contratos efetivados pelo Banco do Brasil (R\$ 1,22 bilhões), 77% foram direcionados para a recuperação de pastagens, 4% para a integração lavoura-pecuária e 7% para o plantio direto. Com relação à distribuição espacial desses recursos, há concentração de contratação no Cerrado. Embora importantes os recursos do Programa ABC, eles responderam por uma parcela da ordem de 10% a 15% do efetivamente gasto pelo setor na recuperação de pastagens (G.B. Martha Jr, não publicado).

Tabela 2 Áreas de preservação permanente (APPs) em cursos d'água, nascentes, lagos e veredas.

Módulos Fiscais	Rio 10 m ***	Rio +10 m ***	Nascentes	Lagos, Lagoas	Veredas	Teto Preservação (APPs)**
0 a 1	5 m	5 m	5 m	5 m	30 m	10%
1 a 2	8 m	8 m	8 m	8 m	30 m	10%
2 a 4	15 m	15 m	15 m	15 m	30 m	20%
4 a 10	20 m	30a100 m*	15 m	30 m	50 m	Integral
+ de 10	30 m	30a100 m*	15 m	30 m	50 m	Integral

Observações: *= Metade da largura do rio, observando o mínimo de 30 m e o máximo de 100 metros.

**= Teto de Preservação é em relação à área total da propriedade.

***= Referem-se a rios que cortam a propriedade.

Fonte: Agroanalysis, 2012.

No que tange às emissões de metano, a produção de bovinos, em sistemas pastoris, tem sido o alvo das críticas. Um ponto a ser ressaltado é que essas críticas computam, geralmente, apenas as emissões. Os benefícios de captura do CO₂ da atmosfera e sua estocagem no solo coberto por pastagens são raramente mencionados nessas situações. Um segundo ponto é que existe relação entre eficiência produtiva e emissões de metano. Com o aumento do desempenho animal observado no país nas últimas décadas (Tabela 1), em especial a partir de meados da década de 1990, houve redução expressiva nas emissões por unidade de ganho de peso vivo (Martha Jr. et al., 2012a).

Outra fonte de emissão de CO₂ nas atividades de agropecuárias é observada nas operações mecanizadas e na produção dos insumos modernos, como fertilizantes e agroquímicos (Lal, 2004). Deve-se analisar as emissões das operações mecanizadas em conjunto com o gasto energético de agroquímicos, que é bastante variável e, portanto, bastante sujeito à cultura e à estratégia de manejo adotada na fazenda.

Por exemplo,⁵ em plantio convencional, a emissão média de carbono equivalente, considerando aração, duas operações com grade e duas operações de cultivo, seria de 35,3 kg de carbono equivalente por hectare (CO₂-e/ha). Partindo para um sistema de revolvimento do solo mais restrito, próximo ao plantio direto, as emissões médias seriam reduzidas para a faixa de 5,8 kg de CO₂-e/ha. No caso do glifosate, a emissão é estimada em 9,1 kg de carbono equivalente por kg de ingrediente ativo. As estimativas de gasto energético com fungicidas variam de 1,2 a 8 kg de carbono equivalente por kg de ingrediente ativo, e com inseticidas de 1,4 a 11,7 kg de carbono equivalente por kg de ingrediente ativo.

As perdas por desnitrificação (emissão de óxido nitroso, N₂O) podem ocorrer quando há uma combinação de elevada disponibilidade de nitrogênio mineral no solo, ambiente anaeróbico e elevada quantidade de resíduos (fontes de carbono). Tais fatos podem ocorrer em sistemas de milho e soja e, também, em pastagens. Estima-se que 1% do N aplicado como fertilizante, ou mineralizado

5 A partir de Lal (2004).

de resíduos vegetais no solo, é emitido como $N-N_2O$. Com a aplicação de fatores de correção, esse valor é acrescido em cerca de 30% (IPCC, 2006). Pela ótica de mudanças climáticas, a eficiente fixação biológica de nitrogênio representa substancial economia de fertilizantes nitrogenados.

Com relação ao tema “água e agropecuária”, tem-se observado, por vezes, debates calorosos acerca de um possível comprometimento de reservas hídricas pela produção, em especial a pecuária. Entretanto, embora a produção agropecuária tenha uma elevada demanda por “fluxo de água”, muito pouco da água absorvida pelas plantas cultivadas é efetivamente exportada do sistema como produto. Quase a totalidade da demanda hídrica é a água armazenada no solo (Mekonnen & Hoekstra, 2012), que evapora para a atmosfera ou é absorvida pelas plantas e, posteriormente, transpirada, dando continuidade ao ciclo hidrológico.

Com relação à agroindústria, o principal fator que afeta o volume de água consumido são as práticas de lavagem, dependentes de exigências de órgãos reguladores e de mercados importadores. O consumo de água na agroindústria, no entanto, depende de diversos fatores, como por exemplo o *layout* da planta. Plantas mais modernas facilitam as operações de limpeza e a economia de água.

A eficiência de uso de nutrientes dos fertilizantes, em agroecossistemas, é resultado de um processo complexo, que depende de condições de clima, de solo e de manejo e de suas interações. A adubação de pastagens agrega complexidade, pois é composta por três eficiências parciais: conversão do nutriente do fertilizante em forragem, eficiência de pastejo e eficiência de conversão da forragem consumida em produto animal (Martha Jr. et al., 2007).

A principal questão ambiental na produção de suínos diz respeito aos dejetos. A condição líquida desses resíduos dificulta o manuseio e impõe riscos de contaminação do solo e da água. Na propriedade rural, os dejetos podem ser utilizados como fertilizantes, mas o manejo desse material deve seguir as recomendações técnicas para evitar perdas expressivas dos nutrientes aplicados, marcadamente do nitrogênio por volatilização de amônia, desnitrificação ou por lixiviação.

Na produção de aves, os resíduos também são a principal questão ambiental. Para minimizar esse problema potencial, a cama-de-frango tem sido utilizada por mais de um ciclo de engorda de frangos e, alternativamente, pode ser uma opção de fertilizante. O manejo desse material também precisa seguir as recomendações técnicas para garantir o uso eficiente dos nutrientes aplicados.

Mais recentemente, o crescimento das cidades e, portanto, a maior proximidade entre o local de produção agropecuária e os centros urbanos tem gerado problemas adicionais por causa do odor. Uma maneira eficaz de contornar esse problema é via biodigestores. Há necessidade de se ampliar os esforços de capacitação de produtores rurais, no tocante à operacionalização desses equipamentos. Ademais, por meio de biodigestores criam-se possibilidades de venda de créditos de carbono.

Na indústria, a busca por alternativas ao manejo de resíduos do processamento, que não a queima, vem se intensificando. Paralelamente, procuram-se opções para aumentar a eficiência no uso de produtos químicos utilizados na limpeza e sanitização, bem como das operações industriais de maneira mais ampla, por exemplo, no tocante ao uso mais eficiente da água e da energia consumidas na atividade industrial.

3. Comércio exterior⁶

O comércio internacional (exportações e importações) de milho, soja e carnes é bastante concentrado: em geral, os cinco principais *players* respondem por 50% a 70% do fluxo comercial. Na safra 2010/2011, seis importadores (Japão, Coreia do Sul, Taiwan, México, União Europeia e Egito) absorveram 53,3% do total das importações de milho. Estados Unidos, Argentina e Brasil responderam por 79% do volume exportado de milho em 2010/11.

Com relação à soja, o grande importador do grão (previsão 2011/12) é a China, que deverá responder por 61% do volume importado no mundo (56,5 milhões de toneladas). O segundo grande importador de soja grão para 2011/2012 deverá ser a União Europeia, com volume estimado em 12 milhões de toneladas. Outros grandes importadores – Japão, México, Taiwan – deverão demandar, individualmente, entre 2,4 a 3,5 milhões de toneladas. Esses cinco principais importadores responderão por 83% das importações de soja (grão) no mundo em 2011/2012.

Tendência semelhante é observada no caso do óleo de soja. Contudo, para o farelo de soja, o grande importador passa a ser a União Europeia. Em segundo plano, vêm os países Asiáticos, como Tailândia, Indonésia, Vietnã e Coreia do Sul.

As exportações de soja vêm das Américas: Estados Unidos, Brasil, Argentina e Paraguai, detêm, juntos, 87%; 83% e 93% das exportações de farelo, óleo e grão de soja, respectivamente.

Os cinco maiores importadores de carnes bovina, suína e de frango responderam por 54%, 62% e 44%, respectivamente, dos volumes comercializados em 2011. Na carne bovina, os principais países importadores são Estados Unidos, Rússia, Japão, Coreia do Sul e UE-27. A Rússia, o Japão e o México também estão entre os grandes importadores de suínos e aves, enquanto que a Coreia do Sul é grande importadora de suínos. A UE-27 é grande importadora de frango.

Os cinco maiores exportadores de carne bovina, suína e de frango responderam, respectivamente, por 70%, 94% e 91% do volume exportado em 2011. Contudo, é preocupante que a participação do Brasil nas exportações globais de bovinos e de suínos caiu de 29% para 17% e de 14% para 9%, respectivamente, entre 2007 e 2011. O *market-share* do Brasil nas exportações de carne de frango também diminuiu no período, de 39% para 36%, mas ainda se mantém bastante destacada.

Nas últimas três décadas, e de modo particularmente intenso nos últimos 15 anos, a demanda de alimentos tem sido continuamente aumentada, em resposta a uma crescente população, mais urbana e de maior renda. E, com a urbanização e, principalmente, com o aumento da renda, no Brasil e em outros países emergentes, como a China, vem a mudança nos hábitos alimentares em direção ao maior consumo de proteína animal (e, portanto, também de soja e milho para ração).

Ressalte-se que se a perspectiva para as próximas décadas de ganhos reais em renda per capita se confirmarem, a demanda internacional por carne (e por grãos e oleaginosas para a alimen-

⁶ Para essa seção utilizaram-se as bases de dados do Agrostat, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (<http://www.agricultura.gov.br/portal/page/portal/Internet-MAPA/pagina-inicial/servicos-e-sistemas/sistemas/agrostat>), e do Economic Research Service, do USDA, United States Department of Agriculture (<http://www.fas.usda.gov/report.asp>). As últimas atualizações foram feitas no primeiro semestre de 2012.

tação animal) tende a se sustentar em patamares elevados. Martha Jr. et al. (2012a) estimaram que a demanda para produtos agrícolas com elasticidade-renda na faixa de 0,5 a 0,75, consistente com valores de produtos de origem animal em países em desenvolvimento (Braun, 2005), considerando preços constantes, deve apresentar crescimento anual na demanda de 2,4% a 3,6% na China, 3,4% a 4,8% na Índia, 2,1% a 2,8% na Rússia e de 2,1% a 3,0% no Brasil.

4. Barreiras ao comércio

Com uma visão de futuro, parece irreversível que a produção com foco no mercado doméstico e nas exportações seja analisada por uma ótica sócio-ambiental paulatinamente mais exigente. Portanto, os modelos de produção adotados, seus impactos sobre o desenvolvimento regional e os impactos da cadeia produtiva agropecuária sobre o meio ambiente já mostram sinais que crescerão rapidamente em importância para a inserção do produto brasileiro no exterior.

Dentre as barreiras não-tarifárias que podem ser relevantes em termos de restrições ao comércio, no contexto de “uma economia verde”, destacam-se as barreiras técnicas e os subsídios. Ambas medidas podem ser utilizadas com fins protecionistas.

As “barreiras verdes” surgem em razão de padrões técnico-ambientais específicos. Quatro grandes vertentes poderiam ser identificadas como relevantes para essa discussão.

Na primeira, os indicadores que derivam desses padrões técnico-ambientais são de difícil verificação. Esse seria o caso do uso indireto da terra em razão da produção de soja (ou de cana-de-açúcar). O argumento é que as lavouras dinâmicas deslocariam a pecuária, resultando em taxas crescentes, ou ao menos sustentadas, de desmatamento na fronteira agrícola.

Embora essa argumentação persista, ela tem rapidamente perdido força, posto que não se sustenta frente às evidências empíricas. Considere, por exemplo, as taxas de desmatamento na Amazônia Legal. Estas, atingiram 27.772 km² em 2004, mas tiveram uma forte e consistente queda anual de 20% nos anos seguintes, atingindo 4.656 km² em 2012, i.e., 17% dos valores registrados menos de uma década atrás.⁷ Os melhores termos de troca, impulsionando ganhos de produtividade da agropecuária, o comprometimento do setor privado (por exemplo, a moratória da soja) e a governança mais eficiente (monitoramento de uso da terra inclusive) na fronteira agrícola, têm sido fatores importantes para essa redução expressiva nas taxas de desmatamento na Amazônia Legal.

Uma segunda vertente diz respeito às métricas utilizadas para se estimar as emissões de gases de efeito estufa. De acordo com a UNEP (2012), quatro grandes desafios surgem nessa questão: (1) a proliferação de diferentes métodos; (2) a escolha (e incerteza) dos dados; (3) a representação inadequada dos países em desenvolvimento no processo de determinação das métricas-referência; e (4) o custo elevado e os desafios técnicos na geração dessas medidas.

Para os setores analisados, o caso das emissões de metano pelos bovinos é particularmente relevante. Um primeiro aspecto seria a necessidade de se gerar resultados, validados por pesquisas

⁷ Veja detalhes em <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>.

críveis e verificáveis, para as nossas condições. Isso poderia ser utilizado como contra-ponto frente aos valores-padrão internacionais, estando implícita a necessidade de maior inserção de atores nacionais relevantes nesses debates internacionais.

Outro aspecto é que a métrica do “Global Warming Potential (GWP)” é a atualmente reconhecida pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Entretanto, evidências científicas suportam que esta métrica é equivocada ao “traduzir” calorías em aumento de temperatura em sistemas abertos, em decorrência da emissão de gases de efeito estufa. A métrica que melhor representa o que acontece na natureza é a do “Global Temperature Potential (GTP)” (indicada pelo Ministério de Ciência e Tecnologia Brasileiro, MCT), que estima o incremento da temperatura resultante das emissões de gases de efeito estufa (Shine et al., 2005; Shine, 2009; Meira Filho, 2010).

No caso do metano, sua equivalência para o dióxido de carbono, de 23-25 vezes, no GWP, cai para 4-5 vezes quando medida corretamente pelo GTP. Como resultado, a contribuição das emissões de metano para as emissões totais no Brasil, de 17,3%, com o GWP, cai para 4,8%, com o GTP (MCT, 2011). Não se detectam diferenças relevantes entre essas duas abordagens para os demais gases de efeito estufa, de maior tempo de residência na atmosfera (Shine, 2009; Meira Filho, 2010), embora a redução na participação nas emissões de metano implique em aumento na participação desses gases no total emitido (MCT, 2011).

A terceira vertente é que existem situações em que os indicadores usados como potencial “barreira verde” sequer se aplicam a outros países que não o país que impõe a barreira. Deve-se ter em mente que para sistemas de produção relativamente mais homogêneos no mundo, como os sistemas industrializados de suínos e aves, o “curso de ação” destas barreiras técnicas, embora ocorra, tende a ser mais limitado. O mesmo não acontece para os sistemas de produção de bovinos, que no caso brasileiro são fortemente ancorados em pastagens enquanto que em regiões como América do Norte (Estados Unidos e Canadá), Europa e Ásia (China, Japão) baseiam-se mais em confinamento. Nesse caso, o “curso de ação” para possíveis barreiras técnicas é maior.

Por fim, há a questão da eficiência de uso dos recursos. É preciso entender que cada país, e mesmo regiões em um país, pautam a produção em resposta à escassez dos fatores de produção disponíveis. Pautar eventuais barreiras técnico-ambientais sem considerar a qualidade desses fatores (por exemplo da mão-de-obra), ou com base exclusivamente na produtividade de um único fator, como a terra, é, no mínimo, uma análise incompleta (Martha et al., 2012b). Conforme discutido por esses autores, isso acontece, em parte, porque apenas em sistemas agropecuários rudimentares a terra é capaz de explicar de modo relevante a produção. Com efeito, Alves et al. (2012) estimaram que na moderna agropecuária brasileira os ganhos tecnológicos respondem por quase 70% do crescimento da produção.

Complementarmente, o que determina o “ponto ótimo” de produção não é a produtividade máxima da terra para uma dada disponibilidade de fatores. O “ponto ótimo” é aquele em que o preço do produto se iguala ao produto físico marginal no estágio em que este é menor do que o produto físico médio e ambos são positivos. E, se os preços mudam, também se altera o nível ótimo da métrica produtividade da terra para uma determinada área em produção (Martha et al., 2012b).

Frente a esse cenário, e na ausência de participação mais ativa e coordenada do Brasil, podem vir os subsídios. O argumento seria que a forma de produção agropecuária no país, ao não precificar “adequadamente” sua “pegada ambiental”, sustenta renda e preços que, direta ou indiretamente, contribuem para aumentar as exportações e/ou reduzir as importações.

Em resumo, por um lado, “barreiras verdes” podem vir a restringir nossas exportações. Por outro, subsídios alavancam a produção (e possivelmente o desenvolvimento tecnológico) em países compradores dos produtos do agronegócio brasileiro.

Cabe um comentário sobre possíveis efeitos do consumo sobre a demanda. Um exemplo é a questão da exportação de produtos transgênicos. Embora parcela crescente da produção brasileira de soja e milho seja composta por transgênicos, alguns mercados no exterior levantam restrições a esse tipo de produto. Em outubro de 2012, a Europa aprovou a importação de milho com o evento “MIR 162”, que confere resistência à lagarta do cartucho. Tal fato deve abrir espaço para já em um futuro próximo se aumentar o fluxo de exportações de grãos e oleaginosas geneticamente modificados para o mercado Europeu e outros que adotam padrões semelhantes.

No caso da carne vermelha, em particular, há forte movimento para redução de seu consumo. Em muitas situações, trazem a “pegada ambiental” para o foco das discussões, mas tais fatos, por vezes, sequer se sustentam diante de argumentações mais técnicas e fundamentadas.

5. Tecnologias

5.1. Geração, difusão e apropriabilidade

Uma das estratégias de políticas mais eficazes para se aumentar a produção agropecuária de modo sustentável, no longo prazo, é o investimento contínuo em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I). Os investimentos mundiais em P&D para a agricultura foram de US\$ 39,6 bilhões (valores constantes de 2005, dólares internacional, paridade do poder de compra do Banco Mundial-2008). Os países ricos concentraram 73% do total de investimentos em P&D (sendo 34% de investimentos públicos e 39% de privados). Os investimentos em P&D nos países pobres e em desenvolvimento foram predominantemente de origem pública (26%); os investimentos privados, nesse grupo de países, representou apenas 2% do montante investido mundialmente (Beintema & Elliott, 2011).

É importante reconhecer que as atividades de inovação são muito mais amplas e vão muito além das atividades de P&D, abrangendo, por exemplo, tecnologias cristalizadas em produtos, treinamentos tecnológicos, etc. (OECD, 2005). A inovação, na América Latina, centra fortemente na aquisição de bens de capital e equipamentos: enquanto na região esses itens representam 50% a 80% do gasto total com inovação, nos países da OECD esses gastos são da ordem de 10% a 30% (Pagés, 2010).

Obviamente a adoção de tecnologia pelos produtores, a aquisição de insumos e o escoamento da produção são fortemente dependentes da infraestrutura instalada na região e de sua

conexão com portos de exportação. Não obstante, os problemas para a solução das deficiências logísticas na agropecuária não parecem ser de solução fácil, em parte, por se tratar de um gargalo de atratividade de investimento.

Por exemplo, verificou-se que em um nível de regime competitivo por fundos públicos, as estradas rurais têm menor nível de eficiência na geração de desenvolvimento econômico e na sua auto-sustentação, por meio da geração de impostos. Isso reflete em grande parte a incapacidade destas estradas rurais, que ligam zonas produtoras aos portos, não gerarem emprego e renda em níveis compatíveis com os observados em regiões sob influência de estradas urbano-industriais ao longo de seu percurso (Lopes et al, 2008).

Em nível agregado, a difusão de tecnologias foi um sucesso na agropecuária brasileira (Alves, 2012). A iniciativa privada, em particular nas últimas duas décadas, tem se mostrado ativa e de enorme importância para a difusão de novas tecnologias. Entretanto, para o fortalecimento do agronegócio brasileiro, com maior inclusão social e desconcentração de renda, há necessidade de se intensificar as ações de difusão de tecnologia.

A difusão de tecnologia, essencialmente, é um processo de procura e processamento de informação, no qual o indivíduo aumenta seu conhecimento para paulatinamente reduzir a incerteza associada à tomada de decisão sobre a adoção da inovação (Rogers, 2003). Nesse sentido, avaliações subjetivas do produtor são relevantes nessa percepção de incerteza, bem como fatores como a idade e o grau de integração ao mercado (garantia de compra do produto) (Souza Filho et al., 2011). De acordo com Rogers (2003), cinco atributos percebidos da inovação – vantagem relativa, compatibilidade, complexidade, facilidade em realizar testes e possibilidade de observação das experiências – ocupam papel central, respondendo por 49% a 87% da variância na taxa de adoção.

Esperam-se efeitos positivos para a apropriabilidade de tecnologias voltadas às práticas e processos no sistema de produção quando: (a) as tecnologias são mais facilmente adaptáveis às capacidades (financeiras, de recursos humanos) e rotinas em uso na propriedade e, de modo geral, são simples ou de grau de complexidade limitado; (b) os esforços de disponibilização das informações são amplos, abordam de modo claro prós e contras da tecnologia e as recomendações destas são traduzidas em linguagem assimilável por parcela expressiva de técnicos e produtores rurais; (c) são intensificadas as iniciativas para o estabelecimento de unidades de referência tecnológica, compatíveis com a realidade local, e capazes de apresentar perspectiva adequada dos desafios técnicos e dos potenciais custos e retornos econômicos da tecnologia. Esses dois últimos itens, ao ampliarem o conhecimento do tomador de decisão, contribuem para reduzir a incerteza sobre o uso da tecnologia.

O aumento do poder de mercado, resultante da concentração da agroindústria à jusante e à montante, pode conferir maior apropriabilidade – habilidade de controle e exploração dos benefícios da tecnologia e da inovação – ao setor privado, estimulando seu desenvolvimento. Por um lado, isso resulta do próprio poder de mercado, que pode aumentar os incentivos à inovação. Embora tais incentivos possam concorrer para o aumento de produtividade ou para a implementação de ações

concordes a uma economia de baixa emissão de carbono, é inevitável ponderar a existência de competição por recursos para a inovação em outros campos, como, por exemplo, a qualidade do produto e a melhor conservação pós-colheita. Desse modo, não necessariamente as inovações para uma agropecuária de baixa emissão de carbono vão ocorrer na intensidade e velocidade eventualmente pleiteada pela sociedade na ausência de incentivos desenhados para tal fim.

Por outro lado, a concentração de mercado pode atuar negativamente sobre o avanço tecnológico, ao criar barreiras ao acesso de tecnologias e conhecimentos críticos à competitividade sustentada da cadeia de valor agropecuária. Adicionalmente, a busca por maior apropriabilidade pode determinar os rumos do desenvolvimento tecnológico nas grandes empresas. Um exemplo seria a preferência das empresas pelo desenvolvimento de híbridos *vis-à-vis* variedades para um dado nível de potencial de produtividade. Com o tempo, tal fato pode restringir a oferta de tecnologias disponíveis aos produtores.

5.2. Perspectivas Tecnológicas

As cadeias de valor da soja, do milho e das carnes experimentaram substanciais avanços tecnológicos nas últimas décadas. Alguns desses avanços foram disruptivos, como a “tropicalização” e a fixação biológica de nitrogênio na soja, os híbridos no milho, e o binômio “braquiária-Nelore” na pecuária. Entretanto, os ganhos tecnológicos projetados para o futuro têm características incrementais.

Tal fato, no entanto, não é pouco. Dados revisados por Alston et al. (1998), por exemplo, apontaram que investimentos significativos em pesquisa (entomologia, doenças, genética) são necessários apenas para manter os níveis de produtividade. Segundo os autores, 35% a 70% dos recursos das pesquisas agrícolas nos Estados Unidos são necessários para manter os ganhos prévios da pesquisa.

Uma possibilidade de “ruptura tecnológica” na agropecuária brasileira pode vir por meio da disseminação – e efetiva adoção – de modernas tecnologias por expressivo contingente de produtores no país. Alves et al. (2012) calcularam que 44% do 4,4 milhões de estabelecimentos rurais que declararam renda no Censo Agropecuário de 2006 foram capazes de remunerar todos os insumos, porém, apenas cerca de 500 mil estabelecimentos tiveram renda superior a 10 salários mínimos mensais. Restam, assim, aproximadamente 2 milhões de estabelecimentos, com renda de até 10 salários mínimos mensais, que, potencialmente, podem ter solução no setor agrícola. Tal estratégia depende da adoção de tecnologias modernas, o que reforça a necessidade de ações de crédito acompanhadas por extensão rural.

A Figura 1 indica possibilidades de inovação nas cadeias de soja, milho e carnes. No caso das sementes, o melhoramento genético convencional rapidamente perde espaço na “era da biologia”, marcada pelo uso de marcadores moleculares e pelo foco em “traits” (eventos) biotecnológicos.

A biotecnologia, já amplamente utilizada para a soja e o milho, e crescendo em interesse rapidamente nas forrageiras, traz perspectivas de potencialização dos métodos tradicionais de melhoramento genético e exploração sustentável da biodiversidade e variabilidade genética. Os focos atuais

da biotecnologia comercial estão na transferência de genes para resistência a herbicidas e proteção de plantas contra tipos de insetos (ou a ambos). Novos desafios estariam relacionados à adaptação das culturas às condições ambientais limitantes, como estresses hídricos e nutricionais que comprometam o desempenho e a competitividade da agricultura tropical.

No segmento de sementes há concentração de mercado pelas seis grandes empresas de insumos agropecuários – Syngenta, Bayer, BASF, Dupont, Dow e Monsanto, que detêm parcela majoritária da tecnologia (híbridos, transgênicos) demandada para soja e milho. Em uma década, mais de 80% e 90% da área cultivada com milho e soja no país, respectivamente, devem ser de transgênicos (Céleres, 2011). Contrasta, porém, o mercado para sementes de forrageiras. O consórcio Unipasto, formado por empresas nacionais e multinacionais, que aporta recursos à rede de pesquisa de desenvolvimento de novas forrageiras coordenada pela Embrapa, detêm parcela majoritária do mercado.⁸

No negócio de sementes que se projeta para os anos que se seguem, esses “traits” com resistência a herbicidas, inseticidas, ou a ambos, que ainda melhoram aspectos qualitativos, ou que conferem resistência à seca, crescem em relevância. Além da melhora potencial no resultado econômico da propriedade, o uso da biotecnologia tem tido impacto positivo sobre atributos ambientais (Céleres, 2011).

O processo de geração de novas cultivares é, no entanto, demorado e custoso. Levantamento recente da Consultoria Phillips McDougall (2012) mostrou que o número de anos desde a descoberta de um “trait” até a primeira venda comercial é da ordem de 12 anos para o milho e de 16,3 anos para a soja. O custo estimado para trazer um novo “trait” ao mercado, de acordo com a consultoria, é de US\$ 136 milhões. Os investimentos em P&D em sementes e “traits” das seis maiores empresas (Monsanto, Dupont, Syngenta, BASF, Dow, Bayer), que em 2000 era da ordem de US\$ 1,3 bilhões, em 2011, alcançou US\$ 3,4 bilhões.

O “pipeline” das seis principais empresas de biotecnologias do mundo (e do Brasil) – Basf, Bayer, Dow, Dupont, Monsanto e Syngenta – tem foco em resistência a doenças, insetos e herbicidas (“input traits”) e em características agrônômicas. Esses lançamentos, com uma “folga” para outros ganhos incrementais (e condicionados por aspectos regulatórios), devem prevalecer no mercado mundial e brasileiro na próxima década.

Os desenvolvimentos tecnológicos das indústrias de sementes encontram-se cada vez mais alinhadas com a de agroquímicos, havendo nítido alinhamento entre as seis grandes empresas no mercado de sementes, que também são os principais players na indústria de agroquímicos. Exemplificando, nos herbicidas, as seis grandes empresas de insumos agropecuários – Syngenta, Bayer, BASF, Dupont, Dow e Monsanto – detêm 65% do mercado brasileiro (Silva & Costa, 2011).

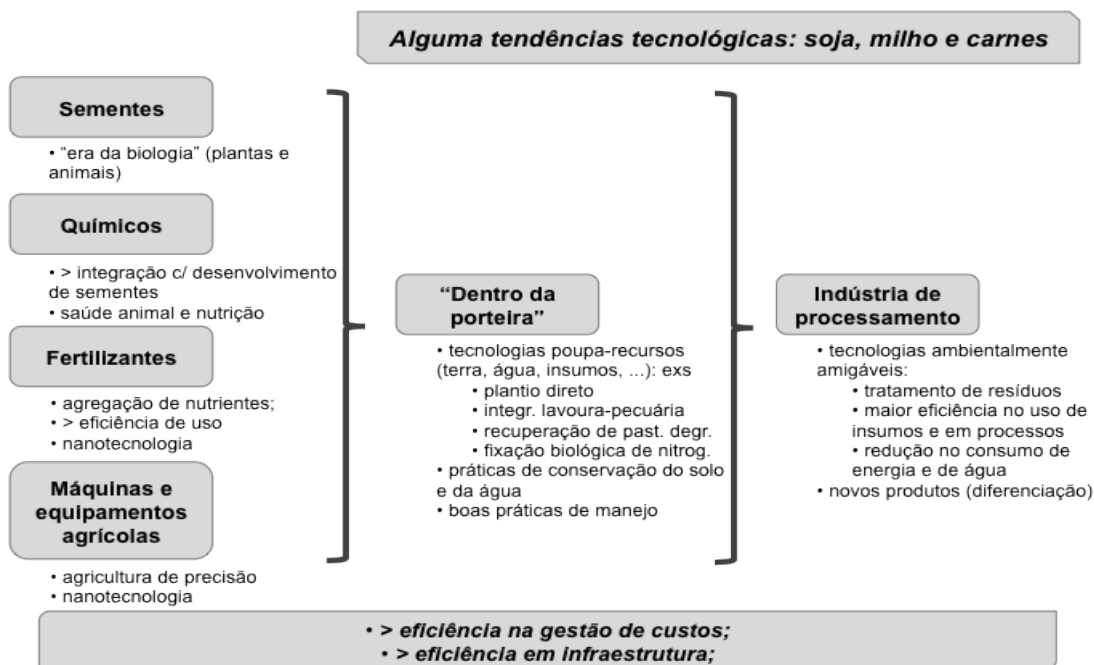
De acordo com Silva & Costa (2011), essa aliança entre o segmento de sementes e agroquímicos pós anos 1990 deveu-se a fatores como: *“(i) possibilidade de capturar os lucros proporcionados pelas patentes de sementes transgênicas, normalmente mais efetivas do que as dos produtos químicos; (ii) aplicação da biotecnologia nas lavouras, que poderia reduzir o consumo de defensivos; (iii)*

⁸ Veja detalhes adicionais em http://www.unipasto.com.br/a_unipasto.php.

necessidade de garantir a aceitação de lavouras geneticamente modificadas diante das dificuldades e riscos com a legislação; (iv) perspectiva de prolongar a utilização dos produtos químicos, mesmo depois da expiração das patentes, que ainda teriam valor desde que adicionados a uma semente a ele resistente; (v) existência de um cliente comum, o agricultor, que poderia ser atendido por uma oferta integrada de pesticidas e sementes”.

Figura 1 Possibilidades de inovação nas cadeias de soja, milho e carnes.

Elaboração G.B. Martha Jr.



O custo estimado para trazer um novo agroquímico ao mercado é da ordem de US\$ 256 milhões, sendo transcorridos 9,8 anos entre a primeira síntese e a primeira venda do produto no mercado (McDougall, 2012). Os investimentos em P&D em agroquímicos das seis maiores empresas (Monsanto, Dupont, Syngenta, BASF, Dow, Bayer), que, em 2000 era da ordem de US\$ 2,2 bilhões, em 2011, alcançou US\$ 3,1 bilhões.

O desenvolvimento de novos produtos, além de mais caro, torna-se mais complexo. O "pipeline" de novos agroquímicos torna-se menos disperso e, conforme informações do Rabobank, estratégias vencedoras vão se diferenciar de acordo com a escala da empresa, presença geográfica, exposição ao mercado de sementes e *market-share* atual. Silva & Costa (2011) apontaram que a expectativa é de redução na introdução de novos defensivos no mercado. No caso dos produtores "genéricos" de agroquímicos, o estudo do Rabobank indicou a necessidade de investimentos em ações estratégicas envolvendo a combinação "cultura-região-composto químico-formulações inovadoras".

Ganhos tecnológicos nesse segmento, na próxima década, também devem ser incrementais. Costa & Siva (2011), discutindo possibilidades para a competitividade da indústria nacional ressal-

taram, dentre outros, a busca por ingredientes de melhor desempenho agrônomico e o possível incentivo à competição pelo uso de produtos cujas patentes estão em vias de expirar.

Ainda na parte de químicos, destaque-se a importância da indústria de saúde animal. Além de novos produtos “convencionais”, a próxima década deve se beneficiar de produtos incrementalmente mais eficientes por meio do uso de nanotecnologias (nanopartículas e nanoencapsulação) para liberação controlada (e absorção mais eficiente) de fármacos (e eventualmente de produtos para nutrição) para uso na pecuária.

Note-se a dependência do país em insumos importados, como fertilizantes. Exemplificando, em 2010, 76%, 43% e 91% dos fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, respectivamente, foram importados (Anda, 2011). Tal dependência sinaliza que a ampliação na produção desses insumos no país é oportuna. Sinaliza, também, a importância de incentivar o uso de tecnologias “poupa-insumos” na agropecuária nacional.

Os ganhos tecnológicos para os próximos dez anos na indústria de fertilizantes também devem ser incrementais. Na indústria existem trabalhos para a agregação de nutrientes em misturas existentes (por exemplo, enxofre em fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos). A busca por maior eficiência agrônomico e redução de perdas, como a ureia recoberta com enxofre, permanece no “pipeline” de algumas empresas. Assim como na indústria de fármacos, o desenvolvimento de nanopartículas e nanoencapsulação para liberação controlada (e absorção mais eficiente) de fertilizantes deve crescer em importância na próxima década.

Fontes alternativas de fertilizantes, como o “pó de rocha”, que fornece principalmente potássio, têm sido incentivadas pela pesquisa, mas seu posicionamento potencial no mercado ainda é incerto e possivelmente limitado a regiões mais próximas ao local de extração e processamento. A fixação biológica de nitrogênio deve continuar como foco de políticas e da pesquisa. O Programa ABC incentivava essa tecnologia (meta de se aumentar a área com fixação biológica de nitrogênio em 5,5 milhões de hectares entre 2010 e 2020), enquanto que a pesquisa avança para aumentar a contribuição do nitrogênio da fixação biológica no total demandado por gramíneas, como milho e cana-de-açúcar.

Ampliar o uso de automação nas propriedades rurais na próxima década, criando oportunidades crescentes para a indústria de máquinas e equipamentos, parece uma tendência irreversível. Tal constatação reflete a busca por aumentos na produtividade do trabalho, a expectativa de redução de trabalhadores no meio rural (migração para as cidades, ainda que com menor intensidade frente a décadas passadas) e o progressivo envelhecimento da população (e, portanto, dos trabalhadores).

O uso de agricultura de precisão⁹ e, paralelamente, de nanosistemas inteligentes de monitoramento e de nanodispositivos eletrônicos também devem ser ampliados (Mattoso et al., 2005). Acompanhando tais mudanças, as geotecnologias crescem em importância e, nos próximos anos, começam a ser usadas de modo mais generalizado pelas iniciativas pública (desenho de políticas, monitoramento) e privada (agricultura de precisão, adequação à legislação).

⁹ A agricultura de precisão, em seus diversos usos (aplicação de fertilizantes, defensivos químicos, irrigação, etc.), envolve geralmente a obtenção de dados dos recursos e características das fazendas, seguida por uma fase de análise e outra de intervenções no sistema. Periodicamente ocorre a reavaliação dos processos vis-à-vis resultados observados.

De modo geral, o desenvolvimento tecnológico “no dentro da porteira” deve experimentar avanços incrementais com foco em tecnologias poupa-recursos (terra, água, insumos), como aquelas incluídas no Programa ABC. Paralelamente, os incentivos às práticas de conservação do solo e da água e às boas práticas de manejo devem ser ampliadas. A velocidade de incorporação dessas tecnologias aos sistemas de produção, ao longo da próxima década, deve ser ditada pelos preços relativos e termos de troca.

Na indústria, o foco centra em tecnologias ambientalmente amigáveis e com impacto positivo sobre a redução de custos e/ou aumento de receitas. Os ganhos devem ser incrementais e crescentes ao longo da próxima década. Exemplos seriam o tratamento de resíduos, a busca por maior eficiência no uso de insumos e em processos, a redução no consumo de energia e de água, e, paralelamente, maiores escalas de produção, e fortalecimento da marca, com busca de desenvolvimento de novos produtos (diferenciação no mercado).

Deve-se reconhecer, no entanto, que a diferenciação de produtos em boa parte da cadeia é limitada, uma vez que o padrão tecnológico é definido por um produto homogêneo. Existem oportunidades para as situações em que o produto (principalmente sementes, mas também agroquímicos) é identificado como portador de características superiores pelo mercado.

5.3. Visão setorial da tecnologia

A perspectiva dos atores envolvidos na cadeia de valor da soja, milho e carnes foi investigada por meio de questionários enviados a representantes da indústria de insumos e de processamento, do “dentro da porteira”, de agentes financeiros e da pesquisa agropecuária. De modo geral, a percepção dos entrevistados foi de que as medidas de baixo carbono são implementadas em maior extensão no exterior em comparação ao país. Um aspecto que chamou a atenção foi a constatação de que a regulamentação restritiva sobre produtos, no exterior, foi percebida como mais relevante na opinião dos entrevistados, enquanto que a regulamentação de processos produtivos teve peso semelhante no Brasil e em outros países.

Um dos maiores “gaps” entre a percepção de medidas de baixa emissão de carbono implementadas no exterior e no país foi com respeito às restrições ao comércio exterior. Tal fato reforça a premissa que no futuro próximo o Brasil poderá ser submetido em maior extensão a tais restrições já presentes no exterior. Com efeito, o grau de importância dado a essa medida – restrições ao comércio exterior – e, de modo semelhante, às regulamentações restritivas de produtos e processos, parecem dar suporte a essa assertiva. Entretanto, cerca de 50% dos entrevistados apontaram que os pagamentos por restrições ambientais de caráter local é de baixa-média importância para o setor.

Na percepção dos agentes do setor, empresas, fornecedores, universidades e centros de pesquisa são todos relevantes no desenvolvimento tecnológico. Isso sinaliza a importância de fomentar arranjos produtivos entre esses atores, por meio de mecanismos inovadores que incentivem parcerias público-privadas para o efetivo desenvolvimento tecnológico.

Os diferentes agentes das cadeias de valor de soja, milho e carnes têm a visão de que o país tem as capacidades tecnológicas necessárias para sustentar um ciclo virtuoso de desenvolvimento tecnológico. Considerando o desenvolvimento tecnológico por uma ótica mais geral, verificou-se enorme importância atribuída pelos entrevistados às tecnologias de produto mais eficientes no uso de energia.

As tecnologias do Programa ABC – recuperação de pastagens, plantio direto, integração lavoura-pecuária, fixação biológica de nitrogênio – teriam horizonte de difusão prioritário no curto/médio prazo (até 2020). Tal fato é consistente com o próprio Programa ABC, cujas metas centram no período 2010-2020. Com foco na difusão de médio/longo prazo (2030-2050), destaca-se a nanotecnologia. O melhoramento genético e a agricultura de precisão teriam horizonte de difusão focado no médio prazo (2020-2030).

6. Visão setorial no médio e longo prazo

Os setores de milho, soja e carnes, e seus impactos associados ao uso da terra, têm tido uma trajetória pró-sustentabilidade, sentido amplo (i.e., dimensões técnico-econômica, social e ambiental), em especial, nas últimas duas décadas. Entretanto, há caminho para se avançar mais. Alguns objetivos para o médio/longo prazo, convergindo para sistemas paulatinamente mais competitivos e sustentáveis, seriam:

- Governança aprimorada da gestão dos recursos naturais e de seu uso, por meio de monitoramento eficiente (por exemplo, pelo uso de geotecnologias) e com base em critérios amplamente discutidos, críveis, verificáveis e, portanto, não-subjetivos;
- Eliminação de inseguranças jurídicas em aspectos relevantes à cadeia de valor;
- Redução progressiva da dependência do agronegócio de insumos importados (fertilizantes, agroquímicos);
- Ampliação dos trabalhos da defesa sanitária (vegetal e animal), minimizando possíveis argumentos em favor de barreiras não-tarifárias;
- Ampliação do uso de técnicas e processos mais eficientes (água, energia) na indústria, contribuindo para o aumento da competitividade (redução de custos) e menor impacto sobre os recursos do ambiente.
- Qualificação ampliada e aprimorada da mão-de-obra, com habilidades mínimas para possibilitar o trabalho com os sistemas cada vez mais complexos da agropecuária do futuro;
- Inserção de contingente crescente de produtores rurais ao mercado e às cadeias de valor agropecuária;
- Infraestrutura e logística ampliada e aprimorada: aumento na capacidade de armazenamento nas fazendas; manutenção eficiente das vias de transporte (estradas rurais e ligações com centros produtores de insumos, processamento e consumo) e dos portos; utilização eficiente e integrada dos modais logísticos, com foco no hidroviário e ferroviário

que contribuem para redução na intensidade de emissão de gases de efeito estufa em comparação com o transporte rodoviário;

- Fortalecimento da pesquisa agropecuária, permitindo fluxo contínuo de novas tecnologias e inovações para a cadeia de valor;
- Isonomia de variáveis-chaves (nível de tributação, taxa de juros e prazos de financiamento, etc.) frente aos nossos principais concorrentes internacionais;
- Fomentar encadeamentos positivos da agropecuária, para trás e para frente, ampliando as possibilidades de geração de emprego e renda no meio rural.

7. Posicionamento e políticas

Conforme a agropecuária se moderniza, a exemplo do que ocorreu no Brasil ao longo das últimas quatro décadas, ela passa a ser paulatinamente mais afetada por políticas de caráter genérico, como as políticas monetária, cambial e de renda. Deste modo, o impacto destas políticas sobre o setor não pode ser desconsiderado, posto que se traduz em ações mais ou menos ousadas de investimento pelos empreendedores e, em última análise, na capacidade de sucesso do negócio (risco do negócio e risco financeiro).

Com foco na cadeia de valor agropecuária, a transmissibilidade de efeitos entre seus elos, e suas interações com outras cadeias de valor e as suas respostas às políticas macroeconômicas e genéricas precisam ser conhecidos, constantemente monitorados e reavaliados para permitir eventuais correções de trajetória. Essa visão é importante, pois alguns gargalos transpassam os interesses específicos dos elos individuais da cadeia.

No dentro da porteira (mas com reflexos em outros elos), parece particularmente importante reduzir a dependência do setor em insumos importados (fertilizantes, defensivos agrícolas) e ampliar os trabalhos de monitoramento e atuação das defesas sanitárias vegetal e animal. Fortalecer o capital humano para níveis compatíveis com as exigências dos sistemas de baixa emissão de carbono, mais complexos, é obviamente essencial. Também importante é a promoção de arranjos inovadores e que estimulem a adoção de tecnologias que permitam a produção agropecuária ao longo de todo o ano, tornando a demanda de trabalho mais ajustada à oferta no ciclo anual.

Vale lembrar que estímulos à agroindústria, no meio rural, podem gerar encadeamentos positivos na cadeia de valor e podem ter importante efeito inclusivo na ótica regional, ao criar oportunidades de geração de emprego e renda para além da porteira. Com efeito, além de potenciais efeitos diretos e indiretos positivos sobre a geração de emprego e renda, políticas com foco na cadeia de valor podem conferir vantagens comparativas às regiões mais distantes de grandes centros urbanos. Isso, no entanto, passa por uma bem planejada inserção (e formalização) dos produtores ao mercado e infraestrutura e logística compatível com o empreendimento.

O aspecto da logística e infraestrutura é particularmente importante, pois beneficia toda a cadeia de valor (insumos, “dentro da porteira”, agroindústria de processamento, consumidores e ser-

viços de apoio). Ademais, o transporte, principalmente aquele de longa distância, tem peso elevado sobre a “pegada de carbono” da agropecuária brasileira nas exportações destinadas à Europa (Defra, 2008). Contudo, há espaço para se fomentar estradas melhores nos pólos de produção agropecuária e o uso mais generalizado de hidrovias e ferrovias, tornando mais eficiente (menor custo) e menos poluidor o transporte na agropecuária.

As políticas específicas de curto prazo para o setor agrícola estão galgadas no tripé crédito rural, apoio à comercialização e gestão rural. Já há vinculação do crédito, por exemplo, à adequação à legislação ambiental. A comercialização teria seus custos substancialmente reduzidos (com transbordamentos positivos para toda a cadeia de valor) com melhor infraestrutura de armazenamento e modais de transporte mais eficientes e integrados. A gestão rural deve ter seu papel fortalecido nos próximos anos, recebendo apoio crescente das geotecnologias que contribuem para um melhor monitoramento e controle do uso do solo e das safras e, potencialmente, para uma possível redução do prêmio de seguros agrícolas. Na linha de redução de risco, é importante aportar mais recursos para o seguro rural, conferindo, adicionalmente, maior previsibilidade e estabilidade ao Programa de Subvenção ao Prêmio do Seguro Agrícola, através de um planejamento de mais longo prazo, por exemplo quinquenal (MB Agro, 2012).

No médio/longo prazo, a competitividade do setor agropecuário vai depender da expansão da oferta concorde restrições econômicas e aquelas ambientais que vierem a fazer parte de sua função objetiva. Nesse sentido, assegurar investimentos continuados e crescentes em pesquisa, desenvolvimento e inovação mostram-se absolutamente imprescindíveis. O Brasil investe cerca de 1,5% do PIB agropecuário em P&D ante 3% dos países desenvolvidos (ASTI/CGIAR, 2012). Elevar progressivamente o nível de investimento em P&D, para a faixa mais próxima dos nossos competidores internacionais (2%-2,5%), é estratégia interessante.

Pagés (2010) encontrou que a propensão de uma empresa a se envolver em ações de inovação, bem como seu nível de esforço em inovação, são positivamente associados com a presença de financiamento público para esse fim. Fomentar parcerias público-privadas tornam-se, adicionalmente, estratégia interessante para aumentar os aportes para a pesquisa e o seu pragmatismo.

Não menos importante, se o crescimento futuro da agropecuária nacional é para ser inclusivo, é essencial um competente plano de assistência técnica rural. Tal ação, deve ser capaz de capturar conhecimentos, decodificá-los e transformá-los em tecnologias de elevada capilaridade em seu alcance.

Por fim, porém, muito importante, é a constatação de que o setor de insumos, o “dentro da porteira”, e a agroindústria, com amparo da pesquisa e extensão rural, do setor público e de suas políticas, precisam garantir inserção adequada de interlocutores nacionais nos debates no Brasil e no exterior que podem se traduzir em barreiras técnicas, promovendo, quando apropriado, contra-pontos com fundamentação científica, crível e verificável.

Considerações finais

A análise do agronegócio nacional ao longo das últimas quatro décadas revela uma trajetória vencedora. O setor respondeu com competência aos desafios que lhe foram impostos e hoje é um dos mais competitivos do mundo.

No curto/médio prazo, os prognósticos para o crescimento setorial são positivos. Isso se deve à expectativa de sustentação de preços elevados das commodities agrícolas frente aos padrões históricos, e de continuidade dos ganhos de produtividade, que garantem certa robustez às pressões de custo, por exemplo, de elevação dos salários.

O agronegócio brasileiro mostra-se paulatinamente mais exposto ao mercado internacional, o que é importante para a sustentação de preços e, conseqüentemente, do emprego e da renda em nível doméstico. Desse modo, eventuais restrições às nossas exportações, por exemplo, na forma de barreiras não-tarifárias, são um risco que não se quer correr, ainda que se reconheça que parcela majoritária da nossa produção é destinada ao mercado interno.

Até o momento, “barreiras verdes” mostram-se relativamente latentes, com força reduzida para abalar nosso comércio. Contudo, o mundo se torna cada vez mais exigente em padrões sócio-ambientais, de maneira que é importante assegurar que nossa produção e exportações atendam aos padrões dos mercados compradores.

As ações para uma agropecuária de baixa emissão de carbono lançadas pelo Governo brasileiro (“Programa ABC – Agricultura de Baixa Emissão de Carbono”) estão sendo efetivamente apoiadas pelo setor privado. Entretanto, a adoção dessas tecnologias pelos produtores, a aquisição de insumos e o escoamento da produção são dependentes de infraestrutura, que precisa ser aprimorada para reduzir a “pegada e carbono” da produção agropecuária.

Ressalte-se, também, que a produção brasileira tem sido cada vez mais explicada por ganhos tecnológicos, tendência que tem se acentuado no tempo. Assim, a ampliação da produção agropecuária passa, obrigatoriamente, por investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação. Fomentar parcerias público-privadas é opção interessante e necessária para ampliar os recursos para ações de PD&I que sustentem a competitividade do agronegócio nacional. Muito importante, um crescimento setorial mais inclusivo demanda um competente plano de assistência técnica rural, capaz de assegurar que os conhecimentos gerados pela pesquisa cheguem de fato à ponta executora.

Por fim, para evitar desdobramentos desfavoráveis no futuro, o Brasil precisa avançar na questão das métricas. Buscam-se métricas que reflitam adequadamente as condições tropicais de produção (e seu ambiente de tomada de decisão) e que confirmem maior robustez e menor incerteza dos dados. Muito importante, é preciso assegurar uma maior inserção de colaboradores brasileiros no desenvolvimento de métricas de referência e maior representatividade e inserção dessas equipes nos diferentes fóruns de debates internacionais.

Referências Bibliográficas

- ALSTON, J.M.; NORTON, G.W.; PARDEY, P.G. *Science under scarcity: principles and practices for agricultural research evaluation and priority setting*. Wallingford: CAB International, 1998. 585p.
- ALVES, E.; SOUZA, G.S.; ROCHA, D.P. Lucratividade da agricultura. *Revista de Política Agrícola*, v.21, n.2, p.45-63, 2012.
- ALVES, E. Nosso problema de difusão de tecnologia. *Revista de Política Agrícola*, v.21, n.1, p.3-4, 2012.
- ANDA. *Estatísticas do setor de fertilizantes no Brasil*. Disponível em <http://www.anda.org.br/index.php?mpg=00.00.00&ver=por>. Acessado em 29 de dezembro de 2011.
- ASTI/CGIAR. *Agricultural Science and Technology Indicators – Brazil*. (disponível em <http://www.asti.cgiar.org/brazil>, acessado em 24 de abril de 2012).
- BEINTEMA, N.; ELLIOTT, H. *Setting meaningful investment targets in agricultural research and development: challenges, opportunities and fiscal realities*. FAO: Roma, 2011. p.347-387.
- BRAUN, J. von. *The world food situation: an overview*. Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR) Annual General Meeting, Marrakech, 2005.
- CÉLERES. *Relatório de biotecnologia*. Disponível em http://www.celeres.com.br/pdf/RelBiotecBrasil_1103.pdf. Acessado em 15 de dezembro de 2011.
- DEFRA. *Comparative life-cycle assessment of food commodities procured for UK consumption through a diversity of supply chains*. Disponível em <http://randd.defra.gov.uk/Default.aspx?Menu=Menu&Module=More&Location=None&Completed=0&ProjectID=15001>. Acessado em 27 de novembro de 2008.
- GASQUES, J.G.; BASTOS, E. T.; BACCHI, M. R. P.; VALDES, C. Produtividade Total dos Fatores e Transformações da Agricultura Brasileira: análise dos dados dos Censos Agropecuários. In: GASQUES, J.G.; VIEIRA-FILHO, J.E.R.; NAVARRO, Z. (Org). *A agricultura brasileira: desempenho, desafios e perspectivas*. Brasília, DF: IPEA: MAPA, 2010.
- IPCC. International Panel on Climate Change. *Guidelines for national greenhouse gas inventories: reference manual*. Disponível em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl>. Acessado em 24 de novembro de 2006.
- LAL, R. Carbon emission from farm operations. *Environmental International*, v.30, p.981-990, 2004.
- LOPES, M.R.; SOUZA, G.S.; LOPES, I.G.V.; OLIVEIRA, M.S.; BARCELOS, F.C.; BOGADO, P.R. Estradas rurais ou urbano-industriais: processo de escolha em regime de competição por fundos públicos. *Revista de Política Agrícola*, v.17., n.4, p.47-64, 2008.
- MARTHA, G.B.; Jr., VILELA, L.; SOUSA, D.M.G. *Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. 224p.
- MARTHA, G.B., Jr., VILELA, L.; ALVES, E. Economic and environmental issues in integrated crop-livestock systems. *Cab Reviews*, 2012b (no prelo).
- MARTHA Jr., G.B.; ALVES, E., CONTINI, E. Land-saving approaches and beef production growth in Brazil. *Agricultural Systems*, v.110, p.173-177, 2012a.
- MATTOSO, L.H.C.; MEDEIROS, E.S.; MARTIN, L. A revolução nanotecnológica e o potencial para o agronegócio. *Revista de Política Agrícola*, v.14, n.4, p.38-46, 2012.
- MB AGRO. *Seguro agrícola no Brasil: uma visão estratégica de sua importância para a economia brasileira*. São Paulo: MB Agro, 2012. (Relatório de projeto) 119p.

- McDOUGALL. *R&D trends in crop protection*. ABIM Conference. Disponível em http://www.abim.ch/fileadmin/documents-abim/Presentations_2012/ABIM_2012_6_McDougall_John.pdf. Acessado em 4 de novembro de 2012.
- MCT. Ministério de Ciência e Tecnologia. *Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Brasília: MCT, 2011.
- MEIRA FILHO, L.G. Metano, aquecimento e mudança do clima. *Agroanalysis*, v.19, n.6, 2010. (Especial de sustentabilidade).
- MEKONNEN, M.M.; HOEKSTRA, A.Y. A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, v.15, 401–415, 2012.
- OECD. *Oslo Manual: guidelines for collecting and interpreting innovation data*, 3a ed. Paris: OECD, 2005. 168p.
- PAGÉS, C. (Ed.) *The age of productivity*. Washington: Interamerican Development Bank, 2009. 348p.
- PEREIRA, P.A.A.; MARTHA Jr., G.B.; SANTANA, C.A.M.; ALVES, E. The development of Brazilian agriculture: future technological challenges and opportunities. *Agriculture & Food Security*, v.1, p. 4, 2012.
- ROGERS, E.M. *Diffusion of innovations*. 5ªed. New York, Free Press, 550p.2003
- SHINE, K.P.; FUGLESTVEDT, J.S.; HAILEMARIAM, K.; STUBER, N. Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases. *Climatic Change*, v.68, p.281-302, 2005.
- SHINE, K.P. The global warming potential: the need for a interdisciplinary retrieval. *Climatic change*, v.96, p.467-472, 2009.
- SILVA, M.F.O.; COSTA, L.M. A indústria de defensivos agrícolas. *BNDES Setorial*, n.35, p.233-276, 2011.
- SOUZA FILHO, H.M.; BUAINAIN, A.M.; SILVEIRA, J.M.F.J.; VINHOLIS, M.M.B. Condicionantes da adoção de inovações tecnológicas na agricultura. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 28, n.1, p.223-255, 2011.
- UNEP. *Product carbon footprint standards*. Nairóbi: UNEP, 2012. 5p. (Policy Brief, 9. Trade and environment briefings).

Biocombustíveis

André Luis Squarize Chagas

Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas decorrentes das preocupantes emissões de gases efeito estufa (GEE) motiva as discussões com relação a adoção de políticas de baixo carbono nos vários países. Essas políticas se caracterizam pelo tratamento diferenciado às empresas, produtos e processos que adotem tecnologias em que o balanço energético seja poupador ou redutor nas emissões de GEE, contabilizados em termos de carbono equivalente. Nos diferentes países, as emissões se diferenciam de acordo com suas estruturas econômicas e níveis de desenvolvimento econômico e social. Nos países desenvolvidos, as emissões se concentram no uso de energia, com destaque para o setor de transporte. No caso brasileiro, a maior parte das emissões decorre de mudanças no uso do solo, com destaque para o desflorestamento e as atividades agropecuárias. Este perfil de emissões coloca vantagens para a economia brasileira no alcance de metas de redução de emissões, podendo concentrar-se em ganhos de produtividade e melhores técnicas de manejo na agropecuária. No caso dos países desenvolvidos, a redução de emissões está associada a maior eficiência energética e a busca de fontes de energias alternativas, entre elas, os biocombustíveis.

O etanol, empregado na indústria química, fabricação de bebidas e como combustível, é hoje a principal bioenergia utilizada no mundo. Entre 2005 e 2010, a produção mundial cresceu 77,3%, quando atingiu 87 bilhões de litros. Os maiores produtores e consumidores do etanol são o Brasil e os Estados Unidos que, juntos, foram responsáveis por mais de 80% da produção e do consumo mundial. Com uma demanda interna de cerca de 50 bilhões de litros, o mercado americano de etanol foi o que mais cresceu nos últimos anos, em função da substituição do Metil Tércio Butil Éter (MTBE) pelo etanol como oxigenador da gasolina em vários Estados. A expansão da demanda americana tem sido respaldada pelo crescimento da oferta de milho no país e pela expansão da capacidade produtiva instalada. No Brasil, a demanda por etanol superou os 25 bilhões de litros em 2010. Nesse mercado, a tendência nos últimos anos também foi de crescimento, porém a taxas bem menores que no caso americano.

O Brasil é pioneiro no processo de busca de energia limpa. Além da forte presença das hidrelétricas, o país é o único que possui um programa de larga escala de veículos com motores que utilizam fontes energéticas limpas e renováveis, no caso o álcool, seja na adição de porcentual significativo à gasolina (álcool anidro), seja diretamente como combustível (álcool hidratado). A competitividade do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar no Brasil é significativamente maior do que a dos demais produtores, destacando-se em relação ao etanol de milho dos EUA, tanto na questão dos custos de produção, como do balanço energético. (BNDES; CGEE, 2008). Para o Brasil, a expansão da produção de cana-de-açúcar representa grande oportunidade de geração de valor e renda, uma vez que o país apresenta nítidas vantagens comparativas na produção de combustíveis de fontes renováveis (HOFFMANN, 2006).

A preocupação com as emissões de GEE colocam duas questões que podem afetar a estrutura econômica dos países: (i) a imposição de restrições ao consumo e ao comércio de produtos intensi-

vos em emissões; (ii) o surgimento de mudanças tecnológicas em termos de eficiência energética e novas fontes de energia que comprometam setores já instalados.

Particularmente, no caso dos biocombustíveis, a nítida vantagem brasileira, consequência de sua vanguarda e vantagens comparativas na dotação de recursos naturais, pode ser questionada no futuro, por conta dos avanços tecnológicos em outros países e um direcionamento crescente de recursos para P&D que poderão colocar em xeque a posição do país. É o que se verifica, por exemplo, no desenvolvimento do etanol celulósico, ou ainda com o surgimento de outras fontes energéticas que se tornem competitivas (como a célula de hidrogênio, entre outras). Isto já pode ser sentido pela grande expansão na produção do etanol de milho nos EUA, que já supera a produção brasileira, o que sinaliza a importância que este tema vem assumindo em nível global.

Já o biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis e pode ser produzido a partir de gorduras animais, óleos e gorduras residuais ou de óleos vegetais. O biodiesel pode ser produzido a partir de qualquer óleo vegetal bruto, ou seja, sem grandes refinações. De uma maneira geral, faz-se a extração do óleo, seguida de procedimentos de separação por centrifugação e filtragem, resultando nos óleos vegetais brutos. A Alemanha é a principal produtora deste biocombustível, mas o Brasil vem ganhando importância, em decorrência do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) que foi elaborado por meio de parceria entre governo e instituições privadas. Diferente do etanol, o biodiesel ainda se encontra em estágio tecnológico bem menos desenvolvido, mas a disponibilidade de matéria-prima, clima e solo, coloca o país entre os principais produtores e consumidores do produto.

Esse artigo se divide em cinco seções, contando essa introdução e as referências bibliográficas ao final. A próxima seção trata dos temas abordados no projeto, com foco sobre as questões relacionadas ao etanol; na seção seguinte, o foco é o biodiesel. Para os dois tipos de biocombustíveis são considerados a caracterização setorial e o quadro internacional e nacional de produção, consumo e comércio, a dinâmica tecnológica de cada produto, e os potenciais efeitos das mudanças climáticas e de adoção de políticas de baixo carbono sobre os dois mercados. A última subseção para cada biocombustível trata das sínteses das ideias apresentadas ao longo do texto. Ao final, apresentam-se, a título de considerações finais, uma síntese das discussões expostas ao longo do texto para ambos os biocombustíveis.

1. Etanol

O etanol é o mais comum dos álcoois. Seu uso como combustível pode se dar como complemento à gasolina, como aditivo, caso em que se utiliza o etanol anidro, substância com alto teor alcoólico, ou como combustível substituto à gasolina, caso em que se emprega, via de regra, o etanol hidratado, substância que tem uma concentração alcoólica inferior à do anidro. Além disso, o etanol anidro também é utilizado pela indústria química, como matéria-prima para a produção de tintas, vernizes e solventes. O etanol hidratado é também empregado na indústria farmacêutica, alcoolquí-

mica e bebidas, e como produto para limpeza. Na medicina, é utilizado, assim como outros álcoois também são, como esterilizante. É usado também na produção de biodiesel, onde o óleo reage com o etanol, gerando éster etílico e glicerina. O etanol é também usado como matéria prima para a produção de vinagre e ácido acético, a síntese de cloral e iodofórmio.

O emprego do etanol para outras finalidades, que não combustível, exige diferentes graus de pureza, o que significa maiores custos de produção. Existem várias pesquisas para o desenvolvimento da alcoolquímica, por meio da qual o etanol poderia substituir o petróleo como base para a produção de várias matérias-primas. Hoje em dia, discute-se o conceito de biorrefinaria, plantas industriais que utilizariam açúcares, obtidos de cana ou de qualquer outra biomassa, para a obtenção de moléculas específicas que atendam a diferentes fins e aplicações na indústria química.

2. Produção, consumo e comércio internacional

A produção de etanol encontra-se difundida em vários países e pode ser obtida de diferentes fontes de matéria-prima entre as quais podem ser citadas o milho, a mandioca, a beterraba, o capim e a cana-de-açúcar. Os principais produtores são Brasil e Estados Unidos que respondem por mais de 80% da produção mundial. A maior parte da produção destina-se a utilização como combustível. Os 30% restantes da produção mundial estão divididos entre a China, a Índia, a União Europeia e outros produtores menores, que destinam o etanol, sobretudo, para a indústria química e para a fabricação de bebidas. É crescente a destinação do etanol para combustível nesses mercados, o que sinaliza para o potencial do produto no mercado internacional (Tabela 1).

Tabela 1 Principais países produtores de Etanol – 2002-2010 (bilhões de litros)

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
EUA	8,15	10,62	12,90	14,76	18,38	24,55	34,97	40,60	50,08
Brasil	11,49	12,14	13,54	13,81	16,70	20,00	24,20	23,92	24,90
China	2,88	0,80	1,00	1,20	1,68	1,70	2,00	2,05	2,05
União Européia	0,31	0,47	0,61	0,90	1,58	1,79	2,76	3,59	3,94
Mundo	20,52	24,34	28,51	31,33	39,24	49,55	66,06	72,83	86,86

Fonte: Renewable Fuels Association e F.O.Licht.

É nos países ricos e industrializados que reside o mercado potencial para o etanol. Contudo, são mercados altamente protegidos, e qualquer avanço nesta área depende da abertura de mercados através de negociações. Nos Estados Unidos, maior produtor mundial, com mais de 200 usinas instaladas, a obrigação de adição de etanol à gasolina assegura mercado ao etanol. Até 2011, os subsídios destinados à produção de etanol local, bem como as tarifas impostas à importação, funcionavam como reserva de mercado aos produtores daquele país. Em 2012, a quebra na safra de milho, nos EUA, e o aumento no custo da matéria-prima do etanol americano têm contribuído para

restabelecer algum comércio do etanol brasileiro para aquele país. Tal comércio é limitado, no entanto, pelos problemas brasileiros na oferta desse produto.

Quadro 1 Principais mercados do etanol

País	Produção (litros/ano)	Programa de Adição		Matéria-prima predominante
		Porcentual	Ano de início	
Estados Unidos	Mais de 50 bilhões	Predomínio do E10	1992	Milho
Brasil	Cerca de 25 bilhões	E25 e E100	1975	Cana
União Europeia	Menos de 4 bilhões	E2 a E10	2003	Beterraba, grãos
China	Cerca de 2 bilhões	Até E16	2001	Grãos
Japão		E3	2003	Trigo, beterraba e arroz

Fonte: Elaboração própria

Os Estados Unidos se tornaram o maior produtor mundial de etanol em 2005. Em 2010, os americanos produziram cerca de 50 bilhões de litros de etanol e, junto com o Brasil, foram responsáveis por 86% da produção mundial. O etanol é usado, pelos americanos, principalmente como um aditivo à gasolina, em misturas com concentração predominante de até 10 por cento de etanol. A *Energy Policy Act* de 1992 permite que o etanol seja misturado à gasolina na proporção de 85% de etanol e 15 % de gasolina, formando a mistura denominada E85¹. Misturas com proporções superiores de etanol, como, por exemplo, o E95, também são classificadas como combustíveis alternativos sob a égide dessa Lei. Os veículos movidos a E85 são denominados, assim como no Brasil, de veículos flexíveis (*Flexible Fuel Vehicles - FFV*) e são produzidos por várias montadoras. Nos EUA o etanol é produzido primordialmente a partir do milho.

A Renewable Fuels Association, associação de comércio dos produtores de etanol nos Estados Unidos, registrou 209 usinas de etanol em operação, além de outras duas em construção ou em expansão a partir de janeiro de 2012. Após sua conclusão, os EUA passarão a ter capacidade total instalada de 15 bilhões de galões – cerca de 57 bilhões de litros.

Durante muito tempo, o governo federal americano subsidiou a produção de etanol a US\$ 0,51 por galão e mais uma tarifa de importação, no valor de US\$ 0,54 por galão de etanol importado, além de tarifa padrão de 2,5% *ad valorem*. No final de 2011, no entanto, o Congresso ame-

¹ Dos mais de 200 mil postos de abastecimento existentes nos EUA, cerca de 2,9 mil oferecem o E85, a maioria deles concentrada nos estados da região do meio-oeste americano, onde fica a maior parte da produção de milho no país. Dentre esses estados destacam-se os estados de Minnesota, Illinois, Indiana, Wisconsin, Iowa, Missouri, Michigan, Colorado, South Dakota, Ohio e Nebraska.

ricano não renovou a concessão de ambos, o que representou a primeira derrota da indústria do etanol nos últimos 30 anos. Contribuíram para essa queda a crise da dívida pública americana, a crescente insatisfação da opinião pública com os gastos federais (como o movimento *Tea Party*), bem como a incapacidade do setor no Brasil de atender a qualquer aumento na demanda externa. Em 2010 foi formada uma coalização de associações empresariais, organizações assistenciais, grupos agrícolas e grupos ambientais (chamada “No2VEETC”), contrárias aos subsídios ao etanol. As consequências dessa queda são ainda pouco previsíveis, embora possa ser benéfica aos produtores brasileiros, no médio prazo.

No Brasil, o etanol é obtido a partir da cana-de-açúcar, que sempre se constituiu em uma das principais atividades econômicas do país. No século passado, houve uma aceleração da produção a partir da década de 70, por conta do Programa Nacional do Álcool, o Proálcool². Atualmente, são 70 mil agricultores em todo o Brasil e 439 usinas, distribuídas, principalmente, nas regiões Centro-Sul (responsável por 89% da produção de álcool) e Norte-Nordeste (11% restantes) (MAPA, 2011; Unica).

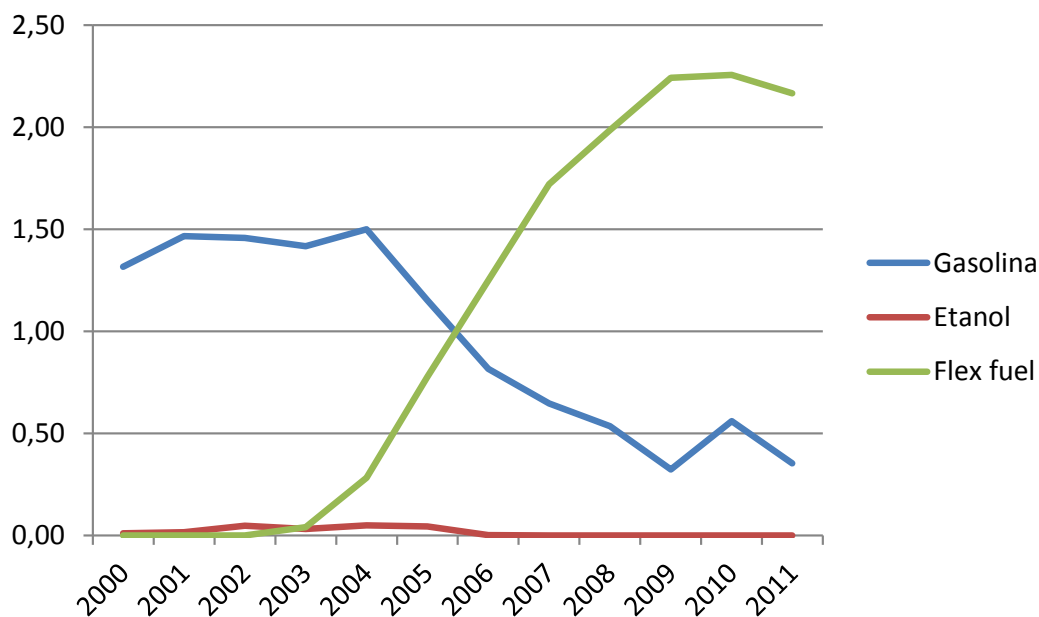
O advento dos veículos Flex Fuel gerou um aumento significativo no consumo de álcool hidratado no Brasil: de 4,3 bilhões de litros, em 2003, para 15 bilhões de litros em 2010.³ Os veículos Flex Fuel e os movidos exclusivamente a álcool hidratado têm alíquotas do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) menores em relação aos veículos a gasolina. O Decreto nº 4.317, de 31 de julho de 2002, fixou as alíquotas do IPI de veículos Flex Fuel (início do tratamento tributário destes veículos) e induziu o lançamento dos mesmos no ano seguinte. Desde seu lançamento a participação dos veículos flex aumentou de forma significativa, representando atualmente mais de 85% do total de automóveis vendidos no país. Deve-se destacar que a produção do etanol anidro também cresceu, apesar da maior expansão do hidratado, o que reflete um aumento também no consumo de gasolina (figura 1).

Em outras regiões do mundo, já se adotam políticas de adição do etanol à gasolina, como é o caso do Japão (E3 - gasolina com 3% de etanol) e China. A Alemanha passou a adotar o E5 (gasolina com 5% de etanol) em 2012.

2 O Proálcool foi instituído pelo Decreto-Lei 76.593, de 14 de novembro de 1975 e tinha como objetivo garantir o suprimento de etanol no processo de substituição da gasolina. Também visava apoiar o desenvolvimento tecnológico da indústria sucroalcooleira. Na primeira fase do programa, até 1979, a ênfase foi a produção de etanol anidro para ser misturado à gasolina. Na segunda fase, a ênfase passou a ser o etanol hidratado, usado puro em motores adaptados para o combustível. Entre 1983 e 1988, mais de 90% dos automóveis vendidos no País eram movidos a etanol. A queda do preço do petróleo e a crise do Proálcool, no bojo da crise do setor público como um todo, entre as décadas de 80 e 90, marcam um período de estagnação na produção do setor. No início dos anos 90, intensas mudanças começam a ocorrer no setor, com o fim do protecionismo público, marcado pela extinção do Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA), e a promulgação de uma série de medidas direcionadas à formação de um mercado interno de cana-de-açúcar, açúcar, álcool e outros subprodutos, sem a intervenção direta que caracterizara o setor desde os anos trinta. A consequência direta foi a redução na participação do etanol como combustível. Ao final da década de 90, apenas 1% dos carros vendidos tinham motores a etanol. Por outro lado, aumentou a participação do etanol como aditivo à gasolina, em porcentuais de até 25%.

3 Cabe destacar que nos EUA a frota deste tipo de veículo é superior a 7 milhões de unidades que podem ser abastecidas com qualquer mistura de E-85 (85% de etanol e 15% de gasolina) e gasolina. Outros países como Suécia, Espanha, Alemanha, França, Holanda, Inglaterra e Canadá estão incentivando o uso de veículos Flex Fuel.

Figura 1 Produção de automóveis por tipo de motor, 2000 a 2011, em milhões de unidades



Fonte: ANFAVEA.

Com relação à produção, na Europa, a Política Agrícola Comum (CAP - *Common Agricultural Policy*), uma das mais antigas da EU, inclui regras sobre a utilização do solo, bem como um programa de remuneração para a produção de culturas voltadas aos biocombustíveis⁴. A UE criou, também, o Programa de Remuneração de Culturas Energéticas. Consideram-se culturas energéticas aquelas destinadas à produção de biocombustíveis, ou a produção de energia elétrica e/ou térmica. As reformas na CAP definiram uma remuneração de €45 por hectare cultivado de cultura energética. Esta remuneração foi garantida, em 2003, para uma área máxima de 1,5 Mha. Apesar disso, as metas de adição de etanol na Europa não estão sendo atendidas. Como a produção é ainda tímida, a UE não tem condições de atingir a meta proposta sem recorrer a importações.

A produção japonesa de etanol se concentra atualmente em algumas poucas usinas que produzem a partir do trigo, da beterraba e do arroz, principalmente, o que só é possível com preços de matérias-primas muito baixos, abaixo inclusive do seu preço no mercado alimentício. Existem investimentos para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar ou de biomassa. Uma das maiores apostas japonesas é a utilização de resíduos da produção de gêneros alimentícios, como por exemplo, a palha do arroz.

Dentre os demais produtores de etanol, a produção chinesa vem apresentando relativo crescimento na última década (cerca de 8% a.a.), o que já a coloca como o quarto maior mercado produtor de etanol do mundo. No entanto, sua produção representa menos de 3% da produção mundial. A matéria empregada para a produção de etanol na China é baseada em grãos, o que potencialmente concorre com o consumo alimentar, gerando uma tensão não desprezível no setor daquele país. Os

⁴ Pela CAP, os fazendeiros são obrigados a reservar 10% de suas áreas agricultáveis sem uso com o intuito de promover a biodiversidade. Aqueles que participam desta política recebem um pagamento como forma de compensação pela não utilização e tem autorização de plantar espécies oleaginosas para a produção de biodiesel ou outros produtos industriais que não sejam passíveis de venda no mercado de alimentos.

avanços na produção de etanol celulósico contribuiriam para o acréscimo da produção chinesa, que é exportador líquido do produto.

A produção de etanol na América Central e Caribe beneficiava-se, até 2011, do tratamento preferencial dispensado pela política americana, por meio do *Caribbean Basin Initiative* (CBI), que possibilitava isenção das tarifas impostas ao etanol de outras regiões, no montante de até 7% da produção americana de etanol. Como o etanol não necessariamente precisaria ser produzido nessa região, esse benefício, além de eventualmente incrementar a produção nesses países, também incentivava a “triangulação”, mecanismo pelo qual países como o Brasil exportam grandes quantidades de etanol hidratado para países signatários do CIB, para que fossem desidratados nesses países, e adequado às normas e especificações norte-americanas em plantas especialmente projetadas para esta finalidade, com o intuito de exportar para os EUA sem a incidência da tarifa alfandegária⁵.

3. Fatores críticos para a competitividade internacional

3.1. Fatores críticos relacionados à demanda

As restrições relacionadas à demanda de etanol concentram-se em:

- i) porcentual ainda modesto de adição de etanol à gasolina. Na Europa, por exemplo, a mistura de etanol praticada não supera 4 a 5% (FALLON, 2012). Na Ásia, os programas de adição ficaram aquém dos objetivos, seja por ter colidido com a difícil realidade do abastecimento ou o trade-off entre alimentos e energia.
- ii) o conflito energia versus alimentos levanta dúvidas nos consumidores quanto aos benefícios do uso dos biocombustíveis. A controvérsia em torno do destino de grãos para etanol, na China, por exemplo, provocou reação interna (SCOTT E JUNYANG, 2011). Recentemente (abril de 2012) o governo chinês, acompanhando o movimento americano, decidiu reduzir o subsídio à produção de etanol de grãos.
- iii) problemas conjunturais, relacionados à gestão da crise econômica, mas que podem ter consequências de longo prazo. A queda na atividade dos países europeus pode comprometer a adoção de medidas mais rigorosas de redução de emissão de carbono. A administração de problemas emergentes dificulta a discussão em termos de estratégias de longo prazo, sobretudo quando ainda se vislumbra um trade off entre crescimento e emissões de GEE.

Esta tendência, de volumes de adição de biocombustíveis que não combinam com ambiciosos objetivos declarados de programas nacionais, continuará, provavelmente, em muitas partes do mundo.

5 O fim dos subsídios americanos tende a modificar essa situação.

4. Fatores críticos relacionados à oferta

No que se referem às restrições pelo lado da oferta, as principais questões relacionam-se a:

- i) disponibilidade de terras cultiváveis para as matérias-primas destinadas à produção de etanol. Trata-se de problema que todos os países do mundo vão enfrentar, tendo em vista os atuais limites à expansão da produção agrícola no mundo, o que fará ressurgir sempre o conflito latente entre produção de biocombustíveis e alimentos. Nesse ponto, avanços tecnológicos sucessivos farão reduzir essa pressão, de tempos em tempos. Mas o trade-off sempre estará presente enquanto houver taxa de crescimento populacional líquida;
- ii) naquelas áreas em que se encontram as atuais fronteiras agrícolas, algumas dificuldades adicionais se colocam. A primeira relaciona-se à inevitável alteração na composição floresta-produção agrícola, com impacto sobre clima. Mesmo naqueles países em que esse trade-off não é tão pronunciado, como ocorre em alguns países da África, a dificuldade de organizar a produção, devido à insegurança institucional, falta de qualificação da força de trabalho, dificuldade no aprofundamento do capital setorial, ausência de infraestrutura adequada para distribuir a produção no mercado internacional etc., funcionam como limitantes à expansão da produção no curto e médio prazos;
- iii) nos atuais países produtores, a necessidade de ganhos de produtividade para assegurar a expansão da produção esbarra na capacidade de investimento do setor, principalmente no contexto de crise. As restrições tecnológicas atuais atuam no sentido de aumentar o custo de produção de produção, sobretudo de matérias-primas como trigo, milho e outros grãos.

5. Fatores críticos relacionados ao comércio

Atualmente o comércio mundial de etanol, comparado ao volume produzido, continua a ser modesto, apesar do incremento dos últimos anos. O principal entrave relacionado ao comércio internacional do etanol refere-se à própria transformação do produtor em uma *commodity* global etanol. Entre as principais questões que devem avançar a pauta de discussões, colocam-se:

- i) O desenvolvimento e fortalecimento de novos países produtores nas Américas, na África e na Ásia, possibilitando a diversificação da origem do etanol por países;
- ii) Redução de barreiras protecionistas e dos desestímulos tarifários para uma maior adoção do etanol como combustível, como os existentes nos EUA e em países da União Europeia e no Japão;
- iii) Criação de canais de distribuição mundiais;
- iv) Padronização do produto para que a produção possa ser realizada com segurança nos diferentes países, entre outras ações.

No que se referem às padronizações internacionais, várias iniciativas vêm sendo buscadas, no sentido de atestar a qualidade do produto produzido, mas também o processo de produção e sua adequação socioambiental. Assim, temas relacionados ao uso do solo e da água, condições de trabalho, utilização de fertilizantes e agrotóxicos, preservação da biodiversidade, entre outras, são pontuadas nas diversas certificações existentes. Alguns protocolos internacionais que podem ser mencionados, nesse sentido, são o Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB), Global Bioenergy Partnership (GBEP), ISO/ABNT e Bonsucro⁶.

Via de regra, essas certificações têm em comum a exigência de cumprimento, pelas empresas, às normas legais, respeito aos direitos trabalhistas e humanos, melhoria de planejamento do negócio, controle do fornecimento de insumos, entre outros. No caso das normas europeias, nota-se maior ênfase à proteção ambiental. A princípio tal exigência não é algo indesejável, mas pode esconder barreiras comerciais não tarifárias sobre os produtos de fora da região. De todo modo, entende-se que as certificações são mais benéficas que o contrário, e necessárias para assegurar a oferta da *commodity* contratada no mercado internacional⁷.

6. Dinâmica tecnológica

O etanol pode ser obtido a partir de culturas energéticas e de biomassa lignocelulósica. A complexidade do processo de produção depende da matéria-prima. Desse modo, o espectro de tecnologias concebidas e aplicadas vai desde a simples conversão de açúcares por fermentação, até a conversão em várias fases da biomassa lignocelulósica. A grande diversidade de alternativas tecnológicas requer a análise do processo global, juntamente com a concepção e desenvolvimento de cada uma das operações envolvidas.

Entre as tendências de novas pesquisas neste campo, o processo de integração é questão chave para reduzir custos na indústria do etanol e aumentar a competitividade do etanol relacionado à gasolina (CARDONA E SÁNCHEZ, 2007). Várias opiniões têm sido publicadas sobre o tema da produção de etanol, especialmente a partir de biomassa lignocelulósica (CHANDRANT E BISARIA, 1998; LEE, 1997; LIN E TANAKA, 2006). A quantidade de comentários que cobrem a produção de etanol a partir de outros tipos de matérias-primas, como materiais de

6 Adiante essas certificações são analisadas em mais detalhe.

7 Uma das maiores motivações para a demanda internacional de etanol é a crença nos benefícios ambientais do seu consumo, o que tornaria esse mercado análogo a outros em que a definição de padrões e custos não desprezíveis de certificação e monitoramento de informações a respeito da sustentabilidade pode tornar proibitiva a existência do mercado. A disseminação de padrões de certificação atestaria a inexistência de um padrão internacional, de fato. Este impedimento, que pode ser um grande empecilho, deve ser, contudo, contrabalançado pelas políticas de adição de etanol à gasolina e outras, de caráter regulatório e mandatário, que os principais países têm adotado nos últimos anos. A emergência de um padrão internacional de certificação e monitoramento só será viável se os custos dessa instituição forem internalizados no mercado, seja com ganhos de produtividade, seja com aumentos de preços. A convergência para uma, ou algumas poucas, normas de certificação do produto será dada por um equilíbrio de forças entre os principais países demandantes e ofertantes. É nesse sentido que se acredita em um papel proativo do setor, no Brasil, no sentido de influenciar na definição de parâmetros que assegurem a qualidade, competitividade e sustentabilidade do produto brasileiro, bem como em criar mecanismos que efetivamente garantam o atendimento da norma estabelecida.

sacarose ou baseados em amido é mais reduzida (por exemplo, KOSARIC E VELIKONJA, 1995; E BOTHAST E SCHLICHER, 2005).

7. Etanol a partir de açúcares⁸

principal matéria-prima para a produção de etanol é a cana-de-açúcar, na forma de um caldo de cana ou melaço (um subproduto de usinas). O melaço de beterraba é outra fonte de açúcar fermentável. O microorganismo mais utilizado na fermentação é a *Saccharomyces cerevisiae*, devido à sua capacidade de hidrolisar a sacarose da cana em glicose e frutose. Entre as bactérias, o microrganismo mais promissor é o *Zymomonas mobilis*, que tem uma baixa eficiência energética, resultando em um maior rendimento de etanol (até 97% do máximo teórico). No entanto, a sua gama de substratos fermentáveis é demasiado estreita (glucose, frutose e sacarose), e no processo de fermentação do xarope há formação do polissacárido levana, o que aumenta a viscosidade do caldo; e de sorbitol, um produto de redução de frutose que diminui a eficiência da conversão de sacarose em etanol.

Outras substâncias demonstraram a sua utilidade no processo de produção baseado em cana de açúcar. A adição de um complexo enzimático comercial de amilases, celulasas e amylopectinases permite a conversão de substâncias não fermentáveis em compostos assimiláveis, melhorando a fermentação alcoólica (ACEVEDO ET AL., 2003). Por outro lado, a adição de uma concentração inibitória mínima de ácidos de lúpulo para melaço irá parar o crescimento de bactérias, aumentar o rendimento do etanol e evitar a necessidade de antibióticos, como descrito na patente de Maye (2006).

8. Etanol a partir de amido

O amido é uma matéria-prima de alto rendimento para produção de etanol, mas a sua hidrólise é necessária para produzir etanol por fermentação. O milho é moído para obter o amido de extração, que é enzimaticamente tratado para a obtenção de xarope de glicose. Em seguida, este xarope é fermentado em etanol. Existem dois tipos de moagem de milho na indústria: secos e molhados⁹.

A fermentação é realizada usando *S. cerevisiae*, com adição de sulfato de amônio ou ureia como fontes de azoto. A bactéria *Z. mobilis* também foi pesquisada para a produção de etanol a partir de amido de milho moído seco. Novas tendências industriais na cultura do milho para a produção de etanol destinam-se ao processo de moagem seca. O aumento da capacidade produção de etanol nos EUA é representado principalmente por plantas de etanol que utilizam milho moído seco. Outros esforços de pesquisa são orientados para o desenvolvimento de híbridos de milho com maior

⁸ Esta seção se baseia no trabalho de Sánchez e Cardona, 2008.

⁹ Durante o processo úmido, o grão de milho é separado em seus componentes. O amido é convertido em etanol e os demais componentes são vendidos como coprodutos. Durante a moagem seca, os grãos não são fracionados e todos os seus nutrientes entram no processo e estão concentrados em uma destilação coproduto utilizada para alimentação animal chamado Grãos de Destilação Secos com Solúveis (DDGS, na sigla em inglês). Em geral, os passos de sacarificação, liquefação e a fermentação são os mesmos para ambas as tecnologias.

quantidade de amido extraível ou elevado teor de amido fermentável. A engenharia genética pode ser aplicada para dirigir a acumulação de amilases no endosperma de grãos de milho transgênicos.

A mandioca representa uma importante fonte alternativa de amido, não só para produção de etanol, mas também para a produção de xaropes de glicose. Na verdade, a mandioca é um tubérculo que ganhou maior interesse devido à sua disponibilidade nos países tropicais, sendo uma das dez melhores e mais importantes culturas tropicais. A produção de etanol a partir de mandioca pode ser realizada utilizando o tubérculo de mandioca todo ou o amido extraído a partir dele. A extração de amido pode ser realizada através de um processo de alto rendimento de grande volume industrializado como o método de extração Alfa Lavai (FAO, 2004), ou por um processo tradicional para plantas pequenas e média dimensão. Este processo pode ser considerado como o equivalente do processo de moagem úmida para produção de etanol a partir do milho¹⁰.

Além do milho e trigo, o etanol pode ser produzido a partir de centeio, cevada, triticale e sorgo. Para estes cereais, alguns pré-tratamentos têm provado ser úteis. A produção de etanol de bananas e resíduos de banana usando comercial α -amilase e glucoamilase também tem sido estudada. Uma das culturas mais promissoras para produção de etanol combustível é o sorgo sacarino, que produz grãos com elevado teor de amido, caules com alto teor de sacarose e folhas e bagaço com alto teor lignocelulósico. Além disso, esta cultura pode ser cultivada tanto em países tropicais como temperados.

9. Etanol a partir de biomassa lignocelulósica

É evidente a importância da biomassa lignocelulósica como matéria-prima para produção de etanol. O complexo lignocelulósico é o biopolímero mais abundante na Terra. Considera-se que a biomassa lignocelulósica compreende cerca de 50% da biomassa do mundo. Muitos materiais lignocelulósicos têm sido testados para a produção de etanol. Em geral, os potenciais materiais lignocelulósicos para produção de etanol combustível podem ser divididos em seis grupos principais: i) restos vegetais (bagaço de cana, palha de milho, palha de trigo, palha de arroz, casca de arroz, palha de cevada, bagaço de sorgo doce, caroços de azeitona e celulose), ii) madeiras de lei (mogno, álamo, choupo), iii) madeira macia (pinus, pinheiro), iv) resíduos de celulose, papel de jornal, resíduos de papel de escritório, lamas papel reciclado), v) biomassa herbácea (feno de alfafa, gramíneas, capim-amarelo, bermuda costeira), e vi) resíduos sólidos urbanos (RSU).

Numerosos estudos para o desenvolvimento de produção em larga escala de etanol a partir de lignocelulose estão sendo realizados no mundo. No entanto, o principal fator limitante é o maior grau de complexidade inerente ao tratamento desta matéria-prima. Isto está relacionado com a na-

¹⁰ A produção de mandioca com elevado teor de amido (85-90% de matéria seca) e menos teor de proteína e minerais é relativamente simples. O amido de mandioca oferece uma maior solubilidade para amilases, em comparação com o amido de milho. No entanto, considera-se que o etanol de mandioca teria melhores indicadores econômicos se o tubérculo inteiro fosse usado como matéria-prima, especialmente quando os pequenos produtores estão envolvidos. Esse aproveitamento é prejudicado pelo tempo de processamento necessário (3-4 dias após a sua colheita).

tureza e composição da biomassa lignocelulósica. Dois dos polímeros principais da biomassa devem ser decompostos em açúcares fermentáveis, a fim de ser convertida em etanol ou outros produtos valiosos. Mas este processo de degradação é complicado, altamente consumidor de energia e não completamente desenvolvido.

O desafio de processamento principal na produção de etanol a partir de biomassa lenhocelulósica é o pré-tratamento da matéria-prima. O complexo lignocelulósico é constituído por uma matriz de celulose e lignina ligada por cadeias de hemicelulose. Durante o pré-tratamento, esta matriz deve ser quebrada, a fim de reduzir o grau de cristalinidade da celulose. O fato de a hidrólise da celulose ser afetada pela porosidade (área de superfície acessível) de materiais lignocelulósicos também deve ser considerado. Os métodos de pré-tratamento principais relatados na literatura incluem métodos físicos, físico-químicos, químicos e biológicos.

Para a fermentação de materiais lenhocelulósicos, a celulose deve ser degradada em glucose (sacarificação), utilizando ácidos (química) ou enzimas (biológico). No primeiro caso, os ácidos concentrados ou diluídos podem ser utilizados. No entanto, a hidrólise da celulose é realizada atualmente usando enzimas microbianas celulolíticas. A hidrólise enzimática demonstrou melhores resultados para a fermentação subsequente porque não há formação de componentes de degradação da glucose, embora o processo seja mais lento.

10. Comparação dos principais tipos de matérias-primas

A seleção da matéria-prima mais apropriada para a produção de etanol depende fortemente das condições locais. Evidentemente, os países norte-americanos e europeus têm baseado sua indústria de etanol nos materiais ricos em amido, devido às suas condições agroecológicas. Estas condições não são apropriadas para a cultura de cana de açúcar. O emprego de amido-culturas, especialmente milho, para produção de etanol tem provocado um amplo debate sobre a adequação dessas matérias-primas, considerando a quantidade de energia necessária para sua produção (PATZEK ET AL., 2005; PIMENTEL, 2003; SHAPOURI ET AL., 2003; CHAGAS ET AL. 2008). No entanto, a competitividade do etanol de cana brasileiro tem sido amplamente demonstrada, principalmente se a sua relação de energia de saída/entrada é considerada.

Materiais lignocelulósicos representam uma opção promissora como matéria-prima para produção de etanol, considerando a sua relação de energia de saída/entrada, a sua grande disponibilidade, tanto em países tropicais como temperados, o seu baixo custo (principalmente relacionado com o seu transporte), e seus rendimentos em termos de etanol. Uma das vantagens da utilização de biomassa lignocelulósica é que esta matéria-prima não está diretamente relacionada com a produção de alimentos, o que implica a produção de bioetanol, sem a necessidade de empregar grandes extensões de terra cultivável fértil para o cultivo de cana ou de milho exclusivamente dedicada à produção de bioenergia. Além disso, lignocelulose é um recurso que pode ser processado de maneiras diferentes para a produção de muitos outros produtos, como gás de síntese, metanol, hidrogênio e eletricidade.

A seleção da matéria-prima lignocelulósica é concordante com os interesses de cada país para a transferência de valor para os resíduos produzidos, especialmente para os resíduos que não têm valor como alimento. Para o caso dos EUA, a palha de milho é considerada uma das matérias-primas mais promissora, devido à sua grande disponibilidade.

Certamente, uma detalhada avaliação econômica e ambiental dos impactos das diferentes matérias-primas diferentes é necessária, a fim de tomar decisões sobre as mais adequadas matérias-primas para produção de etanol em cada caso. Uma abordagem útil para a realização de tais avaliações é empregar ferramentas de simulação com base em dados realistas, obtidos a partir de instalações existentes, produção de etanol de plantas-piloto ou modelos matemáticos. Além disso, esta abordagem permite a análise de como diferentes configurações tecnológicas têm influência sobre os indicadores do processo global.

11. Mudanças Climáticas, Institucionais e Tecnológicas

11.1. Impactos ambientais

As principais preocupações ambientais levantadas com relação à expansão da produção do etanol referem-se aos riscos de contaminação de solo, uso da água, deslocamento de culturas para regiões de florestas, queimadas, uso de áreas de proteção ambiental (nascentes, margens de rios, topos de montanha etc.), entre outros aspectos.

No que se refere à cana, vários trabalhos já foram empreendidos com o objetivo de estimar a quantidade de energia de origem fóssil despendida no processo de produção de cana-de-açúcar nas condições brasileiras. Dentre os quais podem ser citados Macedo (1998), Macedo, Seabra e Silva (2008), Urquiaga, Alves e Boddey (2005); Pimentel e Patzek (2008). A conclusão de uma parte desses trabalhos é de que o balanço energético da cana (razão entre energia total contida no combustível produzido e a energia fóssil investida na sua produção) é bastante variada. Estudos empreendidos por pesquisadores no Brasil estimam essa relação entre 8 a 9, podendo chegar a 12 em determinadas condições. No entanto, estudos realizados no exterior apontam para números bem menos expressivos, em torno de 3,7 e 1,1. A principal razão para essa divergência de conclusões refere-se aos pressupostos adotados no cálculo.

Os estudos realizados no exterior (PIMENTEL E PATZEK, 2008; OLIVEIRA, VAUGHAN E RYKIEL, 2005; OLIVEIRA, 2008) assumem tecnologia muito defasada nas operações de campo, implicando em um consumo de energia fóssil muito maior do que o que seria razoável. Pimentel e Patzek (2008) estimam consumo de 2.596 Mcal (o que é aproximadamente 10.640 MJ) por 1.000 L de etanol, devido à utilização de energia nas fases de limpeza preparo e esmagamento da cana, nas esteiras de transporte, filtros e centrífugas e aquecimento do caldo para fermentação¹¹.

11 Se transformados em ha pela produtividade média, esses valores de consumo de energia representam cerca de metade de toda a energia contida no etanol. No entanto, as usinas brasileiras produzem toda a energia que consomem nesses processos a partir da queima do bagaço em caldeiras de alta pressão, cujo vapor gerado aciona turbinas que produzem eletricidade em unidade de cogeração. Portanto, não é correto assumir que esses gastos de energia

Soares et al. (2009) fazem uma ampla revisão nos dados disponíveis e fatores de consumo de energia fóssil na produção de cana nas condições brasileiras. A estimativa do total de energia fóssil utilizado nas operações de campo, incluídos o transporte de cana para a usina e o fornecimento de insumos, é de 12.329,7 MJ /ha/ano. Já os ingressos de energia fóssil associados ao material usado nas construções e nos equipamentos das usinas representam 2.611 MJ /ha/ano, totalizando 14.940,8 MJ /ha/ano. Considerando que um litro de etanol produz na combustão 21,45 MJ de energia, um ha de cana capaz de produzir 6.510 L de etanol por ano pode gerar 139.639 MJ de energia, aproximadamente 9 vezes a energia fóssil investida nas operações agrícolas.

Mas existem outras preocupações ambientais relacionadas à produção do etanol e do açúcar. O impacto ambiental potencial da expansão da cana faz com que todos os novos investimentos devam obter licença ambiental e apresentar o Estudo de Impactos Ambientais e Relatório de Impacto Ambiental (EIA-RIMA)¹².

Em relação ao uso da terra, estipula-se a exigência de uma reserva legal da ordem de 20% da área total que não pode ser utilizada além da preservação das áreas de proteção permanente (matas ciliares, nascentes etc.). Este é um problema do setor, uma vez que historicamente os produtores de cana avançaram com as plantações em todas as áreas, inclusive as áreas de proteção permanente. A intensificação da fiscalização tem levado a implementação de significativos programas de recomposição das matas ciliares e proteção às nascentes¹³.

Uma das principais preocupações ambientais da atividade canavieira é a prática da queimada da cana na colheita. O excesso de fuligem gerado nos municípios canavieiros é considerado um fator de agravamento de problemas de saúde além da própria deterioração das condições atmosféricas devido à emissão de CO₂. Como esta prática tende a ocorrer com maior intensidade nos meses de seca, durante os quais se dá a colheita, agravam-se seus efeitos negativos. A queimada é uma prática realizada para facilitar a colheita manual da cana. A legislação proíbe determinados tipos de queimadas, em determinadas áreas e horários¹⁴.

provêm de fonte fóssil.

12 Conforme previsto no Inciso IV do Artigo 225 da Constituição, que exige estudo prévio para qualquer atividade potencialmente causadora de degradação ambiental. A exigência e o modelo de EIA-RIMA são definidos por Resolução (237/97) do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). São previstos três tipos de licença: licença prévia que aprova a localização e a concepção do empreendimento e estabelece todos os requisitos para a obtenção das licenças seguintes; licença de instalação e licença de operação. Esta última é de três anos para a produção de açúcar e de dois para o etanol, devendo-se solicitar sua renovação antes do vencimento. O licenciamento é responsabilidade da autoridade ambiental estadual, exceto em casos cujo empreendimento extrapola os limites do estado.

13 Existe uma discussão em relação à responsabilidade pela preservação das áreas de proteção e reservas legais. As usinas produzem utilizando “cana própria”, cana-de-açúcar produzida em terras próprias e áreas arrendadas, e “cana de terceiros”, obtida junto a fornecedores. Em relação às terras próprias e de terceiros fornecedores, não existe dúvida em relação à responsabilidade, mas em relação às áreas arrendadas existem dúvidas.

14 A queima controlada da cana é regulada por decreto no âmbito federal (Decreto no 2661/98) e no Estado de São Paulo possui uma lei específica mais restritiva (Lei Estadual no 11.241/02). A tendência é que esta prática seja encerrada em alguns anos, tanto por pressões da regulação para diminuir a emissão de poluentes e seus efeitos deletérios como pelo próprio incentivo econômico decorrente do uso integral da cana (caldo, palha, folhas e bagaço), ou mesmo questões relacionadas ao mercado de trabalho, formalização da mão-de-obra e encarecimento da força de trabalho. No Estado de São Paulo, o Protocolo Ambiental assinado entre as usinas, produtores de cana e o governo estabelece o fim das queimadas nas áreas passíveis de mecanização em 2014 e em todas as áreas em 2017. A mecanização da colheita

Com o avanço da mecanização da colheita, outra preocupação tem se colocado: a sobra da palha no campo. Parte desta é utilizada como cobertura, mas a colheita mecanizada gera uma grande quantidade de palha, em torno de 14 toneladas por hectare. A dificuldade de se definir um destino para a palha, pela dificuldade de seu transporte, tem gerado as queimadas das palhas remanescentes após a colheita, o que tem sido objeto de várias atuações de produtores. Este tem sido um problema maior do que a queimada controlada para a colheita manual. O destino natural para a palha é ser queimada nas caldeiras para ampliar a geração de energia elétrica, a principal dificuldade existente refere-se ao seu transporte até a usina. Outro possível destino será sua utilização como matéria-prima para o etanol de segunda geração¹⁵.

Os subprodutos gerados no processo produtivo poderiam ser outro receio. No passado, muitos rios no Brasil foram contaminados pela vinhaça despejada pelas usinas. Atualmente, a água captada para o processo industrial é quase em sua totalidade tratada e reaproveitada na própria usina, gerando baixa captação de água; os sistemas industriais são praticamente fechados¹⁶. No caso das atividades agrícolas, a cana produzida nas regiões tradicionais do Centro-Sul praticamente não utiliza a irrigação, dependendo basicamente das chuvas¹⁷.

Atualmente, praticamente todos os subprodutos são aproveitados no processo de produção da usina. A vinhaça é utilizada no campo para fertilização em um processo chamado de fertirrigação, por ser um valioso fertilizante orgânico e uma fonte de reposição de água para o solo; reduzindo a necessidade de fertilizantes e de água. Existem restrições sobre a quantidade de vinhaça utilizada por área, para não haver problema de contaminação do solo, e as usinas devem fazer o acompanhamento da qualidade das águas subterrâneas para verificar se há contaminação¹⁸. A expectativa é que a quantidade de vinhaça passível de ser utilizada pelas usinas

da cana-de-açúcar avançou e atingiu 65,2% da área colhida no estado de São Paulo, na safra 2011/2012, de acordo com informações obtidas a partir de imagens de satélite, compiladas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Dos 4,8 milhões de ha de cana colhidos na última safra, 3,1 milhões (65,2%) foram colhidos mecanicamente. Os dados do Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético apontam que a produção de cana no estado vem cumprindo as metas estabelecidas para redução da queimada. Desde 2007, quando a proposta foi assinada entre o setor canavieiro e o Governo do Estado de São Paulo, a mecanização passou de 34,2% para 65,2% da área colhida.

15 A exigência de recolhimento da palha excedente, em veículos específicos, poderia ser uma forma simples de resolver o problema de sua queima. Algumas experiências de enfardamento em fardos quadrados ou redondos já foram testadas. O processo de fardos quadrados, em que a palha é prensada em fardos de 400 kg, tem apresentado vantagens sobre o processo de fardos redondos, em que a palha é amarrada em fardos de 120 a 160 kg, o que gera dificuldades no desenfundamento para trituração e perdas em densidade de carga no transporte por acomodação destes na carroceria e carretas.

16 Os níveis de captação e lançamento de água nas atividades industriais reduziram-se da ordem de 5m³/tonelada de cana na década de 90 para a faixa dos 1,8m³/tonelada, sendo que a eficiência do tratamento da água captada para lançamento atingia os 98%.

17 A captação de água superficial ou subterrânea é controlada pelo Estado e depende da concessão de outorga pelo órgão ambiental (Departamento de Águas e Energia Elétrica, no caso de São Paulo). Em várias bacias hídricas do Estado de São Paulo já está sendo cobrada dos usuários de recursos hídricos a captação, consumo e lançamento de efluentes com carga orgânica; o que deverá induzir a redução da captação e um melhor tratamento dos efluentes.

18 No Estado de São Paulo esta utilização é regulamentada por Norma Técnica da CETESB que define os limites e as medidas de proteção ambiental para evitar a poluição das áreas. As usinas devem apresentar anualmente à CETESB o plano de aplicação da vinhaça demonstrando o respeito às normas. Atualmente CETESB e CTC (Centro Tecnológico da Cana) estão trabalhando na definição de parâmetros de utilização da vinhaça. Os parâmetros devem considerar qual a quantidade de nutrientes demandadas pelo solo.

seja muito inferior do que aquela gerada, assim deverá se verificar no futuro uma grande sobra de vinhaça sem destino nas usinas. Uma possível solução será o desenvolvimento de mini usinas de fertilizantes que promovam a concentração de vinhaça e viabilizem o seu transporte para ser utilizada em regiões mais distantes, hoje isto é inviável pela elevada quantidade de água na qual a vinhaça se encontra, o que encarece o transporte.

Outro subproduto utilizado como fertilizante é a torta de filtro. A forte utilização dos resíduos como fertilizantes faz com que a cultura da cana seja, entre as grandes culturas brasileiras, a que menos utiliza fertilizantes. Também os consumos de fungicidas (praticamente nulo) e pesticidas são inferiores aos das demais lavouras. O controle da broca (principal praga) e da cigarrinha se faz por meio biológico. Apenas os controles de formigas, besouros e cupins se fazem por meio químico. O uso de agrotóxicos é regulamentado por legislação federal e controlado por agência estadual ou federal, dependendo do estado. Os limites para utilização são fixados e deve ser feito o acompanhamento da contaminação do solo, além de exigir-se dos produtores o retorno das embalagens.

O bagaço da cana que sobra da extração do caldo é um material celulósico que é queimado nas caldeiras das usinas para a geração de energia elétrica. A queima do bagaço nas caldeiras gera emissão de poluentes atmosféricos – o Conselho Nacional do Meio Ambiente definiu limites para a emissão de particulados e óxidos de nitrogênio. A queima do bagaço não resulta na emissão de compostos de enxofre. Grande parte das usinas, principalmente aquelas que possuem caldeiras antigas, geram emissões superiores ao permitido. O órgão fiscalizador tem determinado a troca das caldeiras ou sua adaptação, por exemplo, com a utilização dos lavadores de filtros. O desenvolvimento do processo de hidrólise poderá viabilizar a extração do etanol tanto do bagaço como da palha.

Em resumo, do ponto de vista ambiental, ainda que existam possibilidades de melhorias no processo de produção, com o fito de reduzir ainda mais o impacto ambiental do setor, a produção de etanol a partir da cana apresenta resultados líquidos positivos, por gerar uma matéria-prima renovável para a produção de combustíveis menos poluente, possibilitar o aproveitamento de seus subprodutos e colaborar para a geração de energia elétrica no país, com menos impactos ambientais que usinas termelétricas, por exemplo.

12. Certificações socioambientais

Os biocombustíveis representam alternativa ambientalmente mais amigável para suprir parcelas da demanda energética de diversos setores da sociedade. As vantagens potenciais desses novos combustíveis dependem, no entanto, de que o desempenho ambiental e social dos mesmos seja otimizado ao longo de toda sua cadeia produtiva.

Questões como uso do solo e da água, emprego adequado de fertilizantes e agrotóxicos, preservação da biodiversidade, condições de trabalho oferecidas, entre outras, têm que ser rigorosamente avaliadas ao longo de todo o ciclo de vida desses novos produtos, de modo a se assegurar que a expansão de seu uso signifique efetivamente progresso ambiental e social.

O desenvolvimento de processos nacionais de certificação e etiquetagem de todo o ciclo produtivo dos biocombustíveis poderia contribuir para a maior garantia para a sociedade de sustentabilidade dos produtos.

Nesse sentido, alguns protocolos internacionais estão sendo propostos, dentre os quais se destacam: Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB), Global Bioenergy Partnership (GBEP), ISO/ABNT e Bonsucro, como discutido na sequência.

13. Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB)

A certificação Roundtable on Sustainable Biofuels (RSB) é uma iniciativa suíça da “École Polytechnique Fédérale de Lausanne” (EPFL) e outros parceiros, para desenvolver padrões internacionais de sustentabilidade para os biocombustíveis. A versão da Norma RSB inclui princípios e critérios para a produção sustentável de biocombustíveis, orientação a associados e indicadores de adesão. A RSB desenvolveu vários documentos para fornecer orientação para a realização do Estudo de Impacto Ambiental e Social (EIAS), incluindo orientações sociais, ambientais e de valores de conservação do solo, água e diretrizes.

O padrão RSB inclui 12 tópicos¹⁹. Ela também inclui orientações sobre as melhores práticas na produção, transformação e uso de biocombustíveis nos transportes. A metodologia é desenvolvida para tratar dos impactos indiretos, incluindo a mudança de uso do solo e as questões de segurança alimentar. Examinam-se duas abordagens para os impactos indiretos: (1) a utilização de um fator de uso indireto do solo e (2) a promoção de práticas e insumos que diminuam o risco de impactos indiretos. (SCARLAT e DALLEMAND, 2011.)

14. Global Bioenergy Partnership

Em 2005, o Grupo dos Oito Países (G8) e mais cinco países (Brasil, China, Índia, México e África do Sul) estabeleceram a Parceria Global de Bioenergia (Global Bioenergy Partnership - GBEP) para promover o desenvolvimento da biomassa e de biocombustíveis e desenvolver um ambiente de sustentabilidade voluntária para a bioenergia (SCARLAT e DALLEMAND, 2011). A parceria já congrega 21 países e 11 organizações internacionais e mais 21 países como observadores, juntamente com a Comissão Econômica para América Latina e Caribe, o FIDA (Fundo Internacional para o Desenvolvimento da Agricultura), IRENA (International Renewable Energy Agency), a Comissão Europeia, o Banco Mundial, o Conselho Empresarial Mundial para o Desenvolvimento Sustentável, entre outros.

A Força-Tarefa sobre Sustentabilidade do GBEP, criada em 2008 e coordenada pelo Reino Unido, procura construir um consenso sobre a sustentabilidade da bioenergia, para identificar sinergias entre as várias iniciativas e incentivar a integração, para promover uma maior coerência e reduzir

19 i) legalidade; ii) melhoria planejamento, e monitoramento contínuo; iii) emissões de gases de efeito estufa; iv) direitos humanos e trabalhistas; v) desenvolvimento rural e social; vi) segurança alimentar local; vii) conservação; viii) solo; ix) água; x) ar; xi) uso da tecnologia, insumos e gestão de resíduos; e xii) regularização fundiária.

a duplicação desnecessária. Busca-se estabelecer critérios de sustentabilidade relevantes, práticos, com base científica, voluntária e indicadores relevantes e melhores exemplos de práticas relativas à sustentabilidade da bioenergia. Os critérios do GBEP devem finalmente incluir um conjunto de indicadores que podem ser interpretados de acordo com as circunstâncias nacionais e incluirá informação de apoio e descrições de abordagens metodológicas para a medição²⁰.

Critérios de sustentabilidade para bioenergia ISO / PC 248

A Organização Internacional de Normalização (ISO) desenvolveu um padrão internacional para tratar de questões de sustentabilidade relacionadas à produção de bioenergia (ISO, 2009). Um novo projeto ISO para tratar de critérios de sustentabilidade (comitê ISO/TC 248) foi criado para este fim e sua primeira reunião foi realizada em abril de 2010. Vinte e nove países estão envolvidos como participantes ou observadores, incluindo a China e os EUA. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Deutsches Institut für Normung (DIN), da Alemanha, forneceram o secretariado e a liderança da comissão, respectivamente.

Os critérios de sustentabilidade para bioenergia do Projeto ISO/TC 248 irá abordar os aspectos sociais, econômicos e ambientais da cadeia de suprimentos, produção e uso de bioenergia e desenvolver critérios de sustentabilidade globalmente harmonizados. O projeto pretende desenvolver um padrão global (ISO 13065) para a sustentabilidade de biomassa e de avaliação da conformidade, incluindo a cadeia de suprimento. Isso irá incluir além de terminologia adequada, os aspectos ambientais, sociais e econômicos relacionados com a sustentabilidade da bioenergia. A norma deve contribuir para a resolução das questões sociais e ambientais e para ajudar a evitar obstáculos técnicos ao comércio de bioenergia e fazer a bioenergia mais competitiva (SCARLAT e DALLEMAND, 2011).

15. Bonsucro

O padrão Bonsucro pretende fornecer mecanismo para a produção sustentável da cana de açúcar (todos os produtos) em relação às dimensões econômica, social e ambiental. Ele busca incorporar um conjunto de princípios, critérios, indicadores e verificadores que serão utilizados para certificar produtores de cana que os cumprem, e para orientar as empresas na cadeia de valor da

20 A Força-Tarefa desenvolveu o primeiro projeto de critérios de sustentabilidade e indicadores do GBEP, classificados como indicadores de base (altamente relevante, prático e com base científica), indicadores de grande relevância (praticidade baixa e / ou uma base fraca científica); não altamente relevantes. Estes critérios abrangem uma série de questões de sustentabilidade, incluindo: (i) os impactos ambientais: as emissões de GEE, a terra e os ecossistemas, qualidade do ar, disponibilidade de água, eficiência de uso e qualidade, diversidade biológica e mudança do uso da terra, incluindo os efeitos indiretos; (ii) impactos sociais: segurança alimentar, acesso à terra, água e outros recursos, desenvolvimento rural e social, o acesso à energia, condições de trabalho, saúde e segurança humana, (iii) os impactos econômicos e de segurança energética: o acesso ao desenvolvimento econômico, a viabilidade econômica e competitividade, à tecnologia e segurança energética (SCARLAT e DALLEMAND, 2011). Uma série de tópicos deve ser mais refinada, incluindo a biodiversidade, efeitos indiretos do uso da terra mudança, a segurança alimentar, o apoio do governo, comércio e jurídica nacional, políticas e estruturas institucionais.

cana que desejam adquirir matéria-prima/suprimentos sustentáveis, e também o setor financeiro, que deseja fazer investimentos mais sustentáveis.

O padrão é baseado em um conjunto de medidas que permite a agregação e uma clara demonstração do impacto. A unidade de certificação é a usina de açúcar e etanol e as auditorias serão baseadas em avaliações da área de fornecimento de cana. Auditores credenciados serão obrigados a realizar avaliações²¹.

16. Característica geral das certificações

A característica geral das certificações é a exigência de cumprimento às normas legais, pelas empresas a serem certificadas, respeito aos direitos trabalhistas e humanos, melhoria de planejamento, controle do fornecimento de insumos etc. As normas de origem europeia tendem a dar maior ênfase à proteção ambiental, o que em princípio é algo desejável, mas pode esconder barreiras comerciais não tarifárias sobre os produtos de fora da região. De todo modo, entende-se que as certificações são benéficas. Os produtores brasileiros, quer no padrão Bonsucro ou no comitê da ISO, por exemplo, ou ainda em outros fóruns de certificações, devem estar na vanguarda dessas discussões, estabelecendo princípios que interessem ao país, e que assegurem a legalidade, a proteção ambiental e os direitos sociais. O governo também tem papel importante no sentido de sinalizar, via gradação de incentivos, inclusive os de crédito pelo BNDES, seu interesse de que o setor siga nessa direção (NASSAR, 2012).

Mudanças climáticas e regulação.

O Brasil possui posição de destaque nas negociações internacionais acerca da mitigação do aquecimento global, tendo o próprio MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) surgido da proposta brasileira de fundo de desenvolvimento limpo. Além disso, a regulamentação pátria do MDL continua sendo de vanguarda, cabendo sua análise sob as perspectivas dos princípios jurídicos do ordenamento nacional (SABBAG, 2008).

O Brasil aprovou os termos da Convenção por meio do Decreto Legislativo nº 01/94, e os promulgou por meio do Decreto Federal nº 2.652/98. Com o Decreto Legislativo 144 do dia vinte de junho de 2002, o país ratificou o texto do Protocolo de Kyoto. Assim, ficam sujeitos à aprovação do Congresso Nacional quaisquer atos que possam resultar em revisão da Convenção sobre Mudanças Climáticas, bem como quaisquer ajustes complementares que, nos termos do inciso I do artigo 49 da Constituição Federal, acarretem encargos ou compromissos gravosos ao patrimônio. E, ainda cabe mencionar que a Resolução nº 01 de onze de setembro de 2003 da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima veio dispor sobre os procedimentos e modalidades possíveis para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no âmbito do Protocolo de Kyoto (Milaré, 2004).

21 Os critérios de sustentabilidade do padrão Bonsucro incluem 5 princípios: (i) respeito à legislação; (ii) respeito aos direitos humanos e às normas de trabalho; (iii) gerenciamento da eficiência dos insumos, produção, e do processamento para aumentar a sustentabilidade; (iv) gerenciamento ativo da biodiversidade e dos serviços do ecossistema; (v) melhoria contínua das áreas-chave do negócio.

Nesse sentido, o Plano Nacional de Mudanças do Clima, que deu origem à Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC), Lei 12.187/2009, fixou metas voluntárias de redução de emissões entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020, com base no segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal. Essas medidas dos Poderes Legislativo e Executivo foram marcos necessários para subsidiar futuras ações do país em defesa do ambiente global, seja no âmbito do Poder Público ou da sociedade civil organizada.

No que se refere ao marco regulatório da produção de cana, o governo brasileiro concluiu em 2009 o Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar (ZAE-Cana). Na elaboração do Zoneamento Agroecológico para a cana-de-açúcar foram utilizadas avaliações quanto à disponibilidade hídrica, solo, clima e cultura. O Zoneamento é parte da política agrícola do governo, para a contratação de crédito de custeio e seguro agrícola. Ele fornece o potencial de terras aptas ao plantio da cultura, que se conjugado com as áreas atualmente sob plantio, fornece o potencial de expansão da cultura por regiões de interesse²².

Uma das motivações para a regulação do setor, tanto no Brasil quanto nos Estados Unidos, seria atender a metas de redução de emissão apenas no longo prazo. As motivações diretas, no entanto, atendem muito mais a interesses localizados em suas indústrias nacionais, bem como os objetivos de liderança tecnológica no setor. Um aspecto importante às eventuais restrições de emissão é o possível impacto sobre a demanda de automóveis, com conseqüente redução no consumo de combustível, o que pode afetar o setor.

No questionário enviado a especialistas, no escopo desse projeto de pesquisa, uma das questões relacionava-se às medidas que foram implementadas em âmbito nacional e internacional e o grau de importância que têm ou viriam a ter caso fossem implementadas. A tabela 2 resume os resultados obtidos nesse levantamento. Os entrevistados são quase unânimes em afirmar que no Brasil ainda não foi implementada muitas mudanças institucionais e regulatórias já adotadas no exterior, como por exemplo, pagamento por restrições ambientais de caráter local, pagamento por permissões de emissões de CO₂, restrições ao comércio exterior, regulamentação restritiva sobre os produtos e mudanças no comportamento do consumidor.

As medidas consideradas mais importantes pelos entrevistados foram pagamento por permissões de emissões de CO₂ e mudanças no comportamento do consumidor, seguidas por pagamento por restrições ambientais de caráter local e regulamentação restritiva sobre os processos produtivos. Também pagamento por permissões de emissões de outros GEEs foi atribuído grau de importância significativo. Dentre essas medidas, regulações restritivas sobre os processos produtivos foram avaliadas como implementadas no Brasil, por uma pequena maioria na amostra.

Esses resultados corroboram o que foi levantado nas visitas realizadas²³, em que foi possível identificar expectativas do setor no sentido de regulações que favoreçam as tecnologias mais limpas do se-

22 O Zoneamento Agroecológico da cana limita o cultivo de cana-de-açúcar na Amazônia, Pantanal e Bacia do Alto Paraguai e mapeou o cultivo potencial em 64,7 milhões de hectares, ou 7,5% do território nacional (MAPA; EMBRAPA, 2009).

23 Foram realizadas visitas ao Ministério de Minas e Energia, Ministério de Ciência e Tecnologia, Petrobras e Amyris. Ademais, em workshop realizado no Rio de Janeiro, também foi possível estabelecer contato com Petrobio, Embrapa Agroenergia e Solazyme. Também foram estabelecidos contatos com o Grupo de Economia da Energia da UFRJ.

tor, encarecendo aquelas mais defasadas ambientalmente. Em outras palavras, o setor em sua maioria vê mais como oportunidades do que como riscos as intervenções pró redução na emissão de carbono, pois acreditam que essas mudanças acabarão por incentivar o uso de combustíveis renováveis.

Tabela 2 Mudanças institucionais

Mudanças Institucionais e regulatórias	Já implementada no Brasil?		Já implementada no exterior?		Grau de importância			
	Sim	Não	Sim	Não	Nenhuma	Baixa	Média	Alta
a) pagamento por restrições ambientais de caráter local	3	9	9	2	0	4	5	3
b) pagamento por permissões de emissões de CO ₂	0	11	10	1	0	1	6	4
c) pagamento por permissões de emissões de outros GEEs	0	11	5	6	0	3	6	2
d) restrições ao comércio exterior	1	11	8	3	0	5	6	0
e) regulamentação restritiva sobre os processos produtivos	7	5	10	1	0	4	3	4
f) regulamentação restritiva sobre os produtos	5	7	8	3	0	6	3	2
g) mudanças no comportamento do consumidor	5	7	9	2	0	4	2	5

Fonte: Questionário enviado a especialistas.

Mudanças climáticas e mudança tecnológica

As condições naturais e geográficas são favoráveis a que o país explore vantagens comparativas expressivas, suficientes para que o país assumira posição de destaque, no plano mundial, na produção e uso da biomassa como recurso energético. Além dos usos energéticos mais conhecidos da biomassa, como os dos resíduos agrícolas, deve-se destacar o grande potencial existente no Brasil para o desenvolvimento de florestas energéticas, cultivadas especificamente para esse fim. Diversos estudos têm sido conduzidos por instituições de pesquisa no País (p. ex., EMBRAPA e IPT), com o objetivo de identificar biomassas com grande potencial energético, e que podem ser cultivados em acordo com as exigências ambientais vigentes. No entanto, para garantir a vanguarda tecnológica, para além de apenas fornecedor de clima, solo e matéria prima, o país também precisa insistir no desenvolvimento tecnológico dos produtos relacionados aos biocombustíveis.

No desenvolvimento tecnológico do etanol destacam-se os temas já mencionados relativos à manutenção das vantagens comparativas do país: melhoria da competitividade por meio de redução de custos na fase produtiva e de distribuição; melhoramento genético, por meios tradicionais ou transgênicos; pesquisa e desenvolvimento da utilização da palha e bagaço da cana para cogeração ou utilização como matéria prima do etanol de segunda geração; desenvolvimento de técnicas de produção do etanol de segunda geração etc.

Esses temas foram recorrentes nos levantamentos realizados por meio de entrevistas, e no questionário enviado a especialistas, levado a campo por essa pesquisa. Esses temas são catalisados

em um novo conceito que se está desenvolvendo e relaciona-se à bioindústria, biorrefinaria etc. É comum entre os atores do setor, quer na academia, quer entre os profissionais de mercado, a ideia de que a indústria de biocombustíveis, e de maneira mais geral, de bioprodutos, encontram-se em transformação, e serão diferentes da que se conhece hoje. Novas matérias primas, novas tecnologias de conversão, novos produtos e novos modelos de negócio estão sendo testados e aprimorados. Diversas empresas buscam responder aos desafios colocados e explorar as oportunidades existentes. No entanto, parece consenso também que o processo de formação dessa nova bioindústria ainda tem pontos em aberto e as estratégias e políticas são traçadas em um ambiente de muitas incertezas.

No questionário enviado a especialistas, uma das questões relacionava-se à percepção dos entrevistados em relação às tecnologias que impactarão o setor do etanol, o estágio atual de desenvolvimento, o horizonte de difusão e o caráter proprietário ou não da tecnologia²⁴. As tecnologias pesquisadas foram agrupadas em três grandes tópicos, a saber, tecnologias relacionadas aos processos enzimáticos de fermentação, produtos derivados a partir do etanol e tecnologias relacionadas ao etanol de segunda geração²⁵. A tabela 3 resume os resultados obtidos nesse levantamento. Os números nas tabelas representam médias de respostas para cada quesito, em relação ao número de tecnologias em cada subgrupo, de modo a poder tornar comparáveis as respostas entre os subgrupos.

Tabela 3 Tecnologias de biocombustíveis, estágio de desenvolvimento, horizontes de difusão e propriedade da tecnologia

Tecnologia	Estágio atual de desenvolvimento				Horizonte de difusão				Tecnologia Proprietária?	
	Conceito	Bancada	Protótipo/ Piloto	Comercial	2015	2020	2030	2050	Sim	Não
Processos enzimáticos	4,5	0,0	4,0	0,0	4,5	3,0	0,5	0,5	5,0	4,5
Produtos derivados de etanol	3,1	1,8	1,5	0,0	2,8	4,3	0,8	0,0	5,4	3,3
2ª geração	3,8	4,8	0,3	0,0	3,3	4,3	0,7	0,0	5,5	3,0

Fonte: Questionário enviado a especialistas

Todas as tecnologias pesquisadas se encontram em estágio de desenvolvimento, nenhuma delas alcançou o estágio comercial. O ponto a destacar é que os processos enzimáticos são os que, proporcionalmente, se encontram em estágio mais avançados, uma vez que apresentam a maior quantidade de respostas em estágio de protótipo/piloto. De outro lado, as tecnologias de segunda geração são as

24 Tecnologia proprietária é aquela protegida por patentes ou segredos industriais

25 As tecnologias de processos enzimáticos de fermentação incluem a *Saccharomyces cerevisiae* (usado na fermentação) e a *Zymomonas mobilis* (usado na fermentação); com relação aos produtos derivados do etanol, foram pesquisados a obtenção de 1,3 butadieno a partir do etanol, a obtenção de 1-butanol a partir de etanol, a obtenção de acetato de etila a partir de etanol via desidrogenativa, a obtenção de acetato de etila a partir de etanol via oxidativa, a obtenção de ácido acético a partir de etanol, a obtenção de propeno via etanol, a obtenção de xilitol de biomassa e a hidroformilação do eteno gerado a partir do etanol; com relação ao etanol do segunda geração, foram questionados o pré-tratamento biológico, o pré-tratamento físico da matéria-prima, o pré-tratamento físico-químico, o pré-tratamento químico, a hidrólise ácida e a hidrólise enzimática.

mais incipientes, muitas delas se encontrando em estágio de bancada. Para todas as tecnologias pesquisadas, o horizonte de difusão é de cerca de 10 anos (até 2020). Para as tecnologias enzimáticas, o horizonte de difusão parece ser um pouco menor, com uma incidência maior no prazo até 2015.

No questionário enviado a especialistas, os entrevistados também foram questionados sobre as oportunidades do desenvolvimento das tecnologias pesquisadas para o país, e as instituições críticas para o seu desenvolvimento. A tabela 4 resume os resultados obtidos nesse levantamento. Todos os entrevistados são quase que unânimes em reconhecer que as tecnologias representam boa oportunidade para o país e veem, preferencialmente, nos centros de pesquisas e universidades, as principais instituições responsáveis para o desenvolvimento das tecnologias. Um pouco menos consideram as empresas como sendo instituições críticas no desenvolvimento e, muito poucos, os fornecedores. Os resultados são muito semelhantes entre os grupos de tecnologias.

Tabela 4 Tecnologias de biocombustíveis, oportunidade para o Brasil e instituições críticas para o desenvolvimento da tecnologia

Tecnologia	Boa oportunidade para o Brasil?		Instituições críticas para o desenvolvimento da tecnologia				
	Sim	Não	Empresas	Fornecedores	Universidades	Centros de Pesquisa	Outros*
Processos enzimáticos	9,5	1,5	6,0	2,5	8,0	9,5	0,0
Produtos derivados de etanol	7,6	1,9	6,3	2,4	6,0	7,3	0,0
2a geração	9,3	1,5	6,2	4,5	7,8	8,7	0,0

*Governo Federal e Governos Estaduais

Fonte: Questionário enviado a especialistas

Os resultados obtidos a partir dos questionários enviados a especialistas são corroborados pelas visitas realizadas ao longo do desenvolvimento do projeto. Em geral, as perspectivas de desenvolvimento tecnológicos no setor são muito promissoras, o país já dispõe de recursos humanos e infraestrutura de pesquisa para o desenvolvimento das tecnologias pesquisadas.

Dois aspectos levantados nas entrevistas e visitas, e que ainda limitam o desenvolvimento, são o pequeno aporte de recursos por parte de empresas e as dificuldades regulatórias, que impedem maior participação de pesquisadores universitários no desenvolvimento de projetos industriais.

As grandes empresas do setor, associadas ao agronegócio, dão maior ênfase às melhorias tecnológicas focadas na agricultura, e menos na etapa industrial. Alguns entrevistados mencionam a ausência de tradição das usinas em investir no desenvolvimento de novos processos e produtos e a ênfase na comercialização de *commodities* com baixíssimo valor agregado em nível industrial, exportando frequentemente produtos sem qualquer transformação. Nota-se uma dependência de pesquisas fora das empresas para o desenvolvimento tecnológico, o que de todo não é ruim. No entanto, parte da pesquisa acadêmica não está diretamente vinculada a novos produtos e processos, destinando-se a atender as metas de publicação, com impacto restrito a academia, mas com pouca

possibilidade de impactar o desenvolvimento industrial em um prazo relativamente curto ou, pelo menos, no médio prazo. O setor ainda carece de maior compartilhamento de ações entre as empresas e os centros de pesquisa, com objetivo de desenvolver um ciclo virtuoso de retroalimentação entre a geração de inovações e sua utilização na esfera produtiva. Mais do que em outras áreas a pesquisa em biotecnologia industrial exige mecanismos de retroalimentação para de fato ter poder de transformar-se em tecnologia com aplicação no mercado.

17. Análise do impacto das mudanças institucionais e tecnológicas sobre o setor no Brasil

17.1. Síntese das perspectivas tecnológicas e impactos sobre o setor

A grande perspectiva de aumento da demanda e o eventual conflito que o uso dessas matérias-primas possa ter entre a destinação para alimento ou energia tem levado à busca de outras fontes com destaque para a biomassa lignocelulósica que se encontra em diversos materiais e pode ser obtida em qualquer lugar do planeta.

O complexo lignocelulósico é o biopolímero mais abundante na Terra. Considera-se que a biomassa lignocelulósica compreende cerca de 50% da biomassa do mundo. Muitos materiais lignocelulósicos têm sido testados para a produção de etanol, como restos vegetais, madeira madeiras, resíduos de celulose, papel de jornal, resíduos de papel de escritório, lamas papel reciclado, biomassa herbácea e resíduos sólidos urbanos.

As perspectivas de desenvolvimento tecnológicos do setor no Brasil são promissoras, uma vez que o país dispõe infraestrutura de pesquisa em centros de pesquisas e universidades, muitos deles ligados ao setor e suas empresas, ainda que seja necessário um aprofundamento nessas relações; o parque de empresas de bens de capital para o setor também é relativamente desenvolvido, com algumas delas na fronteira tecnológica da produção industrial atual; há dotação de recursos naturais, clima e solo adequados ao desenvolvimento do etanol de 1ª e 2ª gerações. Fatores institucionais precisam ser aprimorados, com vistas a garantir a competitividade de longo prazo ao setor.

Materiais lignocelulósicos representam uma opção promissora como matéria-prima para produção de etanol. Para o caso dos EUA, a palha de milho é considerada uma das matérias-primas mais promissora, devido à sua grande disponibilidade²⁶.

Do ponto de vista institucional, com já mencionado, citam-se o pequeno aporte de recursos por parte de empresas nas pesquisas e os entraves burocráticos que impedem maior participação de pesquisadores universitários no desenvolvimento de projetos industriais.

²⁶ Certamente, uma detalhada avaliação econômica e ambiental dos impactos das diferentes matérias-primas diferentes é necessária, a fim de tomar decisões sobre as mais adequadas matérias-primas para produção de etanol em cada caso. Uma abordagem útil para a realização de tais avaliações é empregar ferramentas de simulação com base em dados realistas, obtidos a partir de instalações existentes, produção de etanol de plantas-piloto ou modelos matemáticos. Além disso, esta abordagem permite a análise de como diferentes configurações tecnológicas têm influência sobre os indicadores do processo global.

18. Síntese das restrições ao comércio e ao consumo e impactos sobre o setor

As dificuldades relacionadas ao comércio internacional permanecem como um dos maiores desafios da cadeia do etanol. Como já discutido ao longo do texto, para que o etanol se consolide surja como uma *commodity* global é necessário que sejam tomadas medidas no sentido de ampliar confiança no uso deste combustível. Em parte, essas medidas se relacionam ao desenvolvimento e fortalecimento de novos países produtores, possibilitando a diversificação da origem do etanol por países.

Além das questões comerciais, restrições relacionadas à oferta também limitam o atendimento à potencial demanda internacional de etanol, necessária a implementação de ambiciosos programas de adição do combustível à gasolina. Nos Estados Unidos, como mencionado, o maior obstáculo à expansão da produção é a necessidade de novas matérias-primas, sobretudo derivada de material celulósico, o que é algo ainda possível apenas no médio prazo.

No caso brasileiro, as restrições concentram-se na capacidade ou não do setor em atender a demanda potencial pelo combustível. A queda da produtividade em razão do aumento da idade média dos canaviais, que não foram renovados a contento, fez com que a produção andasse de lado nos dois últimos anos, e acendeu uma luz no setor sobre as fontes de sua competitividade.

Objetivos de médio e longo prazo desejáveis para o setor

A manutenção da vanguarda tecnológica no país necessita do aumento da produtividade e rentabilidade na produção de primeira geração; do desenvolvimento de processos rentáveis na segunda geração; do aprimoramento do motor flex; e do desenvolvimento de novos produtos, ligados ao setor do etanol.

Em se tratando do etanol de primeira geração, alguns ganhos de produtividade ainda podem ser obtidos, com o melhoramento genético dos cultivares, reduzindo custos de produção²⁷; com a melhoria do transporte de insumos, matéria-prima e produto final²⁸; com a mecanização da colheita²⁹; com o aprofundamento da cogeração de energia, feita a partir da queima do bagaço de cana³⁰.

27 A complexidade do material genético da cana é alegada como um entrave a esse caminho. Mas muito das pesquisas realizadas nos últimos anos, para o sequenciamento genético da cana, por exemplo, precisa ser aprofundado em termos de geração de produtos. Os centros de pesquisas brasileiros estão relativamente preparados para essa tarefa, tendo em vista todo o conhecimento acumulado ao longo do tempo nessa rota tecnológica.

28 Quanto ao escoamento da produção, a necessidade de transporte por estrada e caminhões reduz em muito os ganhos de produtividade da cana e seu impacto ambiental positivo. O escoamento em grandes distâncias requer a construção de dutos de distribuição que integrem os vários mercados, em diferentes regiões do país, e também os portos, para eventual escoamento da produção ao exterior. É paradigmática a iniciativa de constituição da Logum Logística S.A., responsável por consolidar, em uma única rede, três projetos individuais de etanoldutos, que envolvia, além de dutos, complexos sistemas de transporte por hidrovias, rodovias, cabotagem, além de operações em terminais aquaviários, portos e armazéns. O projeto da Logum está sendo financiado pelo BNDES, e faz parte do PAC – Programa de Aceleração do Crescimento – promovido pelo Governo Federal.

29 As dificuldades logísticas generalizadas do país também atingem o setor. As características da matéria-prima limita o tamanho das usinas e o aproveitamento de ganhos de escala em plantas maiores. A mecanização da cana e o desenvolvimento de novos equipamentos, que eventualmente, permitam o tratamento da matéria prima antes de sua chegada à usina podem contribuir para a redução dos custos nessa etapa do processo produtivo.

30 Em plantas maduras, a adaptação para a cogeração envolve a inversão de novos investimentos, nem sempre avaliados como rentáveis pelas empresas, seja pelo alto custo envolvido, seja por questões tributárias específicas (substituição tributária que impede o aproveitamento de créditos do ICMS). Questões tributárias não poderiam repre-

No que se refere ao etanol de segunda geração, os principais entraves ainda se referem aos elevados custos de produção na fase industrial. Nesse ponto, os americanos parecem apresentar vantagens sobre os brasileiros. Contribuem para isso os pesados recursos direcionados à pesquisa e desenvolvimento nessa área, a implantação de plantas pilotos, em escala industrial, e mesmo o maior custo de produção de longo prazo associado ao etanol de milho. Se a adoção de uma nova tecnologia é viabilizada quando esta iguala o custo de produção da tecnologia atual, o fato de terem uma tecnologia atual mais cara, possibilitaria a eles vantagem na adoção de tecnologia substituta. Nesse caso, a manutenção da vanguarda tecnológica ao país teria que ser obtida com o subsídio a adoção da nova tecnologia nos estágios iniciais. Políticas específicas de incentivos fiscais poderiam ser desenhadas para patrocinar os investimentos de empresas privadas nesses projetos.

Um incentivo importante pode vir do aumento da competitividade do etanol frente à gasolina, o que poderia se dar pelo aprimoramento do motor flex. No atual estágio do desenvolvimento dos motores elétricos, a melhor opção tecnológica parece apontar para veículos híbridos – veículos com dois motores, operando complementarmente, um motor a combustível líquido e outro elétrico. Nessa situação, o etanol continua sendo uma opção importante, na medida em que é um combustível líquido competitivo, capaz de ser utilizado isoladamente, ou como aditivo à gasolina.

No que se refere ao desenvolvimento de novos produtos derivados do etanol, muitas são as perspectivas de desenvolvimento, assim como todas requerem investimentos na busca de viabilidade econômica dos novos produtos, bem como nas adaptações necessárias nas plantas atualmente existentes, para que tornem possível a fabricação. Existem perspectivas promissoras relacionadas ao querosene de aviação e ao diesel de cana. O mercado de cosméticos e artigos de higiene e cuidado pessoal, produtos de higiene doméstica e industrial e os mercados de polímeros e plásticos, sobretudo os biodegradáveis, são mercados potenciais para os produtos derivados de etanol no médio e longo prazos.

19. Políticas industriais, tecnológicas e ambientais para adaptação às mudanças climáticas

Entende-se que a expansão do setor, em si, contribui beneficentemente para a mitigação dos efeitos climáticos da matriz energética mundial, tendo em vista a substituição no consumo (direta ou complementarmente) de combustíveis fósseis. Por essa razão, as iniciativas de proteção à produção do etanol são constantes nos países que optam pela sua produção. O grande valor estratégico representado pelo etanol nesses diversos mercados nacionais, e ao longo de toda sua cadeia de produção, envolto em interesses econômicos, energéticos e ambientais, contribuem para essa proteção. Aliado a isso, e na medida em que a cadência dos investimentos no setor e o comprometimento de autoridades governamentais se intensificam na direção de fortalecer a presença do etanol na matriz

sentar empecilho para esse aproveitamento, e, portanto, a sua rápida solução precisa ser equacionada. Já os custos de investimentos podem ser superados garantindo-se acesso às linhas de crédito disponíveis, sobretudo no BNDES. Institucionalmente, o governo pode contribuir com incentivos à mudança na estrutura organizacional de grupos com capacidade de financiamento insuficiente.

energética, amplia-se o número de estudos dedicados a avaliar a carga protecionista e seus desdobramentos nos diversos mercados, incrementando o arcabouço literário sobre o tema³¹.

Nos Estados Unidos, a indústria passou por um longo período de proteção, com pesados subsídios e barreiras tarifárias ao etanol de outros países. O fim dos subsídios ao etanol naquele país abre espaço para que outros produtores – e inclusive o Brasil – forneçam o combustível ao mercado norte-americano, o maior do mundo. Além da importância comercial dessas transações, elas ajudam na transformação do etanol em uma *commodity* internacional. Isso pode contribuir, em médio prazo, para que ocorra uma difusão global dos veículos flexíveis ou dos dedicados exclusivamente ao etanol³².

No Brasil, o governo e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estudam aumentar a regulação do setor de etanol, passando a regular a produção e estabelecer metas. A intenção do governo é estender ao etanol o mesmo tratamento dado ao setor de petróleo, o qual a ANP acompanha desde a produção até a distribuição. A ANP estabelece metas de produção com os concessionários dos blocos de petróleo adquiridos nos leilões da agência. A principal motivação para essa intervenção seria o alto nível de preço do etanol, devido à baixa disponibilidade do produto. Contratos de fornecimento de prazo compatíveis com a maturação dos investimentos podem ser desenhados pelo órgão regulador.

No que se refere ao marco regulatório da produção de cana, o governo brasileiro concluiu em 2009 o Zoneamento Agroecológico da Cana de Açúcar (ZAE-Cana). Esse zoneamento é parte da política agrícola do governo, para a contratação de crédito de custeio e seguro agrícola. Ele fornece o potencial de terras aptas ao plantio da cultura, que se conjugado com as áreas atualmente sob plantio, fornece o potencial de expansão da cultura por regiões de interesse. O Zoneamento Agroecológico da cana limita o cultivo de cana-de-açúcar na Amazônia, Pantanal e Bacia do Alto Paraguai e mapeou o cultivo potencial em 64,7 milhões de hectares, ou 7,5% do território nacional. Tal medida deve ser valorizada pelo setor, pois demonstrará o compromisso ambiental do mesmo, na preservação de áreas consideradas estratégicas para a manutenção de florestas, rios e fauna.

No que se refere ao etanol de segunda geração, o *Biomass Program* nos EUA tem se mostrado mais eficaz no sentido de promover a formação de redes entre universidades, empresas e instituições que compartilham equipamentos e conhecimento, a fim de atender aos objetivos do programa estabelecidos nas chamadas. Esse desempenho deve-se, principalmente, à flexibilidade do programa com relação à origem dos integrantes da rede, o que permite ao país um maior conhecimento dos processos utilizados em outras nações, fundamental nesse momento, pois a descoberta e a aceleração do(s) processo(s) que permita(m) a fabricação do etanol celulósico em escala comercial podem significar o domínio tecnológico daquele país.

31 No entanto, no Brasil, após um período de proteção, sob o argumento de indústria nascente, que garantiu o sucesso do Proálcool, foi a liberação associada à inovação tecnológica do carro flex quem contribuiu para o crescimento do setor.

32 Evidentemente, a queda da proteção no mercado americano ocorre em um momento muito peculiar, tendo em vista a queda na produtividade do produto no mercado brasileiro e a redução na produção de etanol. A situação ressuscitou nos Estados Unidos o debate sobre o conflito entre a produção de biocombustível e de comida.

No Brasil, o Plano PAISS é uma tentativa de mitigar, em parte o atraso do Brasil em inovações no setor³³. Estimam-se recursos iniciais de R\$ 1 bilhão, podendo alcançar mais de R\$ 3 bilhões. Além disso, os recursos somente serão comprometidos, independente do instrumento financeiro indicado, na medida em que houver a aprovação e posterior contratação dos projetos nos respectivos instrumentos de apoio. Foram selecionados 31 planos de negócios, sendo 13 para a linha 1, 17 para a linha 2 e apenas 1 na linha 3.

O programa foi lançado em 2011 e os planos selecionados tiveram prazo considerável para devida elaboração e articulação, com vista a garantir qualidade adequada dos mesmos. O resultado foi a seleção de 25 empresas e 35 planos de negócios distribuídos em três diferentes linhas temáticas:

- Linha 1 – Bioetanol de Segunda Geração: projetos visando o aprimoramento e o desenvolvimento do processo de produção de segunda geração, desde a etapa agrícola (coleta e armazenamento do palhiço) até a fase industrial (pré-tratamento, hidrólise e fermentação), bem como integração e escalonamento destes processos.
- Linha 2 – Novos produtos de cana-de-açúcar: desenvolvimento de novos produtos capazes de agregar valor às atividades tradicionais do setor e também pesquisa acerca da possibilidade de integração dos processos de produção destes novos produtos.
- Linha 3 – Gaseificação: desenvolvimento de tecnologias (desde o pré-tratamento, até a fase de purificação dos gases), equipamentos e catalisadores para conversão do gás em outros produtos.

Mais da metade dos planos de negócio se enquadram na linha 2, de novos produtos, enquanto que um pouco menos da metade deles se concentram na linha 1, ligada ao etanol celulósico, e apenas um projeto, da Petrobrás, foi aprovado na linha 3, de gaseificação. Conseqüentemente, observa-se uma concentração dos projetos relacionados à tecnologia de segunda geração e ao desenvolvimento de produtos que se adequem ao conceito de biorrefinaria, permitindo a integração de diferentes processos dentro de uma mesma cadeia produtiva³⁴.

Uma característica importante do PAISS é também a seleção, principalmente, de *start ups* ligadas à biotecnologia e de grandes empresas atuantes no setor sucro-energético brasileiro. Observa-se a presença de grande quantidade de empresas ou institutos de pesquisa estrangei-

33 O PAISS é uma iniciativa conjunta do BNDES e da FINEP de seleção de planos de negócios e fomento a projetos que contemplem o desenvolvimento, a produção e a comercialização de novas tecnologias industriais destinadas ao processamento da biomassa oriunda da cana-de-açúcar, com a finalidade de organizar a entrada de pedidos de apoio financeiro no âmbito das duas instituições e permitir uma maior coordenação das ações de fomento e melhor integração dos instrumentos de apoio financeiro disponíveis. As linhas temáticas do PAISS contemplaram: bioetanol de 2ª Geração; novos produtos de cana-de-açúcar; e gaseificação. Foram selecionados 31 planos de negócios, sendo 13 para a linha 1, 17 para a linha 2 e apenas 1 na linha 3.

34 Existe um peso muito grande de alguns poucos projetos no total do programa, o que pode ser um risco grande para o mesmo. O ideal seria que os projetos fossem mais bem balanceados, em termos de participações, entre as empresas e entre as linhas de fomento.

ros: dos 25 selecionados, 15 são estrangeiros e somente 10 são brasileiros. Dentre as firmas estrangeiras, 6 delas são europeias, 8 são americanas e uma última resulta de joint venture entre a Du Pont (americana) e a British Petroleum (inglesa). Conforme quadro 2, que relaciona as empresas selecionadas com os respectivos projetos e financiamento dentro de cada linha de pesquisa em que atuam.

Quadro 2 relação de empresas selecionadas, planos de negócios e valor de financiamento.

Empresa	Linha I		Linha II		Linha III	
	Objeto	Valor	Objeto	Valor	Objeto	Valor
Abengoa Bioenergy	Construção de planta de etanol celulósico	n.d.				
Agacê Sucroquímica			n.d.	n.d.		
Amyris			Produção de diesel de cana	n.d.		
Baraúna Ltda.			n.d.	n.d.		
GranBio	Planta comercial de etanol celulósico	R\$ 1.030,3MM				
Biommm	P&D em enzimas	n.d.				
Bunge Ltda.			Produção de óleos renováveis	R\$ 295 milhões		
Butamax			Produção de biobutanol	n.d.		
CTC	Planta de etanol celulósico	n.d.	Produtos no conceito de bior-refinaria	n.d.		
Dow Brasil	n.d.	n.d.	Foco em biopolímeros	n.d.		
DSM South America	Adaptação de leveduras para fermentação	n.d.	Obtenção de ácido succínico	R\$ 8 milhões		
Du Pont			n.d.	n.d.		
Eli Lilly	n.d.	n.d.				
Odebrecht Agroindustrial	Planta de etanol celulósico	R\$ 100 milhões	n.d.	n.d.		
Ideom			Foco em biopolímeros	n.d.		
Kemira Chemicals			n.d.	n.d.		
LS9			Produção de óleos renováveis	n.d.		
Mascoma Brasil	Bioprocesso consolidado	n.d.				
Methanum Ltda.			n.d.	n.d.		
Metso Paper	n.d.	n.d.				
Novozymes	P&D em enzimas	n.d.				
Petrobrás	Produção de etanol celulósico	n.d.			Construção de planta de gasificação de biomassa	n.d.
PHB Industrial			Foco em biopolímeros	n.d.		
Solazyme			Planta de óleos renováveis	R\$ 247,5 milhões		
VTT Brasil	n.d.	n.d.	Foco em biopolímeros	n.d.		

n.d. : não há dados disponíveis

Fontes: BNDES, Valor Econômico, Unica e Jornal da Cana.

20. Biodiesel

O biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis e pode ser produzido a partir de gorduras animais, óleos e gorduras residuais ou de óleos vegetais (Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel, 2005). O biodiesel pode ser produzido a partir de qualquer óleo vegetal bruto, ou seja, sem grandes refinações. De uma maneira geral, faz-se a extração do óleo, seguida de procedimentos de separação por centrifugação e filtragem, resultando nos óleos vegetais brutos. Portanto, uma planta industrial de extração de óleo vegetal com os necessários controles de qualidade para purificação inicial do produto é suficiente para a produção do óleo (LEIRAS, 2006).

A extração do óleo vegetal pode ser feita por processo físico (prensagem) ou químico (por solvente). A extração por solvente produz resultados melhores, no entanto a maneira mais tradicional de extração é a física, que utiliza prensas mecânicas e hidráulicas para esmagar os grãos (LEIRAS, 2006).

Pode-se ainda optar por uma extração mista (mecânica/ solvente). A seleção do tipo de extração depende de dois fatores determinantes: a capacidade produtiva e o teor de óleo. O Quadro 1 abaixo mostra os cenários e os tipos de usinas de extração recomendáveis.

Quadro 1 Tipos de usinas recomendadas para extração de óleo.

Tipo de Usinas	Situações Recomendadas	Matérias-Primas Típicas
Usinas de extração Mecânica	- Pequenas e médias capacidades, normalmente abaixo de 200 ton de grãos/ dia. - Oleaginosas de alto teor de óleo, acima de 35%.	Mamona Amendoim Babaçu
Usinas de extração por solvente	-Grandes capacidades, normalmente acima de 300 ton/ dia de matéria-prima. - Oleaginosas com baixo teor de óleo, abaixo de 25%.	Soja
Usinas mistas	Médias e grandes capacidades, acima de 200 ton/dia. - Oleaginosas de médio e grande teor de óleo, acima de 25%.	Algodão Mamona Amendoim Babaçu Girassol

Fonte: Parente (2003) apud Leiras (2006).

Em 1898, Rudolph Diesel apresentou pela primeira vez o seu motor de ignição por compressão usando óleo de amendoim, que seria o biodiesel original. Diesel acreditava que o combustível feito de biomassa seria a alternativa viável para os motores que utilizavam vapor. No entanto, o uso direto de

óleos vegetais como combustível foi rapidamente superado por fatores tanto econômicos quanto técnicos. Dessa forma, os motores diesel foram projetados e são fabricados de acordo com rígidas especificações para uso do óleo diesel de petróleo. Esses motores são sensíveis às gomas que se formam durante a combustão do óleo vegetal e que se depositam nas paredes do motor. Para superar este problema, processos de esterificação são utilizados para que se produzam ésteres de óleo vegetal que têm propriedades físicas similares ao diesel de petróleo, mas que apresentam maior lubrificidade.

Vários países começaram a incentivar o uso de biodiesel, por meio de programas mandatórios de adição do biodiesel ao diesel, para reduzir o potencial impacto ambiental do derivado de petróleo. Com isso tem-se verificado uma grande expansão da produção em nível mundial. As fontes de matérias-primas dependem do país e das características regionais. Pela possibilidade de ser produzido a partir de diversas fontes a sua produção pode se dar em praticamente todas as partes do planeta.

21. Produção, consumo e comércio internacional

O mercado do biodiesel, juntamente com o do etanol, vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, em função das preocupações de vários países com o meio ambiente e a intenção de reduzir a dependência do petróleo importado. Ao longo dos últimos anos, vários países lançaram programas de incentivo à produção e consumo do biocombustível. Como nos principais países produtores de biodiesel a produção é suficiente apenas para cobrir a demanda interna, o comércio mundial do biocombustível é insignificante.

O principal mercado produtor e consumidor de biodiesel é a União Europeia, que vem fabricando o produto em larga escala desde 1992. Apesar da implementação do Programa do etanol, o biodiesel continua dominando a cena dos combustíveis alternativos na Europa. Em resposta aos incentivos por parte das instituições europeias (subsídios às plantações de produtos alimentícios em áreas até então não utilizadas e isenção de 90% dos impostos), muitos países europeus montaram suas usinas, com destaque para Alemanha, Espanha, França e Itália entre outros, o que vem contribuindo para a expansão da capacidade produtiva do biocombustível na região.

Na Europa, a maior capacidade produtora e consumidora de biodiesel está na Alemanha. Esse país é o maior produtor mundial do biocombustível, utilizando como principal matéria-prima a canola. Em 2010 foram produzidos 2,83 bilhões de litros, um aumento de 13% em relação a 2009 e de 242% em relação a 2003 quando foram produzidos 827 milhões de litros. Para 2012, a perspectiva é de que a produção alemã fique em 2,6 bilhões de litros. A redução se deve à concorrência com biodiesel importado e a adoção do E10 (FLACH, LIEBERZ, BENDZ E BETTINA, 2011). O governo alemão concede subsídios de 47 euros para cada 100 litros de biodiesel (F. O. LICHT, 2005). A França, que até 2003 era o maior produtor mundial do biodiesel (lá chamado de diester) hoje ocupa a terceira colocação no mundo (segunda na Europa), atrás do Brasil.

Os Estados Unidos ocupavam o quarto lugar na produção de biodiesel em 2004, com 113 milhões de litros, seguidos pela Dinamarca (80 milhões de litros), Áustria (65 milhões de litros) e

Espanha (15 milhões de litros). Em 2010, a produção americana alcançou cerca de 1,3 bilhões de litros. Nos Estados Unidos, o interesse pela produção do biodiesel vem crescendo em decorrência de vários aspectos: das leis federais e estaduais que autorizam o uso do biodiesel como combustível ou aditivo na proporção de 20%, dos incentivos tarifários e creditícios concedidos pelo governo aos fabricantes do produto e da necessidade de dar vazão aos estoques extras de óleo de soja e milho em vários estados americanos.

Tabela 5 Principais países produtores de biodiesel – 2007 a 2010 (bilhões de litros)

	2007	208	2009	2010
Alemanha	3,29	3,17	2,60	2,83
Brasil	0,40	1,16	1,60	2,37
França	1,08	1,99	2,37	2,14
Argentina	0,21	0,80	1,33	2,08
Estados Unidos	1,84	2,55	1,94	1,29
Espanha	0,20	0,25	0,81	0,92
Itália	0,53	0,76	0,90	0,84

Fonte: EIA.

No Brasil, o biodiesel começou a ser produzido em meados da década passada, a partir da promulgação da Lei 11.097 de 13 de janeiro de 2005, que estabelecia a adição do biodiesel ao diesel mineral consumido no país. O entendimento, por parte do governo federal, é que seria estratégico para o Brasil ingressar no mercado de biodiesel e reduzir a necessidade de divisas para importação de diesel. Ademais, também houve preocupação governamental de promover um combustível renovável fomentando o desenvolvimento regional, preferencialmente na agricultura familiar, com vista a reduzir as desigualdades sociais e gerar emprego e renda no campo.

Entre os anos de 2005 e 2007, a mistura de 2% (B2) no diesel comercializado foi autorizada de forma não compulsória (período voluntário). O período de obrigatoriedade começou em janeiro de 2008 com a mistura 2% (B2), tendo de passar a 5% até 2013. No segundo semestre de 2008, o governo elevou a mistura para 3% (B3), e no segundo semestre de 2009 para 4% (B4). Embora inicialmente a mistura a 5% (B5) estivesse prevista para vigorar somente em 2013, durante o ano de 2009 esse prazo foi revisto, antecipando a meta de B5 a partir de janeiro de 2010.

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP é responsável pela regulação do mercado de biodiesel no Brasil. Uma de suas principais incumbências é realizar periodicamente os leilões de compra e venda de biodiesel³⁵.

O biodiesel brasileiro é produzido a partir de diversos tipos de óleos vegetais (soja, canola, girassol, mamona, pinhão-manso, algodão, dendê, etc.) ou de gordura animal, mas a soja representa a

³⁵ Esses leilões foram formatados para o período não obrigatório entre 2005 e 2007, mas, para preservar a participação da agricultura familiar no fornecimento de matérias-primas, o governo preferiu manter a sistemática de compra por meio de leilões no período obrigatório, em detrimento de negociação direta entre produtores e distribuidores ou refinarias, tal como ocorre no mercado de etanol.

principal matéria-prima. A razão por que a soja responde pela maior parcela do óleo vegetal brasileiro tem outras causas, além das indicadas acima. A soja tem uma cadeia produtiva bem estruturada, tanto antes quanto depois da porteira; a tecnologia de produção é bem definida e moderna; existe ampla rede de pesquisa que assegura pronta solução de qualquer novo problema; oferece rápido retorno do investimento, com mercado consumidor conhecido e amplo; a soja produz o farelo protéico mais utilizado na formulação de rações para animais produtores de carne, restando o óleo como subproduto do farelo.

Os produtos alternativos à soja, no Brasil, não dispõem de todos esses atributos competitivos, apesar da relativamente mais alta produtividade do óleo por hectare (como ocorre com a palma e a mamona).

22. Fatores críticos para a competitividade internacional

22.1. Fatores críticos relacionados à demanda

Do ponto de vista internacional, o grande problema enfrentado pelo biodiesel decorre de sua falta de competitividade frente ao óleo diesel de petróleo, tendo em vista os elevados custos de produção do biocombustível. Desconsiderando-se eventuais subsídios públicos, as atuais tecnologias de fabricação da bioenergia são ainda imaturas, e dependem de preços elevados do petróleo para compensar os custos de produção.

22.2. Fatores críticos relacionados à oferta

Apesar da baixa produtividade, registram-se vários projetos de construção de usinas de processamento, o que tende a elevar sua produção nos próximos anos. Além disso, a diversidade de alternativas de matérias-primas, os elevados custos de produção do biocombustível, o ambiente de incertezas, sugerem dificuldades para a ocupação da capacidade instalada desses projetos, o que pode prejudicar o suprimento da demanda prevista para os próximos anos.

Nesse contexto, dentre os principais desafios a serem enfrentados está a necessidade de elevados investimentos em P&D, voltados para o desenvolvimento de tecnologias de produção agrícola, com a definição de plantas mais aptas, sistemas de produção eficientes e definição de regiões com potencial para a produção. Há, também, necessidade de investimentos em novas tecnologias industriais, que transformem os produtos agrícolas em biodiesel. Se essa questão tecnológica não for solucionada, a margem de lucro reduzida dos produtores, em função dos custos elevados de produção, pode desestimular a produção do biodiesel.

O custo maior de produção do biodiesel em relação aos derivados do petróleo exige, também, incentivo tributário. Na Alemanha, maior produtor mundial do biocombustível, a competitividade do produto em relação ao diesel de petróleo é baseada em incentivos fiscais. A introdução

do E10 na Alemanha também servirá para reduzir a demanda por biodiesel nesse país (Flach, Lieberz, Bendz, e Dahlbacka, 2011).

22.3. Fatores críticos relacionados ao comércio

O comércio internacional de biodiesel deve continuar muito reduzido, tendo em vista os atuais níveis de produção dos países e as exigências locais, que acabam consumindo toda a produção doméstica, não gerando excedentes exportáveis.

23. Dinâmica tecnológica

Embora existam iniciativas baseadas em rotas distintas da transesterificação para a produção de combustíveis automotivos a partir de óleos vegetais, e considerável esforço tenha sido aplicado ao uso direto de misturas óleo vegetal e diesel mineral, tecnicamente não há dúvidas de que esse procedimento ainda é o que melhor combina eficiência de conversões, favoráveis a produções em larga escala e minimização de formação de subprodutos, desde que as matérias-primas empregadas mantenham um nível mínimo de qualidade.

A transesterificação ocorre em uma sequência de três sub-reações consecutivas e reversíveis, com di e monoglicerídeos como intermediários, e as proporções estequiométricas são três moles de álcool por mol de triglicerídeo, óleo vegetal. Entretanto, algum excesso de álcool é necessário para aumentar o rendimento da conversão e permitir a posterior separação dos ésteres do glicerol (SCHUCHARDT, SERCHELI, VARGAS, 1998).

Após a obtenção e purificação do óleo vegetal a partir das sementes ou amêndoas, geralmente mediante operações de trituração, laminação, cozimento e extração do óleo bruto, pode ser efetuada sua conversão em biodiesel. De uma forma simplificada, as etapas típicas em um processo de transesterificação no presente estado de desenvolvimento, são:

- i) Álcool e o catalisador são misturados em um tanque com um agitador;
- ii) Óleo vegetal é colocado em um reator fechado contendo a mistura álcool/catalisador. O reator é usualmente aquecido a aproximadamente 70°C para aumentar a velocidade da reação, que leva entre 1 a 8 horas;
- iii) Ao final da reação, quando se considera convertido um nível suficiente de óleo vegetal, os ésteres (biodiesel) e a glicerina são separados por gravidade, podendo ser adotadas centrífugas para agilizar o processo.
- iv) O álcool em excesso é separado do biodiesel e da glicerina por evaporação sob baixa pressão (evaporação flash) ou por destilação. O álcool recuperado volta ao processo.
- v) O biodiesel deve ser purificado e em alguns casos, lavado com água morna para remover resíduos de catalisador e sabões.

A transesterificação pode ser conduzida na presença de catalisadores ácidos, básicos e enzimáticos, simples ou complexos³⁶. Os catalisadores ácidos, dentre os quais o ácido sulfúrico, são os mais empregados, embora mais lentos quando comparados ao uso de catalisadores básicos³⁷. A catalise básica por sua vez é muita rápida, geralmente em 15 minutos o estado assintótico é alcançado e leva a excelentes rendimentos, muitas vezes superior a 90%. Contudo, o emprego de catalisadores básicos apresenta como inconvenientes a grande sensibilidade à presença de água e ácidos graxos livres, que mesmo em teores bastante reduzidos afetam o rendimento da reação, consomem o catalisador e levam à formação de géis e sabões³⁸. Além disso, a separação do biodiesel do restante reacional é uma tarefa complexa e exige várias etapas de separação e neutralização, para atingir a especificação correta. Os separadores centrífugos para a separação da glicerina parecem ser os mais recomendados. Um dos parâmetros mais importantes na especificação do biodiesel é exatamente o teor máximo de glicerina, de 0,5% na proposta brasileira, e de 0,25% nas normas americanas e europeias, que deve ser baixo para evitar a formação de depósitos na câmara de combustão, e a produção de teores elevados de acroleína nos gases de escapamento.

O emprego de enzimas como catalisadores oferece vantagens frente aos catalisadores ácidos e básicos, como a menor sensibilidade à presença de água, recuperação do catalisador e separação do biodiesel. No entanto, apresenta altos custos. Esta tecnologia vem sendo estudada no Brasil desde os anos 80.

Em 1984, obteve-se uma patente relativa ao uso de guanidinas suportadas por polímeros orgânicos. Contudo, encontra-se ainda em fase de desenvolvimento e é um objeto de intenso esforço de pesquisa, podendo em médio prazo constituir-se em uma alternativa interessante.

O Centro de Pesquisas da Petrobras dedica-se ao desenvolvimento de rota etílica para a produção de éster de óleo de mamona, diretamente, a partir de sementes trituradas. Os resultados ainda não estão disponíveis, embora uma patente já tenha sido obtida.

A matéria-prima utilizada afeta os requerimentos de processo, os rendimentos e a qualidade do biodiesel produzido. No estágio atual dos processos, o biodiesel originário de palmáceas apresenta uma qualidade superior àquelas das demais oleaginosas, devido à presença de maior teor de ácidos graxos de menor peso molecular e com alto nível de saturação, como o ácido palmítico.

36 A transesterificação etílica é significativamente mais complexa que a metílica. O aumento do tamanho da cadeia do álcool acarreta uma maior sofisticação ao processo e parte dos parâmetros do processo deve ser revista. Entretanto, trabalhando-se as quantidades estequiométricas relativas entre catalisador, álcool e óleo não transesterificado, bem como com outras variáveis de processo como temperatura, agitação, tempo de reação, acredita-se ser possível atingir qualidade similar do produto obtido via rota metílica. Apesar de que maiores quantidades de reagentes e utilidades devam ser usadas e, portanto, com maiores quantidades de produtos a serem recuperados e efluentes a serem tratados. Devido ao caráter azeotrópico do etanol, o processo de recuperação de álcool é também mais complexo e dispendioso. A possibilidade de utilização de álcool etílico na produção de biodiesel é de alto interesse, não apenas por ser menos agressivo ambientalmente que o álcool metílico, como também considerando as condições particulares do Brasil, onde são produzidos volumes expressivos de etanol de um modo sustentável e a preços competitivos.

37 Outro inconveniente do uso de catalisadores ácidos encontra-se na necessidade de sua remoção visando a prevenir possíveis danos às partes integrantes dos motores.

38 Tais exigências dificultam a utilização de óleos usados de frituras, cujo teor de ácidos graxos normalmente ultrapassam o índice dois de acidez.

24. Mudanças Climáticas, Institucionais e Tecnológicas

24.1. Impactos ambientais

As principais preocupações ambientais levantadas com relação à expansão da produção de biodiesel, semelhante a aspectos do etanol, referem-se aos riscos de deslocamento de culturas para regiões de florestas, uso de áreas de proteção ambiental (nascentes, margens de rios, topos de montanha etc.), entre outros aspectos.

Também no caso do biodiesel, sua expansão tem se dado como uma resposta a uma preocupação ambiental decorrente do aquecimento global. O uso de biodiesel gera um volume de emissões de gases efeito estufa inferior aos derivados de petróleo. Mas, pode-se alegar que para sua produção utilizam-se derivados de petróleo e energia fóssil.

Existem poucos trabalhos que tenham se ocupado do balanço energético em culturas oleaginosas de fins energéticos. As discussões têm se baseado entre correntes que defendem haver um balanço favorável, balanço neutro e mesmo aquelas que apregoam um balanço desfavorável.

De outro lado é importante destacar vantagem do ponto de vista da produção agrícola, pois é um processo carbono neutro, ou seja, sua obtenção e queima não contribui para o aumento de CO₂ na atmosfera, zerando assim o balanço de massa entre emissão de gases dos veículos e sua absorção pelas plantas. Além disso, para os sistemas produtivos agrícolas e particularmente aqueles específicos da agricultura familiar, a internalização desse insumo energético, em substituição ao diesel mineral de custo elevado, pode melhorar o balanço energético agrícola³⁹.

Mendonça (2007) realiza um estudo de ciclo de vida e balanço energético do diesel produzido a partir do óleo de soja, em condições brasileiras. Para a autora, o balanço para o biocombustível conta fortemente com a oscilação de três variáveis críticas, que tem impacto decisivo sobre os resultados, em diferentes estudos, para diferentes culturas e em condições distintas: i) a energia utilizada na produção da matéria orgânica (energia solar e energia química de conversão) da planta propriamente dita, que depende de insumos químicos (fertilizantes, pesticidas e herbicidas) e de energia para o maquinário de transporte e cultivo; ii) a conversão do óleo vegetal em biodiesel é um processo de alto consumo energético no ciclo e que envolve o uso de diferentes tipos de produtos contendo energia equivalente acumulada, como, por exemplo, o etanol utilizado na transesterificação; finalmente, iii) os resíduos agrícolas, que também influenciam o balanço energético.

No ciclo de produção do biodiesel a partir de soja, em qualquer porcentagem de mistura com o diesel, resulta em um processo de absorção de carbono pelo meio, como ocorre nos ciclos de vida de vegetais em geral. O ciclo de carbono na produção de combustíveis à partir de óleos vegetais consiste no retorno e absorção do dióxido de carbono (CO₂), pois os processos de combustão

39 Cumpre destacar que são escassos os estudos de balanço energético e de carbono de toda a cadeia de biodiesel para as diversas matérias primas, contemplando as fases de processamento e distribuição, fazendo-se necessárias mais pesquisas não apenas para avaliação dos impactos ambientais da inserção de oleaginosas na matriz energética brasileira, mas também para fins de reivindicação de créditos de carbono, se for o caso.

e respiração balanceiam o dióxido de carbono na plantação com a absorção na fotossíntese, o que foi tratado, no estudo de Mendonça (2007) como material eliminado pelo ciclo retornando ao meio como carbono equivalente à composição celulósica dos resíduos vegetais e à participação na fórmula molecular dos materiais consumidos. O acúmulo na atmosfera é reduzido e o tempo de ciclo do carbono, para fixação de CO₂ e substituição posterior na combustão de biodiesel, é pequeno (poucos anos) quando comparado ao carbono para óleos oriundos do petróleo (alguns milhões de anos). Nesse caso, o ciclo do biodiesel de soja absorveu mais carbono que toda a produção: para cada 1 tonelada de biodiesel produzido e utilizado, o meio absorve 1,124 toneladas de CO₂ equivalente. Não há saldo positivo na utilização de óleo diesel puro, 1 tonelada de óleo diesel produzido e queimado libera 3,55 kg de CO₂ equivalente⁴⁰.

Outra questão ambiental importante é o grande volume de glicerina previsto como subproduto, equivalente a entre 5 e 10% do produto bruto, que poderá não ter colocação, mesmo se negociado a preço irrisório, além de ter efeito poluente significativo. O resíduo existente é que a glicerina, com alto potencial poluidor, seja descartada no meio ambiente. Em contato com rios e lagos ela se comporta como sabão, mas por ser insolúvel se precipita na água e dificulta a oxigenação.

Outro problema relacionado à glicerina é a qualidade do óleo. O processo de transesterificação, que separa o óleo da glicerina, deve obedecer a parâmetros de qualidade, pois a queima de biodiesel com a presença de glicerina tem importantes impactos ambientais. Por exemplo, quando óleos vegetais, gorduras animais e óleos com baixo índice de transesterificação são aquecidos acima de 280 °C, a queima da glicerina provoca a produção da acroleína, um composto altamente tóxico e cancerígeno.

Estudos visando ao uso racional da glicerina, do ponto de vista econômico e ambiental, vêm sendo desenvolvidos em todo o mundo, podendo-se citar pesquisas que visam seu aproveitamento como suplemento para ração animal, produção de compostos químicos (plásticos, etanol, anticongelantes, éter) e até mesmo energia, pela queima direta ou pela produção de biogás.

25. Mudanças climáticas e regulação

O papel do Estado regulador, no caso do biodiesel, tem se mostrado muito mais importante que no caso do etanol. Em certa medida, é inevitável a comparação entre o estágio atual do biodiesel e os primórdios do programa Proálcool, na década de setenta. No entanto, o papel do estado regulador é mais forte. O Programa Nacional de Produção de Biodiesel - PNPB, ao propor a intro-

40 Em trabalho mais recente elaborado pela Delta CO2 Sustentabilidade Ambiental para a Aprosoja, Abiove e Ubrabio, “observa-se que a porcentagem de redução das emissões de GEE em relação ao diesel europeu ficou entre 68 e 72%. Da mesma forma para o cenário de exportação do biocombustível (Porto de Santos – Porto na EU) a redução (65-68%) está bastante acima do limite mínimo imposto pela Diretiva de Fontes de Energia Renovável (2009/28/EC) a partir de 2010 (35% de redução das emissões em relação ao combustível fóssil). (...) Os resultados são favoráveis ao biodiesel de soja mesmo com a elevação do limite mínimo de redução das emissões previsto para entrar em vigor a partir de 2017 (50%) e 2018 (60%).” (Delta CO2, 2013, pp. 17). Nota-se que esses percentuais também credenciarão o biodiesel de soja a “combustível avançado”, conforme norma RFS2 (Renewable Fuel Standard), de 2012, da EPA (Environmental Protection Agency), nos Estados Unidos.

dução deste biocombustível na matriz energética brasileira como substituto parcial do óleo diesel, embasou-se em três vertentes indissociáveis: econômica, ambiental e social.

Na esfera econômica, o biodiesel deveria diminuir a dependência brasileira nas importações de óleo diesel, criar mercado nacional para a indústria da agroenergia, gerar renda, propiciar investimentos e remunerar o empreendedor. No âmbito social, a renda gerada precisava ser redistribuída, fortalecendo-se a agricultura familiar e incentivando-se a produção (agrícola e industrial) nas regiões brasileiras de baixo índice de desenvolvimento econômico-social. Na questão ambiental, a aposta versava sobre as perspectivas de redução das externalidades negativas oriundas das emissões veiculares (poluentes e CO₂) da combustão nos motores de veículos ciclo diesel de transporte de cargas e coletivo de pessoas.

Na prática, contudo, o programa do biodiesel, face à complexidade relacionada à diversidade de alternativas de matérias primas para sua produção, a questões de uso de solo, à competição com a indústria de alimentos, aos elevados custos produtivos, à frágil logística de suprimento e ao risco de restringir a agricultura familiar a regiões marginais, está requerendo atuação firme do Estado para que os benefícios originais do PNPB, revertidos em externalidades positivas para o consumidor e a sociedade como um todo, não sejam debitados por externalidades negativas geradas pela falta de planejamento estratégico e por ações desordenadas do poder público.

O Estado regulador do biodiesel, com competências constitucionais e atribuições legais para a regulação do mercado onde se insere este biocombustível, tem como papel estrito a proteção do consumidor quanto à qualidade, ao preço e à garantia de suprimento das misturas diesel/biodiesel.

Contudo, a abrangência do biodiesel, como fomentador econômico, social e ambiental, obriga o Estado a ir além de seu importante papel regulatório, remetendo-o à missão mais ampla de formulador de políticas públicas, não se limitando à proteção do consumidor de misturas quanto à qualidade, preço e oferta, mas aumentando o bem-estar geral da sociedade, haja vista o potencial do biodiesel como gerador de riquezas, distribuidor de rendas e protetor do meio ambiente.

O biodiesel, sob a abordagem da sustentabilidade (convergência do foco econômico, social e ambiental) é estratégico para o País. Nesta perspectiva, o papel do Estado apenas regulador, que por determinação legal se restringe às especificações de produto e fiscalização do abastecimento nacional em relação a preços e oferta, mostra-se insuficiente para a consolidação do biodiesel na matriz energética brasileira. Faz-se necessário, também, que o Estado desempenhe seu papel de formulador de políticas públicas de amparo ao biocombustível.

As características do território brasileiro oferecem potenciais vantagens competitivas para tornar o País líder mundial em agroenergia. A experiência adquirida ao longo de décadas com o etanol da cana-de-açúcar precisa ser aproveitada na formulação de políticas públicas para o biodiesel, não apenas para transpor os obstáculos econômicos e ambientais, mas também para efetivamente materializar as promessas de conquistas sociais inseridas no PNPB.

26. Mudanças climáticas e mudança tecnológica

O desenvolvimento da produção de biodiesel e sua utilização como complemento e substituto marginal aos derivados de petróleo, também têm impacto positivo sobre a mudança climática. Os aspectos tecnológicos relacionados à produção do biodiesel passam pela busca de novos métodos e produtos que aumentem a eficiência econômica do produto.

No Brasil, o governo vem incentivando a pesquisa em novas matérias-primas, substitutas ao óleo de soja. Em especial, a Petrobras Combustível vem trabalhando no desenvolvimento de produtos subprodutos do processo produtivo de biodiesel dessas matérias-primas alternativas, com vistas a aumentar a possibilidade de receitas na produção. São exemplos de subprodutos pesquisados:

- torta de mamona: a torta de mamona é um dos produtos resultantes da extração do óleo de mamona. É utilizada como importante fertilizante orgânico em culturas como café, pimenta, cana-de-açúcar, hortaliças, entre outras. Além de ser uma excelente fonte de Nitrogênio, possui importante atividade nematicida, podendo ser usado no controle de nematóides fito parasitas. A Petrobras Biocombustível é hoje a maior produtora de Torta de Mamona do Brasil.
- farelo de girassol: o farelo de girassol é um dos produtos resultantes da extração do óleo de girassol. Excelente fonte de proteínas e de micronutrientes, o farelo de girassol é muito utilizado na formulação de rações para bovinos, ovinos, caprinos e suínos. Também é utilizado na avicultura.
- óleo de girassol: extraído das sementes do girassol, o óleo de girassol tem grande valor nutricional e larga utilização na alimentação humana.
- óleo de mamona: extraído dos grãos da mamona, o óleo de mamona tem grande importância para a indústria, devido às suas características únicas, onde é aplicado em diversos segmentos, tais como: alimentício, farmacêutico, tintas e vernizes, borrachas entre outros. A Petrobras Biocombustível é hoje a maior produtora de Óleo de Mamona do Brasil.
- ácido graxo: o ácido graxo é matéria-prima básica para vários processos industriais: indústria de alimentos, tintas, plásticos, fertilizantes, agroquímicos e cosméticos.

O desenvolvimento de produtos complementares ao biodiesel, como aditivos e óleos industriais, também pode contribuir para viabilizar economicamente determinados segmentos nesse mercado. Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas no sentido de desenvolver tais produtos (INPI, 2008).

27. Análise do impacto das mudanças institucionais e tecnológicas sobre o setor no Brasil

27.1 Síntese das perspectivas tecnológicas e impactos sobre o setor

A Rede Biodiesel, coordenada pela Embrapa, tem por objetivo o desenvolvimento de tecnologias para a produção de mamona, girassol, canola e dendê; aproveitamento de coprodutos da produção de biodiesel; otimização de processos para a obtenção de biodiesel; desenvolvimento de protótipo comercial para produção do biocombustível; competitividade das cadeias produtivas de oleaginosas para a produção de biodiesel.

Nesse contexto, busca-se o desenvolvimento de novas variedades de oleaginosas, de novas formas de plantio, de adubação e de controle de pragas, condição necessária para viabilizar o biodiesel no longo prazo. Entre os aspectos industriais, busca-se a eliminação de substâncias tóxicas da torta da mamona para viabilizar seu uso como ração animal e a purificação e uso da glicerina, que é resultante do processo de fabricação do biodiesel. Novos equipamentos, rotas e catalisadores para a produção de biodiesel também estão sendo estudados. Os resultados podem contribuir para que o Brasil se torne um importante produtor mundial de biodiesel e para que produtores de diversas oleaginosas, como o girassol, a soja, a canola, a mamona e o dendê, possam participar desse mercado. Busca-se também desenvolver tecnologias para aproveitar os resíduos da produção de biodiesel, de forma a agregar mais ganhos, e desenvolver novas rotas industriais de produção de biodiesel.

28. Síntese das restrições ao comércio e ao consumo e impactos sobre o setor

No plano internacional, o biodiesel ainda não se consolidou como um combustível alternativo, como ocorre com o etanol, por conta, principalmente, de sua falta de competitividade frente ao óleo diesel de petróleo, tendo em vista os elevados custos de produção do biocombustível. Nesse sentido, apenas com mandatos obrigatórios e alguma forma de subsídio, a produção do combustível se mantém. No caso brasileiro, as economias de escopo do complexo soja viabilizam subsídios marginais ao biodiesel, inviabilizando, por outro lado, culturas alternativas de maior produtividade de óleo por hectare, como a mamona ou a palma (dendê), mas com custos de produção proibitivos, atualmente.

Desconsiderando-se eventuais subsídios públicos, as atuais tecnologias de fabricação do biodiesel são ainda imaturas, e dependem de preços elevados do petróleo para compensar os custos de produção. Apesar da baixa produtividade, registram-se vários projetos de construção de usinas de processamento, o que tende a elevar sua produção nos próximos anos.

Os principais desafios a serem enfrentados para a expansão do biodiesel incluem a necessidade de elevados investimentos em P&D, voltados para o desenvolvimento de tecnologias de produção agrícola, com a definição de plantas mais aptas, sistemas de produção eficientes e definição de regiões com potencial para a produção. Há, também, necessidade de investimentos em novas tecnologias industriais, que transformem os produtos agrícolas em biodiesel. Se essa questão tecnológica

não for solucionada, a margem de lucro reduzida dos produtores, em função dos custos elevados de produção, pode desestimular a produção do biodiesel, no longo prazo.

O custo maior de produção do biodiesel em relação aos derivados do petróleo exige, também, incentivo tributário. Na Alemanha, maior produtor mundial do biocombustível, a competitividade do produto em relação ao diesel de petróleo é baseada em incentivos fiscais. A introdução do E10 na Alemanha também servirá para reduzir a demanda por biodiesel nesse país.

O comércio internacional de biodiesel deve continuar muito reduzido, tendo em vista os atuais níveis de produção dos países e as exigências locais, que acabam consumindo toda a produção doméstica, não gerando excedentes exportáveis.

29. Objetivos de médio e longo prazo desejáveis para o setor

O programa de biodiesel brasileiro foi, desde o início, concebido como um programa de inclusão social, destinado a fomentar a agricultura familiar. A criação do selo social teve por objetivo garantir que os projetos de grande porte se associassem a projetos de pequeno portes, para atender aos objetivos sociais do programa⁴¹. Entende-se que o mecanismo do selo social pode ser aprimorado com aumento nos requisitos de participação de produtos de pequenos produtores. Com isso, a produção de biodiesel não se aterá ao escoamento da produção dos excedentes de óleo da indústria de soja.

Por outro lado, os ganhos de eficiência desejados para essa indústria, no longo prazo, virão, necessariamente, de pesquisa e desenvolvimento em novas matérias-primas para a produção do biodiesel.

Os leilões promovidos pela ANP garantem o biodiesel necessário para que as metas do PNPB sejam atendidas. Mas limitam sua expansão para além da cadeia produtiva da soja. Uma parcela, a princípio marginal, nos leilões poderia ser destinada a biodiesel de outras fontes, assegurando algum mercado inicial para essas matérias-primas alternativas.

No plano internacional, como já mencionado, o mercado internacional de biodiesel não é um mercado concorrencial puro, com formação de preços livre e transparente. Ao contrário, é um mercado derivado de políticas públicas mandatórias, que criam uma reserva de mercado para as misturas com óleo diesel. Neste caso, o preço de venda do biodiesel deixa de seguir os preços do petróleo. Porém, mesmo com uma concorrência parcial, existem as disputas de preço entre os produtores de biodiesel. Por exemplo, para exportar biodiesel para a Europa, o Brasil precisa mirar no preço do biodiesel de canola, produzido naquele continente, e não no preço do petróleo em Roterdã.

A viabilidade do biodiesel hoje em dia só se sustenta com as políticas mandatórias e diferenciação tributárias em relação ao diesel. A continuidade de tais políticas por algum tempo ainda é condição necessária para o amadurecimento dessa indústria. A necessidade de especificações e padronizações internacionais também introduz dificuldades adicionais ao comércio internacional

⁴¹ Por esse motivo, algumas vezes a manutenção do selo social é apontada como entrave ao desenvolvimento da indústria do biodiesel no Brasil, pois os ganhos de produtividade necessários para o pleno desenvolvimento dessa indústria podem ser limitados por essa opção institucional.

do produto brasileiro. Eventuais mecanismos que favoreçam créditos no mercado de carbono poderiam contribuir para a viabilidade econômica do produto. Existe disposição na sociedade em conferir suporte quase integral às políticas de incentivo ao uso de biocombustíveis. Entretanto, a expansão da área de agricultura de energia em regiões de pouca disponibilidade de área (Europa, EUA, Sudeste Asiático) pode levar à redução da área de alimentos e, em consequência, ao aumento de seu preço, dilemas que a sociedade terá que tratar nos próximos anos.

Finalmente, no que se refere à logística, a viabilização de alternativas econômicas e ambientalmente melhores para o escoamento da produção precisa ser planejada. A construção de rede de dutos, por exemplo, para escoamento do óleo precisa ser viabilizada. Possivelmente, a demanda atual não comporte dutos exclusivos, assim o planejamento de polidutos, que combinem o escoamento de etanol, ou mesmo grãos, poderia ser uma alternativa logística ao biodiesel.

O biodiesel é estratégico para o País, caso este deseje fixar uma imagem de economia e produzir soluções ambientalmente sustentáveis. O Estado tem o papel de ser o agente articulador dos agentes, na medida em que sinalize claramente a opção pelo biodiesel. Ações no sentido de apoiar a pesquisa e o desenvolvimento é fundamental. O Estado, na formulação de políticas públicas para o biodiesel, deve se aprofundar na análise de seu ciclo de vida visando estratégias de médio e longo prazo, com ações factíveis de curto prazo, voltadas para temas como planejamento agrícola, zoneamento agrário, desenvolvimento tecnológico, incentivos tributários, concessão de crédito e planejamento logístico para todas as etapas do ciclo de vida do biocombustível.

Considerações Finais

Em termos gerais, as mudanças decorrentes da adoção de políticas e regulações em direção a uma economia de baixo carbono tendem mais a beneficiar que a prejudicar o setor produtor de biocombustíveis. Isso porque, sejam como substitutos, ou, o que é mais provável, como complementares aos combustíveis fósseis, que devem continuar predominantes no médio prazo, os biocombustíveis ainda são a alternativa menos custosa de combustível renovável.

O Brasil se destaca no contexto da produção de biocombustíveis em razão do seu bem sucedido programa de produção de etanol a partir de cana de açúcar. Esse programa, em mais de quarenta anos, possibilitou a criação de um grande número de centros de pesquisa, produtores rurais, empresas processadora e rede de distribuição, com vista a gerar e distribuir combustíveis e aditivos à gasolina, a partir do etanol. Os sucessivos ganhos de produtividade, ao longo dos anos, na indústria produtora de etanol, atesta o sucesso de longo prazo na estratégia adotada pelo país.

A alternativa de produção escolhida foi favorecida em grande parte pelas condições ambientais e geográficas do país, bem como pelo domínio da cultura da matéria prima. Com mais de quatrocentos anos de manejo da cana, terra em condições e clima adequados, foi possível o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de espécies adaptadas a diferentes condições de clima e solo. Evidentemente que tais aprimoramentos não seriam possíveis sem a existência de redes de pesquisa ligadas a cen-

tros de pesquisa e usinas, que conseguiram, ao longo do tempo, realizar o melhoramento genético da cana e, conseqüentemente, aumentar sua produtividade.

Por tudo isso, o biocombustível obtido a partir da cana representa, e continuará representando, uma grande oportunidade para o país.

No entanto, algumas ponderações devem ser feitas com relação à manutenção da vanguarda tecnológica do país na área. Como bem mostrou a recente estratégia de produção de etanol americana, a suposta supremacia brasileira na área foi rapidamente cedida a eles⁴². A favor deles, deve-se reconhecer o emprego de matéria prima com muito maior teor de açúcar por tonelada produzida, o que, conseqüentemente, implica em maior teor de etanol por tonelada de matéria prima. A favor da cana ainda conta a maior produção de tonelada por hectare plantado. Mas, um possível aumento na produtividade do milho (aumento no número de grãos por espiga, ou ainda, no número de espigas por pés de milho) poderá minimizar as vantagens da cana, ainda no curto prazo.

Também pesa a favor da produção da matéria prima americana a possibilidade de produção de etanol em plantas de maior porte, em razão da possibilidade de armazenamento e transporte do milho em mais longas distâncias que a cana. Isso possibilita que uma usina americana de porte médio produza o dobro ou mais de álcool que uma indústria nacional. Se o futuro dos biocombustíveis, sobretudo do etanol, for baseado em uma indústria multi-produto – uma biorrefinaria, por exemplo – o maior porte das usinas americanas conferirão vantagens àquele país, em razão dos potenciais ganhos de escala, tudo o mais constante.

Os desafios para a produção do etanol de primeira geração no Brasil concentram-se na necessidade de ganhos de produtividade, que podem vir do melhoramento genético dos cultivares; da mecanização da colheita e transporte; da melhoria organizacional das empresas do setor; da adoção de inovações de processo de gestão; da melhoria do transporte de insumos, matéria-prima e produto final.

No que se refere às inovações tecnológicas no setor, as perspectivas de desenvolvimento tecnológicos do setor são promissoras. O país dispõe de infraestrutura de pesquisa em universidades e centros de pesquisa, muitos deles ligados ao setor e suas empresas. A produção de bens de capital para o setor é relativamente desenvolvida. Existem recursos naturais, clima e solo adequados ao desenvolvimento do etanol de 2ª geração.

O maior risco reside no fato de que o resto do mundo e, mais uma vez, os Estados Unidos, estão investindo pesadamente no desenvolvimento tecnológico do etanol de 2ª geração, o que aumentará de maneira significativa a produtividade da bioindústria daquele país. Em termos econômicos puros, os americanos têm a vantagem na adoção da tecnologia de 2ª geração atualmente disponível⁴³. Nesse

42 Não se discute que essa ultrapassagem foi conseguida também por conta de pesados subsídios que deixaram de existir recentemente. Mas, não se deve deixar de reconhecer o esforço internacional, e particularmente dos Estados Unidos, em buscar a liderança tecnológica na área.

43 Como já destacado, aliado aos pesados recursos direcionados à pesquisa e desenvolvimento do etanol de 2ª geração, o maior custo de produção de longo prazo associado ao etanol de primeira geração, partir do milho, também contribui para a adoção mais rápida da tecnologia de 2ª geração. Se a adoção de uma nova tecnologia é viabilizada quando esta iguala o custo de produção da tecnologia atual, o fato de terem uma tecnologia atual mais cara, possibilitaria a eles vantagem na adoção de tecnologia substituta.

caso, para que o Brasil mantenha-se na fronteira tecnológica, é preciso compensar as desvantagens econômicas puras com políticas específicas de incentivos, no sentido de patrocinar os investimentos de empresas privadas nesses projetos, com compromissos de resultados em médio prazo.

Nesse sentido, entende-se que é necessário o aprofundamento das relações entre os agentes existentes (centros de pesquisa, produtores e distribuidores), com vista a adoção do etanol de 2ª geração a partir de biomassa da cana do etanol produzido pela 1ª geração. O papel do governo seria o de sinalizar adequadamente nessa direção, eventualmente criando linhas de financiamento específicas atreladas a resultados de médio e longo prazo para empresas e centros de pesquisa. Eventualmente, alguns instrumentos jurídicos que permitam a execução dessa estratégia terão que ser redefinidos ou mesmo criados.

No que se refere ao comércio internacional, entende-se que o país deve manter sua postura de defesa dos biocombustíveis como produtos a serem produzidos e adotados por todos os países. As estratégias que vêm sendo seguidas, pelos vários países, é a de adotar políticas de adição de etanol à gasolina, atrelada à produção de etanol local. Entende-se que esse é o primeiro passo para o desenvolvimento de um mercado internacional da *commodity* etanol⁴⁴. Nesse quesito, as questões logísticas e de distribuição do produto, limitarão a capacidade de atuação do país, no caso desse mercado se viabilizar rapidamente.

Todas essas medidas não são impossíveis de serem adotadas. Como mencionado, os biocombustíveis, em especial o etanol, representa uma grande oportunidade para o país. Entende-se que o direcionamento regulatório e a ação do estado devam ser no sentido de assegurar ao país a manutenção do seu status diferenciado, econômico e tecnológico, no setor de combustíveis renováveis.

Com relação ao biodiesel, entende-se que o país perdeu a oportunidade de estar na vanguarda tecnológica da produção desse biocombustível, por não ter apostado, no passado, em sua produção. Tal defasagem tecnológica, no entanto, não o distancia muito do que ocorre, atualmente, em outros países. Diferente do etanol, que é empregado como aditivo à gasolina e tem custo de produção menor que esta, o biodiesel é mais caro que o diesel, ao qual é empregado como aditivo. Por essa razão, nos vários países, apenas a existência de mandatos obrigatórios e alguma forma de subsídio à produção é que viabiliza o produto.

No caso da produção de biodiesel brasileiro, busca-se o desenvolvimento de novas variedades de oleaginosas, de novas formas de plantio, de adubação e de controle de pragas, o que é necessário para a viabilidade de sua produção no longo prazo. Em termos estratégicos, o biodiesel brasileiro precisa se desvincular da indústria da soja, obtendo uma matéria prima que gere maior quantidade de óleo por hectare e que possibilite a construção de plantas de maior porte. No exterior, a palma é o principal produto empregado na produção do biodiesel, mas sua adaptabilidade às condições de solo e clima do país ainda não são as adequadas. Também existem restrições ao emprego, em larga

44 Os aspectos de padronização do produto, como já foram discutidos ao longo do texto, serão essenciais para a criação desse mercado. Entende-se que o país, representado pelos produtores de etanol e o governo têm papel importante no sentido de pautar as especificações de produto, em grande parte pela sua experiência nessa área.

escala, de outras culturas como a mamona e o girassol. Novos equipamentos, rotas e catalisadores para a produção de biodiesel também precisam ser desenvolvidos.

Desconsiderando-se eventuais subsídios públicos, as atuais tecnologias de fabricação da bioenergia são ainda imaturas, e dependem de preços elevados do petróleo para compensar os custos de produção. Por essa razão, o comércio internacional de biodiesel deve continuar muito reduzido.

O programa de biodiesel brasileiro foi, desde o início, concebido como um programa de inclusão social, destinado a fomentar a agricultura familiar, e não se vê razão para que não continue a ser. Entende-se que o mecanismo do selo social pode ser aprimorado, aumentando os requisitos de participação de produtos de pequenos produtores. Os ganhos de eficiência desejados para essa indústria, no longo prazo, deverão vir, necessariamente, de pesquisa e desenvolvimento em novas matérias-primas para a produção do biodiesel.

Em linhas gerais, a vantagem brasileira na produção de biocombustíveis, sobretudo o etanol, não está assegurada para o futuro próximo, mesmo no contexto de adoções de políticas de baixo carbono pelos vários países e desenvolvimento do produto como *commodity* internacional. Ainda que o setor possa ser considerado limpo, no sentido do seu balanço de emissões energéticas, isso por si só, não é argumento para assegurar o crescimento e desenvolvimento dessa indústria. Governo e representantes do setor produtor de biocombustíveis têm o desafio de articular as ações necessárias, em quesitos como tecnologia, logística, processos de gestão, tributação e, principalmente, questões institucionais, com vista de assegurar o país na fronteira tecnológica do setor.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo, A., Godoy, R., Bolaños, G., *Increase in ethanol production during fermentation of molasses using the enzymatic complex Rhyzozyme*. In: XXII Congreso Colombiano de Ingeniería Química, Bucaramanga, Colombia (in Spanish).2003.
- Andreoli, C.; Souza, S. P. Cana-de-açúcar: a melhor alternativa para conversão da energia solar e fóssil em etanol: texto para discussão. *Economia & Energia*, ano X, n. 59, p. 27-33, 2006.
- ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Boletim Mensal de Biodiesel, setembro/2011.
- Bai F.W.; Chen L.J.; Anderson, W.A.; M. Moo-Young. Parameter oscillations in a very high gravity medium continuous ethanol fermentation and their attenuation on a multistage packed column bioreactor system. *Biotechnology and Bioengineering*, 88 (5), 2004, pp. 558–566.
- Bastos, V. D. Etanol, álcoolquímica e biorrefinarias. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 25, p. 5-38, mar. 2007.
- Berndes, G; Azar, C.; Kåberger,T.;Abrahamson, D. The feasibility of large-scale lignocellulose-based bioenergy production. *Biomass and Bioenergy*, 20, 2001, pp. 371–383.
- BNDES; CGEE. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.
- Bothast, R.J.; Schlicher, M.A. Biotechnological processes for conversion of corn into etanol. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 67, 2005, pp. 19–25.

- Buainain, A.M.; Batalha, M.O. (org.) Cadeia produtiva da agroenergia, vol. 3, Ministério da Agricultura, Pecuária e Pesca. Brasília, jan. 2007.
- Cardona, C.A.; Sánchez, Ó.J. Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98, 2007, pp. 2415–2457.
- Castro, Nivalde J. de; Dantas, Guilherme de A. Fusões e aquisições no setor sucroenergético e a importância da escala de geração. Texto de Discussão do Setor Elétrico. Rio de Janeiro. 2009.
- Cesar, A. S.; Batalha, M. O. Análise Dos Direcionadores De Competitividade Sobre A Cadeia Produtiva De Biodiesel: O Caso Da Mamona. *Produção*, 21 (03), 2011, pp. 484-497.
- CGEE. “Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo”. Relatório final, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos CGEE-Nipe/Unicamp, dezembro de 2005.
- CGEE. Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil - Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009.
- CGEE. Química verde no Brasil: 2010-2030. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.
- Chagas, A. L. S.; Toneto-Jr., R.; Azzoni, C. R. Teremos que trocar energia por comida? Análise do impacto da expansão da produção de cana-de-açúcar sobre o preço da terra e dos alimentos. *Economia (Brasília)*, 9, 2008, p. 39-61.
- Chandrakant, P.; Bisaria, V.S. Simultaneous bioconversion of cellulose and hemicellulose to ethanol. *Critical Reviews in Biotechnology*, 18 (4), 1998, pp. 295–331
- CTC, Centro de Tecnologia Canavieira. Site oficial: http://www.ctcanavieira.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=94&Itemid=81.
- Delta CO2 Sustentabilidade Ambiental. Pegada de carbono na produção de biodiesel de soja. Período de referência 2008/09. Disponível em http://www.abiove.org.br/site/_FILES/Portugues/07022013-121853-relatorio_acv_do_biodiesel.pdf. Acesso em 16 de abril de 2013.
- Elnashaie, S.S.E.H, Garhyan, P., 2005. *Chaotic fermentation of ethanol*. Patent US2005170483.
- Eloheid, A.; Tokgoz, S.. Removing Distortions in the U. S. Ethanol Market: What Does It Imply for the United States and Brazil? *American Journal of Agricultural Economics*, v.90, n.4, pp. 918-932, Nov. 2008.
- EMBRAPA. Rede Biodiesel. Site Oficial: http://www.cnpf.embrapa.br/agroenergia/pages/dynamicpages.php?page-no=1&geral_id=88.
- Ergun, M., Mutlu, S.F.; Gürel, Ö. Improved ethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* with EDTA, ferrocyanide and zeolite X addition to sugar beet molasses. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 68, 1997, pp. 147–150.
- F.O. LICHT. World Ethanol & Biofuels Report. Várias edições. 2005.
- Fallon, J. K. *Global biofuels will struggle to match ambitious objectives*. Disponível em <http://www.ogj.com/articles/print/vol-110/issue-4/processing/global-biofuels-will.html>. Acessado em abril/2012.
- FAO. *Global cassava market study*. Business opportunities for the use of cassava. Proceedings of the Validation Forum on the Global Cassava Development Strategy, vol. 6. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, 2004.
- FIESP/CIESP. Ampliação da oferta de energia através da biomassa. <Disponível em: http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio_dma.pdf>. Acessado em 16/01/2012.

- Flach, Bob; Lieberz, Sabine; Bendz, Karin e Dahlbacka, Bettina. *GAIN Report EU Annual 2011*. USDA Foreign Agricultural Services, June 2011.
- Furtado, A. T. ; Cortez, L. A. B.; Scandiffio, M. I. G. *O sistema de inovação da agroindústria canavieira brasileira*. VII ESO-CITE, 2008.
- Hoffmann, R. Segurança alimentar e produção de etanol no Brasil. *Segurança Alimentar e Nutricional*, n. 13, 2006, p. 1-5.
- Hojo, O.; Hokka, C.O.; Souto Maior, A.M. Ethanol production by a flocculant yeast strain in a CSTR type fermentor with cell recycling. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 77–79, 1999, pp. 535–545.
- IAC – Instituto Agrônômico. Site oficial: <http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/cana/centrocana.php?pg=historicocana>
- INPI. Mapeamento tecnológico do biodiesel e tecnologias correlatas sob o enfoque dos pedidos de patentes. Volume I – Mundo. Maio de 2008.
- João, I. S.; Porto, G. S., Galina, S. V. R. A posição do Brasil na corrida pelo etanol celulósico: mensuração por indicadores C&T e programas de P&D. *Revista Brasileira de Inovação*, Campinas (SP), 11 (1), pp.105-136, janeiro/junho 2012
- Kosaric, N.; Velikonja J. Liquid and gaseous fuels from biotechnology: challenge and opportunities. *FEMS Microbiology Reviews*, 16, 1995, pp. 111–142.
- Kosaric, N.; Velikonja, J. Liquid and gaseous fuels from biotechnology: challenge and opportunities. *FEMS Microbiology Reviews*, 16, 1995, pp. 111–142.
- Laluce C.; Souza, C.S.; Abud, C.L.; Gattas, E.A.L.; Walker, G.M. Continuous ethanol production in a nonconventional five-stage system operating with yeast cell recycling at elevated temperatures. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 29, 2002, pp. 140–144.
- Lee, J. Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol. *Journal of Biotechnology*, 56, 1997, pp. 1–24
- Leiras, A. *A Cadeia Produtiva do Biodiesel: uma avaliação econômica para o caso da Bahia*. Dissertação de Mestrado. PUC-RJ, 2006.
- Lin , Y.;Tanaka, S. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 69, 2006, pp. 627–642.
- Lynd, L.R. Overview and evaluation of fuel ethanol from cellulosic biomass: technology, Economics, the Environment, and Policy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 21, 1996, pp. 403–465.
- Macedo, I. C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 14, pp. 77-81, 1998.
- Macedo, I. C.; Seabra, J. E. A.; Silva, E. A. R. Greenhouse gas emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 32, pp. 582-595, 2008.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Zoneamento Agroecológico da Cana-de-açúcar. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2009. Disponível em : <http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento_cana_de_acucar /ZonCana.pdf>.
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; SAPCANA - Sistema de Acompanhamento de Produção Canavieira, 2011. Disponível em: < <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/pages/SAPCANA.html>>.
- Mattei, L. F. Programa Nacional para produção e uso do biodiesel no Brasil (PNPB): trajetória, situação atual e desafios. *BNB. Documentos Técnicos Científicos*. 41 (04), 2010.

- Maye, J.P., 2006. Use of hop acids in fuel ethanol production. Patent US2006263484
- Mello, F. O. T. *As metamorfoses da rede de poder agroindustrial sucroalcooleira paulista: da regulação estatal para a desregulamentação*. São Carlos: UFSCar, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. 175 p.
- Mendes e Costa, Mercado brasileiro de biodiesel e perspectivas futuras. BNDES Setorial 31, p. 253-280, mar. 2010.
- Mendonça, R. M. L. Avaliação de ciclo de vida do carbono na queima de biodiesel à base de óleo de soja. Universidade de Brasília (Dissertação de Mestrado). 2007.
- Milaré, Ê. Direito do Ambiente: doutrina, jurisprudência e glossário. 3.ed. atual. e ampl. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2004. p. 1032.
- Narendranath, N.V., Thomas, K.C., Ingledew, W.M., 2000. Use of urea hydrogen peroxide in fuel alcohol production. Patent CA2300807.
- Nassar, A. M (coord). Benchmark of cane-derived renewable jet fuel against major sustainability standards. ICONE. Jul/2012.
- Neves, M.F.; Conejero, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. *Economia Aplicada*, 11 (4), 2007, pp. 587-604.
- Nyko, D. et al. Determinantes do baixo aproveitamento do potencial elétrico do setor sucroenergético: uma pesquisa de campo. BNDES Setorial, 33, pp. 421-476, 2011.
- Oliveira, M. D. Sugarcane and ethanol production and carbondioxide balances. In; Pimentel, D. (Ed.) *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems*. New York: Springer, 2008.
- Oliveira, M. D.; Vaughan, B. E.; Rykiel-Jr., E. J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances and ecological footprint. *BioScience*, Washington, v. 55, pp. 593-602, 2005.
- Patzek, T.W.; Anti, S.-M.; Campos R.; Ha, K.W.; Lee, J.; Li, B.; Padnick, J.; Yee, S.-A. Yee Ethanol from corn: Clean renewable fuel for the future, or drain on our resources and pockets? *Environment, Development and Sustainability*, 7, 2005, pp. 319–336.
- Paulillo, L. F.; Mello, F. O. T.; Vian, C. E. F. *Análise da competitividade das cadeias de agroenergia no Brasil*. In: Buainain, A. M.; Batalha, M. O. (Coord.). *Análise da competitividade das cadeias agroindustriais brasileiras*. São Carlos: DEP-UFSCAR/IE-UNICAMP, fev. 2006. 119 p. (Projeto MAPA/IICA).
- Paulillo, L. F.; Vian, C. E. F.; Shikida, P. F. A; Mello, F. T. Álcool combustível e biodiesel no Brasil: quo vadis?. *Revista de Economia e Sociologia Rural*. 45 (3), 2007, pp. 531-565.
- PECEGE. *Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol no Brasil: fechamento da safra 2010/2011*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas/Departamento de Economia, Administração e Sociologia. 2011. 141 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA.
- Pimentel D.; Patzek, T. Ethanol production: energy and economic issues related to U.S. and Brazilian sugarcane. In; Pimentel, D. (Ed.) *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems*. New York: Springer, 2008.
- Pimentel D. Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. *Natural Resources Research*, 12 (2), 2003, pp. 127–134.
- RENEWABLE FUELS AGENCY. The gallagher review of the indirect effects of biofuels production. London: Renewable Fuels Agency, 2008.

- RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. *Accelerating industry innovation – 2012 industry outlook*. 2012. Disponível em <<http://www.ethanolrfa.org>>.
- RIDESA, Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. Site oficial: <http://www.ridesa.com.br/?pagina=historico>
- Sabbag, B. K.. O protocolo de Quioto e seus créditos de carbono: manual jurídico brasileiro de mecanismo de desenvolvimento limpo. São Paulo: LTr, 2008. p.30.
- Sánchez, O.J.; Cardona, C.A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, 99(13), 2008, pp. 5270-5295.
- Scaramuzzo, M. Estrangeiros avançam nos canaviais. *Valor Econômico*. São Paulo, Ano 10, n. 2290, p. B12, 30/06/200.
- Scarlat, N. and Dallemand, J.-F. Recent developments of biofuels/bioenergy sustainability certification: A global overview. *Energy Policy*. Vol. 39 (3), 2011, pp. 1630-1646.
- Schuchardt, U.; Sercheli, R.; Vargas, R. M. Transesterification of Vegetable Oils: a Review, *Journal of Brazilian Chemistry Society*, 9 (1), 1998.
- Scott, R. R. e Junyang, Jiang. *GAIN Report India Biofuels Annual 2011*. USDA Foreign Agricultural Services, July 2011.
- Shapouri, H.; Duffield, J.A.; Wang, M. The energy balance of corn ethanol revisited. *Transactions of the ASAE*, 46 (4), 2003, pp. 959–968.
- Soares, L. H. B; Alves, B. J. R.; Urquiaga, S.; Boddey, R. M. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. *Embrapa*, Circular Técnica 27. Seopédica, RJ, 2009.
- Staduto, J. A.; Shikida, P. F. A. ; Bacha, C. J. C. Alteração na Composição da Mão-de-obra Assalariada na Agropecuária Brasileira. *Agricultura em São Paulo*, v. 51, n. 2, 2004, p. 57-70.
- Thomas, V.M.; Kwong A. Ethanol as a Lead Replacement: Phasing Out Leaded Gasoline in Africa. *Energy Policy*, 29, 2001, pp. 1133-1143.
- Toneto-Jr., R.; Liboni, L.B. *Mercado de Trabalho da cana-de-açúcar*. Anais do I Workshop do Observatório do Setor Sucroalcooleiro. Ribeirão Preto, 2008.
- Toneto-Jr., R.; Palomino, J. M.; Liboni, L.B. Estudo da competitividade da indústria paulista: setor sucroalcooleiro. Nota Técnica 2. Mimeo, 2008.
- Urquiaga, A; Alves, B. J. R.; Boddey, R. M. Produção de biocombustíveis – a questão do balanço energético. *Revista de Política Agrícola*. Brasília, v. 14, pp. 42-46, 2005.
- Vian, C. E. de F. *Agroindústria canavieira: estratégias competitivas e modernização*. Campinas: Átomo, 2003. 216p.
- Vian, C. E. F. Expansão e diversificação do complexo agroindustrial sucroalcooleiro no Centro-sul do Brasil – 1980/96. São Carlos, 1997. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos.
- Waack, R. S.; Neves, M. F. Competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar. In Farina, E. M. M. Q; Zylbersztajn, D. (Coord). *Competitividade no agribusiness brasileiro*. Volume V. IPEA, PENSA, USP. 1998.
- Zhang, Y.-H.P.; Lynd, L.R. Toward an aggregated understanding of enzymatic hydrolysis of cellulose: noncomplexed cellulose systems. *Biotechnology and Bioengineering*, 8 (7), 2004, pp. 797–824.

Bioenergia e Biorefinarias

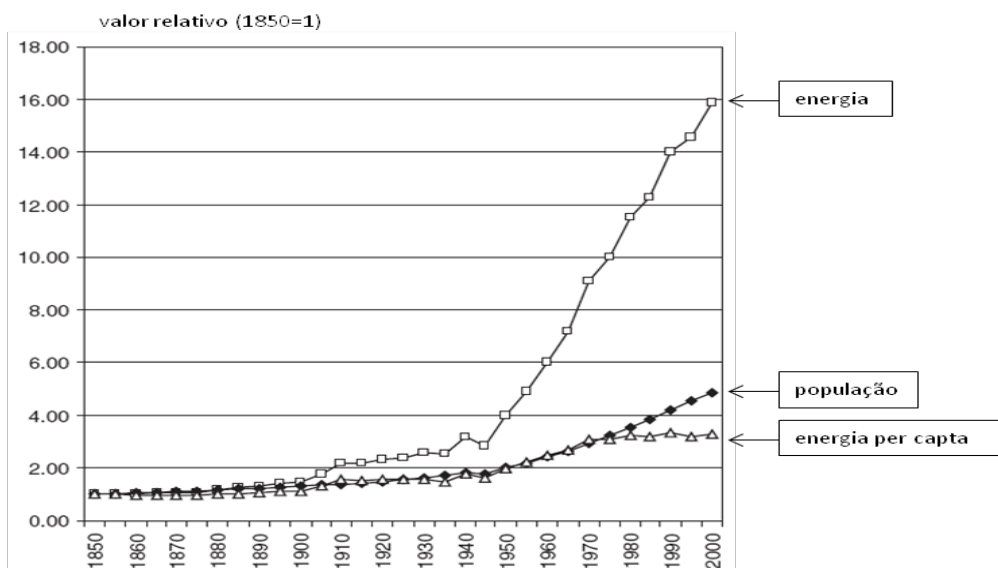
Márcia R. Osaki
Beatriz Selan
Paulo Seleglim Jr.

Introdução

A necessidade de fornecer energia em escala cada vez maior e simultaneamente de maneira econômica e sustentável resulta em um desafio extremamente complexo para a humanidade cuja solução tem como condição *sine qua non* a articulação de diversas áreas das ciências básicas e engenharias, além de políticas de estado estruturadas e de longo prazo. Um olhar retrospectivo sobre as fontes de energia usadas pela humanidade desde sua pré-história revela que, claramente, o início da revolução industrial marcou uma profunda mudança entre o desenvolvimento incremental de fontes de baixa potência para rápidos avanços a partir de fontes de alta potência. Passamos da queima de lenha para o reator nuclear em pouco mais de um século. No cerne desta transformação disruptiva está nossa capacidade de ampliar a matriz energética, tanto em termos de volume quanto em termos de potência, através da aplicação de conhecimentos científicos e da tecnologia.

Assim como a oferta de água potável ou de leitos hospitalares, o consumo de energia *per capita* está fortemente correlacionado ao tamanho de população e a seu bem estar geral. Mais precisamente, o acesso a maiores volumes de energia torna possível à sociedade suportar maiores populações adequadamente nutridas, com saúde e em níveis de escolaridade progressivamente maiores. Esta afirmação pode ser corroborada pela análise quantitativa do crescimento da população mundial entre 1850 e 2000 e o correspondente crescimento da produção de energia, cf. mostrado no gráfico da figura seguinte.

Figura 1 Evolução histórica da população mundial, produção de energia e consumo de energia per capita normalizados em relação aos valores de 1850.



Fonte: Energy Information Administration – DOE/USA

Quatro períodos distintos podem ser identificados quanto à produção de energia, cada um deles resultado de mudanças tecnológicas e/ou sociais de abrangência mundial. Entre 1850 e 1900, em alguns países, iniciou-se um processo intensivo de industrialização associado ao desenvolvimento de malhas ferroviárias e ao transporte marítimo. Porém, a maior parte da população não dispunha dos recursos financeiros que garantissem acesso às riquezas que estavam sendo produzidas neste processo, de modo que o efeito nos valores de energia per capita foi pouco significativo. Neste período, o crescimento da produção de energia atrelou-se ao crescimento vegetativo da população com o desenvolvimento de novas fontes de energia, sobretudo como a exploração mais intensiva do carvão, petróleo e gás natural. Pela sua “escalabilidade” e diversificação, a partir de 1900 até 1950 o acesso a estas fontes de energia tornou-se universal resultando em um aumento da produção sobre o aumento da população, com conseqüente aumento da energia per capita para o dobro do valor de 1850. No forte período de expansão econômica do pós-guerra, entre 1950 até 1975, houve um grande aumento da produção de energia, em volume e intensidade, e, novamente, a energia per capita seguiu o crescimento populacional. Finalmente, entre 1975 até o ano 2000, a possibilidade de exaustão das reservas de petróleo impôs limites no aumento do volume total de energia produzida, o que resultou em sucessivos choques de preços. Isto, por sua vez, estimulou o desenvolvimento de processos e tecnologias energeticamente mais eficientes de maneira que a energia per capita cresceu a taxas bastante inferiores relativamente ao crescimento populacional. Atualmente, tendo em vista que a preocupação com o desenvolvimento de tecnologias energética e ambientalmente eficientes foi incorporada pelos profissionais responsáveis, assim como pela sociedade em geral, o que implica em um certo grau de saturação do desenvolvimento nesta área, este descolamento da energia per capita sugere o início de uma fase de demanda fortemente reprimida, sobretudo nos países menos desenvolvidos.

Isto fica bastante claro com a análise da correlação entre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo de energia per capita. O IDH incorpora fatores como expectativa de vida, nível de escolaridade, distribuição de renda, PIB per capita, taxas de pobreza e qualidade ambiental, e é normalizado numa escala de 0 a 1. Países com IDH próximo de zero possuem uma péssima qualidade de vida como Moçambique e Serra Leoa (IDHs de 0,336 e 0,410 respectivamente). Ao contrário, países com IDH próximo de 1 possuem excelente qualidade de vida sendo que a Noruega é a primeira colocada com um IDH de 0,968. A relação entre o IDH e o consumo de energia per capita, mostrado na figura seguinte, revela diversas tendências interessantes. A principal delas é que há uma relação direta entre IDH e consumo de energia, conforme antecipado anteriormente, porém há uma nítida saturação a partir de aproximadamente 2500 kgoe/pessoa. Mais precisamente, a partir deste valor de consumo de energia per capita, não há melhoria significativa em termos de qualidade de vida. O Brasil possui um IDH próximo de 0,7 e um consumo de energia per capita em torno de 1067,8 kgoe/pessoa o que coloca em perspectiva nossa real situação em termos de qualidade de vida.

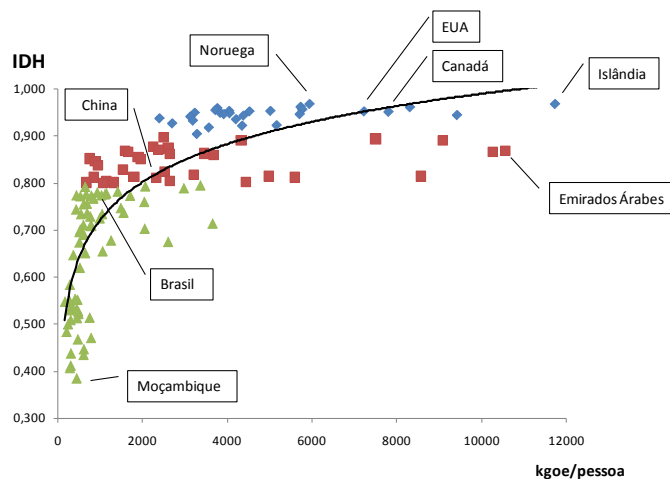
Outro aspecto bastante relevante refere-se à seguinte questão: é possível elevar o IDH dos países menos desenvolvidos para valores em torno de 0,9 dado que os recursos energéticos mundiais são limitados? Partindo da população atual de cerca de 7 bilhões de pessoas e fixando uma meta de

consumo per capita de 2500 kgoe/pessoa, o que teoricamente elevaria o IDH para o patamar de 0,9, obtém-se um consumo total de $628 \cdot 10^{15}$ kJ o que significaria aumentar em cerca de 33% a atual produção mundial de energia. Apesar de alcançável, esta meta está mais longe do que parece porque a população ainda está aumentando a altas taxas, sobretudo nos países nos quais o IDH é mais baixo, Índia e China por exemplo e a necessidade de contar com reservas fósseis de energia o que implica em impactar o ambiente e, conseqüentemente, influenciar negativamente o IDH.

A gravidade deste quadro tem motivado a comunidade internacional que, através do relatório Brundtland publicado em 1987 no âmbito da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, definiu metas para o desenvolvimento sustentável e parâmetros para sua aferição. Assim, conforme este relatório, a relação entre energia, riqueza e bem estar social pode ser mais bem compreendida a partir de uma análise mais detalhada dos seguintes parâmetros:

- E/P – Total de energia consumida relativamente ao total da população, reflete o acesso individual a bens, alimentos e serviços (educação, saúde, iluminação, água, etc.) energeticamente intensos
- PIB/P – Produto Interno Bruto relativamente ao total da população, reflete o acesso individual às riquezas geradas pela economia

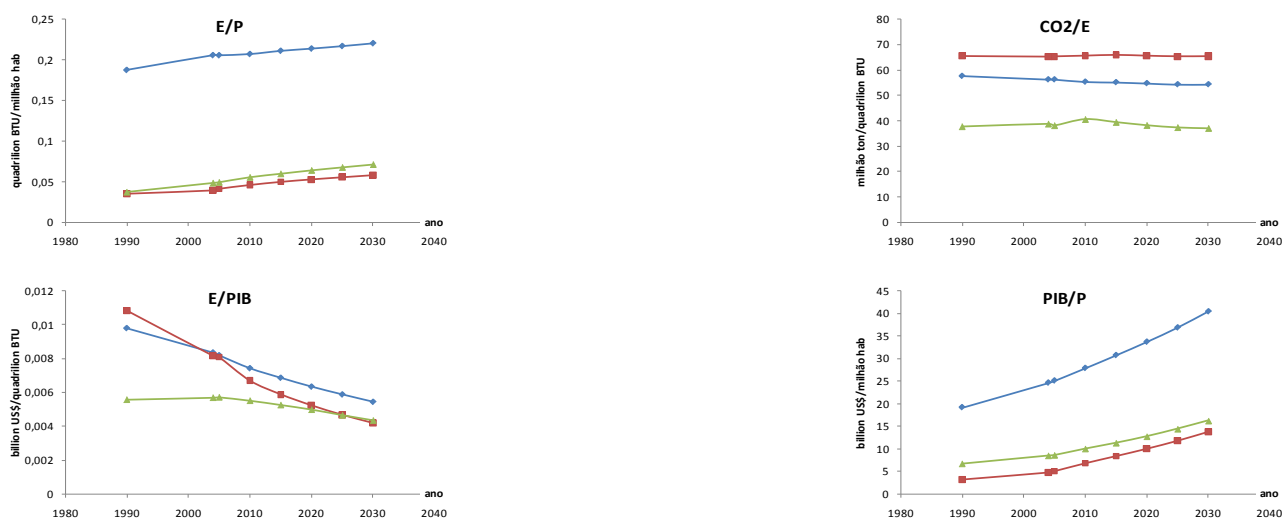
Figura 3 Relação entre o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e o consumo de energia per capita em quilogramas de equivalente em óleo para diversos países. (Legenda: países com IDH entre 0,901 e 1,000 (◆), entre 0,900 e 0,801 (■) entre 0,000 e 0,800 (▲).



- E/PIB – Energia total consumida relativamente ao Produto Interno Bruto, indica a demanda energética na geração de riquezas (uma empresa fornecedora de softwares pode gerar muita riqueza com um gasto mínimo de energia)
- CO₂/E – Total de emissões de CO₂ relativamente à energia total consumida, reflete a eficiência ambiental na produção de energia

Estes parâmetros podem ainda ser levantados para o grupo dos países mais ricos (OCDE – EUA, Europa, Japão, etc.) e em desenvolvimento (não-OCDE – México, China, Índia, Brasil, etc.), com destaque para os indicadores brasileiros, conforme mostrado na figura seguinte. As projeções até ano de 2030 foram obtidas a partir dos modelos do caso de referência publicados no “International Energy Outlook” de 2008 publicado pelo Departamento de Energia do governo dos EUA (www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html).

Figura 2 Evolução de alguns dos parâmetros indicadores sociais relacionados à energia para os países da OCDE (◆), não-OCDE (■) e Brasil (▲).



Analisando o gráfico da evolução da energia per capita (E/P) fica evidente o descolamento do Brasil em relação aos demais países menos desenvolvidos, embora ainda estejamos muito distantes dos países mais ricos. Este aumento na taxa de consumo de energia per capita deverá ocorrer, para o Brasil, à custa das menores emissões poluentes relativamente tanto aos países da OCDE quanto não-OCDE, conforme se pode concluir do gráfico CO_2/E . Esta perspectiva é consequência da matriz energética brasileira estar atualmente alicerçada em cerca de 45% de fontes renováveis e na hipótese de que os programas nacionais de biocombustíveis e geração termoelétrica a partir de biomassas se consolidem de maneira a suprir o aumento projetado da demanda. A análise da demanda energética relativamente ao PIB (E/PIB) mostra que o Brasil tende lentamente para a geração de riquezas a partir de processos menos intensivos em energia, como é o caso dos países da OCDE, embora uma equiparação aos países mais ricos somente ocorreria num futuro bastante distante. Os países menos ricos, por outro lado, estão num processo de franca intensificação da demanda energética, influenciados pela China e Índia que expandem suas economias principalmente a partir de fontes não renováveis. Nosso pior resultado ocorre na análise do PIB per capita (PIB/P) que tende lentamente para a relação dos países menos ricos e reflete um problema crônico de distribuição de renda.

Os indicadores apresentados acima mostram claramente como todo esse processo gera demanda por energia e, igualmente, como a repressão dessa demanda pode afetar negativamente o desenvolvimento das nações e o bem estar social. Portanto, estamos diante de três grandes desafios que podem ser resumidos em: 1) universalizar os benefícios e o acesso à energia, 2) assegurar uma transição equilibrada da atual matriz energética, baseada preponderantemente em recursos à beira da exaustão, para uma nova matriz baseada em fontes renováveis e 3) prevenir possíveis danos ambientais decorrentes dessa nova matriz energética, bem como remediar os impactos já causados, principalmente devido à emissão de carbono fóssil.

1. Matriz energética mundial e brasileira

Segundo o “International Energy Outlook” de 2008¹, a evolução dos diversos setores associados à energia será fortemente marcada pela transição da matriz energética, sobretudo pelo aumento da fração relativa às diversas fontes renováveis. O “Intergovernmental Panel on Climate Change – United Nations Environment Programme” (IPCC – UNEP) tem publicado previsões feitas a partir de diferentes modelos e hipóteses. Em particular duas destas previsões são interessantes para o caso brasileiro uma vez que consideram um cenário em que as preocupações ambientais são preponderantes, incluindo progressos tecnológicos substanciais e forte cooperação internacional nas questões de alterações climáticas. Outra característica compatível com as possibilidades do Brasil é a incerteza quanto ao prosseguimento ou não do nosso programa nuclear, considerado nas variações C2 e C1, conforme mostrado na figura seguinte.

Seja como for, em todos estes cenários pode-se antecipar com muita segurança que a matriz energética se dividirá de maneira aproximadamente equitativa entre combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás) e renováveis (eólica, hidráulica, solar e biomassas). Para o Brasil em específico é seguro afirmar que a fração correspondente às fontes oriundas de biomassa será substancialmente maior em função de nossas características geomorfológicas. Uma forte indicação desta perspectiva decorre de nossa atual matriz energética já fortemente baseada em fontes renováveis, conforme mostrado na figura seguinte.

Adicionalmente às questões da matriz energética, o perfil de demanda por energia constitui igualmente um fator determinante na evolução dos mercados de trabalho nesta área, bem como para o desenvolvimento tecnológico. Ganhos de eficiência de conversão e utilização da energia têm o potencial de reduzir as necessidades energéticas para uma mesma tarefa e, conseqüentemente, auxiliam na preservação das fontes não renováveis e na mitigação dos impactos ambientais decorrentes. Tais ganhos podem advir da reengenharia dos atuais processos com incorporação de novos materiais, maior conhecimento fenomenológico, por exemplo, bem como da introdução de soluções inovadoras para problemas clássicos. As aplicações envolvendo iluminação constituem um cenário bastante ilustrativo dos efeitos da in-

1 www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html

trodução de uma tecnologia disruptiva. Atualmente, a iluminação baseia-se majoritariamente em tecnologias de incandescência e fluorescência, com preponderância da primeira no setor residencial e do segundo no setor comercial. A viabilização tecnológica e econômica das fontes de luz de estado sólido, energeticamente muito superiores às anteriores, promete modificar totalmente este quadro com substituição quase que total das lâmpadas incandescentes. A figura abaixo mostra uma estimativa da relação percentual das tecnologias utilizadas neste setor até o ano de 2095, publicada em um relatório do Instituto Batelle feito para o Programa Global de Estratégias Energéticas do governo dos EUA.

Figura 4 Cenários de evolução da matriz energética mundial considerando que serão introduzidas taxas para promover a expansão dos renováveis e melhora na eficiência final de uso energético (Goldemberg, 2008).

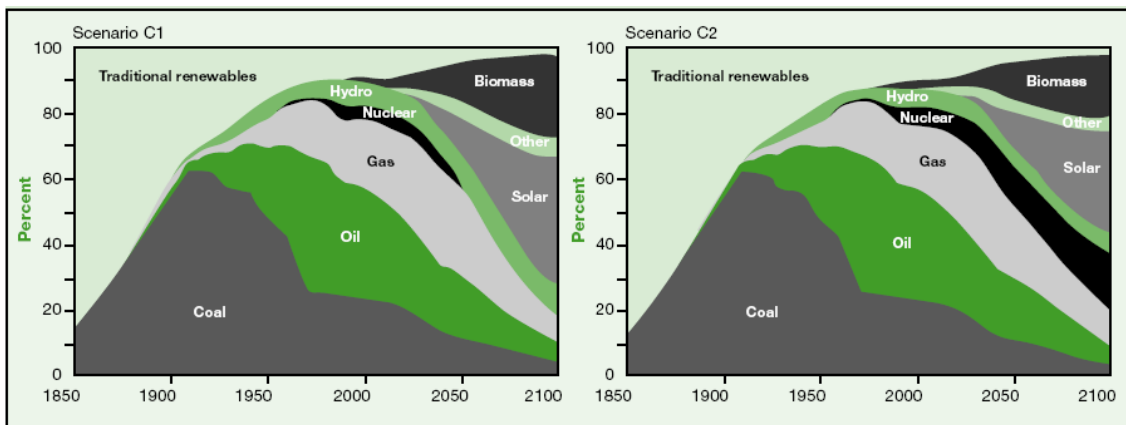


Figura 5 Matriz energética brasileira e mundial (outras fontes incluem energia solar, eólica, geotérmica, etc.)

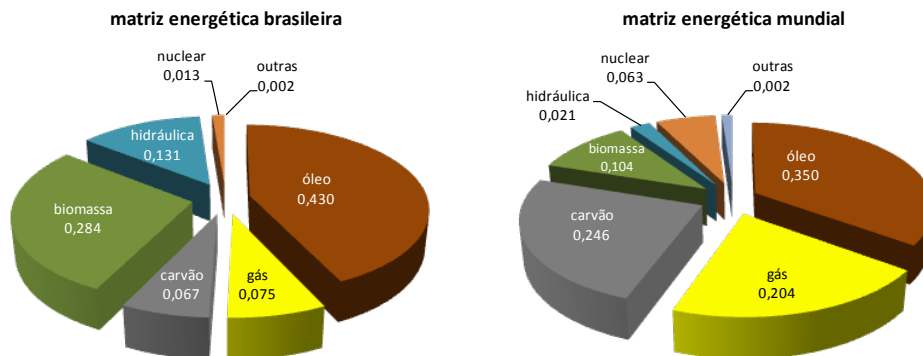
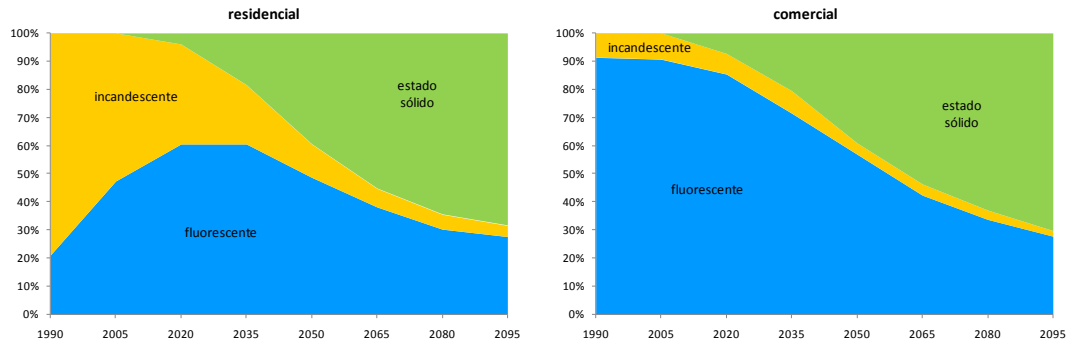
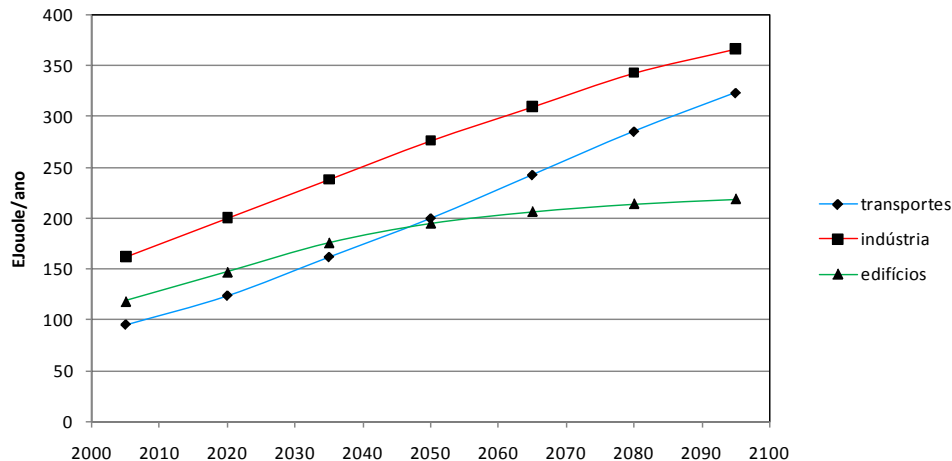


Figura 6 Evolução das tecnologias utilizadas no setor de iluminação
(End-Use Energy Technologies, Edmonds J.A. et al., 2007)



Os desafios associados à utilização da energia e as principais estratégias para sua superação podem ser melhor compreendidos considerando três grandes grupos de aplicação: edifícios, transporte e indústria. A evolução do consumo de energia nestes setores será influenciada por diversos fatores inter-relacionados dentre os quais se destacam o aumento do bem estar social, sobretudo dos países em desenvolvimento, mudanças de padrões de uso de terras, maior demanda por viagens de longa distância, intensificação e universalização do uso de aparelhos eletro-eletrônicos, etc. Atualmente, o consumo total de energia se divide de maneira mais ou menos equitativa, embora esteja previsto um aumento progressivo no setor de transporte e uma diminuição da demanda no setor de edificações até o ano de 2095, cf. mostrado no gráfico da figura seguinte.

Figura 7 Evolução da demanda energética por setor de aplicação
(End-Use Energy Technologies, Edmonds J.A. et al., 2007)



O setor de edificações é extremamente variado, incluindo residências familiares, condomínios e prédios de apartamentos, até shopping centers, edifícios de escritórios, prédios indus-

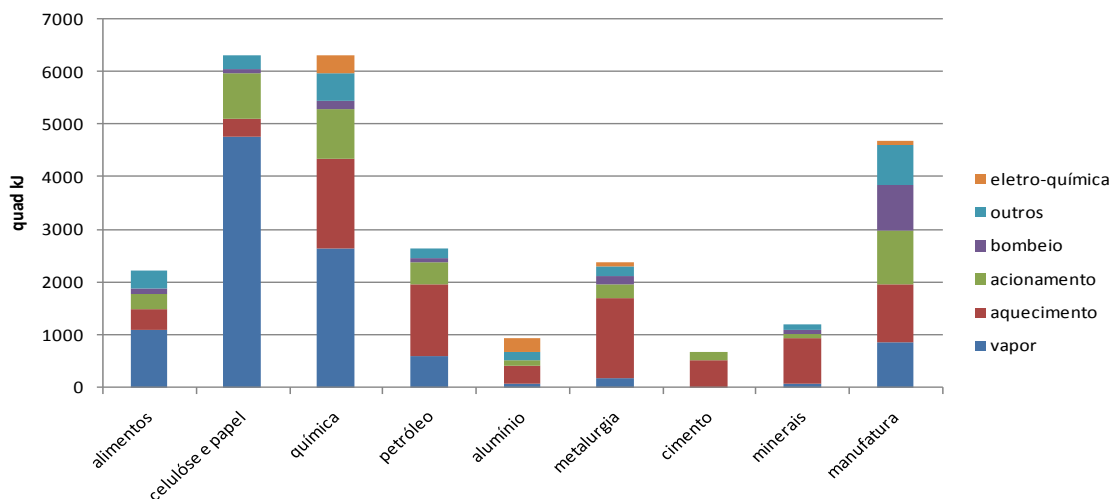
triais, armazéns refrigerados, etc. Embora haja necessidades específicas para cada um destes grupos, iluminação, climatização de ambientes e equipamentos eletro-eletrônicos são demandas comuns em praticamente todos eles. A tendência de menor utilização de energia no setor de edificações relativamente aos outros é decorrente da incorporação de tecnologias energeticamente mais eficientes como o uso de bombas de calor em sistemas de calefação, além de novos materiais e insumos como a aplicação de filtros de infravermelho em áreas envidraçadas, por exemplo. Além disso, o emprego de sistemas inteligentes para controle de iluminação, movimentação de elevadores e outros também tem contribuído significativamente para a redução relativa da demanda de energia no setor de edificações.

As projeções da demanda energética no setor de transportes apontam para um forte crescimento nas próximas décadas motivado pela maior movimentação de pessoas e cargas na medida em que os países em desenvolvimento forem alcançando patamares mais altos de desenvolvimento econômico, especialmente Brasil, China e Índia. Nesse caso, a utilização de energia está essencialmente às tecnologias de propulsão utilizadas: motores de combustão interna, motores a reação, motores elétricos, etc. A não ser pela chamada célula combustível, os avanços neste setor devem ocorrer de forma incremental tanto em termos de desempenho e eficiência energética quanto em termos de emissões poluentes. Além disso, os atuais e futuros motores provavelmente serão majoritariamente movidos a combustíveis líquidos uma vez que ainda são imbatíveis em termos de armazenagem energética. O etanol e o biodiesel representam uma importante tecnologia ponte para o desenvolvimento sistemas de armazenagem mais eficientes. Atualmente um reservatório para gases a altas pressões é capaz de carregar somente cerca de 10% de seu peso próprio, ou seja, para armazenar 10kg de H₂ para uma célula combustível é necessário um tanque pesando 100kg. Problema semelhante ocorre com as baterias elétricas para veículos elétricos; além da baixa autonomia devido ao peso excessivo, o grande tempo de recarga e alto custo ainda comprometem seriamente a competitividade desta tecnologia.

O setor industrial é extremamente vasto, variado e heterogêneo. Alguns processos demandam relativamente pouca energia ao passo que outros, como o refino de petróleo e a fabricação de insumos químicos, têm na energia o seu principal item de custo, normalmente superando salários e matéria prima. Apesar desta variabilidade, a energia demandada se destina a alguns poucos serviços como a geração de vapor, aquecimento, acionamento mecânico, bombeio de fluidos, processos eletroquímicos, etc. O gráfico da figura seguinte mostra a demanda total por setor industrial e serviços nos EUA no ano de 2007, cf. dados do US Department of Energy. Estes dados mostram que, de uma maneira geral, os serviços associados à área térmica (vapor e aquecimento) e à área de máquinas (acionamento) são preponderantes. Atualmente, estes serviços já incorporaram as mais recentes tecnologias de forma que as eficiências energéticas atuais são relativamente altas. Por exemplo, as melhores eficiências energéticas alcançadas na produção de vapor a partir da combustão de gases, óleo ou biomassa giram em torno de 80% enquanto a eficiência de motores elétricos pode ultrapassar 90%. Assim, ganhos de eficiência energética deverão ocorrer de forma incremen-

tal a partir da incorporação de novas tecnologias e materiais. É o caso das membranas de separação molecular em substituição aos sistemas de separação por destilação em indústrias químicas e petroquímicas que requerem grandes quantidades de vapor.

Figura 8 Consumo de energia por serviço nos principais setores industriais em 2007 nos EUA (US Department of Energy)



2. Alternativas para a geração de energia a partir de fontes renováveis

A energia renovável é a energia que vem de recursos naturais como sol, vento, chuva, marés e energia geotérmica que são recursos renováveis (naturalmente reabastecidos). São incluídos também a eletricidade e calor gerados a partir do sol, vento, oceano, hidroelétricas, biomassa, recursos geotérmicos e os biocombustíveis e o hidrogênio derivado de fontes renováveis. A energia renovável substitui combustíveis convencionais em quatro áreas distintas: geração de eletricidade, aquecimento da água, combustíveis e eletrificação rural.

A energia solar pode ser absorvida como a biomassa (fotossíntese), energia hidráulica (evaporação), eólica (ventos) e fotovoltaica, que contêm imensa quantidade de energia e que são capazes de se regenerar por meios naturais.

2.1. Energia eólica

A energia eólica está entre as tecnologias de energia renovável de mais rápido crescimento, com capacidade instalada aumentando a uma média de 30% ao ano desde 1992. É dela a maior parcela da geração de eletricidade de fontes renováveis adicionada nos últimos anos.

Em 2009 a capacidade mundial de geração de energia elétrica através da energia eólica foi de aproximadamente 158GW, o suficiente para abastecer as necessidades básicas de dois países como o Brasil (o Brasil demandou em média 70GW em janeiro de 2010). Para se ter uma ideia da magni-

tude da expansão desse tipo de energia no mundo, em 2008 a capacidade mundial foi de cerca de 120 GW e, em 2007, 59 GW.

A capacidade de geração de energia eólica no Brasil vem aumentando ano a ano. Em 2008 era de 341MW, em 2009 passou 606 MW, e em 2010 atingiu o valor de 920MW. O Brasil responde por cerca da metade da capacidade instalada na América Latina, mas representa apenas 0,38% do total mundial.

Desde 2010 a China é o maior produtor de energia eólica. Em 2011 o total instalado nesse país ultrapassava 62GW, representando um aumento de 41% sobre a produção de 2010.

Em alguns países, a energia elétrica gerada a partir do vento constitui parcela importante na matriz. Na Dinamarca representa 23% da produção, 6% na Alemanha e cerca de 8% em Portugal e na Espanha (dados de setembro de 2007). Globalmente, a energia eólica não ultrapassa o 1% do total gerado por todas as fontes.

2.2. Energia Hidrelétrica

A hidroeletricidade converte a energia potencial gravitacional da água represada nas barragens através de turbinas diretamente para energia elétrica, não requerendo o uso de combustíveis. A queda d'água pode ser natural, como na Usina de Paulo Afonso, ou artificial, criada por uma barragem como na Usina Hidrelétrica de Tucuruí e na Usina Hidrelétrica de Itaipu. A queda também pode ser pequena, como no caso de uma usina maremotriz, que utiliza apenas o desnível das marés.

A energia hidrelétrica continua a ser o recurso renovável mais desenvolvido em todo o mundo: responde, hoje, pela maior parte (85%) da produção de eletricidade renovável e é uma das tecnologias disponíveis de geração de custo mais baixo.

O potencial teórico da energia hidrelétrica é da ordem de 40.000 terawatts-hora por ano (World Atlas, 1998). Considerando-se critérios econômicos e de engenharia, o potencial técnico estimado é menor, mas ainda é substancial – cerca de 14.000 terawatts-hora por ano (ou mais de quatro vezes os níveis atuais de produção).

A previsão da produção hidrelétrica é de crescimento contínuo, especialmente no mundo em desenvolvimento, onde um grande aumento da capacidade já está planejado, principalmente em países asiáticos não OCDE.

2.3. Energia Solar

A energia solar é qualquer tipo de captação de energia luminosa (e, em certo sentido, da energia térmica) proveniente do sol e posterior transformação dessa energia captada em alguma forma utilizável pelo homem, seja diretamente para aquecimento de água ou ainda como energia elétrica ou mecânica. Para ser convertida em energia elétrica, são utilizadas células fotovoltaicas, que são semicondutores para converter fótons de luz diretamente em eletricidade.

As plantas utilizam diretamente essa energia no processo de fotossíntese. Nós usamos essa energia quando queimamos lenha ou combustíveis minerais. Existem técnicas experimentais para criar combustível a partir da absorção da luz solar em uma reação química de modo similar à fotossíntese vegetal - mas sem a presença destes organismos.

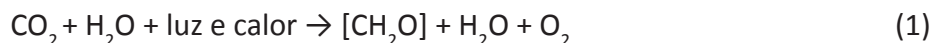
A capacidade instalada da energia fotovoltaica cresceu, em média, mais de 60% por ano de 2000 a 2004. Até recentemente, a energia solar fotovoltaica estava concentrada no Japão, Alemanha e Estados Unidos. Juntos, estes países respondem por mais de 85% da capacidade fotovoltaica solar instalada nos países OCDE. Também se espera que a energia solar fotovoltaica se expanda rapidamente na China.

O principal obstáculo a esse tipo de geração de energia é o custo, que normalmente é mais alto que o custo de geração de energia convencional e substancialmente mais elevados do que os custos de geração de energia eólica.

2.4. Biomassa

Energia de biomassa é energia química, obtida a partir do sol, por meio da fotossíntese realizada por plantas e bactérias. Silva (2010)

Durante o processo de fotossíntese, as plantas absorvem o dióxido de carbono (CO₂) e a água para produzir oxigênio (O₂) e biomassa, como mostra a equação 1. A biomassa seca geralmente contém carbono, hidrogênio e oxigênio. O combustível e alimentos liberam o CO₂ de volta para a atmosfera. O CO₂ é então reusado para o crescimento da próxima cultura e assim, ciclicamente. Gupta e Demirbas (2010)



Tipicamente, biomassa refere à parte não comestível das plantas. Podem ser incluídos: madeiras e espécies herbáceas, resíduos de madeira, resíduos agrícolas e industriais, resíduos de papel, resíduos sólidos municipais, resíduos de processamento de alimentos, resíduos animais, entre outros. Resumidamente, a tabela 1 mostra as categorias de biomassa. Gupta e Demirbas (2010)

Para a obtenção das mais variadas fontes de energia, a biomassa pode ser utilizada de maneira direta ou indireta. O menor percentual de poluição atmosférica global é o principal benefício de sua utilização.

Igualmente, em relação a outras formas de energias renováveis, a biomassa, como energia química, tem posição de destaque devido à alta densidade energética e pelas facilidades de armazenamento, conversão e transporte. A semelhança entre os motores e sistemas de produção de energia de biomassa e de energia fóssil é outra vantagem, dessa forma a substituição não teria um efeito tão impactante nem na indústria de produção de equipamentos nem nas bases instituídas para transporte e fabricação de energia elétrica.

Tabela 1 Principais categorias de matérias-primas de biomassa. Fonte: Gupta e Demirbas (2010)

Categoria principal	Matéria-prima biomassa
Produtos de florestas	Madeira, resíduos de madeira, árvores, arbustos, serragens, cascas
Resíduos biorenováveis	Resíduos agrícolas, resíduos lenhosos, resíduos orgânicos renováveis
Culturas alimentares	Resíduos de culturas de grãos e óleos
Culturas de açúcares	Cana-de-açúcar, beterraba, melações, sorgo
Aterros	Resíduos sólidos municipais
Resíduos orgânicos industriais	Resíduos de plásticos, óleo, couro, borracha
Líquens e musgos	Cogumelos
Plantas aquáticas	Algas, resíduos da água

2.5. Biocombustível

Biocombustível é o combustível gerado a partir da biomassa e tem como vantagem a contribuição da diminuição dos gases do efeito estufa (GEE). Todo material orgânico gera energia, mas o biocombustível é fabricado em escala comercial a partir de produtos agrícolas como a cana-de-açúcar, mamona, soja, canola, babaçu, mandioca, milho, beterraba e algas.

O bioetanol é um biocombustível gerado a partir da cana-de-açúcar e do milho, principalmente. Com o desenvolvimento de novas tecnologias, a biomassa celulósica, como o bagaço da cana, árvores e gramíneas também podem ser utilizados como matéria-prima para a produção de etanol celulósico ou etanol de segunda geração (2G).

O biodiesel é feito a partir de óleos vegetais como o de girassol, nabo forrageiro, algodão, mamona e soja e lipídios animais. É produzido por transesterificação e é um combustível biodegradável alternativo ao diesel de petróleo, criado a partir de fontes renováveis de energia.

2.6. Energia geotérmica

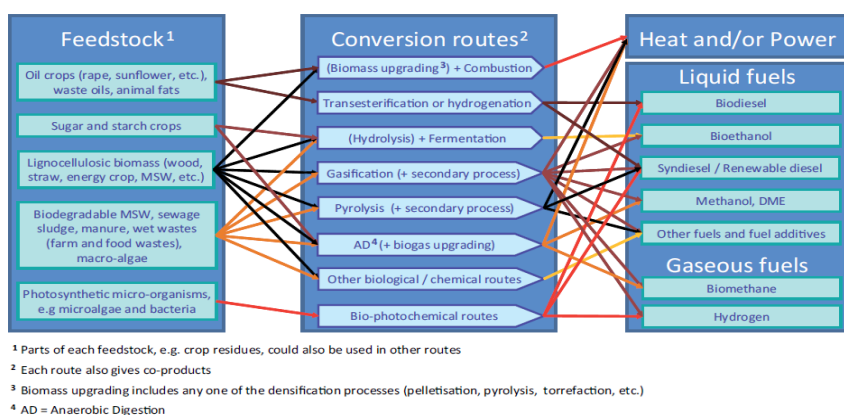
É a energia obtida a partir do calor proveniente do interior da Terra. A produção geotérmica de eletricidade só é prática, geralmente, quando existem vapor ou água subterrâneos a temperaturas superiores a 100°C. Para temperaturas entre 50 e 100°C, a energia geotérmica pode ser utilizada em aplicações diretas de calor, tais como: aquecimento de estufas de plantas e ambientes e fornecimento de água quente.

A capacidade global de geração de energia elétrica geotérmica é de cerca de 9 GW, a maior parte concentrada na Itália, Japão, Nova Zelândia e Estados Unidos. Os campos hidrotérmicos mais quentes são encontrados na orla do oceano Pacífico, em algumas regiões do Mediterrâneo e na bacia do oceano Índico. A Islândia lidera no mundo, em termos de capacidade existente de calor direto, suprimindo cerca de 85% de suas necessidades totais de aquecimento de ambientes usando a energia geotérmica.

De acordo com a World Energy Outlook, espera-se que a capacidade e a produção energética geotérmica atinjam 25 GWh e 174 TWh, respectivamente, até 2030, contribuindo, assim, com 9% das novas fontes renováveis.

3. Bioenergias

Matérias-primas geradas a partir da biomassa podem ser classificadas em grupos, como mostra a figura abaixo. Cada grupo pode seguir várias rotas de conversão para geração de energia, seja na forma de calor ou combustível. Como destaques podem ser citadas as culturas de açúcar e amido, utilizando a rota de conversão a partir da fermentação para a produção de etanol. Para insumos lignocelulósicos, como madeira, palha e bagaço da cana-de-açúcar, a mesma rota de conversão pode ser seguida para a obtenção do etanol.



3.1. Produção e conversão de biomassa

As plantas produzem biomassa energética sob a forma de material lignocelulósico, açúcares, amidos e óleos. O Brasil, país de bons solos, onde o sol e a água são abundantes, é um grande produtor de biomassa. De toda a biomassa que o nosso país produz, a concentração está na cana-de-açúcar, uma gramínea plantada no Brasil desde o início do século XVI.

O foco de interesse são os componentes da biomassa que têm um aproveitamento energético direto. No caso da cana-de-açúcar, os mais simples são os açúcares contidos no caldo, empregados no Brasil para produzir o bioetanol, nas mesmas usinas que produzem açúcar. A cana-de-açúcar é uma das mais importantes culturas comerciais no mundo. Brasil é o líder na produção, com aumento na produção ano a ano. A cultura da cana alcança todos os estados brasileiros e ocupa cerca de 9% da superfície agrícola do país, sendo o terceiro cultivo mais importante em superfície ocupada, depois da soja e do milho. Nogueira (2008)

A cana-de-açúcar é uma gramínea composta de espécies de gramas altas perenes, oriundas de regiões temperadas quentes a tropicais da Ásia, especialmente da Índia. A parte aérea da planta é composta pelos colmos, nos quais se concentra a sacarose, que é o carboidrato predominante e

pelas pontas e folhas, que constituem a palha da cana. A palha é formada pelas folhas secas e verdes e pelas pontas, totalizando 140 kg de massa seca por tonelada de cana. Nogueira (2008)

Após o processamento da cana-de-açúcar para a fabricação de açúcar e/ou etanol, é produzido o bagaço numa quantidade que varia de 240 kg a 280 kg por tonelada de cana moída e constitui no único combustível utilizado nas caldeiras a vapor, suprimindo toda energia necessária ao processamento industrial da cana-de-açúcar.

Há uma possibilidade evidente de se utilizar toda a biomassa da cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de etanol e não somente o caldo como é o processo atual. Estima-se que com o uso do bagaço para a produção do etanol aumentaria a produção em 40%. Neste contexto, o etanol produzido a partir da biomassa lignocelulósica é uma alternativa interessante, pois matérias-primas lignocelulósicas não competem com as culturas alimentares e são mais baratas que as convencionais (Alvira, Tomás-Pejó, Ballesteros e Negro (2010).

3.2. Perspectivas mundiais do aumento da demanda por automóveis movidos a etanol, possíveis consequências e suas expectativas

O uso do etanol em carros flex-fuel ou simplesmente adicionado à gasolina constitui-se na mais importante forma de redução dos gastos de combustíveis advindos de recursos fósseis. Espera-se, então, um incremento na demanda internacional por este produto e, de fato, muitos países têm aprovado legislações sobre o incremento da produção e do consumo de etanol como combustível para os meios de transporte. A produção mundial de etanol experimentou um incremento de mais de três vezes entre 2000 e 2007, passando de 17 bilhões de litros para mais de 52 bilhões de litros. Entre 2007 e 2008, a participação do etanol na gasolina global ampliou-se de 3,7% para 5,4%, enquanto em 2010, a produção mundial de etanol alcançou 76,7 bilhões de litros, sendo os EUA os maiores produtores (21,5 bilhões de litros, o que equivale a 28% da produção global), seguidos pelo Brasil com 20,3 bilhões de litros ou 26% do *market share* global deste produto. Contudo, ainda existe um debate interessante acerca do efetivo uso do bioetanol como substituto da gasolina.

As principais preocupações desta visão estão pautadas na sua produção e uso relativamente ao aumento dos preços dos alimentos em decorrência da grande necessidade de área plantada para as culturas, assim como o balanço energético e de poluição de todo o ciclo produtivo do etanol, principalmente quando produzido a partir do milho. Estudos recentes mostram que etanol produzido do milho nos EUA tem um balanço energético positivo de aproximadamente 4:3 (4 unidades de energia renovável requerem 3 unidades de energia fóssil), enquanto o etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil tem um balanço energético de 9:1.

Dentro do contexto de biocombustíveis de segunda geração, as fibras ligno-celulósicas, um importante componente das paredes das células das plantas, constitui-se como uma alternativa atrativa e promissora no aumento da produção de etanol em decorrência da possibilidade de coexistir com as culturas alimentícias sem que haja competição com eles. Por exemplo, os produtores

de milho podem vender os grãos para a indústria de alimentação animal e usar as folhas, caule e espigas para a produção de etanol celulósico. Uma grande variedade de matérias primas pode ser usada para a sua produção, como bagaço da cana-de-açúcar, miscanthus, gramíneas, eucalipto, etc., bem como muitos tipos de resíduos industriais como serragem, têxtil, papel, restos de papelão, etc. Para ilustrar seu potencial, considere uma planta de conversão brasileira típica de cana de açúcar descrito pelos seguintes números:

Área Plantada	30 mil ha
Taxa de processamento de cana-de-açúcar	500 ton/h (toneladas de cana/hora)
Produção de Etanol (sem produção de açúcar)	45 m ³ /h (primeira geração)
Produção de Açúcar (sem produção de etanol)	65 ton/h
Produção de Bagaço	150 ton/h de bagaço seco
Oferta de Bioeletricidade (do bagaço)	50 MW

É óbvio que estes números podem variar consideravelmente, principalmente o excedente de eletricidade que depende da pressão do funcionamento da caldeira e da temperatura. Em vez de ser transformada em energia elétrica, o excesso de bagaço pode ser convertido em etanol de 2ª geração a uma taxa máxima teórica de aproximadamente 42 m³/h. Assim, é possível dobrar a produção de etanol sem necessidade de aumentar a área total plantada.

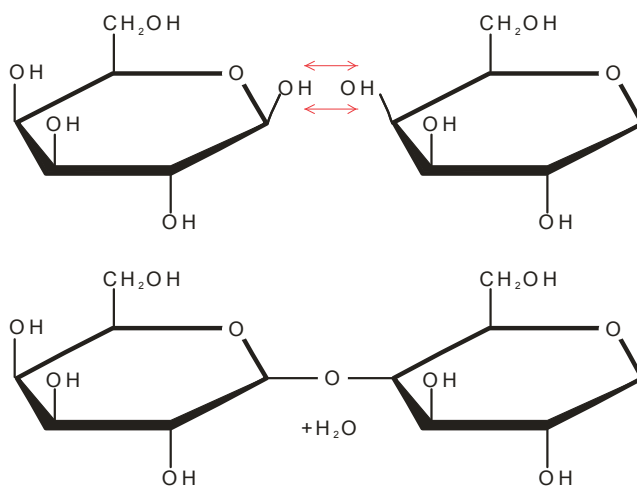
Infelizmente esta perspectiva ainda está distante porque etanol de segunda geração ainda não é economicamente viável. Apesar da Lei de Segurança e Independência Energética dos Estados Unidos de 2007 exigir um consumo total de etanol de 136 bilhões de litros até 2022, com uma parcela crescente de etanol celulósico (1,9 bilhões de litros até 2012 e 60,5 bilhões de litros em 2022), a produção de etanol celulósico é irrelevante neste país ou em qualquer outro país também. Tal rota de conversão é restrita a laboratórios de pesquisa e plantas industriais de demonstração de pequeno porte, sendo que o principal entrave para a produção em escala industrial é o seu custo de produção. Há um consenso entre cientistas, engenheiros e economistas que a razão subjacente para isso é uma falta generalizada de conhecimento científico, o que impede o desenvolvimento de tecnologias robustas para biocombustíveis de 2ª geração que seria a base de custos para processos industriais competitivos. Mas esses problemas também são ótimas oportunidades, como será elaborado na seção seguinte.

4. Processos de produção de etanol de primeira e segunda geração

A produção industrial de etanol baseia-se quase que exclusivamente na fermentação. Esse tipo de fermentação é um processo biológico, mediante o uso de leveduras, que convertem o açúcar simples em energia celular, dióxido de carbono. Sua reação química pode ser expressa por $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2CO_2 + 2C_2H_5OH + \text{calor}$. A fermentação é um processo que ocorre apenas em condições anaeróbicas e a energia contida no etanol ainda é extremamente grande, então, é normalmente associado

com organismos unicelulares capazes de sobreviver com pouca energia. Em condições aeróbicas, os organismos geralmente oxidam os açúcares (respiração) já que esse processo libera muita energia, cujo excesso é armazenado como gordura. Esse processo metabólico é frequentemente usado por organismos mais complexos e que demandam energia como as plantas que armazenam o excesso de energia por meio da construção de cadeias mais longas de açúcares simples (polissacarídeos), unidas por ligações glicosídicas, como mostrado na **Figura 10**. Os vários tipos de amido constituem um excelente exemplo, porque eles são a principal fonte de alimento dos seres humanos.

Figura 10 Formação de um dissacarídeo (lactose) por meio de uma ligação glicosídica entre dois monômeros de açúcar



O principal ponto aqui é que a recuperação de energia por meio da metabolização de um polissacarídeo se torna progressivamente mais difícil conforme a cadeia de açúcar fica mais complexa. Portanto, para permitir a fermentação, é necessário disponibilizar açúcares simples por meio da quebra das ligações glicosídicas por uma ação externa. Na natureza, vários organismos vivos desenvolveram estratégias para usar essa fonte de energia, incluindo a produção direta de enzimas por fungos e bactérias, ou a combinação de ácidos e de ação mecânica em ruminantes. É por isso que não podemos ser alimentados diretamente com grãos em estado natural como trigo, arroz e feijão, sem antes submetê-los a qualquer processo de cozimento. Na pré-história, o controle humano do fogo permitiu uma grande diversidade de fontes alimentares e esta é uma das principais razões para o sucesso da raça humana como espécie.

Ao contrário dos amidos, a celulose é um polissacarídeo formado pela polimerização de dezenas de milhares de monômeros de açúcar. Ela é principalmente sintetizada por plantas verdes e representa 33% da biomassa total das plantas do planeta, atingindo 90% de algodão e 50% em espécies lenhosas.

A celulose é o principal componente da parede celular da planta, possibilitando-lhes resistir a tensões mecânicas externas (o seu próprio peso, vento, etc.) e a pressão osmótica, que atua como uma barreira seletiva de modo a manter a água no interior da célula. Ela está dividida em camadas

e redes de microfibras de celulose que formam emaranhados de filamentos de hemicelulose e pectina. Os espaços vazios são preenchidos com uma substância polimérica amorfa chamada lignina, que age como um aglomerante e proporciona resistência à compressão. Este arranjo altamente elaborado é similar a uma estrutura de concreto reforçado, sendo mais comumente encontrado em plantas lenhosas que surgiram mais recentemente na natureza (plantas superiores). Por esse motivo apenas alguns poucos microrganismos podem se alimentar de lignina, já que eles não tiveram tempo para desenvolver enzimas específicas para a sua degradação. Na verdade esta é uma estratégia de sobrevivência muito bem-sucedida de plantas superiores (eles não podem fugir dos organismos que as atacam) e deve ser creditado aos mecanismos de evolução e seleção natural. Todas essas características são os principais obstáculos para acessar açúcares mais simples para a fermentação, propriedade conhecida como recalcitrância. Portanto, a utilização de celulose para a produção de etanol só pode ocorrer se a sua recalcitrância for superada, isto é, se os monômeros de açúcar tiverem sido previamente libertados para o processo de fermentação.

Em geral, a melhor forma de gerar açúcares simples para a fermentação é um processo composto por duas fases: 1) ruptura de macroestruturas ligno-celulósicas (pré-tratamento) e, subsequentemente, 2) quebra de ligações glicosídicas (hidrólise). Um estudo realizado no Laboratório Nacional de Energia Renovável por Lynd *et al.* (1996) [1] demonstra que a hidrólise do material ligno-celulósico é inferior a 20%, enquanto se precedido por uma das principais técnicas de pré-processamento, é possível atingir mais de 90% do limite teórico. Várias técnicas de pré-tratamento têm sido desenvolvidas, em particular para materiais tais como palha de trigo, espigas de milho e várias gramíneas. As técnicas tradicionais incluem o tratamento ácido e de explosão de vapor, com ou sem amônia ou solventes orgânicos. Técnicas mais inovadoras foram desenvolvidas com base na utilização de fluidos supercríticos, irradiação de microondas, de deslignificação biológica, além do pré-tratamento alcalino e com ozônio. Todas estas técnicas apresentam vantagens e desvantagens que dependem das condições de funcionamento e do tipo de biomassa pré-tratada. No entanto, nenhuma delas é viável para a indústria brasileira de cana-de-açúcar a qual, tipicamente, tem centenas de toneladas de biomassa a ser processada a cada hora. Uma técnica muito promissora desenvolvida em alguns centros de pesquisa no Brasil e no mundo baseia-se na pressurização de água líquida quente seguida de despressurização explosiva.

Uma vez que as macroestruturas ligno-celulósicas tiverem sido quebradas ainda é necessário um processo de despolimerização da celulose e da hemicelulose em açúcares simples que possam ser eficientemente fermentados. A quebra das ligações glicosídicas pode ser feita por meio de uma reação de hidrólise, isto é, uma reação com moléculas de água. No caso da celulose, essa reação é conhecida como celulólise ($[C_6H_{10}O_5]_n + nH_2O \rightarrow nC_6H_{12}O_6$) que, para ocorrer de forma eficiente, deve ser catalisada pela ação de um algum adjuvante químico, geralmente um ácido ou um coquetel de enzima. A celulólise ácida (ou simplesmente “hidrólise ácida”, como é conhecido no jargão da indústria) é um método muito tradicional e data de meados de 1800, quando as primeiras técnicas para a produção de etanol foram desenvolvidas a partir de resíduos de madeira. O calcanhar de

Aquiles da hidrólise ácida é a necessidade de neutralizar e separar o catalisador ácido e seus subprodutos, resultando em perdas inevitáveis de açúcares fermentáveis, bem como a contaminação no processo de fermentação por compostos inibidores. Outro problema importante é a necessidade de materiais resistentes à corrosão, tais como aço inoxidável ou revestimentos cerâmicos especiais, o que aumenta imensamente o custo do equipamento requerido para o processamento. Embora a hidrólise ácida tenha um amplo histórico técnico adquirido durante uma longa história de aplicações industriais bem sucedidas, sua aplicação na produção de etanol celulósico enfrenta dificuldade para incorporar os avanços tecnológicos que levam ao aumento da eficiência energética e de custos, minimizando ou eliminando a geração de resíduos poluentes.

Além do uso de soluções ácidas, a ruptura de ligações glicosídicas também pode ser catalisada por enzimas. A hidrólise enzimática é um processo natural usado por várias espécies na busca por energia. Ruminantes e alguns tipos de cupins pode sacrificar celulose, devido a uma associação simbiótica com bactérias capazes de produzir enzimas celulolíticas, também conhecidas como celulases. Da mesma forma, alguns tipos de fungos são capazes de produzir enzimas celulolíticas altamente eficazes. Por exemplo, o fungo *Trichoderma reesei* produz uma série de celulases capaz de hidrolisar a celulose em uma grande quantidade de açúcares simples. A fermentação da biomassa sacarificada por enzimas celulolíticas é amplamente facilitada, especialmente porque é uma sequência de reações que, em geral, está associada ao metabolismo dos organismos vivos. É por esta razão que uma temperaturas e pHs amenos são adequados para a produção da enzima e para a sua eficácia sobre a celulose, evitando assim a formação de compostos inibitórios da celulólise ou da fermentação. Consequentemente, o processo tende a ser mais simples e mais barato (não é necessário proteção contra a corrosão e resistência a altas temperaturas) e com uma produção mínima ou facilmente tratada de resíduos prejudiciais para o meio ambiente.

Contudo, na atual conjuntura tecnológica, a celulólise enzimática não é capaz de produzir concentrações elevadas de açúcares fermentáveis em escala industrial, tornando-a inadequada para aplicações comerciais. Além disso, dadas às condições típicas de uma usina de cana-de-açúcar no Brasil, o celulólise de centenas de toneladas de biomassa por hora implica numa taxa de produção de enzimas maior do que a capacidade dos biorreatores atuais. Porém, estes problemas devem ser vistos como duas grandes áreas de pesquisa e desenvolvimento que, portanto, podem ser entendidas como oportunidades de negócios estratégicos a serem exploradas. Embora seja conhecida há muito tempo, a aplicação em escala industrial de celulólise enzimática é recente com pouco mais de quinze anos de experiência. Por exemplo, não apenas a ação enzimática sobre a celulose é mal compreendida, como também as misturas enzimáticas eficazes feitas para biomassas específicas, dentre elas bagaço ou miscanthus que ainda não foram desenvolvidas. Pode-se superar esta barreira por meio da pesquisa por novas enzimas, bem como o uso de modificação genética dos fundos produtores de celulares. A biologia molecular é, portanto, uma área de pesquisa muito promissora, bem como o desenvolvimento de biorreatores de nova geração que incorporem tecnologias inovadoras, principalmente os baseados em Dinâmica dos

Fluidos Computacional e Algoritmos de Inteligência Artificial usados para otimizar o design e a operação dos processos de conversão biológicos.

Conclusões

As perspectivas da expansão mundial da demanda por transportes têm colocado muita pressão sobre os cientistas e engenheiros para o desenvolvimento eficiente, robusto e competitivo de processos industriais de larga escala para os biocombustíveis, dentre os quais o bioetanol é provavelmente o mais importante. Grandes problemas de sustentabilidade já foram considerados e relacionados principalmente com o balanço energético total e o esgotamento do solo em decorrência da intensificação da agricultura adicionalmente aos impactos do preço dos alimentos. A produção de etanol de segunda geração a partir de culturas específicas (eucalipto, miscanthus, etc.) ou a partir de resíduos agrícolas ou industriais (sabugo de milho, palha, etc.), constitui uma rota de conversão muito promissora, já que pode, literalmente, coexistir sem competir com as culturas alimentares. Por exemplo, existem interessantes estudos sobre a consorciação do milho com diferentes espécies de *Brachiaria* gerando um aumento na eficiência global fotossintética, sendo a primeira uma fonte de alimento de amido e a segunda constitui-se na principal fonte de celulose para a conversão em biocombustível.

A cana-de-açúcar tem uma das maiores eficiências fotossintéticas no reino vegetal, capaz de converter cerca de 1% da energia solar incidente em biomassa com um alto teor de sacarose, que é facilmente fermentada e convertida em bioetanol. Seu cultivo em larga escala está bem estabelecido no Brasil, principalmente após o desenvolvimento das tecnologias flex-fuel, que permitiu aos consumidores escolher qualquer proporção de gasolina/etanol, dependendo dos preços de mercado. Contribui para esse quadro a combinação simultânea de condições favoráveis, tais como uma boa incidência de luz solar, temperaturas amenas, padrão de chuva regular e adequado, disponibilidade de terra arável, solos férteis, pesquisas de longo prazo para desenvolver híbridos adaptados às condições específicas, etc. Apesar de um balanço energético global altamente favorável quando comparado a outras biomassas, ainda há muito a ser feito para melhorar a eficiência de conversão, minimizar as emissões de GEE, preservar a fertilidade do solo, dos recursos hídricos e assim por diante. É necessário, também, ampliar a taxa de processamento para valores superiores a 1000 tsc/h, de forma a permitir economias de escala. Vários modelos agroindustriais integrados para a produção sustentável e a conversão de biomassa em biocombustíveis e produtos de maior valor agregado têm sido propostos. A fundamentação desse modelo como uma típica (referência) usina industrial de cana-de-açúcar revela vários obstáculos e gargalos para a sua implementação, principalmente devido à falta de conhecimento científico e a ausência de tecnologias robustas e com custos competitivos para o processamento em alta escala relacionadas ao etanol de 2ª geração.

Portanto, de modo a superar essas dificuldades, uma ampla gama de pesquisas precisa ser articulada, passando pela genética, ciência biomolecular e biologia celular para projeto de engenharia e otimização, processamento industrial e avaliação da sustentabilidade. Possíveis temas de pesquisa

e ações futuras são: 1) compreender a estrutura e a composição da biomassa ligno-celulósica, 2) desenvolvimento do genoma de plantas modernas e transformações genéticas que permitam estudos avançados da fotossíntese e do metabolismo delas com o intuito de ampliar a eficiência da célula de conversão, 3) a definição de práticas agrícolas sustentáveis com foco especial na preservação da água e do solo, necessidades e logísticas para energia e matérias-primas, 4) identificação de novas rotas de conversão bioquímicas, que envolvem biologia estrutural da enzima e processamento de proteínas, com especial relevância para os biocombustíveis e bioquímicos de valor agregado, 5) desenvolvimento de processos industriais e equipamentos inovadores com custos competitivos para a transformação de biomassa e 6) construção de ferramentas para avaliação da viabilidade econômica, da pegada ecológica e dos impactos sociais destas novas tecnologias. Para atender a essas expectativas, será necessário orquestrar tanto a pesquisa induzida como a exploratória, sendo a primeira responsável por descobertas científicas que são a base de tecnologias radicais permitindo grandes saltos evolutivos e a segunda com a promoção da sua consolidação por meio de uma série de inovações incrementais resultantes da experimentação, refinamento e testes mais realistas.

Referências Bibliográficas

- ALVIRA, P., TOMÁS-PEJÓ, E., BALLESTEROS, M., & NEGRO, M. J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource technology*, Elsevier Ltda, v.101, n. 13, p. 4851-61, 2010.
- GUPTA, R. B.; DEMIRBAS, A. Gasoline, diesel, and ethanol biofuels from grasses and plants. Cambridge University Press, 2010, 230 p.
- SILVA, C. G. De sol a sol: energia no século XXI. (Série inventando o futuro). São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 128 p.
- FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo. *Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho*. tradução, Maria Cristina Vidal Borba, Neide Ferreira Gaspar. – [São Paulo]: FAPESP; [Amsterdam]: InterAcademy Council; [Rio de Janeiro]: Academia Brasileira de Ciências, 2010. 300 p.

Indústria da Cal

Vanderley M. John
Katia R. Garcia Punhagui
Maria Alba Cincotto

Introdução

O presente capítulo cobre o setor da cal, mais especificamente a atividade de fabricação de cal (óxidos e hidróxidos de cálcio e magnésio), parte da categoria 23.92-3 da CNAE 2.0 – Fabricação de cal e gesso. Note-se que a pesquisa não incluiu a cal produzida em operações unitárias de outras atividades industriais, em que é produzida exclusivamente para o consumo da planta industrial à qual está integrada (mercado cativo), tampouco as operações que comercializam, com ou sem beneficiamento, resíduos industriais constituídos de hidróxido de cálcio e magnésio.

1. Caracterização setorial

A cal é um produto de uso variado que abastece os setores industriais de produção de metais ferrosos e não ferrosos, cimento, celulose e papel, química, farmacêutica e higiene pessoal e alimentos, bem como agricultura, silvicultura e piscicultura, construção civil e aplicações de cunho ambiental (EIPPCB; IPTS, 2013)(IPCC, 2006).

O principal país produtor de cal é a China, com 63% da produção mundial. Com produção bem menor, mas entre os maiores produtores estão Estados Unidos, Índia, Rússia e Brasil, que somam cerca de 16%. Em 2013, o Brasil era o quinto maior produtor de cal no ranking mundial (USGS, 2014).

De forma geral, a produção da cal virgem passa pelas seguintes etapas: mineração do calcário, britagem, calcinação e moagem. A produção da cal hidratada agrega as fases de separação ou moagem da cal virgem, hidratação e moagem.

A mineração do calcário consiste no desmonte da jazida de calcário e pode ser feita por perfuração (implantação de explosivos) ou com rompedor e retroescavadeira em sistemas mais rudimentares de produção. A britagem objetiva produzir partículas da rocha calcária com granulometria adequada ao forno. A calcinação visa decarbonatar o calcário, isto é, remover o CO₂ combinado com os óxidos de cálcio ou magnésio para a produção de cal virgem. O processo ocorre em fornos que operam em altas temperaturas (900 °C e 1200 °C). A moagem visa diminuir a granulometria da cal virgem a tamanhos adequados à sua destinação final ou à hidratação. Antes da hidratação podem ocorrer a moagem ou seleção da cal, que visam a regularização e classificação granulométrica do material. A hidratação é feita em hidratadores¹ e visa transformar os óxidos de cálcio (CaO) ou magnésio (MgO) em hidróxidos de cálcio ou magnésio. A última etapa é o acondicionamento para transporte ao mercado consumidor (VOTORANTIM, 2014)(COELHO, 2013) (EIPPCB; IPTS, 2013)(SILVA, 2007) (SEABRA, 2014a).

A transformação da rocha calcária em cal virgem ou hidratada pode utilizar tecnologias muito variadas segundo o grau de desenvolvimento e o porte do fabricante. Os principais modelos de fornos para calcinação do calcário incluem: (1) forno longo rotativo, (2) forno rotativo com pré-aquece-

¹ Embora existam várias configurações de hidratadores, de modo geral, consistem em um tanque cilíndrico com duas hélices rotativas que agitam vigorosamente a solução de cal e água (SILVA, 2007).

dor, (3) forno de fluxo paralelo regenerativo, (4) forno de eixo anular, (5) forno vertical de alimentação mista, (6) outros fornos (EIPPCB; IPTS, 2013)(IFC; WBG, 2007)(USGS, 2013).

Os **fornos longos rotativos** são constituídos por um cilindro com comprimento até 150 metros, diâmetro entre 2 e 4,5 metros e inclinação entre 1 e 4 graus em relação à horizontal. O calcário é inserido pela extremidade mais alta e a combustão ocorre na extremidade inferior, próximo à saída do material. A cal é conduzida a um resfriador a ar, que é depois utilizado para a combustão. Algumas vantagens deste equipamento são sua grande flexibilidade no uso de combustíveis e granulometria do calcário e a menor quantidade de CO₂ residual. Entre as desvantagens estão o alto consumo de energia, associado à perda de energia por radiação na área do cilindro e pelo ar, e, dependendo do combustível e do calcário, a emissão de enxofre (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Os **fornos horizontais rotativos com pré-aquecedor** são usualmente menores que os fornos rotativos longos e tem comprimento até 90 metros. O uso de calor diminui devido a menores perdas por radiação e convecção e aumento da recuperação do calor dos gases de exaustão. Esse tipo exige, portanto, menor uso de combustível, mas como desvantagem há equipamentos adicionais (o pré-aquecedor) que exigem gastos em investimento e manutenção (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Os **fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo** são constituídos por dois cilindros verticais paralelos conectados por um canal de passagem (VERBOR, 2014). O combustível é injetado na parte superior e desce até a zona de calcinação, onde encontra o fluxo secundário injetado na parte inferior, que sobe resfriando a cal virgem. Ao se encontrarem, são transferidos para o canal de passagem e para o cilindro ao lado, onde sobem, aquecendo o calcário. A alimentação de calcário e a combustão ocorrem de forma alternada entre os cilindros, invertendo a direção do fluxo. Entre suas vantagens estão a redução do consumo de combustível e a possibilidade de utilização de diferentes combustíveis, inclusive resíduos ou biomassa. Entre as desvantagens está o custo do material refratário (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

O **forno vertical de eixo anular** é constituído de um cilindro externo que contém um cilindro interno concêntrico. A parte inferior do cilindro central recebe os gases que sobem preaquecidos pelos óxidos e que são (já aquecidos) empregados na combustão. Isto faz com que a fase final de calcinação possa ocorrer a temperaturas menores. Entre as vantagens destacam-se o baixo CO₂ residual, a boa distribuição do calor, que resulta em produto mais homogêneo, a boa variedade de combustíveis (gás, óleo ou combustível sólido) e a economia de combustível, em função da reutilização dos gases de combustão. Entre as desvantagens, destacam-se a necessidade de manutenção dos recuperadores de calor e câmaras exteriores (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Os **fornos verticais de cuba simples** mais simples são constituídos por uma câmara vertical de cerca de 30 metros de altura e diâmetro de 6 metros. A alimentação do calcário ocorre pela parte superior, passando por diversos estágios até a saída da cal pela parte inferior. No forno vertical de alimentação mista, insere-se calcário misturado a coque siderúrgico em granulometria pouco inferior à da rocha, o que faz que o combustível desça pela câmara em conjunto com a ma-

téria-prima. Dentre as vantagens destacam-se o uso do ar de arrefecimento para combustão e a menor quantidade de ar excedente, a menor necessidade de energia elétrica para ventiladores e o custo mais baixo. Entre as desvantagens está a desuniforme distribuição do calor (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013).

Outros tipos de fornos incluem forno vertical duplo inclinado, forno vertical multi-câmara, forno rotativo com pré-aquecedor de grelha, forno rotativo de eixo pré-aquecedor, forno rotativo com pré-aquecedor de ciclone, forno de grelha móvel, calcinação com suspensão a gás e forno de leito fluidizado (EIPPCB; IPTS, 2013) (IEA, 2007). Há ainda, no âmbito dos fornos artesanais, o “forno de barranco” – uma variedade de forno vertical de baixa sofisticação e que pode operar a lenha, como se verá mais adiante. A Tabela 1 resume algumas das principais características dos fornos industriais mais comuns no setor de cal nos países industrializados.

Tabela 1 Fornos de cal mais comuns em países industrializados

	FH-R*	FV-FPR	FV-EA	FV-CS	
Energia térmica (GJ/t)	5,1 - 9,2	3,2 - 4,2	3,3 - 4,9	3,4 - 4,7	
Eletricidade (kWh/t)	17 - 45	20 - 41	18 - 50	5 - 15	
Produção (t/dia)	100 - 1.500	100 - 600	80 - 300	60 - 200	
Faixa granulométrica (mm)	2 - 60	10 - 200	40 - 150	20 - 200	
Combustível	Gás	x	x		
	Sólidos pulverizados	x	x		
	Líquidos pulverizados	x	x		
	Resíduos	x	x		
	Biomassa	x	x		
	Coque metalúrgico				x
	Carvão				x
Eletricidade utilizada em outras partes do processo (kWh/t)					
Hidratação, classificadores de ar e equipamentos de transporte				5 – 30	
Moagem				4 - 40	
FH-R – forno horizontal rotativo, FV-FPR – forno vertical de fluxo paralelo regenerativo, FV-EA – forno vertical de eixo anular, FV-CS – forno vertical cuba simples					
*Fornos rotativos longos com consumo de energia térmica entre 6,0 e 9,2 GJ/t e energia elétrica entre 18 e 25 kWh/t, e fornos rotativos com pré-aquecedor com consumo de energia térmica entre 5,1 e 7,8 e energia elétrica entre 17 e 45 kWh/t.					

Fonte de referência: (EULA, 2006a) apud (EIPPCB; IPTS, 2013), (EU, 2013), (IEA, 2007), (CIMPROGETTI, 2012)

2. Quadro tecnológico e econômico do setor no Brasil

No Brasil, o setor da cal é marcado pela presença tanto de grandes empresas internacionais e nacionais, que operam de maneira formal utilizando tecnologia similar à dos países desenvolvi-

dos, quanto de pequenas empresas que produzem cal em fornos verticais artesanais intermitentes, alimentados por biomassa de procedência variável, adotam processos com baixa eficiência e atuam com graus variados de informalidade trabalhista, ambiental, fiscal e de qualidade de produto. Naturalmente, é difícil estimar a quantidade de cal produzida sem licença ambiental, mas fontes do mercado estimam algo entre 15% e 20% da produção. Se incluída também a informalidade fiscal, a proporção é ainda maior.

As empresas podem ser classificadas por critérios de escala e atualização tecnológica: 1) empresas de grande porte que operam com tecnologia moderna, 2) empresas de grande porte que operam em situação de defasagem tecnológica, 3) empresas com certa escala – cerca de 100 mil toneladas por ano – que operam com técnicas rudimentares, 4) pequenas empresas que operam com técnicas rudimentares.

Com efeito, vários tipos de fornos são usados no processo de calcinação no Brasil. Os mais comuns são o forno vertical de cuba simples (conhecidos como Azbe), fornos de fluxo paralelo regenerativo (conhecidos como Maerz), fornos rotativos e os fornos verticais de alvenaria. Estes são “equipamentos artesanais” de uma ou múltiplas câmaras, bastante rudimentares, construídos de alvenaria, quase sempre apoiados em encostas, o que facilita a carga de calcário na sua parte superior, já que tanto a carga quanto a descarga são realizadas de forma manual ou semiautomática. O combustível é inserido pela parte inferior do forno. De forma geral, estes fornos não têm zona de resfriamento nem tampouco recirculam os gases aquecidos, o que implica em eficiência energética baixa. Os fornos de alvenaria e de fluxo paralelo regenerativo demarcam os extremos de menor e maior eficiência em termos de consumo de energia, emissões de CO₂ e tecnologia empregada.

No Paraná, predominam fornos de alvenaria (semi-contínuos) movidos a resíduos de madeira proveniente da indústria; em São Paulo, o tipo Azbe, movido a madeira plantada (gaseificada). Em Minas Gerais, na região metropolitana de Belo Horizonte predominam fornos tipo Maerz e fornos rotativos com queima de coque de petróleo. Na região centro-oeste desse estado, área em que se situam as cidades de Arcos, Pains, Divinópolis e Itaú de Minas, encontram-se dois cenários distintos: grandes empresas com fornos rotativos e/ou verticais, que empregam coque de petróleo e lenha como combustível, e pequenos e médios produtores, que usam fornos verticais muito antigos ou fornos semi-contínuos de alvenaria (“forno de barranco”), com queima de óleo, lenha e resíduos ilegais (lixo industrial e pneus, entre outros). Em outras regiões, os fornos de alvenaria e antigos fornos verticais são comuns (ABPC, 2014c).

Atualizações e adaptações tecnológicas são feitas com o intuito de melhorar o desempenho dos fornos, como é o caso dos sopradores de serragem empregados no Paraná ou uso de madeira gaseificada em alguns fornos Azbe em São Paulo, mas o resultado, embora superior ao padrão de partida, não será o mesmo que aquele conseguido com a troca de fornos. Os FV-FPR são considerados os de melhor desempenho com relação ao consumo energético e emissões de CO₂, devido ao menor consumo de combustível e possibilidade de uso de biomassa (EIPPCB; IPTS, 2013)(CIMPROGETTI, 2012).

No âmbito da mineração, existem empresas que utilizam equipamentos como perfuratrizes e explosivos para o desmonte da jazida e carregadeiras e caminhões de grande porte para a condução do material, operam com licença ambiental e fazem ensaios laboratoriais para garantir a qualidade da matéria-prima. Por outro lado, há produtores que empregam o rompedor para o desmonte da jazida, fazem a diminuição do tamanho das pedras e carregamento manualmente e utilizam caminhão convencional para o transporte do calcário, que é analisado visualmente.

As principais regiões produtoras de cal no Brasil são o Sudeste e o Sul, com destaque para os estados de Minas Gerais (64% da produção total de cal para o mercado aberto – não cativo), São Paulo e Paraná (10% cada), seguidas do Nordeste (7%) e outras regiões (9%). A produção de cal virgem para o mercado aberto é liderada pelo estado de Minas Gerais (76%), seguido do Paraná (9%), região Nordeste (5%), São Paulo (1%) e outras regiões (9%). A produção de cal hidratada é liderada por São Paulo (36%), seguida por Minas Gerais (30%), Paraná (14%), Nordeste (10%) e outras regiões (10%) (ABPC, 2014b).

Segundo estimativa da ABPC, a produção total de cal em 2013 foi de 8.419 mil toneladas, sendo 884 mil toneladas (10,5%) destinadas ao mercado cativo e 7.535 mil toneladas (89,5%) ao mercado livre (ABPC, 2014c). A maior parte da produção é referente à cal virgem (76%, 6.403 mil toneladas²) e o restante, à cal hidratada (24%, 2.016 mil toneladas) (ABPC, 2014c). A cal virgem destina-se preferencialmente às atividades de siderurgia, mas também é utilizada na construção civil em algumas regiões do país, particularmente no Paraná. A cal hidratada tem a construção como mercado mais relevante, mas também é utilizada em processos industriais variados.

Em 2013, 71% da produção total de cal foi destinada a fins industriais e 29% à construção civil. Considerando apenas o mercado livre, estes valores foram de 66% e 34%, respectivamente. Dentro dos fins industriais, a distribuição de cal para o mercado livre foi para os setores de siderurgia (27% da produção), química (8%), celulose e papel (8%), pelotização e minério de ferro (7%), indústria alimentícia (5%), meio ambiente (3%), metalurgia e não ferrosos (2%) e agricultura e outros usos (6%) (ABPC, 2014c).

Segundo a ABPC e a USGS, a produção brasileira total de cal cresceu no período de 2005 a 2013 com uma taxa média geométrica de 2,2% a.a. O único período de retração foi em 2009. Os dados da ABPC sobre a produção para o mercado livre mostram uma tendência de baixo crescimento na produção de cal hidratada (para construção civil) (mediana de 0,5% a.a. desde o ano 2000). Em contrapartida, a produção de cal virgem (para diversos fins industriais) cresceu de 3,1% a.a. desde o ano 2000 (Tabela 2).

O comércio exterior de cal no Brasil é inexpressivo. A importação brasileira de beneficiados de calcário em 2012 foi de 15,7 mil toneladas (DNPM, 2013). Os principais países de procedência destes produtos foram Uruguai (76,8%) e Argentina (16,7%) (DNPM, 2013). Uruguai (45%), Argentina (25%) e Paraguai (30%) também foram os principais importadores de semimanufaturados de rochas calcárias brasileiras (predominantemente cal virgem e hidratada), somando 4 mil toneladas (DNPM, 2013). Desta forma, observa-se que as atividades de comércio exterior do setor têm importância irrisória quando comparadas ao mercado interno.

2 Sendo 5.519 mil toneladas para mercado livre e 884 mil toneladas para mercado cativo (ABPC, 2014c).

Tabela 2 Quantidade de cal produzida no Brasil (mil toneladas)

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Ref.
CH+CV	-	-	-	7.425	6.600	7.761	8.235	8.300	8.500	USGS
CV	3.581	3.990	4.144	4.171	3.657	4.677	5.243	5.346	5.519	ABPC
CH	1.885	1.905	2.003	2.016	2.068	2.089	2.029	2.005	2.016	ABPC
CH+CV	5.466	5.895	6.147	6.187	5.725	6.766	7.272	7.351	7.535	ABPC

Legenda: CH – cal hidratada, CV – cal virgem

Observação: dados da ABPC referentes ao mercado livre

Fonte de referência: (ABPC, 2014c), (USGS, 2014)

3. Impactos ambientais setoriais

Entre os impactos ambientais relacionados à produção da cal devem ser citadas as emissões de dióxido de carbono (gás de efeito estufa) e o alto consumo de energia - abordados em detalhe mais adiante -, a produção de resíduos, a emissão de poeira, a geração de ruídos, o consumo de água, os odores, a mudança da paisagem e a emissão de outros gases.

A geração de resíduos, ou subprodutos, podem originar-se: da partida ou desligamento dos fornos para manutenção; do desempoeiramento dos gases de combustão que gera *lime kiln dust*; de deficiências na calcinação; da inadequação da composição do minério para a produção de cal; do processo de britagem, que gera finos, os quais podem ser beneficiados e destinados a outros mercados. A poeira é gerada no processo de britagem, transporte, calcinação e hidratação. Os ruídos e vibrações são inerentes à atividade de manufatura, devido ao uso de maquinário pesado. O consumo de água dependerá das atividades dentro de cada etapa de produção e do controle na hidratação da cal. Os odores são consequências dos gases efluentes da queima de alguns combustíveis ou do uso de resíduos como fonte energética. As mudanças na paisagem ocorrem devido às atividades de mineração. Os diversos gases resultantes variam segundo o tipo de forno, condições de funcionamento, tipos de combustíveis, características da matéria-prima e técnica de redução de emissões empregadas (EIPPCB; IPTS 2013).

3.1. Fontes de insumos por tipo de forno e etapas do processo

Dada a intensidade em energia do processo de produção de cal, entre as questões ambientais relevantes está o uso de combustíveis para a geração de calor. Além da preocupação com a utilização de recursos não renováveis, a queima de combustíveis tem implicações no âmbito das emissões de gases do efeito estufa. De fato, uma estimativa feita pela ABPC em 2014 mostra que a produção da cal no Brasil faz uso dos seguintes combustíveis: lenha, usada em torno de 43% (entre 41% e 46%) da produção; coque de petróleo, 41% (entre 40% e 43%); gás natural, 12% (entre 11% e 12%); óleo combustível, 2%; moinha de carvão, 2% (ABPC, 2014c)(ABPC, 2014b).

Como visto anteriormente, os fornos de calcinação mais usados no Brasil são: forno vertical de alvenaria (de uma ou múltiplas câmaras), forno rotativo horizontal, forno vertical (tipo Azbe), forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (tipo Maerz). Os fornos tipo Azbe localizados no estado de São Paulo, em grande parte, empregam madeira plantada (gaseificada). No Paraná, emprega-se majoritariamente o forno de alvenaria movido a madeira (resíduos industriais). Com efeito, estima-se que 90% da produção deste estado utilize madeira neutra em carbono (ver conceito no Box 1 adiante). De outra parte, estima-se que em Minas Gerais cerca de 60% da madeira utilizada seja fonte de carbono (ver conceito no Box 1), enquanto que no Nordeste este percentual seria de 42%. Estima-se que entre 8% e 13% da produção de cal utilize como combustível madeira de origem não renovável e, portanto, considerada fonte de carbono.

Além dos combustíveis utilizados nos fornos, é necessário somar aos insumos energéticos os combustíveis dos veículos de transporte e equipamentos (britador, perfuratriz, carregadeira etc.) e a energia elétrica usada nos demais equipamentos empregados no setor.

Dados da União Europeia mostram que a energia térmica consumida na calcinação representa entre 80% e 95% do consumo total de energia para a produção de cal. Esta varia entre 3,2 e 9,2 GJ/t segundo o tipo de forno, podendo chegar a 13 GJ/t (em casos específicos) (Tabela 1)(EIPPCB; IPTS, 2013). A calcinação também consome energia elétrica, entre 5 e 40 kWh/t de cal virgem; a hidratação, classificadores de ar e equipamentos de transporte, entre 5 e 30 kWh/t; e a energia para moagem, entre 4 e 40 kWh/t (Tabela 1)(EIPPCB; IPTS, 2013). A energia elétrica gasta nestas etapas é, de todo modo, pequena no montante total de energia consumida na produção de cal.

O processo de fabricação da cal é, como já se salientou, intensivo em energia na etapa de calcinação, que ocorre em fornos a temperaturas entre 900°C e 1200°C (EIPPCB; IPTS, 2013). A decomposição do calcário puro ocorre em torno de 900°C e a energia necessária é de cerca de 3,1 GJ/t. O dolomito requer menos energia, em torno de 2,6 GJ/t, devido às menores temperaturas exigidas para a decomposição do carbonato de magnésio.

No Brasil, a quantidade de energia incorporada no processo de produção de cal³ pode variar entre 2 e 4,4 GJ/t de cal hidratada (PUNHAGUI, 2014). O consumo de energia difere consideravelmente segundo o tipo de forno. Segundo Silva (2009), um “forno de barranco” consome cerca de 280 kg de óleo combustível por tonelada de cal virgem, enquanto que um forno tipo Maerz despende 89 kg. Se confirmados estes valores, a energia incorporada variaria⁴ entre 3 GJ/t e 11 GJ/t.

3.2. Emissões de dióxido de carbono

Um impacto importante do processo produtivo em âmbito global é a alta emissão de dióxido de carbono (CO₂), que ocorre principalmente na etapa de calcinação devido tanto à descarbonatação do calcário, quanto à queima de combustíveis para geração de energia térmica. Parcela importante das emissões de CO₂ são inerentes ao processo de transformação (descarbonatação) e sua

³ Desde a mineração até a porta da indústria.

⁴ Conversão segundo valores energéticos por tipo de combustível feita com base em parâmetros adotados pelo Balanço Energético Nacional (2013) (MME, 2013a).

proporção em relação à quantidade de produto final (cal virgem) pode ser estimada por meio do cálculo estequiométrico, conforme exemplificado abaixo e estimado no tópico 4.1:

Calcário cálcico	Calcário dolomítico
$\text{CaCO}_3 + \text{calor} = \text{CaO} + \text{CO}_2$	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 + \text{calor} = \text{CaO} + \text{MgO} + 2\text{CO}_2$

Com base nos dados do IPCC (1997) e do Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, a produção de uma tonelada de cal virgem cálcica emite 785 kg de CO_2 e de cal virgem dolomítica, 913 kg de CO_2 (IPCC, 1997) (MCT, 2010).

A quantidade de CO_2 emitida por tonelada de cal também depende da temperatura no processo de calcinação e do tempo de residência do produto no forno, que pode fazer variar a fração de calcário decomposto; do teor de calcário residual; do teor de óxidos não hidratados; do conteúdo e natureza das impurezas existentes na matéria-prima; e da granulometria da matéria prima.

As emissões de CO_2 também variam em função do tipo de matéria-prima e de cal que é produzida, pois algumas cales hidratadas para a construção civil podem conter mais de 30% de calcário moído, reduzindo tanto o consumo de energia (e as emissões associadas) quanto as emissões por descarbonatação. Além das emissões pela descarbonatação do calcário, deve-se considerar aquelas provenientes da queima de combustíveis no processo de manufatura, que variam segundo o tipo de combustível e quantidade consumida, que depende da tecnologia empregada.

Um forno vertical de fluxo paralelo regenerativo, por exemplo, pode consumir até três vezes menos energia que um forno “de barranco” descontínuo para a produção de cal virgem. Neste exemplo, usando a mesma fonte energética (óleo combustível), o primeiro forno emitiria cerca de 262 kgCO_2/t de cal virgem, enquanto o segundo, 823 kgCO_2/t pela queima de combustível⁵.

Cabe notar que em muitos empregos da cal, como argamassas de revestimento e estabilização de solos, o CO_2 de processo (da descarbonatação do calcário) é reabsorvido progressivamente. É provável que uma parte significativa seja reabsorvida em curto espaço de tempo.

4. Balanço de carbono e inventário de emissões de GEE

O inventário enfoca as emissões de CO_2 , principal gás de efeito estufa emitido pelo setor de cal. Neste item são descritos os métodos de estimação de CO_2 e os valores adotados para a composição de cenários para o ano de 2020 (ver tópico 6).

A estimação das emissões de CO_2 considera o carbono liberado por duas fontes: a) descarbonatação do calcário, e b) a queima de combustíveis no processo de produção da cal. A energia elétrica utilizada nas plantas de manufatura é desconsiderada nos cenários por ser de menor impacto.

⁵ Valores estimados segundo o consumo de combustíveis nos fornos declarado por SILVA (2009) e fatores de emissão segundo o MME (2013a).

4.1. Emissões de CO₂ provenientes da descarbonatação do calcário

As emissões de CO₂ provenientes da descarbonatação foram estimadas por meio de cálculo estequiométrico, que considerou os diferentes tipos de cales e os parâmetros das normas brasileiras NBR 6.453 e NBR 7.175, que definem teores de óxidos não hidratados, óxidos totais, anidrido carbônico (CO₂) e água combinada. Admitindo que todo o calcário cru é constituído de CaCO₃ e a fração não hidratada será preferencialmente MgO, as emissões resultantes variariam entre 464 e 868 kgCO₂/t de cal virgem, e entre 419 e 694 kgCO₂/t de cal hidratada (Tabela 3).

Tabela 3 Emissões de CO₂ devido a descarbonatação da cal (kgCO₂/t produto)

	Cal virgem			Cal hidratada		
		Máximo	Mínimo		Máximo	Mínimo
Calcítica	CV-E	786	584	CH-I	614	500
	CV-C	670	464	CH-II	527	499
	CV-P	670	468	CH-III	448	419
Dolomítica	CV-E	868	688	CH-I	694	664
	CV-C	789	560	CH-II	643	574
	CV-P	789	564	CH-III	547	429

Fonte: Elaboração própria.

Embora a Tabela 3 evidencie que as emissões da cal hidratada CH-III por tonelada de produto sejam menores que as demais, ao se analisar as emissões por toneladas de hidróxidos (parte reativa da cal) os resultados são o oposto (Tabela 4). Desta forma, a simples troca entre CH-I ou CH-II por CH-III não deve ser tomada como estratégia de mitigação, já que quanto menos reativa for uma cal, maior quantidade de produto será requerida para uma mesma função.

Tabela 4 Emissões de CO₂ devido a descarbonatação da cal hidratada (kgCO₂/t hidróxido)

		Máximo	Mínimo
Calcítica (pura)	CH-I	705	595
	CH-II	778	595
	CH-III	807	595
Dolomítica	CH-I	771	664
	CH-II	898	782
	CH-III	1007	672

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis

As emissões de CO₂ provenientes da queima de combustíveis foram estimadas considerando diversas fontes de informação⁶. Foram levantados dados diretos sobre as emissões de CO₂ para a produção de cal e energia gasta na calcinação; e indiretos sobre os tipos de cal, tipo e quantidade de combustível utilizado, tipos de fornos e matriz energética. Sobre os dados indiretos foram aplicados fatores de conversão de energia e emissão de CO₂ dos combustíveis, resultantes da tomada direta ou da média dos fatores encontrados nas referências⁷. Para os combustíveis da matriz energética, considerou-se: coque de petróleo com 35,13 MJ/kg e 3,30 kgCO₂/kg; gás natural seco com 36,85 MJ/m³ e 2,07kgCO₂/m³; óleo combustível com 40,18 MJ/kg e 3,03 kgCO₂/kg; moinha de carvão vegetal (finos, resíduos do beneficiamento) com 19,43 MJ/kg e 0 kgCO₂/kg; lenha com 12,98 MJ/kg e 1,46 kgCO₂/kg se fonte de carbono ou 0 kgCO₂/kg se neutra em carbono (ver Box 1).

Como pode ser visto na Tabela 5, os FV-FPR⁸ são os que gastam menos energia para a calcinação da cal, enquanto que os FV-A são os que mais consomem energia. Os FH-R variam seu desempenho segundo a perda de energia pela área superficial – função do comprimento – e da presença ou não de pré-aquecedor, que, além de reaproveitar o calor dos gases, permite reduzir o comprimento do forno e conseqüentemente a perda pela superfície. Fornos FH-R sem e com pré-aquecedor têm um consumo por tonelada de cal virgem de 7.327 a 4.606 MJ, respectivamente (THYSSENKRUPP, 2014). Os FV-CS apresentam desempenho mediano em relação ao consumo energético.

Os combustíveis utilizados nos fornos podem variar muito segundo o modelo empregado, aceitando-se sólidos, gasosos e líquidos. Segundo dados da ABPC (ABPC, 2014b), no Brasil, o emprego típico de combustíveis por tipo de forno obedece o seguinte padrão: FV-FPR emprega primordialmente coque de petróleo e moinha de carvão vegetal; FV-CS emprega predominantemente madeira (lenha e resíduos), em particular gaseificada; FH-R emprega predominantemente coque de petróleo e moinha de carvão vegetal; FV-A emprega predominantemente madeira (lenha e resíduos).

Estas, no entanto, são regras gerais. Foi relatado o uso de gás natural para processos de partida de fornos, bem como de outras fontes de biomassa. Existem também registros de queima de resíduos industriais perigosos em fornos verticais de alvenaria, gerando impactos ambientais importantes.

Já as emissões originadas do consumo de combustíveis em outras atividades como transporte e eletricidade são consideradas pequenas. Segundo Bajay (2010), o consumo específico de energia elétrica é de 15 kWh/t (cerca de 54 MJ/t)⁹, que equivale a 0,66 kgCO₂/t cal virgem. Estimativas pró-

6 (ABPC, 2014c), (ABPC, 2014b), (SEABRA, 2014b), (SEABRA, 2014a), (SEABRA, 2012), (CIMPROGETTI, 2014), (COSTA, 2012), (TAVARES, 2006), (MCT, 2006b), (SILVA, 2009), (MCT, 2010), (BAJAY, 2010), (APL, 2008), (CIMPROGETTI; SARANDREA, 2013), (HONGKE, 2014), (MAERZ, 2014), (THYSSENKRUPP, 2014).

7 (MME, 2013b), (GHG PROTOCOL; FGV, 2013) (MME, 2013b) (CETESB, [s.d.]) (CETESB, 2010) (GHG PROTOCOL; FGV, 2012), (FRANCESCATO; ANTONINI; BERGOMI, 2008), (EGGLESTON; IPCC, 2006), (BRAND; MUÑIZ, 2010), (IPCC, 2011), (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2012), (ÁLVARES.JR; LINKE, 2001), (GHG PROTOCOL; FGV, 2012), (ANP, 2010), (CARASCHI; PINHEIRO; VENTORIM, 2012), (GARCIA, 2010), (COUTO et al., [s.d.]), (MELO et al., 2005).

8 Os nomes dos fornos, referidos doravante pelas suas siglas, estão detalhados na Tabela 1.

9 Valor abaixo de outras referências que explicita faixa de variação de consumo energético.

prias sobre dados primários mostram que na mineração são gastos cerca de 0,31 litros de diesel por tonelada de calcário (CaCO_3) extraído (equivalente a 0,56 l/t de cal virgem (CaO) produzida), o que resulta em uma emissão de 0,84 kgCO_2/t calcário (ou 1,50 kgCO_2/t cal virgem)¹⁰. Esses valores são ínfimos no montante final de emissões de CO_2 da cal.

Desta forma, entendendo que as emissões de CO_2 pela descarbonatação do calcário são inerentes ao processo de produção da cal e constantes em relação à matéria-prima, as variações nas emissões do setor ficam condicionadas à mudança no desempenho dos fornos e no tipo de combustível empregado, elementos que serão estudados na composição dos cenários para uma economia de baixo carbono. Em suma, as Tabela 3 e Tabela 5 resumem os valores de energia e emissão de CO_2 considerados para o setor da cal para os processos de descarbonatação e calcinação, respectivamente.

Tabela 5 Emissões e gasto de energia na calcinação – valores considerados para a composição dos cenários

	Emissão (kgCO_2/t)		Energia (MJ/t)	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Forno em geral	188	1.475	3.350	13.162
Forno artesanal ou de alvenaria (FV-A)	479	1.475	5.234	13.162
Fornos vertical fluxo paralelo regenerativo (FV-FPR)	188	337	3.350	4.245
Forno vertical de cuba simples (FV-CS)	399	624	5.303	5.860
Forno horizontal rotativo (FH-R)	564	565	4.606	8.374

Fonte: Elaboração própria com base nas fontes e metodologia detalhadas neste tópico.

5. Mudanças climáticas e mudança tecnológica

Neste item, são avaliados alguns conceitos e tecnologias cujo potencial de mitigação tem sido apresentado em publicações internacionais, particularmente no *BAT - Best Available Techniques* da União Europeia. Os dados coletados foram objeto de análise qualitativa, que procurou analisar a pertinência e viabilidade de certas propostas para a realidade brasileira.

5.1. Novas rotas tecnológicas

Calcinador solar é um reator solar para efetuar a reação endotérmica da calcinação de partículas de calcário (QUALICAL et al., 2000)(MEIER; GREMAUD; STEINFELD, 2005)(MEIER et al., 2006). Projeto piloto executado, mas não se tem notícia de seu emprego em escala industrial.

¹⁰ Conversão entre calcário (CaCO_3) e cal virgem (CaO) por relação estequiométrica, onde uma tonelada de cal virgem equivale a 1,79 toneladas de calcário.

5.2. Redução das emissões de CO₂

A redução das emissões de CO₂ pode ocorrer por: (1) mudanças na matriz energética, com o emprego de combustível com menor teor de carbono, menor uso dos mesmos ou troca de combustível fóssil por renováveis ou resíduos; (2) captura e sequestro do dióxido de carbono, que pode ser feita por tratamento pós-combustão, combustão com oxigênio puro ou pré-combustão (EIPPCB; IPTS, 2013).

5.3. Aumento da eficiência energética

O aumento da eficiência energética pode ocorrer com: (1) uso de fornos eficientes ou modernização de fornos, levando em conta que a modernização deveria visar adaptações para a redução do consumo de energia, otimização da granulometria do calcário e aumento do controle de processo; (2) uso de moinhos eficientes, que tende a ser uma estratégia de impacto menor, uma vez que diminui o consumo de eletricidade que pouco influencia no montante total de energia gasta e nas emissões de CO₂; (3) controle do processo (automação) que melhora a eficiência energética e a qualidade do produto; (4) lavagem do calcário, que visa aumentar o espaço livre entre as pedras melhorando a queima, mas a umidade resultante pode afetar negativamente o processo de calcinação bem como interferir na qualidade da cal (SEABRA, 2014a)(EIPPCB; IPTS, 2013).

5.4. Redução dos resíduos

A redução dos resíduos pode ocorrer pela: (1) diminuição de perdas, com reutilização de material perdido ou coletado nos filtros ou diminuição da periodicidade de desligamento dos fornos; e (2) melhoramento do rendimento da matéria-prima, com a otimização da mineração e técnicas de processamento da cal e com a ampliação da gama de tamanhos dos grãos do calcário (EIPPCB; IPTS, 2013).

5.5. Redução da emissão de poeira

A diminuição das emissões de poeira pode ser feita, sobretudo, por meio de: (1) encapsulamento de operações que geram poeira; (2) manuseio de materiais dentro de sistemas fechados sob pressão negativa e despoeiramento do ar com aspiração por um filtro de tecido; (3) redução da fuga de ar e pontos de derrame; (4) utilização de tubos flexíveis de enchimento para carga do caminhão; (5) estoque de material em local fechado; (6) uso de sprays de água em locais secos; sistemas a vácuo; (7) filtros (EIPPCB; IPTS, 2013); (8) plantio e manutenção de árvores ao redor das áreas de produção; (9) manutenção dos equipamentos de controle de poluição do ar; e (10) altura das chaminés adequadas à boa dispersão dos poluentes (SILVA, 2009).

Tabela 6 Resumo da avaliação prévia das estratégias para diminuição de impactos na produção de cal

Tecnologia	Comentário
Calcinador solar	Não pertinente
Redução das emissões do CO ₂	
Mudança de combustíveis	Pertinente (prioritário)
Captura de CO ₂	Interesse remoto
Aumento da eficiência energética	
Uso de fornos eficientes ou modernização de fornos	Pertinente (prioritário)
Uso de moinhos eficientes	Pertinente
Controle do processo – automação	Pertinente
Sistema de recuperação de vapor	Pertinente
Lavagem do calcário	Não pertinente
Redução de resíduos	
Diminuição de perdas	Pertinente
Melhoramento de rendimento da matéria-prima	Pertinente
Redução da emissão de poeira	Pertinente

Fonte: Elaboração própria

6. Projeções das emissões setoriais de CO₂ no Brasil até 2020

Como visto no item 4, as principais emissões de CO₂ na produção da cal provêm de duas fontes: a) da descarbonatação da pedra calcária, b) da queima de combustíveis no processo de calcinação. As emissões de CO₂ pela descarbonatação do calcário são inerentes ao processo e, portanto, consideradas um fator não manejável para a diminuição das emissões de carbono. Estratégias para a mitigação das emissões de CO₂ do setor da cal devem basear-se, em um primeiro momento, na mudança de combustíveis e tecnologia empregada na calcinação (Tabela 6).

Os panoramas para a redução das emissões de CO₂ até o ano 2020 baseiam-se na mudança destes fatores sobre um cenário base, que representa o panorama atual do setor da cal com relação à energia consumida e emissões de CO₂ no processo de calcinação. Para a análise dos impactos nas emissões de CO₂ resultantes da mudança na matriz energética e dos tipos de fornos foram compostos quatro cenários:

- **Cenário 1** – Cenário Base. Apresenta o *business as usual* do setor da cal com relação à energia consumida e emissões de CO₂ no processo de calcinação.

- **Cenário 2** – Mudança de combustíveis. Avalia os impactos nas emissões de CO₂ da mudança de combustíveis no processo de calcinação.
- **Cenário 3** – Mudança de tecnologia. Avalia os impactos nas emissões de CO₂ e energia da mudança nos tipos de fornos.
- **Cenário 4** – Mudança de combustíveis e tecnologia. Avalia os efeitos na energia e emissões de CO₂ no setor da cal da modificação em conjunto dos combustíveis e da tecnologia no processo de calcinação.

Os níveis de produção seguem inalterados entre todos os cenários, sendo considerados fatores variantes apenas os tipos de fornos e a matriz energética. Foram consideradas somente as emissões diretas da queima dos combustíveis. Para agregar variações técnicas existentes no setor e apreender o potencial de cada uma das soluções dos diferentes cenários, foi estimada uma faixa de valores limítrofes apresentada em mínimos e máximos.

A composição dos cenários considerou os fatores de energia e emissão de CO₂ dos combustíveis (ver item IV.2). A quantidade de cal produzida foi determinada segundo valores indicados pela ABPC para o ano 2013 (ver Tabela 7). A evolução futura do consumo interno de cal (em massa) foi estimada com base em um modelo econométrico descrito no relatório que detalha os resultados desta pesquisa (JOHN; PUNHAGUI; CINCOTTO, 2014). Admitindo que o comércio exterior no setor siga sendo irrelevante, as taxas de crescimento da produção até 2020 correspondem às taxas de crescimento do consumo. São essas taxas que embasam os valores projetados apresentados na Tabela 7.

O **cenário 1** apresenta o panorama *business as usual* do setor da cal com relação à produção, energia e emissões de CO₂. Os valores de produção partiram de informações da ABPC do ano 2013 (Tabela 2) e consideraram a proporção entre cales virgens (72,7%, média) e hidratadas (27,3%, média), segundo informação da ABPC. A distribuição da produção entre cal virgem calcítica e dolomítica é de 80% a 85% para a primeira e de 15% a 20% para a segunda. A cal hidratada calcítica representa de 20% a 30% da produção e a cal hidratada dolomítica de 70% a 80% (SEABRA, 2014b). As projeções de crescimento da produção resultaram da aplicação das taxas de crescimento anual estimadas sobre a produção do ano 2013. Os valores de produção resultantes são apresentados na Tabela 7.

Embora não entrem na discussão dos cenários, as emissões de CO₂ pela descarbonatação do calcário foram estimadas para melhor conhecimento da situação atual. Estas consideraram as projeções para a quantidade produzida por tipo de cal (Tabela 7) e as emissões de CO₂ por tipo de cal (Tabela 3).

Para calcular a energia e emissões de CO₂ pela queima de combustíveis no processo de calcinação da cal no Cenário 1, foi necessário estimar a quantidade de cal produzida por tipo de forno, baseando-se em informações da ABPC. O valor médio de distribuição foi aplicado sobre a produção total, resultando na quantidade estimada de cal produzida por tipo de forno (Tabela 8).

Tabela 7 Estimativa de produção de cal até ano 2020

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Taxa de crescimento (%) (adotada)		2,13%	2,15%	2,31%	2,87%	2,80%	2,65%	2,52%
Produção total de cal	7.535	7.696	7.861	8.043	8.274	8.506	8.731	8.951
Produção cal virgem (CV)	5.519	5.637	5.758	5.891	6.060	6.230	6.395	6.556
Produção CV calcítica	4.553	4.650	4.750	4.860	5.000	5.140	5.276	5.409
Produção CV dolomítica	966	986	1.008	1.031	1.061	1.090	1.119	1.147
Produção cal hidratada (CH)	2.016	2.059	2.103	2.152	2.214	2.276	2.336	2.395
Produção CH calcítica	504	515	526	538	553	569	584	599
Produção CH cal dolomítica	1.512	1.544	1.578	1.614	1.660	1.707	1.752	1.796

Fonte: Elaboração própria com base em metodologia detalhada neste tópico.

Tabela 8 Produção de cal por tipo de forno

Tipos de fornos	Porcentagem da produção (%)			Combustível predominante	Produção em 2013 (toneladas)
	Variante 1	Variante 2	Média		
FV-A	18%	16%	17%	MA	1.254.795
FV-CS	28%	25%	27%	MA	2.009.380
FV-FPR	42%	46%	44%	C, M, G*, O*	3.332.411
FH-R	12%	13%	12%	C, M, G*, O*	938.414
FV-A + FV-CS	46%	41%	43%	MA	3.264.175
FV-FPR + FH-R	54%	59%	57%	C, M, G*, O*	4.270.825
Total	100%	100%	100%	-	7.535.000

Legenda:

FV-A: forno vertical de alvenaria, FV-CS: forno vertical de cuba simples (tipo Azbe), FV-FPR: forno vertical de fluxo paralelo regenerativo (tipo Maerz), FH-R: forno horizontal rotativo.

MA – madeira, C – coque de petróleo, M – moinha, G – gás natural seco, O – óleo combustível

* gás natural e óleo combustível em menor quantidade, assim como observado na matriz energética.

Fonte: Elaboração própria com base em metodologia detalhada neste tópico.

Desta forma, a energia gasta para a produção de cal resultou da aplicação dos fatores de consumo energético de cada forno (Tabela 5) sobre a massa total produzida. As emissões de CO₂ pelo processo de calcinação (queima nos fornos) foram calculadas a partir do gasto energético, com o qual se estimou a quantidade de combustível, sobre o qual se aplicou o fator de emissão de CO₂ do combustível. O combustível por tipo de forno considerou a simplificação apresentada na Tabela 8, e os valores de energia e emissão de CO₂ por tipo de combustível consideraram aqueles apresentados no item 4.2.

O **cenário 2** objetiva avaliar os efeitos nas emissões de CO₂ da mudança de combustíveis na matriz energética. Os valores de consumo energético por tipo de forno ficam inalterados para que

os efeitos da modificação de um único parâmetro possam ser melhor observados e discutidos. A variação dos combustíveis baseia-se fundamentalmente na diminuição do percentual de madeira fonte de carbono (ver Box 1) e de coque de petróleo na matriz energética.

Box 1 Conceito de fonte de carbono e carbono neutro relacionados à madeira

O conceito de carbono neutro presume que a mesma quantidade de carbono absorvido na fotossíntese, incorporada na árvore, será emitida ao final do ciclo de vida, quando a madeira é queimada ou degradada, liberando o carbono armazenado de volta à atmosfera. Neste ciclo, o saldo de carbono seria praticamente zero, ou seja, sem efeito emissivo líquido na atmosfera (LUYSSAERT et al., 2008)(JOHN A., 2008)(PUNHAGUI, 2014).

No caso da madeira plantada, o conceito de carbono neutro pode ser empregado, uma vez que esta absorve durante seu crescimento o carbono que será emitido à atmosfera ao final de seu ciclo de vida.

Isto é bem diferente do que ocorre com madeiras provenientes de fontes não sustentáveis de produção. Ao retirar-se a madeira da floresta nativa de maneira convencional, considerável quantidade de biomassa é destruída, convertendo-se em resíduos que, por processos de queima ou degradação emitem carbono, revertendo o processo de fotossíntese. Sem a recomposição da biomassa destruída, como é usual em extrações convencionais, o carbono estocado na floresta nativa diminui, aumentando o saldo de CO₂ na atmosfera. Desta maneira, a madeira nativa extraída de forma não sustentável pode ser considerada fonte de carbono, devendo ser contabilizadas as emissões de sua queima ou degradação (PUNHAGUI, 2014).

O **cenário 3** objetiva avaliar os efeitos nas emissões de CO₂ e energia da mudança de tipos de fornos. Para que a mudança entre fornos possa ser avaliada sem interferências, mantém-se constante o atual percentual estimado de uso de madeira fonte de carbono e os fatores de consumo de energia por tipo de forno (Tabela 5). Mudanças na matriz energética, no entanto, estão implícitas na modificação do tipo de forno. Exceto por essa variação automática, outras alterações não foram feitas, ou seja, cada forno mantém os combustíveis inicialmente a ele vinculados (Tabela 8). A variação nos tipos de fornos baseia-se em: a) mudar todos os fornos FV-CS do estado de São Paulo para FV-FPR (situação possivelmente viável dado o porte das empresas paulistas que empregam FV-CS); b) mudar todos os FV-A para FV-CS, e todos os FV-CS para FV-FPR (cenário de incremento tecnológico a partir da tecnologia previamente utilizada).

O **cenário 4** objetiva avaliar os efeitos nas emissões de CO₂ e energia da mudança conjunta dos combustíveis e tipos de fornos. Analisa as melhores mudanças efetuadas (nos cenários anteriores), estimando as possibilidades de mitigação de CO₂ até 2020. Este cenário é composto por três propostas: a) de curto prazo, que diminui o uso da madeira fonte de carbono para 3% a 8% da matriz

energética¹¹ e aumenta o uso de moinha (ou outro combustível neutro em carbono) para 14% da matriz energética¹²; b) de médio prazo, que diminui o uso da madeira fonte de carbono para 0% da matriz energética e aumenta o uso de moinha para 23% da matriz energética¹³; c) de longo prazo, que diminui o uso da madeira fonte de carbono para 0% da matriz energética, aumenta o uso de moinha, ou outros combustíveis neutro em carbono, para 30% da matriz energética e converte os FV-A para FV-CS e os FV-CS para FV-FPR¹⁴.

6.1. Resultados dos cenários

6.1.1 Cenário 1 – Cenário base (*business as usual*)

Em 2013, as emissões pela descarbonatação do calcário na produção de cal no Brasil se situaram entre 3.514 e 5.775 GgCO₂. Se o mesmo padrão de distribuição da produção for mantido até 2020, serão emitidos entre 4.174 e 6.860 GgCO₂ (Tabela 9). Esses valores, se divididos pelo total de cal produzida (sem distinção por tipo de cal), resultam em emissões entre 466 e 766 kgCO₂/t, coeficientes que estão dentro da faixa de emissões definida.

As emissões de carbono pela queima de combustíveis nos fornos (processo de calcinação) foram, em 2013, de 1.533 a 2.464 Gg de CO₂. A energia gasta entre 32.708 a 50.295 TJ. Se a distribuição da produção por tipos de fornos e a matriz energética forem mantidas no ano de 2020, estima-se que a energia gasta se situará entre 38.853 e 59.745 TJ e as emissões de CO₂ entre 1.821 e 2.927 Gg (Tabela 9). Somando as emissões de CO₂ da descarbonatação e calcinação, tem-se entre 5.047 e 8.239 GgCO₂ pela produção de cal no ano de 2013. Se forem mantidas as mesmas condicionantes, esses valores seriam entre 5.995 e 9.787 GgCO₂ em 2020 (Tabela 9). As emissões da descarbonatação são equivalentes a 70% das emissões totais do setor e as emissões da queima de combustível nos fornos, aos restantes 30%.

Como comentado anteriormente, as emissões pela descarbonatação são inerentes ao processo. Por isso, ainda que a queima de combustíveis nos fornos responda por aproximadamente 1/3 das emissões totais, a partir deste ponto os cenários serão discutidos sobre os dados de energia e emissão de CO₂ provenientes do processo de calcinação, ou seja, ficam excluídas das discussões dos cenários as emissões de CO₂ pela descarbonatação.

No padrão de produção atual, a energia gasta no processo de calcinação está entre 4.341 e 6.675 MJ/t de cal e as emissões de CO₂ pela queima de combustíveis nos fornos, entre 203 e 327 kgCO₂/t de cal. A faixa de variação da energia consumida na calcinação por tonelada de cal produzida é compatível com as referências nacionais e internacionais. A faixa de variação das emissões de CO₂ (calcinação), embora dentro da previamente estimada, apresenta mais proximidade aos menores

11 Valores referentes à redução de cinco pontos percentuais da madeira fonte de carbono na matriz energética.

12 Valor referente a 30% do percentual de coque de petróleo na matriz energética atual, sem mudança de fornos.

13 Valor referente a 50% do percentual de coque de petróleo na matriz energética atual, sem mudança de fornos.

14 Valor referente a 50% do percentual de coque de petróleo na matriz energética resultante da nova distribuição dos fornos.

valores para as emissões por queima de combustíveis nos fornos. Isto se deve à quantidade de cal produzida por fornos tipos Azbe e de alvenaria, que utilizam madeira em grande parte neutra em carbono. Estima-se que entre 90% e 100% da madeira empregada na produção de cal no Paraná e São Paulo, respectivamente, seja neutra em carbono (ver item 3.1).

Tabela 9 Resultados do Cenário 1

	Ud	2013		2020		Taxa de variação
Produção	Mil t	7.535		8.950		
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Máx./Mín.
Consumo de energia ¹	TJ	32.708	50.295	38.853	59.745	54%
Emissão de CO ₂ pela calcinação ²	GgCO ₂	1.533	2.464	1.821	2.927	61%
Emissão de CO ₂ por descarbonatação ³	GgCO ₂	3.514	5.775	4.174	6.860	64%
Emissão de CO ₂ total ⁴	GgCO ₂	5.047	8.239	5.995	9.787	63%

¹ Considerada somente energia térmica na calcinação.

² Considerado somente emissão de CO₂ pela queima direta de combustíveis.

³ Resultado de cálculo estequiométrico, com adoção das variantes normativas, sobre a produção por tipo de cal.

⁴ Soma da emissão de CO₂ da descarbonatação e da calcinação.

Fonte: Elaboração própria.

Embora as emissões de CO₂ sejam mais baixas do que algumas referências internacionais devido ao uso de madeira neutra em carbono, isto não se relaciona à eficiência produtiva. Os fornos em alvenaria, por exemplo, ainda que tenham apresentado emissões de CO₂ mais baixas, são ineficientes em termos energéticos. Seu consumo de energia varia entre 5.234 e 13.162 MJ/t, entre 56% e 310% a mais que FV-FPR, o que acarreta sobrecarga de demanda de insumo energético.

Tabela 10 Resultados do Cenário 1 considerados para discussão dos demais cenários

	ud	2013		2020		Taxa de variação
Produção por tipo de forno	t					
Barranco (FV-A)		1.254.795		1.490.576		
Azbe (FV-CS)		2.009.380		2.386.952		
Maerz (FV-FPR)		3.332.411		3.958.586		
Rotativo (FH-R)		938.414		1.114.746		
Total		7.535.000		8.950.860		
		Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Máx./Mín.
Energia térmica	TJ					
Barranco (FV-A)		6.567	16.515	7.801	19.619	

continua

Azbe (FV-CS)	10.656	11.775	12.658	13.988	
Maerz (FV-FPR)	11.162	14.146	13.260	16.804	
Rotativo (FH-R)	4.322	7.858	5.134	9.335	
Total	32.708	50.295	38.853	59.745	54%
<hr/>					
Emissão pela calcinação	GgCO ₂				
Barranco (FV-A)	135	567	161	674	
Azbe (FV-CS)	220	404	261	480	
Maerz (FV-FPR)	919	1.165	1.092	1.384	
Rotativo (FH-R)	259	328	307	390	
Total	1.533	2.464	1.821	2.927	61%

Fonte: Elaboração própria.

6.1.2. Cenário 2 – Mudança de combustíveis

As emissões derivadas do uso de madeira fonte de carbono podem ser evitadas pela troca da lenha de mata nativa (de fonte não sustentável) por lenha de plantação, resíduos da indústria madeireira ou pellet de madeira.

A diminuição em cinco pontos percentuais¹⁵ no uso de madeira fonte de carbono pode mitigar entre 14% e 16% as emissões de CO₂. Se na matriz energética 0% da lenha fosse fonte de carbono, as emissões baixariam entre 23% e 39% (Tabela 11), sem modificar nenhum outro parâmetro, como fornos ou a distribuição dos combustíveis na matriz energética.

Sem mudar o percentual estimado de uso de madeira fonte de carbono, mas substituindo todo o coque de petróleo por gás natural, seria possível baixar as emissões de CO₂ entre 20% e 26% (Tabela 11). Neste caso não haveria inversão financeira em mudança tecnológica, mas sim aumento de custo pela troca entre combustíveis, o que seria um fator adverso deste cenário.

Outra opção seria aumentar a quantidade de moinha (ou outro combustível neutro em carbono) em substituição ao coque de petróleo. Se o coque fosse diminuído em 10%, ou seja, passasse a representar 37% da matriz energética setorial e a moinha a 6%, as emissões poderiam baixar entre 5% e 6% (Tabela 11). Mais ainda, se o coque de petróleo fosse reduzido em 30%, ou seja, passasse a representar 29% da matriz energética e a moinha a 14%, as emissões diminuiriam entre 15% e 19% (Tabela 11).

A mudança de combustível mostra-se, portanto, com grande potencial para a redução das emissões de CO₂ do setor. Algumas conversões são de fácil acesso às empresas sem grandes alterações de logística, enquanto que outras podem ser dificultadas pela disponibilidade local e custo.

6.1.3 Cenário 3 – Mudança de tecnologia

Se toda a produção de cal do estado de São Paulo passasse a ser produzida em FV-FPR em substituição ao FV-CS, seria possível diminuir a energia consumida entre 2% e 4%, percentuais consi-

¹⁵ Varia de 8% a 13% na matriz energética para 3% a 8% na matriz energética.

derados baixos para a magnitude do investimento. As emissões, por sua vez, aumentariam entre 4% e 8% devido ao uso do coque de petróleo nos FV-FPR (Tabela 11).

Por outro lado, se fosse possível que toda a produção feita em FV-A passasse para FV-CS e toda a produção feita em FV-CS passasse para FV-FPR, seria possível uma redução de consumo energético entre 12% e 25%. As emissões de CO₂ poderiam diminuir 1% ou aumentar até 22% (Tabela 11). Um aumento poderia eventualmente ocorrer uma vez que neste cenário não se considerou a mudança nos combustíveis consumidos por tipo de forno. Assim, a produção de cal feita em FV-CS, que operam majoritariamente com madeira neutra em carbono, passaria a ser feita em FV-FPR, que operam majoritariamente com coque de petróleo. De toda maneira, os efeitos deste cenário podem ser potencializado pela mudança de combustíveis por tipo de forno.

6.1.4. Cenário 4 – Mudança de combustíveis e tecnologia

Neste cenário se avaliam ações conjuntas de mudanças de combustíveis e tecnologia. Acredita-se que a curto prazo seria possível diminuir o uso de madeira fonte de carbono em cinco pontos percentuais (que passaria a representar entre 3% e 8% da matriz energética) e aumentar o uso da moinha, ou outros combustíveis neutros em carbono, em substituição ao coque, para 14,1% da matriz energética¹⁶. Neste caso, seria possível diminuir as emissões de CO₂ entre 31% e 34% (Tabela 11), sem mudança de tecnologia empregada. Isto não afetaria a estrutura das empresas nem requeria altos investimentos. Por outro lado, seria necessário fortalecer os setores/indústrias fornecedores de tais combustíveis.

Em médio prazo, o aumento do uso da moinha (ou outro combustível neutro em carbono) para 23% da matriz energética¹⁷ e o uso de 100% de madeira neutra em carbono poderiam diminuir as emissões de CO₂ do setor entre 55% e 65% (Tabela 11), sem modificações tecnológicas. Em ambos os casos, não haveria incremento do desempenho energético, o que gera excedente da demanda de combustíveis.

A longo prazo, se fosse possível o incremento tecnológico em todos os níveis de produção da cal, ou seja, conversão de FV-A para FV-CS e FV-CS para FV-FPR, acompanhado do uso de 100% de madeira neutra em carbono e o aumento de combustíveis neutros em carbono para 30% da nova matriz energética¹⁸, seria possível diminuir as emissões de CO₂ entre 29% e 44% (Tabela 11), valor menor que a proposta a médio prazo. Porém, a eficiência energética, que não é alterada nas duas propostas anteriores, melhora. Haveria uma diminuição do consumo energético entre 12% e 25% (Tabela 11).

Sendo assim, dentro do que é manejável no setor da cal para uma economia de baixo carbono, acredita-se que primeiramente deve-se estimular a mudança de combustíveis, e em paralelo, deve haver estímulos para a mudança tecnológica.

16 Diminuindo o coque em 30%, este passaria de 41,3% da matriz energética para 28,9%, enquanto que a moinha (ou outro combustível neutro em carbono) passaria de 1,9% para 14,3% da matriz energética.

17 Diminuindo o coque em 50%, este passaria de 41,3% da matriz energética para 20,7%, enquanto que a moinha (ou outro combustível neutro em carbono) passaria de 1,9% para 22,6% da matriz energética.

18 Valor referente a 50% do que seria o percentual do coque na nova matriz energética, resultante da redistribuição dos fornos.

Tabela 11 Resumo dos resultados dos cenários estudados

	ud	2013		2020		Variação em relação ao valor referencial	
		Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
CENÁRIO 1 - Base							
Produção	Mil t	7.535		8.950			
Consumo de energia ¹	TJ	32.708	50.295	38.853	59.745		
Emissão de CO ₂ pela calcinação ²	GgCO ₂	1.533	2.464	1.821	2.927		
CENÁRIO 2 – Mudança de combustíveis							
Madeira fonte de carbono na matriz energética = entre 3% e 8%	GgCO ₂	1.312	2.078	1.558	2.469	-14%	-16%
Madeira fonte de carbono na matriz energética = 0%	GgCO ₂	1.178	1.493	1.399	1.773	-23%	-39%
Substituição integral do coque por gás natural	GgCO ₂	1.140	1.966	1.354	2.336	-26%	-20%
Diminuição do coque em 10% ³	GgCO ₂	1.435	2.340	1.705	2.780	-6%	-5%
Diminuição do coque em 30% ⁴	GgCO ₂	1.239	2.092	1.472	2.486	-19%	-15%
CENÁRIO 3 – Mudança de tecnologia							
Mudança de FV-CS p/ FV-FPR em SP	GgCO ₂	1.654	2.575	1.965	3.056	+8%	+4%
Mudança de FV-CS p/ FV-FPR em SP	TJ	31.285	49.118	37.163	58.348	-4%	-2%
Incremento tecnológico em todos os níveis de produção ⁵	GgCO ₂	1.865	2.444	2.215	2.903	+22%	-1%
Incremento tecnológico em todos os níveis de produção ⁵	TJ	28.920	37.929	34.355	45.057	-12%	-25%
CENÁRIO 4 - Mudança de combustíveis e tecnologia							
Mudança de combustíveis ⁶	GgCO ₂	1.018	1.707	1.210	2.027	-34%	-31%
Mudança de combustíveis ⁷	GgCO ₂	689	873	818	1.037	-55%	-65%
Mudança de combustíveis e fornos ⁸	GgCO ₂	1.081	1.370	1.284	1.628	-29%	-44%
Mudança de combustíveis e fornos ²	TJ	28.920	37.929	34.355	45.057	-12%	-25%

Notas:

¹ Considerada somente energia térmica. Matriz energética é composta por lenha (43%), coque de petróleo (41%), gás natural (12%), moinha (2%) e óleo combustível (2%). Estima-se que a madeira fonte de carbono seja entre 8% e 13% da matriz energética.

² Considerando somente emissão de CO₂ pela queima direta de combustíveis.

³ Matriz energética passa a ter 37,2% de coque de petróleo e 6,1% de moinha.

⁴ Matriz energética passa a ter 28,9% de coque de petróleo e 14,3% de moinha.

⁵ Mudança de FV-A para FV-CS (tipo Azbe) e de FV-CS para FV-FPR (tipo Maerz).

⁶ Diminuição da madeira fonte de carbono para 3% a 8% e aumento de combustíveis neutros em carbono, em substituição ao coque de petróleo, para 14,3% da matriz energética.

⁷ Diminuição da madeira fonte de carbono para 0% e aumento de combustíveis neutros em carbono, em substituição ao coque de petróleo, para 23% da matriz energética.

⁸ Mudança de FV-A para FV-CS e de FV-CS para FV-FPR; e matriz energética composta por 30% de moinha (ou outro combustível neutro em carbono), 17% de lenha neutra em carbono, 33% coque de petróleo, 17% gás natural, 3% óleo combustível.

Fonte: Elaboração própria.

7. Diretrizes de uma política pública setorial para a transição rumo à Economia de Baixo Carbono

Parcela importante das emissões de CO_2 na produção da cal ocorre pela descarbonatação da pedra calcária, uma parte inerente ao processo de transformação industrial e sobre a qual pouco se pode fazer para diminuir as emissões de CO_2 . Uma estratégia para reduzir as emissões de CO_2 seria, por meio de normativa, reduzir o teor máximo de óxidos não hidratados na cal hidratada. Além disso, a redução das emissões de carbono deve focar as emissões decorrentes da queima de combustíveis nos fornos.

Neste estudo, foram avaliadas possíveis estratégias de mitigação das emissões de CO_2 por meio de três cenários que ponderaram sobre: 1) mudanças na matriz energética; 2) mudanças de tecnologia; e 3) mudanças de tecnologia e combustíveis.

Os resultados indicaram que alterações nos combustíveis utilizados têm grande potencial para a redução das emissões de CO_2 provenientes da fase de calcinação, enquanto que mudanças dos fornos teriam menor influência. A troca de combustíveis fósseis para neutros em carbono diminui consideravelmente as emissões de CO_2 . Acredita-se que a implementação desta estratégia seja não somente viável mas de rápida absorção pelo setor, uma vez que não exige modificações tecnológicas consideráveis e que parte da produção já é feita com uso deste tipo de insumo energético.

Desta forma, acredita-se que para implantar uma economia de baixo carbono no setor da cal no Brasil deve-se em um primeiro momento incentivar o uso de combustíveis neutros em carbono, como resíduos de outros processos produtivos ou madeira plantada. Para isto, seria necessário apoiar pesquisas que introduzam melhorias no aproveitamento energético de biomassa, como pellets, serragem, outros resíduos de madeira e biomassa gaseificada. A identificação de resíduos orgânicos de outras origens, que tenham poder calorífico e composição química adequada, também deve ser apoiada.

Para escalar o uso destes combustíveis limpos, é necessário desenvolver soluções de beneficiamento capazes de gerar combustíveis com propriedades térmicas e químicas controladas e compatíveis com os fornos de cal. Esta também é uma oportunidade de novos negócios verdes dentro da cadeia da cal. Outras medidas incluem financiar possíveis adaptações ou modificações tecnológicas necessárias para a incorporação de novos combustíveis, amparar a organização logística entre fornecedores de insumos energéticos com menor emissão de carbono e as indústrias consumidoras, e favorecer o desenvolvimento da indústria madeireira (preferencialmente a silvicultura).

Outra estratégia subsequente seria apoiar a implantação de fornos energeticamente eficientes, promovendo a redução dos fornos de alvenaria (artesanais) e a modernização dos fornos, com a troca de fornos verticais de cuba simples por fornos verticais de fluxo paralelo regenerativo. Para tanto, seriam necessários apoio financeiro às empresas e políticas públicas de incentivo.

A implantação de tais estratégias depende de uma articulação setorial estruturada envolvendo os setores público, privado e entidades de pesquisa. Esta articulação é condição para a

construção de políticas públicas eficazes na promoção de estratégias que resultem na mitigação das emissões. O principal desafio será desenvolver planos que atinjam os pequenos produtores que operam de maneira parcialmente informal. Uma vez consolidada a articulação setorial, incluindo a definição de políticas e de mecanismos de financiamento, acredita-se que seja possível obter resultados entre 5 e 10 anos.

Referências Bibliográficas

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6453:2003. Cal virgem para construção civil - requisitos*. ABNT, 2003a.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7175:2003. Cal hidratada para argamassas*. ABNT, 2003b.
- ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal. *Associação Brasileira dos Produtores de Cal*. Disponível em: <<http://www.abpc.org.br/frame.htm>>. Acesso em: 5 jul. 2014a.
- ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal. *Visão Geral do Setor da Cal*, ago. 2014b.
- ABPC - Associação Brasileira dos Produtores de Cal. *Documento para coleta de dados: destinado à ABPC*. Mauro Adamo Seabra, 15 ago. 2014c.
- ÁLVARES.JR, O. DE M.; LINKE, R. R. A. *Metodologia simplificada para cálculo das emissões de gases do efeito estufa das frota de veículos no Brasil*. CETESB, 2001. Disponível em: <www.ambiente.sp.gov.br/proclima/PDF/inventario_efeitoestufa.pdf>
- ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - 2010*. Rio de Janeiro: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Brasil), 2010.
- APL - Arranjos Produtivo Local - Cal e Calcário do Paraná. *Matrizes energéticas alternativas para industrialização da cal no Paraná. Projeto Fortalecimento tecnológico do APL de cal e calcário do Parnaá. Meta física III*. Curitiba: [s.n.]. v. III
- BAJAY, S. V.; SANT'ANA, P. H. DE M. *Oportunidades de eficiência energética para indústria. Relatório setorial. Cal e gesso*. Brasília: CNI, Procel, Eletrobras, 2010.
- BORIM, G. V. *Resultado da Análise – Pellet*. Esalq. Departamento de Ciências Florestais. Universidade de São Paulo, 5 fev. 2007. Disponível em: <http://www.madersul.com.br/Downloads/Pelletbraz/Analise_Pellet_LQCE.pdf>
- BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B. DE. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. *Scientia Florestalis*, v. 38, n. 88, p. 619–628, 2010.
- CAL OESTE. *Forno calcinação. Cal Oeste*. Disponível em: <http://www.caloeste.com.br/flex/foto_topo/fotos/img/14/Imagem%20057%20modified_img.jpg>. Acesso em: 17 ago. 2014.
- CARASCHI, J. C.; PINHEIRO, D. G.; VENTORIM, G. *Caracterização física e química dos pellets de madeira produzidos no Brasil*. XIII Ebramem. Anais... Vitória-ES: EBRAMEM, a 25/07 2012. Disponível em: <http://www.abipel.com.br/media/doc/CARACTERIZACAO_FISICA_E_QUIMICA_DOS_PELLETS_DE_MADEIRA_PRODUIZIDOS_NO_BRASIL_XIII_EBRAMEM.pdf>
- CARPIO, R. C. et al. Estado da arte do processo produtivo da cal na região Centro Oeste de Minas Gerais. *ForScience*, v. 1, n. 1, p. 74–85, 11 nov. 2013.

- CARVALHO, E. A.; ALMEIDA, S. L. M. *Caulim e carbonato de cálcio: competição na indústria de papel* MCT, CNPq, CETEM, 1997. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/series_sed/sed-41.pdf>
- CETESB. *1º Relatório de Referência do Estado de São Paulo de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, período de 1990 – 2008. Inventário das Emissões de CO₂ por queima de combustíveis no Estado de São Paulo, 1990 a 2008: Abordagem de Referência (Top Down)*. São Paulo: CETESB, 2010.
- CETESB. *Inventário de emissões de CO₂. Manual de preenchimento*. São Paulo: CETESB, [s.d.].
- CIMPROGETTI. *Submitted form*, 1 set. 2014.
- CIMPROGETTI, C. L. T. *Reference List Main Lime Burning*, dez. 2012. Disponível em: <http://www.fmw.co.at/docs/de_Referenzliste_Schachtoefen.pdf>
- CIMPROGETTI; SARANDREA, L. *Lime and Lean Gases*, ago. 2013.
- COÊLHO, J. *Calcario Santa Maria do Cambucá - PE - Rit TV Programa Revista do Campo.*, 15 mar. 2013. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=2iMgWVUU-qs>>. Acesso em: 7 ago. 2014
- COSTA, B. L. de C. *Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, fev. 2012.
- COUTO, L. et al. *Produção de pellets de madeira: o caso da Bio-Energy no Espírito Santo*. Texto. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/catalogo/REC000g823wk6z02wx5ok0u5nfp9q5j9on.html>>. Acesso em: 8 nov. 2014.
- DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. *Sumário Mineral 2013. Cal*. David de Barros Galo, 2013. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=8970>
- ECHA - European Chemicals. *Calcium dihydroxide*. Disponível em: <http://apps.echa.europa.eu/registered/data/dossiers/DISS-9eaebe88-3dab-1715-e044-00144f67d031/AGGR-c0185199-38f6-4eeb-9847-bb362953630e_DISS-9eaebe88-3dab-1715-e044-00144f67d031.html#section_3_5>. Acesso em: 14 ago. 2014.
- EGGLESTON, H. S.; IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 1 Introduccion*. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- EIPPCB - European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau; IPTS - European Commission's Joint Research Centre – Institute for Prospective Technological Studies. Supervisores: Serge Roudier e Luis Delgado. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. European Union: 2013
- ELBRA, Energia Limpa do Brasil. *Pellet*. Disponível em: <<http://www.elbra.ind.br/pellet.php>>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- EPE-EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MME-MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011*. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf>.
- EU - European Union. L100. Official Journal of the European Union. ISSN 1977-0677. 9 mar. 2013, p. 52.
- EULA - European Lime Association. *Draft lime sector Chapter 2.1 and 2.2*, 2006a.
- EULA. *Draft lime sector Chapter 2.3 and 2.4 and additional information on these chapters*, 2006b.
- FRANCESCATO, V.; ANTONINI, E.; BERGOMI, L. Z. *Wood Fuels Handbook (UK)*. BiomassTrade Centres. [s.l.] AIEL - Italian Agriforestry Energy Association, 2008.

- GARCIA, D. P. *Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil*. Dissertação de mestrado—Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2010.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. *Caracterização energética de pellets de madeira*. In: 7º CONGRESSO INTERNACIONAL DE BIOENERGIA. São Paulo: 5 nov. 2012
- GHG PROTOCOL; FGV – Fundação Getúlio Vargas. *Programa Brasileiro GHG Protocol. Arquivo em excel. Fatores de conversão*. Disponível em: <<http://www.fgv.br/ces/ghg/>>. Acesso em: 31 out. 2011.
- GHG PROTOCOL; FGV-Fundação Getúlio Vargas *Programa Brasileiro GHG Protocol. Ferramenta GHG Protocol 2013. Versão 2013.1*. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br/index.php?r=site/CapaSecao&id=1>>. Acesso em: 1 nov. 2014.
- HONGKE, H. M. *Lime Kiln*. Disponível em: <http://www.rotarykilnhk.com/24-Lime_Kiln>. Acesso em: 8 nov. 2014.
- IABR - Instituto Aço; CST. *Notícias do setor - CST fecha contrato com Grupo belga Lhoist*. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/imprensa/noticias.asp?id=300>>. Acesso em: 14 jul. 2014.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *SIDRA-Sistema IBGE de Recuperação Automática. Indústria. Pesquisa Industrial Anual (2005-2012)*. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=3466&z=t&o=22>>. Acesso em: 14 jul. 2014.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática*. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 14 ago. 2014.
- ICAL, M. *ICAL - Vídeo Institucional*, 12 mar. 2013. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=2PjgmKh1yU0&feature=youtube_gdata_player>. Acesso em: 17 ago. 2014
- IEA - International Energy Agency. *Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions: in support of the G8 plan of action: energy indicators*. Paris, France: International Energy Agency, 2007.
- IFC - International Finance Corporation; WBG - World Bank Group. *Environmental, Health, and Safety Guidelines for Cement and Lime Manufacturing. IFC, WBG, 30 mar. 2007*. Disponível em: <<http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/f74848804951d04eb75cb719583b6d16/Final+-+Cement+and+Lime+Manufacturing.pdf?MOD=AJPERES>>
- ILA - International Lime. *Uses of lime*. Disponível em: <<http://www.internationallime.org/uses.html>>. Acesso em: 13 ago. 2014.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Bracknell: JT Houghton, LG Meira Filho, B Lim, K Treanton, I Mamaty, Y Bonduki, 1997. v. Workbook. Module I. Energy
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. *Carbon metrics*. Disponível em: <<http://www.carbonmetrics.com/ipcc-emission-factors-tool>>. Acesso em: 31 jan. 2011.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Chapter 2 - Mineral Industry Emissions. In: *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 3. Industrial Processes and Product Use*. 1. ed. Japan: IGES- Institute for Global Environmental Strategies, 2006. v. 3.
- JOHN A., M. Carbon-negative biofuels. *Energy Policy*, v. 36, n. 3, p. 940–945, mar. 2008.
- JOHN, V. M. *Imagens visita empresa Lhoist*, 24 out. 2014.
- LAPA VERMELHA. *Calcário*. Disponível em: <<http://www.lapavermelha.ind.br/produtos.htm>>. Acesso em: 17 jul. 2014.
- LIPPEL. *Fábrica de Pellets*. Disponível em: <<http://www.lippel.com.br/br/unidades-de-producao/usina-de-combustivel-solido/fabrica-de-pellets.html#.VImNNSlOXVo>>. Acesso em: 11 dez. 2014a.

- LIPPEL. *Pellets de biomassa*. Disponível em: <http://www.lippel.com.br/br/sustentabilidade/pellets-de-biomassa#.U_czmMR7Ks>. Acesso em: 16 ago. 2014b.
- LUYSSAERT, S. et al. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, v. 455, n. 7210, p. 213–215, 2008.
- MAERZ, O. A. *Maerz Ofenbau AG – The world leader in lime kilns. Product Portfolio*. Disponível em: <<http://www.maerz.com/incEN.php?show=products>>. Acesso em: 8 nov. 2014.
- MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório de Referência. Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis, no Setor Energético*. Brasília: MCT, 2006a.
- MCT- Ministério de Ciência e Tecnologia. *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório de Referência. Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis, no Setor Energético*. Brasília: MCT, 2006b.
- MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. *Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência Emissões de Gases de Efeito Estufa nos Processos Industriais - produtos minerais. Parte II. Produção de Cal. Outros Usos do Calcário e Dolomita. Produção e Uso de Barrilha*. Brasília: MCT, 2010a.
- MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia. *Programa Nacional de Mudanças Climáticas. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Fatores de Emissão. Arquivos de Fatores de Emissão*. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em: 24 out. 2011.
- MEIER, A. et al. Solar chemical reactor technology for industrial production of lime. *Solar Energy, Solar Power and Chemical Energy Systems (SolarPACES'04) International Symposium on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems*. v. 80, n. 10, p. 1355–1362, out. 2006.
- MEIER, A.; GREMAUD, N.; STEINFELD, A. Economic evaluation of the industrial solar production of lime. *Energy Conversion and Management*, v. 46, n. 6, p. 905–926, abr. 2005.
- MELO, F. A. de O. et al. Avaliação de uma fornalha para aquecimento direto de ar utilizando moinha de carvão. *SBICafé*, 2005.
- MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética, 2013a.
- MME - Ministério de Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012*. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia - Empresa de Pesquisa Energética, 2013b.
- OLIVEIRA, F. V.; MARTINS, A. H. Calcium carbonate precipitation for industrial application. *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 2, p. 175–183, jun. 2009.
- PANORAMIO. *Antigos Fornos Para Produção de Cal - Botuverá-SC*. Disponível em: <<http://www.panoramio.com/photo/50485942>>. Acesso em: 17 ago. 2014.
- PETROBRAS. *Coque Verde de Petróleo: Menor Impacto Ambiental - Petrobras*. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/coque-verde-de-petroleo/>>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- PUNHAGUI, K. R. G. *Potencial de reducció́n de las emisiones de CO2 y de la energía incorporada en la construcció́n de viviendas en Brasil mediante el incremento del uso de la madera*. Tese de doutorado. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya y Universidade de São Paulo, 2014.
- QUALICAL et al. *The Solar Production of Lime. 2000-2003 Research Program*. Qualical, 2003 2000. Disponível em: <http://www.pre.ethz.ch/publications/0_pdf/Brochure_Solar_Production_of_Lime.pdf>

- QUALICAL. *Cal hidratada e cal virgem* Qualical, 2014. Disponível em: <<http://www.qualical.com.br/Apostila%20cv.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2014
- SEABRA, M. A. *Responsabilidade Socioambiental no Setor da Cal. Programas Institucionais da ABPC para qualificação de Produtores de Cal*. Apresentação apresentado em VII ERUR - Encontro de Refrataristas e Usuários de Refratários. Refratários para a Indústria de Cimento e Cal. Curitiba, out. 2012. Disponível em: <<http://ibar.com.br/refratarios/Refratario/DIA%2018OUT/05.ABPC.pdf>>. Acesso em: 7 maio. 2014
- SEABRA, M. A. *Setor da cal*, 25 jul. 2014a.
- SEABRA, M. A. *Dados da produção desagregados entre cal virgem e hidratada*, 3 nov. 2014b.
- SEMGRH, D. *Calcário extraído em Jatapu pode ser suficiente para atender o Amazonas - notícias em Amazonas*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2012/12/calcario-extraido-em-jatapu-pode-ser-suficiente-para-atender-o-amazonas.html>>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- SILVA, A. C. *Estudo e otimização da reação de hidratação do hidróxido de cálcio*. Dissertação de mestrado—Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- SILVA, J. O. DA. *Produto RT 72. Perfil da Cal*. [s.l.] MME - Ministério de Minas e Energia; Banco Mundial; J. Mendo Consultoria, set. 2009.
- TAVARES, S. F. *Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- THYSSENKRUPP, T. I. S. *Fornos para calcinação_setor de cal*, 17 out. 2014.
- TWA; CLM. *Merged and sorted comments master spread sheet on draft 1 and information*, 2007.
- USGS - U. S. Geological Survey. *2012 Minerals Yearbook. Lime (advance release)*U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey, , jun. 2013. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lime/myb-1-2012-lime.pdf>>
- USGS - U. S. Geological Survey. *Lime. Statistics and Information.*, 2014. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lime/index.html#mcs>>. Acesso em: 14 ago. 2014
- VERBOR. *Engenharia & Serviços Verbor Latinoamérica. Projetos Realizados. Forno Maerz*. Disponível em: <<http://www.verbor.com.br/projetos-realizados.php>>. Acesso em: 17 jul. 2014.
- VOTORANTIM, C. *Divisão Calcário Votorantim*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2_zXqYXZaRQ>. Acesso em: 14 ago. 2014.
- VOTORANTIM, C. *Processo de fabricação da cal*. Disponível em: <http://www.votorantimcimentos.com.br/htms-ptb/Produtos/Cal_procFabricacao.html>. Acesso em: 14 ago. 2014.
- WEN, Y.; XIANG, L.; JIN, Y. Synthesis of plate-like calcium carbonate via carbonation route. *Materials Letters*, v. 57, n. 16–17, p. 2565–2571, maio 2003.
- WPAC, W. P. A. OF C. *Pellets*. Disponível em: <<http://www.pellet.org/>>. Acesso em: 11 dez. 2014.
- ZRCBV, M. B. V. *Mineração / Mineradora / Calcário Bela Vista / Cal Xerez*, 9 maio 2012. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=N_a6VAK3ika&feature=youtube_gdata_player>. Acesso em: 17 ago. 2014

**Produção Independente de
Ferro-Gusa (“Guseiros”)**

Germano Mendes De Paula

Introdução

Este capítulo apresenta as principais conclusões da análise do segmento guseiro no âmbito do projeto “Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas”. Do ponto de vista metodológico, fez-se uso de duas fontes principais de informações: a) fontes bibliográficas; b) entrevistas*.

As entrevistas foram essenciais para compreender as perspectivas das empresas e instituições acerca do tema, mas em função do termo de confidencialidade, nenhuma resposta de qualquer respondente será identificada ao longo deste capítulo. Ademais, os conceitos formulados, opiniões e críticas encontradas no presente texto, salvo as manifestadas pelos autores citados nominalmente, são de inteira responsabilidade do autor.

Este capítulo é dividido em oito seções, incluindo esta breve introdução. A segunda aborda a atividade guseira em escala global, ao passo que a terceira focaliza a indústria brasileira. Os impactos ambientais setoriais são examinados na quarta seção, enquanto a seguinte investiga o balanço de carbono e o inventário de emissões de gases do efeito estufa (GEE). A sexta seção apresenta um levantamento inédito no país sobre a difusão de tecnologias modernizantes no parque guseiro. A sétima mostra as projeções das emissões setoriais de GEE no Brasil, até 2020, de acordo com oito cenários. A última seção estabelece as diretrizes de uma política setorial para a transição rumo à economia de baixo carbono.

1. Caracterização setorial

1.1. Produtos e mercado

Esta seção cobre os produtores independentes de ferro-gusa, usualmente denominados de “guseiros”, classificados na Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) sob o código 2411. Essas empresas têm por finalidade produzir e comercializar ferro-gusa para terceiros (ou ferro-gusa de mercado, *merchant pig iron*), ao invés de fabricá-lo para consumo no seu próprio processo produtivo, como é o caso de usinas siderúrgicas integradas.

O ferro-gusa é um insumo siderúrgico, produzido no alto-forno, a partir da reação entre o minério de ferro e o carvão (mineral ou vegetal). O carvão cumpre duas funções: a) combustível para gerar o calor necessário à operação do alto-forno; b) agente químico para retirar o oxigênio durante

* O autor agradece a valiosa contribuição das seguintes empresas/organizações e profissionais que foram entrevistados: **ArcelorMittal Tubarão** (Dr. Guilherme Correa Abreu); **Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração/ABM** (Horacídio Leal Barbosa Filho); **DPC Processos Termoquímicos** (Sidney Pessoa Vieira); **Ferroeste** (Gustavo Rozenbaum Bcheche); **Queiroz Galvão** (Paulo Afonso de Faria Gomes); **Minitec** (Sérgio Wilibaldo Garcia Scherer); **RS Consultants** (Dr. Ronaldo Santos Sampaio); **Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais/Sindifer** (Fausto Varela); **Sinobras** (Clayton Labes); **Sustentabil Soluções Ambientais** (Rubens Oliveira) e **Viena Siderúrgica** (Rodrigo Kaukal Valadares). Este também agradece o competente trabalho de assistência de pesquisa de Lucas de Castro Campos.

o processo, decorrente das reações de redução do Fe_2O_3 . A composição química do ferro-gusa consiste de pelo menos 92% de ferro e de 3,5% a 4,5% de carbono. Existem três tipos de ferro-gusa, conforme os teores de silício, manganês, enxofre e fósforo (Quadro 1).

Quadro 1 Tipos de ferro-gusa

Tipo	Aplicação	Composição química
Ferro-gusa básico (ou de aciaria)	Siderurgia	<1,5% silício, 0,5-1% manganês, <0,05% enxofre, <0,12% fósforo
Ferro-gusa de fundição	Fundição	1,5-3,5% silício, 0,5-1% manganês, <0,05% enxofre, <0,12% fósforo
Ferro-gusa nodular	Fundição	<0,05% manganês, <0,02% enxofre, <0,05% fósforo

Fonte: International Iron Metallics Association (IIMA), entrevistas

Como se observa no Quadro 1, o ferro-gusa de mercado é consumido basicamente por duas indústrias: siderurgia e fundição, com destaque para a primeira. No que tange à siderurgia, embora as usinas integradas possam comprar ferro-gusa no mercado para compensar um desbalanceamento produtivo (quando as necessidades de carga metálica excedem a capacidade interna de produção de ferro-gusa ou ainda por paralisação/acidente de altos-fornos), o uso mais relevante diz respeito às usinas semi-integradas (baseadas em aciarias elétricas). Neste último caso, a sucata é o principal insumo utilizado, mas o aumento da proporção de ferro-gusa na carga metálica usualmente possibilita maior produtividade e a fabricação de aços de melhor qualidade. A sucata de obsolescência é mais barata do que o ferro-gusa, mas possui mais contaminantes.

A segunda indústria consome ferro-gusa de fundição e ferro-gusa nodular, sendo o último obtido por meio de uma pequena adição de magnésio ao banho líquido de carbono, resultando em grafites esferoidais. Ele possui propriedades mecânicas superiores, tais como maior ductilidade (o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura) e resistência mecânica. Millbank (2007) estimou que, em 2006, 60% da produção mundial não-cativa de ferro-gusa foram vendidos para siderúrgicas e 40% para fundições. Não foi possível obter informações mais atualizadas acerca da importância relativa dos dois principais tipos de clientes.

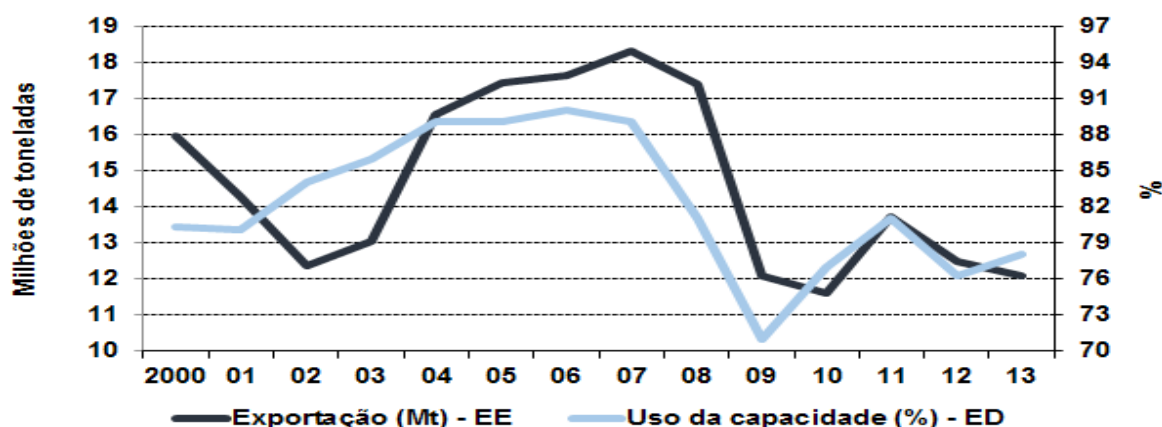
De acordo com Hassan (2013), em 2011, o comércio internacional de ferro-gusa atingiu 12,5 milhões de toneladas. Na ocasião, as vendas domésticas foram equivalentes a 64 milhões de toneladas, dos quais 55 milhões de toneladas na China. Portanto, o tamanho do mercado alcançou 76,5 milhões de toneladas, correspondendo a 6,9% da produção global. Conclui-se que a produção de ferro-gusa é predominantemente cativa, como parte de um processo integrado.

As informações estatísticas mais confiáveis sobre o mercado de ferro-gusa relacionam-se ao comércio internacional. As exportações se ampliaram de 16 milhões de toneladas em 2000 para 18

milhões de toneladas em 2007, regredindo para 12 milhões de toneladas em 2013 (eixo esquerdo do Gráfico 1). Verifica-se que esta trajetória é muito relacionada com o grau de utilização da siderurgia mundial (eixo direito do mesmo gráfico). De fato, a correlação entre as duas séries é de 72%.

Ainda no que tange ao Gráfico 1, constata-se que o auge das exportações de ferro-gusa (2005-2007), ocorreu quando o grau de ociosidade da siderurgia global estava no patamar de 11%. Na avaliação da consultoria McKinsey, o grau de utilização da indústria alcançará 81% em 2019 (VAN HOEY, 2014). Portanto, até o final desta década, é pouco provável que se verifique uma retomada vigorosa das exportações mundiais de ferro-gusa. Ao contrário, é mais prudente esperar uma manutenção ou mesmo retração de tais vendas.

Gráfico 1 Exportações mundiais de ferro-gusa (milhões de toneladas) e utilização da capacidade instalada da siderurgia mundial (%), 2000-2013



Fonte: World Steel Association (WSA), IIMA

Obs: EE = eixo esquerdo; ED = eixo direito

No período 2000-2013, a produção mundial de ferro-gusa duplicou de 576 milhões de toneladas para 1,17 bilhão de toneladas, perfazendo uma taxa anual média de crescimento de 5,6%. Simultaneamente, as exportações regrediram a um ritmo anual médio de 2,2%. Como consequência, a relevância das exportações na produção mundial envolveu de 2,8% em 2000 para apenas 1,0% em 2013.

Quanto às exportações mundiais de metálicos (insumos da carga da aciaria elétrica), o ferro-gusa também vem apresentando um desempenho insatisfatório, pois sua participação decresceu de 19,9% em 2000 para 10,6% em 2013. No mesmo período, a importância relativa da sucata ferrosa aumentou de 73,7% para 82,5%, enquanto a relevância conjunta de ferro diretamente reduzido e de ferro briquetado a quente (DRI e HBI, nos acrônimos em inglês, sendo ambos fabricados em módulos de redução direta) manteve-se praticamente constante no patamar de 6%-7%.

As exportações mundiais de ferro-gusa têm sido historicamente dominadas por Rússia, Brasil e Ucrânia. A participação conjunta destas três nações nas exportações globais aumentou de 56% em

2000 para 72% em 2013. Ao longo desse período, alguns países chegaram a ser relevantes em determinados anos, mas apenas de forma temporária. Por exemplo, a participação chinesa cresceu de 3,2% em 2002 para 12,9% em 2005, regredindo para 1,4% em 2008. No caso da Índia, a fatia subiu de 3,3% em 2009 para 8,7% em 2011, diminuindo para 3,2% em 2012.

Os Estados Unidos são os maiores (e mais regulares) importadores mundiais de ferro-gusa. Com exceção de 2009, que pode ser considerado um ponto fora-da-curva em função da crise mundial, sua participação oscilou de 27% a 34% das importações globais ao longo de 2000-2013. Por sua vez, a Turquia teve sua importância relativa ampliada de 1,7% em 2000 para 8,0% em 2013, enquanto a participação sul-coreana regrediu de 12,7% para 8,2%, respectivamente.

A queda do preço do gás natural, como decorrência da crescente exploração do gás de xisto (*shale gas*, em inglês) nos Estados Unidos, estimula a construção de módulos de redução direta. Esta tecnologia possibilita a redução de minério de ferro, tanto por carvão mineral, quanto por gás, embora a última alternativa seja a mais frequente. Os custos de produção de uma tonelada de DRI naquele país, em 2013, representam um ganho de 23% frente aos preços do ferro-gusa e de 12% comparativamente aos da sucata de alta qualidade (GAMBARDELLA, OSSENBECK & LANGTON, 2013). A Nucor, considerada a maior importadora mundial de ferro-gusa, inaugurou em dezembro de 2013 um módulo de redução direta com capacidade de 2,5 milhões de toneladas em Louisiana, a um custo de US\$ 750 milhões. Esta planta é de tamanho similar às exportações brasileiras de ferro-gusa em 2013.

A decisão da Nucor em investir em redução direta já era particularmente desfavorável a médio prazo para os guseiros brasileiros, que sempre tiveram nos Estados Unidos seu principal mercado. Todavia, a crescente probabilidade de que tal estratégia venha a ser adotada por outras companhias tende a comprometer seriamente as exportações brasileiras de ferro-gusa. Por outro lado, é importante destacar que os problemas enfrentados pelo novo módulo de redução direta da Nucor e eventuais preços mais elevados do gás de xisto no futuro são fatores que podem desestimular o ritmo de crescimento da produção norte-americana de DRI.

A Tabela 1 corresponde à matriz de comércio internacional de ferro-gusa em 2013. Ela apresenta as vendas dos três principais exportadores (Rússia, Brasil e Ucrânia) para os dez maiores importadores deste produto. Por exemplo, das 4,12 milhões de toneladas importadas pelos Estados Unidos, 42,7% foram provenientes do Brasil, 38,8% da Rússia, 11,5% da Ucrânia e 6,9% de outras nações. Esta tabela também permite verificar a dispersão geográfica das vendas dos três principais exportadores.

A participação brasileira nas importações norte-americanas oscilou ao redor do patamar de 71% no período 2000-2008. Depois, ela regrediu para 52% em 2009 e ainda para o nível de 46% em 2010-2013. Simultaneamente, a importância relativa dos Estados Unidos nas exportações brasileiras reduziu-se de 86% em 2000 para 58% em 2008. Depois de uma queda temporária para 41% em 2009, se estabilizou no nível de 67% no quadriênio 2000-2013. Após a discussão sobre as principais tendências do comércio internacional, a próxima seção aborda o padrão de integração vertical, rotas tecnológicas e inovações.

Tabela 1 Matriz das importações de ferro-gusa, 2013 (mil toneladas)

		Exportadores				
		Rússia	Brasil	Ucrânia	Outros	Total
Importadores	EUA	1.598	1.760	474	286	4.118
	Itália	444	80	748	203	1.475
	Coreia do Sul	188	35	8	755	987
	Turquia	300	0	599	68	967
	Taiwan	185	252	0	353	790
	Alemanha	180	76	7	182	445
	China	61	0	0	236	297
	México	54	193	29	3	280
	Bélgica	100	11	34	130	274
	Holanda	69	116	0	53	239
	Outros	745	71	136	886	1.838
	Total	3.924	2.595	2.034	3.156	11.709

Fonte: elaboração própria com base em informações da IIMA.

2.2. Rotas tecnológicas, verticalização e inovações

Existem três tipos principais de rotas tecnológicas empregadas pelos vendedores de ferro-gusa no mundo: alto-forno a coque, alto-forno a carvão vegetal e usinas integradas a coque. Os dois primeiros casos são usinas não-integradas, no sentido que o produto final é o próprio ferro-gusa. A diferença entre elas refere-se ao tipo do redutor (carvão mineral/coque *versus* carvão vegetal). As usinas integradas a coque são aquelas que, a jusante do alto-forno, possuem aciarias e laminações. Nesses casos, elas vendem ferro-gusa em função do excedente deste insumo frente às suas necessidades.

A estrutura produtiva é muito diferente entre os três principais exportadores mundiais de ferro-gusa (Quadro 2). No caso da Rússia, as companhias são baseadas em altos-fornos a coque (Tulachermet, Sokol e Kosaya Gora) e usinas integradas a coque (que vendem o excedente de ferro-gusa no mercado). No Brasil, o parque nacional dos guseiros consiste de 142 altos-fornos, sendo 140 equipamentos à base de carvão vegetal e apenas dois a coque (ambos de propriedade da Usina Siderúrgica do Pará/Usipar, em Barcarena, Estado do Pará, que estão paralisados), cuja experiência será detalhada no próximo capítulo. Na Ucrânia, não existe qualquer empresa especializada na comercialização de ferro-gusa, mas as usinas integradas a coque vendem parte de sua produção, em função do desbalanceamento das etapas produtivas.

A participação das empresas especializadas em ferro-gusa (Tulachermet, Sokol e Kosaya Gora) nas exportações russas aumentou de 48% em 2009 para 57% em 2013. A Tulachermet, que possui uma capacidade instalada de 3,2 milhões de toneladas, comercializou 2,1 milhões de toneladas

de ferro-gusa em 2013, dos quais 70% destinados à indústria de fundição (FROLOV, 2014). A Sokol possui uma capacidade instalada de 800 mil toneladas de ferro-gusa e 180 mil toneladas de tubos de ferro fundido de grande diâmetro. Ela paralisou seus altos-fornos em 2012, mantendo apenas as atividades de fundição. A Kosaya Gora possui três altos-fornos, com capacidade conjunta de 700 mil toneladas. Um deles foi convertido para produzir ferro-manganês. Além disso, em junho de 2010, ela paralisou um dos dois altos-fornos remanescentes.

Quadro 2 Estrutura produtiva nos principais países exportadores de ferro-gusa

	Alto-forno a coque	Alto-forno a carvão vegetal	Usinas integradas a coque
Rússia	Tulachermet Sokol Kosaya Gora		Ural Steel NMLK Lipetsk MKMK
Brasil	Usipar	Guseiros	
Ucrânia			Donetsk Dzerzhinsky Alchevsk

Fonte: Barrington (2009), Hassan (2013), Metal Expert

Na Ucrânia, não existem empresas focalizadas em ferro-gusa, mas apenas usinas integradas a coque que vendem o excedente deste insumo no mercado. A despeito dos conflitos militares, a exportação de ferro-gusa aumentou 28,7% no primeiro semestre de 2014, comparativamente ao mesmo período do ano passado. A situação é muito diferente no segundo semestre, pois as siderúrgicas ucranianas enfrentam escassez de insumos e muitas linhas ferroviárias foram danificadas por ações militares (WORLD STEEL NEWS, 01/08/2014).

Em maio de 2014, a Tulachermet anunciou investimentos visando à verticalização a jusante: aciaria e laminação de aços longos com capacidade de 1,5 milhão de toneladas, prevista para entrar em operação em outubro de 2016. Assim, a capacidade efetiva dedicada à comercialização de ferro-gusa da companhia será reduzida à metade. No caso da experiência brasileira, existem alguns movimentos relativos à verticalização que merecem ser citados: Ciafal (aciaria), Simara (hoje Sino-bras; aciaria e laminação) e **Ferroeste** (aciaria e, posteriormente, laminação), Metalsider (fundição).

Quanto às inovações, cabe destacar que se trata de uma indústria bastante madura. Alguns dos seus *players*, em particular na Rússia e Ucrânia, possuem usinas muito antigas. Por exemplo, a Kosaya Gora entrou em operação em 1897, a Sokol, em 1890 e Tulachermet, em 1935. Ademais, as companhias especialistas na Rússia e no Brasil vêm operando com substancial ociosidade, desestimulando a construção de novos altos-fornos.

É pouco provável que, numa atividade relativamente pequena comparativamente à indústria siderúrgica e fabricando um insumo com baixa ou nenhuma capacidade de diferenciação, as

companhias especializadas em ferro-gusa adotassem estratégias tecnológicas agressivas. Quanto aos altos-fornos a carvão vegetal, a tecnologia é simples, sendo que a engenharia é de domínio público (CGEE, 2010). Tendo em vista que os guseiros brasileiros, baseados em altos-fornos a carvão vegetal, se constituem em um modelo de negócio único no âmbito da siderurgia mundial, eles serão melhor examinados na próxima seção.

3. Quadro nacional

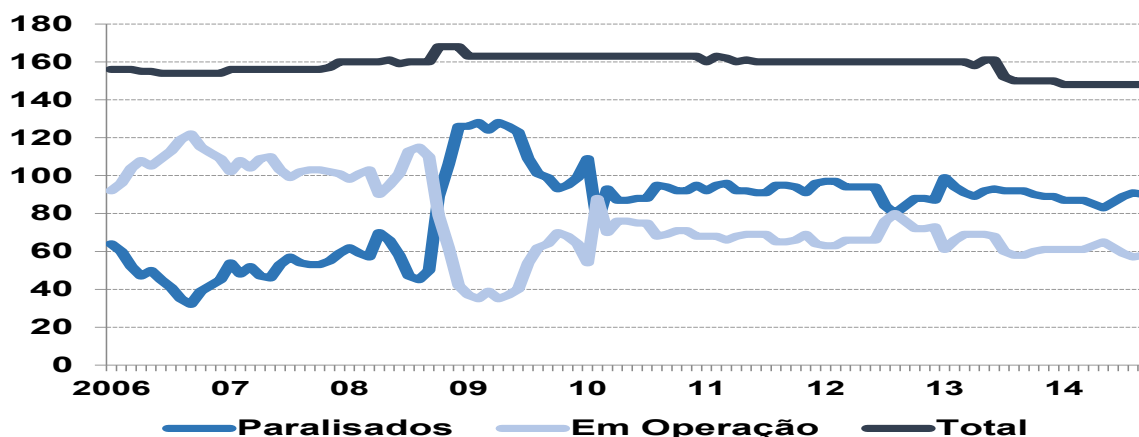
3.1. Capacidade instalada e produção

O Brasil é o único país que utiliza altos-fornos a carvão vegetal com produção expressiva, uma tecnologia que gradualmente foi perdendo importância relativa desde 1709 quando Abraham Darby, na Inglaterra, utilizou coque pela primeira vez no processo siderúrgico.

De acordo com o International Iron Metallics Association (IIMA), a capacidade instalada conjunta das unidades não verticalizadas de produção de ferro-gusa no Brasil aumentou de 14,3 milhões de toneladas em 2006 para 15,5 milhões de toneladas em 2009, regredindo marginalmente para 14,8 milhões de toneladas em 2014. Ela é concentrada em Minas Gerais (55%), Pará e Maranhão, conhecido como polo de Carajás (36%). Mato Grosso do Sul (6%) e Espírito Santo (3%) completam a lista dos Estados produtores.

É preciso esclarecer que, nesse total, estão incluídos seis altos-fornos a carvão vegetal que pertencem a siderúrgicas integradas, que totalizam 672 mil toneladas (ou 4,5% do total). Assim, excluindo estes casos, a capacidade nominal dos guseiros independentes é atualmente de 14,1 milhões de toneladas. O número de altos-fornos dos guseiros (incluindo a ressalva acima) expandiu-se de 156 em 2006 para 163 em 2009, diminuindo para 148 de janeiro de 2014 em diante (Gráfico 2).

Gráfico 2 Número de altos-fornos paralisados e em operação no parque guseiro brasileiro, 2006-2014



Fonte: IIMA

O número de altos-fornos paralisados aumentou de 45 equipamentos (em agosto de 2008) para 128 (em fevereiro de 2009), revertendo parcialmente para 99 (em dezembro de 2009). Entre janeiro de 2013 e setembro de 2014, em média, 90 altos-fornos (ou 59% do parque) ficaram parados.

A produção dos guseiros cresceu de 6,1 milhões de toneladas em 2000 para 10,1 milhões de toneladas em 2004, se estabilizando no patamar de 9,6 milhões de toneladas no triênio 2005-2007. Após a drástica retração para 4,3 milhões de toneladas em 2009, constatou-se a recuperação parcial para 5,8 milhões de toneladas em 2011. Desde então, a trajetória é de ligeiro declínio, atingindo 5,4 milhões de toneladas em 2013 (SINDIFER, 2014).

O volume de produção em 2013 correspondeu a apenas 53% do nível verificado em 2004. Em paralelo à retração da atividade, ocorreu importante transformação da distribuição geográfica da produção, pois a participação de Minas Gerais diminuiu de 65,7% em 2000 para 54,6% em 2013. A importância relativa do Espírito Santo também regrediu de 6,1% para 3,7%, respectivamente. O polo de Carajás, ao contrário, teve sua fatia elevada de 26,9% para 33,0%. Ademais, o Mato Grosso do Sul ampliou a sua de 1,3% para 8,7%.

3.2. Comercialização doméstica e exportação

Apesar de a capacidade instalada brasileira se situar no patamar de 15 milhões de toneladas, mesmo no ápice (em 2005), a comercialização dos guseiros não passou de 10 milhões de toneladas. Em 2008, este volume regrediu para 8,6 milhões de toneladas. As vendas recuaram para 4,8 milhões de toneladas em 2009, recuperando-se parcialmente para 5,8 milhões de toneladas em 2011. Nos últimos dois anos, predomina uma trajetória de tênue queda.

As exportações têm um comportamento mais volátil do que as vendas domésticas, sendo que o coeficiente de exportação aumentou de 62% em 2000 para 74% em 2008, com tendência de retração até atingir 50% em 2013. O Brasil não importa ferro-gusa. Em valores monetários, as exportações brasileiras de ferro-gusa aumentaram de US\$ 432 milhões em 2000 para US\$ 3,1 bilhões em 2008, mas diminuíram para US\$ 1,1 bilhão em 2013. Por sua vez, os preços médios de exportação se elevaram de US\$ 118 por tonelada em 2000 para US\$ 499 por tonelada em 2008. Após acentuada queda em 2009 e recuperação no biênio 2010-2011, os preços regrediram para US\$ 397 por tonelada em 2013. É razoável assumir que os preços no mercado doméstico tenham seguido a mesma variação, ainda que como alguma defasagem temporal.

3.3. Estrutura patrimonial

A estrutura patrimonial da indústria guseira é bastante pulverizada. De um total de 148 altos-fornos, seis equipamentos pertencem a siderúrgicas, sobrando 142 equipamentos, que estão instaladas em 80 usinas. Estas são controladas por 73 companhias diferentes. A capacidade média das empresas é de 192 mil toneladas anuais, ao passo que a mediana é de 138 mil toneladas.

As quatro maiores companhias detêm 21,0% da capacidade instalada e 29,2% da produção, sendo que uma das quatro maiores em capacidade encontra-se paralisada. Calculou-se também o índice Herfindahl-Hirschman (HHI), que varia de zero, quanto mais próximo da concorrência perfeita, até 1, que representa um monopólio. Ao final de 2013, este valor foi de 0,026 para a capacidade instalada e de 0,042 para a produção. Conclui-se que as empresas de menor porte têm sido mais afetadas proporcionalmente pela elevada ociosidade do setor.

A indústria guseira é caracterizada por baixas barreiras à entrada e à saída, o que favorece a volatilidade do nível de produção. No âmbito da cadeia siderúrgica, a atividade guseira encontra-se entre aquelas com menor volume de investimento inicial. Não é fácil estimar o volume de inversões para um novo empreendimento, pois, diante do excedente estrutural de capacidade instalada, a forma preferencial de entrada é o arrendamento ou aquisição de planta já instalada.. Considerando essa ressalva, de acordo com os entrevistados, um novo alto-forno com capacidade anual de 120 mil toneladas custaria cerca de US\$ 12-15 milhões, desconsiderando os custos de implantação de centrais termelétricas (CTE), injeção de carvão pulverizado (PCI) e sinterização. Mais importante, os investimentos florestais correspondentes atingiriam aproximadamente US\$ 50-60 milhões, no caso do polo de Carajás.

Como se depreende do Gráfico 2, os guseiros possuem elevada flexibilidade para desligar e religar os altos-fornos, em grande contraste com o que se observa com as usinas integradas a coque. Mesmo com baixa probabilidade de retomada das atividades, os altos-fornos em geral não são desmontados, devido aos reduzidos custos relacionados à sua paralisação. Assim, as reduzidas barreiras à entrada (inclusive de natureza tecnológica) e à saída são fatores explicativos para a fragmentação da estrutura de mercado.

4. Impactos ambientais setoriais

4.1. Fontes de insumos por rota tecnológica

Três são as rotas tecnológicas adotadas pelos exportadores de ferro-gusa no mundo: usinas integradas a coque, alto-forno a coque e alto-forno a carvão vegetal. A primeira é a principal rota tecnológica da indústria siderúrgica, sendo composta de três etapas principais: redução (produção do ferro primário), refino (produção do aço propriamente dito e resfriamento) e laminação (transformação em produtos siderúrgicos). Por sua vez, os produtores especializados em ferro-gusa não possuem as etapas a jusante do alto-forno. No capítulo 5 deste livro são examinadas as etapas a jusante do alto-forno.

Para se produzir uma tonelada de ferro-gusa em um alto-forno a coque são necessários, em média, 1.500 a 1.600 kg de minério de ferro, 400 a 600 kg de coque (ou outro combustível à base de carbono), 140 kg de cal ou magnésia e 1.600 a 2.000 kg de ar. Obviamente, a qualidade do insumo influencia muito a eficiência do processo. Por exemplo, quanto maior a proporção de ferro granulado e pelota na carga, maior é a produtividade do alto-forno.

Em 2012, foram demandadas 5,9 milhões de toneladas de carvão vegetal para a produção de 7,9 milhões de toneladas de ferro-gusa, perfazendo um consumo específico de 750 kg/t. No mesmo ano, as siderúrgicas associadas ao Aço Brasil, consumiram 1,5 milhão de toneladas de carvão vegetal, para 2,2 milhão de toneladas de ferro-gusa ou 689 kg por tonelada de ferro-gusa. Por exclusão, pode-se avaliar que os valores para os guseiros foram de 4,4 milhões de toneladas de carvão vegetal, 5,6 milhões de toneladas de ferro-gusa e consumo específico de 775 kg/t.

Quanto ao consumo específico do minério de ferro, até o final da década passada, o Aço Brasil divulgava informações que permitiam o cálculo de tal indicador. Em 2007, por exemplo, ele foi de 1.545 kg de minério de ferro por tonelada de ferro-gusa. Na mesma ocasião, a referida instituição utilizava um consumo específico de 1.680 kg para estimar a demanda de minério de ferro por parte dos guseiros. Acredita-se que este consumo específico tenha se elevado, em função da queda da qualidade do minério de ferro, embora não existam evidências quantitativas que comprovem esta provável trajetória.

4.2. Consumo de energia e emissões de CO₂

Na rota de produção integrada, a siderurgia usa o carbono para geração de energia e como agente redutor do minério de ferro. Posteriormente uma fração deste carbono é incorporada aos produtos e a outra parte, após a combustão, é emitida na forma de dióxido de carbono (CO₂). O processo de produção de ferro-gusa (coqueria, sinterização e alto-forno) é a etapa que mais consome energia em usinas integradas, em grande medida devido ao uso do coque como agente redutor na transformação do minério de ferro em ferro-gusa.

A rota integrada a coque necessita de 17 a 19 gigajoule (GJ) de energia por tonelada de aço produzido. As etapas de matérias-primas e redução das usinas integradas a coque respondem por 80%-85% do total da energia consumida neste tipo de configuração produtiva. Portanto, para a fabricação do ferro-gusa são necessários, aproximadamente, de 13,6 a 16,2 GJ/tonelada (CGEE, 2010). Em trabalho mais recente, Leal Neto (2013) afirma que a média mundial para o alto-forno a coque é de 14,93 GJ/tonelada de ferro-gusa, enquanto o *benchmarking* é de 12,84 GJ/tonelada.

A emissão de CO₂ representa 93% de todas as emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) da siderurgia mundial. Metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) são pouco relevantes para essa indústria. Por outro lado, são importantes as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), óxidos de enxofre (SOx) e material particulado. Abreu (2011) aponta que, no alto-forno, o limite teórico é de 1,036 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto, mas o limite prático é de 1,428 tonelada de CO₂ por tonelada de aço bruto.

A utilização de carvão vegetal é uma alternativa importante para a redução do consumo de energia e para a mitigação das emissões de CO₂ da indústria siderúrgica no Brasil. De acordo com CGEE (2010), o consumo de energia de uma usina integrada a carvão vegetal é da ordem de 14-17 GJ/tonelada, o que representa uma diminuição de cerca de 14% frente a uma usina integrada a coque.

Uma tonelada de ferro-gusa produzido com carvão mineral emite 1,9 tonelada de CO₂. Os guseiros alegam que uma tonelada de ferro-gusa produzido com carvão vegetal renovável além de evitar essas emissões decorrentes do uso de matéria-prima fóssil, também geraria estoques adicionais de carbono nas novas florestas plantadas, absorvendo (sequestrando) em média 1,1 tonelada de CO₂ da atmosfera. Conseqüentemente, considerando as emissões evitadas e o estoque de carbono propiciado pelos plantios sustentáveis do projeto, o uso de carvão vegetal de florestas plantadas na produção de ferro-gusa geraria um ganho ambiental de 3 toneladas de CO₂ para cada tonelada de ferro-gusa produzida (PLANTAR, 2014).

Todavia, este racional não é consensual. Uma das críticas é de que, em se tratando de processos cujos impactos na atmosfera podem chegar a 100 anos, não se poderia assegurar que no futuro esse carbono não retornasse à forma de CO₂, seja pela decomposição da matéria orgânica, seja por qualquer outro fator que pudesse acarretar a extração dessa madeira e posterior uso. Ademais, não haveria garantia que a rota integrada a coque não viesse a ser empregada, não havendo por consequência o ganho de 1,9 tonelada de CO₂. Assim, de acordo com esta visão, seria mais lógico concluir que a emissão de CO₂ seria nula.

Pode-se também destacar algumas outras vantagens do alto-forno a carvão vegetal comparativamente ao equipamento a coque: menor teor de enxofre, menor temperatura de operação do alto-forno (acarretando menor perda térmica e menor consumo de refratários) e redução de geração de escória em 50% (FELICIANO-BRUZUAL & MATHEWS, 2013). Por outro, o alto-forno a coque proporciona maior estabilidade e rendimentos devido ao maior porte. Sendo assim, a emissão de CO₂ por tonelada de ferro-gusa, sem considerar o resgate das florestas, é menor no equipamento a coque do que no a carvão vegetal.

Todavia, o uso do carvão vegetal não pode ser visto como solução para a siderurgia brasileira na sua totalidade. Além do menor tamanho dos altos-fornos (comparativamente aos equipamentos que utilizam coque como redutor), ela exige maiores investimentos por capacidade instalada em relação à rota semi-integrada (à base de aciaria elétrica), não apenas na usina, mas também em função das inversões requeridas no desenvolvimento de maciços florestais.

4.3. Desmatamento e carvoejamento

O maior problema ambiental da atividade guseira é a utilização de parcela expressiva de carvão extraído de matas nativas, contribuindo para uma das maiores fontes emissoras de GEE no Brasil – o desmatamento. Em meados da década passada, estimava-se que metade do carvão vegetal produzido pelos guseiros seria proveniente de matas nativas. Em Carajás, a proporção de carvão obtido por desmatamento ilegal atingiria quase 80% (MELLO *et alii*, 2009).

Quatro motivos permitem supor que, desde então, tenha diminuído a proporção de utilização de carvão vegetal proveniente de desmatamento ilegal por parte dos guseiros: a) a redução do volume de produção devido ao mercado internacional em retração; b) a promulgação de leis estaduais

mais rigorosas; c) as autuações do Ibama, em particular no polo de Carajás, diante da constatação de irregularidades relacionadas à compra de carvão; d) o incremento do índice de autossuficiência da capacidade de produção à base de carvão vegetal proveniente de fontes legais e autorizadas pela legislação vigente, seja supressão vegetal, seja aproveitamento de material lenhoso, por parte das melhores companhias do setor.

A despeito das melhorias, continua grave o problema do carvão ilegal que chega aos guseiros com aspecto de regularidade, acobertado por guias falsas, obtidas por meio de manipulações fraudulentas dos sistemas Documento de Origem Florestal (DOF) e Comercialização e Transporte de Produtos Florestais (Sisflora). Ademais, o sistema de produção de carvão é pouco eficiente, como discutido a seguir.

Vidal e Pinto (2009) estimam que mais de 60% da produção de carvão no país utilizam a tecnologia mais rudimentar existente (denominada de “rabo quente”), com rendimento gravimétrico (RG, mensurado pela proporção tonelada de carvão vegetal/tonelada de madeira seca) de apenas 20%-25% e com muita baixa recuperação de resíduos. Os fornos circulares, responsáveis por cerca de 20% da produção de carvão, possibilitam maior RG (de 25% a 39%), mas a recuperação de resíduos também é pequena. Os fornos retangulares, que são empregados em menos de 10% da produção, permitem um RG de 30% a 37% e boa recuperação de biocarboquímicos (70 a 120 kg/tonelada de carvão vegetal) e eficientes controles de emissões de gases. As estimativas deste autor em relação à difusão dos fornos retangulares são apresentadas na seção 6.

Resumidamente, os maiores problemas ambientais decorrentes da atividade guseira são relativos ao consumo de madeira ilegal e à compra de carvão vegetal produzido em fornos de baixa eficiência tecnológica e energética. A próxima seção é dedicada ao balanço de carbono e inventário de emissões de GEE.

5. Balanço de carbono e inventário de emissões de GEE

5.1. Balanço de carbono

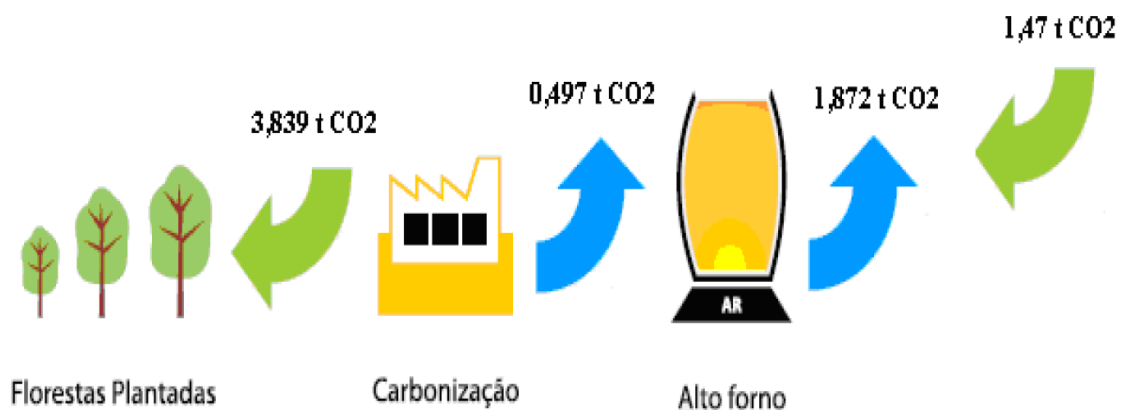
No caso da produção de ferro-gusa, de um lado, são gerados gás metano (CH_4) e CO_2 , durante a carbonização da madeira e a reação química (redução) no alto-forno. Por outro lado, a opção pela energia renovável da biomassa para a fabricação de ferro-gusa contribui para o balanço de CO_2 na atmosfera, por intermédio da fotossíntese (MALLARD, 2009). Assim, é necessário avaliar o efeito líquido quanto à geração de GEE desta atividade.

Ao analisar a experiência da indústria guseira em Minas Gerais, Mallard (2009) conclui que para a produção de uma tonelada de ferro-gusa são emitidas 1.872 kg de CO_2 na atmosfera. Ele também aborda a fixação de CO_2 nas florestas de eucalipto, conforme metodologia utilizada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Como são necessárias dez árvores, para se fabricar uma tonelada de ferro-gusa, com o emprego de carvão vegetal oriundo de floresta plantada com *eucalyptus grandis* são fixadas 3,84 toneladas de CO_2 (MALLARD, 2009).

Considerando os resultados obtidos para a emissão de CO₂, no ciclo de fabricação do ferro-gusa (emissões na carbonização da madeira e no alto-forno e fixação nas florestas de eucalipto), tem-se o balanço geral das emissões de gases de efeito estufa na cadeia produtiva relativa ao setor. Como se observa na figura 1, para cada tonelada de ferro-gusa produzida seriam fixadas 1,47 toneladas de CO₂. Cabem as ressalvas de que não são consideradas as emissões em outras etapas da cadeia, como o transporte, bem como de outros GEE, como o metano.

Como já mencionado, este raciocínio não é consensual. Alguns dos entrevistados destacaram que o fato de se fixar o carbono não constituiria uma garantia de sua permanência eterna, pois a massa de carbono a ser fixada tem um limite. Como, em termos práticos, não se pode plantar eternamente árvore em cima de árvore que foi cortada, haveria limitação de espaço.

Figura 1 Balanço de CO₂ no ciclo de produção de ferro gusa considerando autossustentabilidade em carvão vegetal



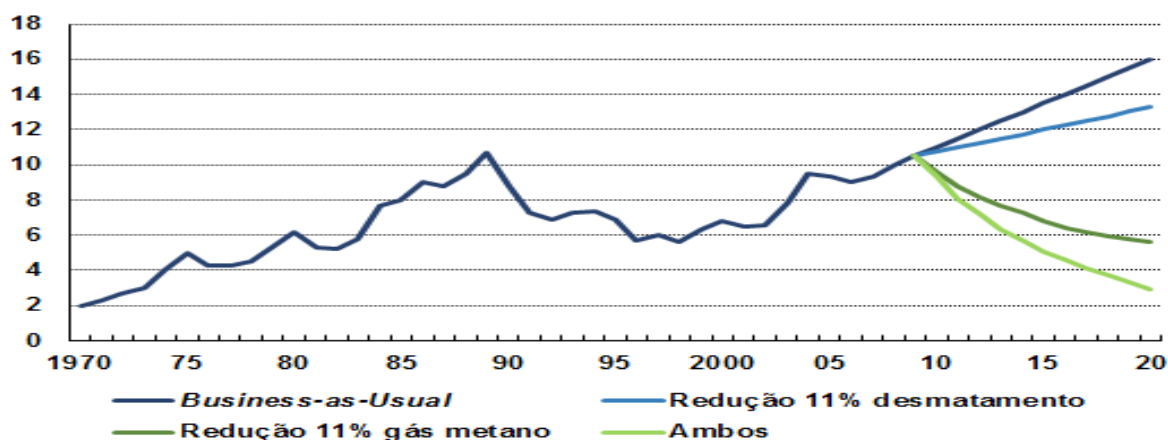
Fonte: Mallard (2009)

A contenda sobre o balanço efetivo de CO₂ da siderurgia a carvão vegetal parece estar muito longe de um resultado convergente. O fato desta controvérsia se basear apenas na realidade brasileira certamente não contribui para o aprofundamento da discussão. Resumindo o debate, de um lado, para alguns, haveria um ganho ambiental superior a três toneladas de CO₂ por tonelada de ferro-gusa produzida em altos-fornos a carvão vegetal originado de florestas plantadas de forma sustentável. Alguns dos entrevistados chegaram a afirmar que esta estimativa é inclusive subestimada. De outro lado, para outros, o balanço de CO₂ seria nulo. Extrapolando ao escopo deste capítulo chegar a um resultado conclusivo sobre o assunto. Assim, adotou-se a visão mais favorável ao setor guseiro, desde que respaldada por projetos aprovados no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

5.2. Inventário de emissões de GEE

Algumas estimativas de emissões de GEE, inclusive aquelas divulgadas no “Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia” (MMA, 2010), apresentam valores agregados para a produção de ferro-gusa a carvão vegetal. O Gráfico 3 mostra as emissões de CO₂ equivalente (CO₂eq) na produção de carvão vegetal empregado na fabricação de ferro-gusa no Brasil. Esta pode ser considerada a estimativa oficial do país, pois faz parte do “Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia”. Em 2009, o total de emissões teria alcançado 10,5 milhões de toneladas de CO₂eq.

Gráfico 3 Emissões na produção de carvão vegetal empregado na fabricação de ferro-gusa no Brasil, 1970-2020 (milhões de toneladas de CO₂eq)



Fonte: MMA (2010)

Em relação à estimativa de 2010, em diante, o Gráfico 3 apresenta quatro cenários: a) cenário de base (*business-as-usual*), sem intervenção política, baseado na extrapolação linear das tendências históricas de crescimento de emissões, atingindo 15,97 milhões de toneladas de CO₂eq em 2020; b) cenário supondo a substituição parcial de madeira nativa por floresta plantada, alcançando 13,32 milhões de toneladas de CO₂eq; c) cenário baseado no controle das emissões de gás metano, gerando 5,60 milhões de toneladas de CO₂eq; d) cenário que combinaria a expansão das florestas plantadas e a melhoria do processo de carbonização, acarretando 2,94 milhões de toneladas de CO₂eq. Os cenários propostos por este autor são apresentados na Seção 7 deste capítulo.

CGEE (2014) indica, que no período 2003-2012, a produção brasileira média de ferro-gusa a partir de carvão vegetal foi 9,5 milhões de toneladas, requerendo o consumo de 6,9 milhões de toneladas de carvão vegetal. No mesmo período, estimou-se que as florestas plantadas tenham alcançado uma participação de 57%. Baseado em metodologia aprovada pelo MDL, para um RG de 26% (que é o padrão típico dos guseiros) e com o emprego da tecnologia atual de produção (fornos de alvenaria), são lançados na atmosfera 78 kg de gás metano por tonelada de carvão vegetal. Deve-se

lembrar que um kg de metano corresponde a 21 kg de CO₂ em termos de GEE. Assim, estima-se que para a produção de 5,6 milhões de toneladas de ferro-gusa, no último triênio (2011-2013), por parte dos guseiros, foram emitidas 9,2 milhões de toneladas anuais de CO₂eq.

Ainda segundo CGEE (2014), o RG típico de usinas integradas a carvão vegetal é de 32%. Como consequência, observa-se uma mudança no patamar de emissão específica de 78 kg de CH₄ para 46 kg de CH₄. Desta forma, no mesmo triênio, para a produção de 2,3 milhões de toneladas de ferro-gusa, por parte das usinas integradas a carvão vegetal, foram emitidas 2,2 milhões de toneladas anuais de CO₂eq. Assim, as emissões conjuntas dos dois tipos de produtores totalizam 11,4 milhões de toneladas de CO₂eq. Este valor, conforme se observa no Gráfico 3, é próximo daquele estimados pelo MMA (2010)

6. Mudanças climáticas e mudança tecnológica

A análise das melhores práticas (*best available technologies*) no caso da produção de ferro-gusa à base de carvão vegetal se resume à indústria brasileira. Deve-se destacar que inexistente no país qualquer censo tecnológico (mesmo que parcial) acerca dos guseiros. Este capítulo, então, tenta suprir esta lacuna. Como se trata de um primeiro esforço nessa direção, ele pode e deve ser aprimorado, em particular quanto ao detalhamento das tecnologias. De todo modo, acredita-se que a principal contribuição dessa seção seja exatamente apresentar este panorama, que somente foi possível graças aos entrevistados.

6.1. Fornos retangulares de produção de carvão

O Quadro 3 mostra a difusão de quatro tecnologias relevantes no segmento guseiro: a) fornos retangulares para a produção de carvão; b) centrais termoelétricas (CTE), visando ao aproveitamento de gases de alto-forno para a cogeração de eletricidade; c) sistemas de injeção de finos de carvão (PCI); d) sinterizações. Apesar de serem tecnologias maduras, com baixa sofisticação tecnológica, são relativamente pouco difundidas nos guseiros, em função de fatores econômicos. Assim, não existem barreiras tecnológicas relevantes, o que é compatível com uma indústria caracterizada por baixas barreiras à entrada e à saída.

De acordo com o levantamento realizado, conforme o Quadro 3, novas usinas possuem seus próprios fornos retangulares de produção de carvão vegetal. Destas, apenas uma encontra-se paralisada. A capacidade conjunta das nove usinas totaliza 3,3 milhões de toneladas de ferro-gusa, cerca de 24% da capacidade instalada do setor. Tais companhias produzem 41% do ferro-gusa do segmento.

A baixa difusão dos tipos de fornos mais sofisticados na produção de carvão já foi previamente abordada. Há consenso de que a difusão de fornos retangulares no Brasil é reduzida, embora haja certa divergência quanto ao valor exato: inferior a 10% (VIDAL & PINTO, 2009) ou no patamar de 20% (OLIVEIRA, 2012; CGEE, 2014). Com base nas entrevistas, este autor elaborou uma avaliação

um pouco mais otimista, estimando que a difusão já alcance 16% da produção dos guseiros propriamente dita. Assumindo que esta proporção seja de 100% para as usinas integradas a carvão vegetal, o valor nacional atingiria 38%.

Quadro 3 Difusão de tecnologias instaladas nos guseiros, 2014

Empresa	Localização	Capacidade instalada (mta)	Em Operação	Forno Retangulares de Carvão	Central Termoeletrica	Injeção de Finos de Carvão	Sinterização
Alterosa	Pará de Minas, MG	252	Sim	X	X	X	
AVG	Sete Lagoas, MG	360	Sim	X	X	X	
CBF Indústria de Gusa	João Neiva, ES	240	Sim		X	X	
Cosimat	Matozinhos, MG	240	Sim				X
Cosipar	Marabá, PA	504	Não		X	X	X
Gusa Nordeste	Açailândia, MA	360	Sim		X	X	
Ibérica	Marabá, PA	420	Sim				X
Metalsider	Betim, MG	420	Sim	X	X		
Pitanguí	Pitanguí, MG	312	Não	X	X		
Plantar	Sete Lagoas, MG	240	Sim	X	X	X	
Queiroz Galvão	Açailândia, MA	600	Sim	X	X	X	
Queiroz Galvão	Santa Inês, MA	264	Não		X	X	
Santo Antônio (Sidersa)	Itaúna, MG	156	Não			X	
Sidepar	Marabá, PA	540	Sim				X
Sideral (ex-Brasil Verde)	Conceição do Pará, MG	72	Sim		X		
Siderpam (ex Siderpa)	Sete Lagoas, MG	192	Sim		X		
Usimar	Marabá, PA	360	Não				X
Usipar	Barcarena, PA	288	Não			X	X
Valinho	Divinópolis, MG	120	Sim		X		
Vetorial	Corumbá, MS	360	Sim	X	X	X	
Vetorial	Ribas do Rio Pardo, MS	300	Sim	X	X	X	
Viena	Açailândia, MA	480	Sim	X	X	X	X

Fonte: elaboração própria a partir de entrevistas e pesquisa bibliográfica diversa.

As principais vantagens dos fornos retangulares são: a) maior produtividade; b) melhor aproveitamento da matéria-prima decorrente de captura dos gases emitidos durante a produção do carvão e de um sistema de queima mais eficaz. Além disso, quando participam de projeto MDL, os fornos retangulares podem gerar créditos de carbono (QUEIROZ GALVÃO, 2014).

Como se observa no Quadro 3, a menor usina que é abastecida com fornos retangulares possui uma capacidade instalada de 240 mil toneladas. Utilizando hipoteticamente esta escala como exemplo, no caso de abastecimento de 100% de carvão vegetal por fornos retangulares, seria necessário investir em pelo menos 280 fornos de 50 toneladas mensais. Isto totalizaria cerca de R\$ 84 milhões, ou US\$ 35 milhões (a uma taxa de conversão de R\$ 2,4 por US\$ 1, que foi utilizada ao longo de toda a seção), o que superaria o valor de construção de dois altos-fornos (US\$ 30 milhões). O valor de investimento em fornos retangulares não é desprezível para os guseiros, ainda mais num contexto de mercado pouco favorável. Em compensação, o *payback* desses investimentos pode ser considerado atraente, no intervalo de 2,5 a 4 anos.

Das quatro tecnologias discutidas neste capítulo, a adoção de fornos retangulares (e outros equipamentos de carbonização mais eficientes do que os empregados atualmente) é aquela com maior impacto em geração de GEE. De acordo com CGEE (2014), o RG dos fornos retangulares varia de 30% e 35%. O emprego de um RG de 35% (ao invés de 26%), contando com monitoramento mais rígido de parâmetros do processo de carbonização, como a temperatura, possibilitaria uma diminuição nas emissões de metano por tonelada de carvão vegetal de cerca de 61,5%. A maior difusão desta tecnologia é crucial no contexto de um paradigma de baixo carbono.

6.2. Centrais termoelétricas

O gás de alto-forno pode ser utilizado para a geração de energia em central termoelétrica (CTE), sendo importante fator de reaproveitamento energético. Desde 1950, esta tecnologia de processo não sofreu mudanças significativas (AÇO BRASIL, 2010). Foram identificadas 16 CTEs no parque guseiro, com uma capacidade conjunta de 96,4 MW. No âmbito das 16 usinas com CTEs, treze encontram-se em operação e três estão paralisadas. Deve-se mencionar que todos os guseiros que empregam fornos retangulares possuem também CTEs, mas a recíproca não é verdadeira. Desta forma, a difusão da cogeração de eletricidade é maior.

Estima-se que a capacidade conjunta das 16 empresas alcance 5,1 milhões de toneladas de ferro-gusa, equivalendo a 36% do setor. Mais ainda, estas companhias fabricam atualmente 52% do ferro-gusa do setor. Isto ratifica que a difusão de CTEs pode ser entendida como um bom indicador dos produtores mais eficientes. Em geral, as CTEs são empreendimentos relativamente novos. De acordo com os entrevistados, a primeira central foi instalada em 1997. Contudo, a maior difusão se concentrou no início da década passada.

O custo projetado para um novo investimento está orçado em US\$ 1,5-2 milhões/MW. O *payback* do investimento em uma CTE por parte dos guseiros é estimado em três anos, mesmo sem considerar os elevados preços hoje praticados no mercado livre de energia no Brasil. De acordo com os entrevistados, tão ou mais importante do que o retorno financeiro é o fato de que a qualidade da energia é bem melhor, facilitando as condições operacionais da usina.

Uma usina com capacidade anual de 240 mil toneladas de ferro-gusa tenderia a instalar uma CTE de 5 MW, incorrendo num investimento de US\$ 7,5 milhões. São valores bastante inferiores aos requeridos para implantar dois altos-fornos (US\$ 30 milhões) ou a correspondente quantidade de fornos retangulares de produção de carvão (US\$ 35 milhões). Isto ajuda a explicar a maior difusão relativa da CTE comparativamente aos fornos retangulares. Na mesma direção, o menor guseiro com CTE possui uma capacidade anual de 72 mil toneladas, enquanto o menor guseiro com fornos retangulares tem uma escala de 240 mil toneladas.

6.3. Injeção de finos de carvão pulverizado

A terceira tecnologia relevante é a injeção de carvão pulverizado (PCI). O carvão vegetal, desde a sua fabricação nas carvoarias até o alto-forno, gera finos que podem alcançar 25% em peso. Este resíduo (moinha) é de comercialização incerta e seu preço é muito baixo comparado com o do carvão vegetal. A alternativa encontra-se na injeção desses finos pelas ventaneiras do alto-forno em substituição parcial ao carvão vegetal granulado carregado pelo topo do forno. Essa substituição não pode chegar a 100%, porque o processo necessita de permeabilidade do leito de carvão na parte superior (ALTEROSA, 2004).

De acordo com os entrevistados e pesquisa bibliográfica, constatou-se que treze plantas pertencentes aos guseiros instalaram sistema de PCI, sendo que quatro encontram-se paralisadas. De acordo com Assis (2008), a adoção da tecnologia PCI entre os guseiros iniciou-se em 1996, embora o *boom* de investimentos nesta tecnologia tenha se verificado no período 2002-2007.

A estimativa, realizada por este autor, é que a capacidade conjunta das treze empresas que instalaram PCI alcance 4,4 milhões de toneladas de ferro-gusa, ou seja, 31% do setor. Estas companhias fabricam 44% do ferro-gusa do segmento. Assim, em termos de difusão, esta tecnologia encontra-se numa posição intermediária entre os fornos retangulares e a CTE.

De acordo com os entrevistados, o preço de implantação de um sistema de PCI com capacidade para abastecer dois altos-fornos com capacidade conjunta de 240 mil toneladas anuais é de US\$ 3,3 milhões. Este valor não leva em conta os investimentos em ativos florestais. Considerando os preços atuais de carvão vegetal granulado e da moinha e uma taxa de injeção de finos de 40 a 55 kg por tonelada de ferro-gusa (sem injeção de oxigênio), o *payback* foi estimado entre 1,5 e 2,5 anos. Trata-se de um retorno considerável, para um volume de capital relativamente pequeno.

A usina com a menor capacidade instalada que adotou PCI é de 156 mil toneladas, atualmente paralisada. Logo em seguida, aparecem duas usinas, ambas com escala anual de 240 mil toneladas, o que parece se constituir no tamanho mínimo eficiente para adoção de fornos retangulares e de PCI.

6.4. Sinterização

Outra tecnologia importante e madura, porém pouco difundida no parque guseiro brasileiro, é a sinterização. Esta planta destina-se à produção de sinter, que corresponde a um aglomerado de finos de minério de ferro, fundentes (calcário e areia), combustível (finos de carvão e/ou coque) e aditivos (corretivos para aproveitamento de resíduos de recirculação). Resumidamente, trata-se de uma tecnologia desenvolvida com o objetivo de aproveitar finos de minérios e resíduos industriais. A sinterização, além de aumentar a produtividade do empreendimento, reduz o consumo de carvão vegetal em 10% (VALLADARES, 2011).

Foram identificadas apenas sete usinas com sinterizações, sendo que três encontram-se paralisadas. A estimativa, realizada por este autor, é que a capacidade conjunta das sete empresas

alcance 2,9 milhões de toneladas de ferro-gusa, isto é, 21% do setor. Estas companhias produzem 20% do ferro-gusa do segmento, ratificando que a sinterização é menos difundida que CTE e PCI.

De um modo geral, os entrevistados foram muito convergentes acerca da premência da difusão das outras três tecnologias já analisadas (fornos retangulares, CTE e PCI). Foi praticamente unânime que os guseiros precisam adotá-las. Por outro lado, a opinião sobre pequenas sinterizações foi mais divergente. Alguns apontaram os benefícios típicos do equipamento, como um grande reciclador. Já outros afirmaram que sinterizações de menor porte dificilmente fazem uso dos melhores controles, acabando por acarretar efeitos colaterais indesejáveis (principalmente do ponto de vista ambiental, pois é uma das atividades mais poluentes no caso de usinas integradas a coque). Na mesma direção, alguns entrevistados indicaram que a escala ótima mínima de uma sinterização seria superior ao tamanho típico dos guseiros. Eles alegaram também que a eficiência operacional de algumas sinterizações em operação é insatisfatória.

Guardada a controvérsia acima apontada, de acordo com os entrevistados, o custo de instalação varia entre US\$ 30 e US\$ 70 por tonelada de sinter produzido. Esta foi a tecnologia que apresentou a maior variação quanto à estimativa de investimento, o que pode ser explicada por diferentes opções quanto à complexidade do equipamento, em particular no que tange ao sistema de controle de emissões de particulados. Nesse contexto, adotou-se a referência de US\$ 50 por tonelada de sinter produzido. No caso de uma usina com capacidade de 240 mil toneladas de ferro-gusa e com 50% de sinter na carga do alto-forno, a escala seria equivalente a 192 mil toneladas, perfazendo algo em torno de US\$ 9,6 milhões. O *payback* estimado é de 3 a 4,5 anos. De todo modo, a sinterização parece ser um investimento que não se aplica à realidade (necessidade) de todos os guseiros.

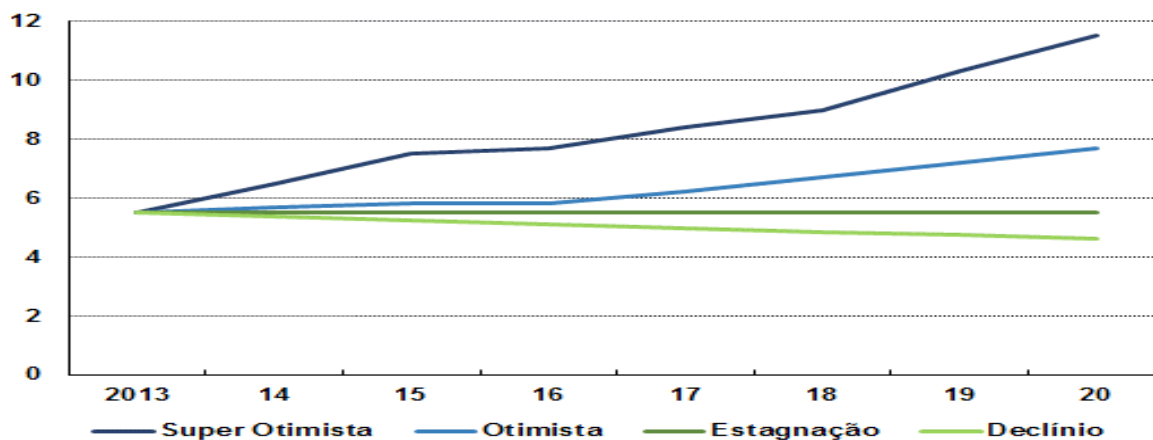
7. Projeções das emissões setoriais de GEE no Brasil até 2020

7.1. Cenários de produção

Antes de discutir as projeções de emissões setoriais de GEE do segmento guseiro faz-se necessário abordar os cenários de produção. Nesse sentido, é interessante resgatar os cenários de produção propostos por CGEE (2014). No cenário-base, o volume de produção dos guseiros passaria de 5,5 milhões de toneladas em 2013 para 11,5 milhões de toneladas em 2030, denotando uma taxa anual de crescimento de 11,1%. No cenário conservador, o volume atingiria 7,7 milhões de toneladas em 2020, acarretando uma taxa anual de crescimento de 4,9%. Com base nas informações apresentadas nas seções precedentes deste capítulo e nas entrevistas, conclui-se que os dois cenários do CGEE são por demais otimistas.

Tendo em vista essas considerações, neste capítulo preferiu-se adotar quatro cenários de produção: a) “super otimista”, que corresponde ao cenário-base do CGEE; b) “otimista”, relativo ao cenário conservador do CGEE; c) “estagnação”, pressupondo a manutenção do volume de produção dos guseiros; d) “declínio”, com queda anual média de 2,5%, encerrando a série em 2020 com 4,6 milhões de toneladas (Gráfico 4).

Gráfico 4 Cenários de produção dos guseiros, 2013-2020 (milhões de toneladas)



Fonte: CGEE (2014) e elaboração própria

7.2. Cenário de emissão de GEE

Como já discutido, os guseiros produziram 5,6 milhões de toneladas anuais de ferro-gusa no último triênio (2011-2013). Reproduzindo as premissas adotadas por CGEE (2014), estimou-se que foram emitidos 9,2 milhões de toneladas anuais de CO₂eq para a fabricação de carvão vegetal correspondente. Este resultado é principalmente influenciado pelo RG. No caso de um RG de 26% (que é o padrão típico dos guseiros, segundo CGEE, 2014), são lançados na atmosfera 78 kg de gás metano, o que corresponde a 1,638 tonelada de CO₂eq por tonelada de ferro-gusa. Este será considerado como cenário *Business as Usual* (BAU) em termos de emissão, a ser combinado com os quatro cenários de produção.

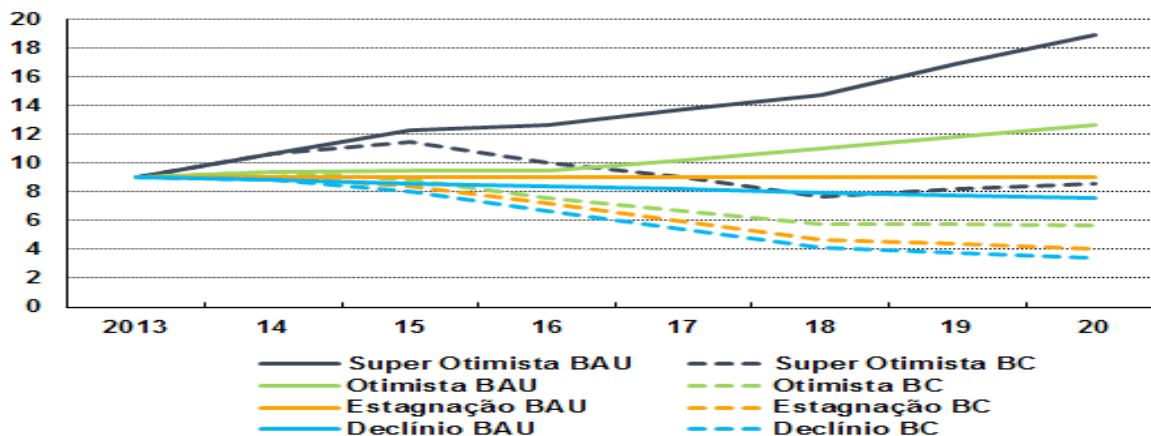
Das quatro tecnologias discutidas no capítulo anterior – fornos retangulares de produção de carvão vegetal, CTE, PCI e sinterização –, a primeira (fornos retangulares e outras técnicas de carbonização mais eficientes) é aquela que possui maior impacto sobre a emissão de GEE, razão pela qual será priorizada no cenário de baixo carbono. Reproduzem-se neste estudo as premissas do estudo do CGEE (2014), que assume os seguintes RG para os guseiros: 26% (em 2014), 27% (em 2015), 29% (em 2016), 31% (em 2017), 33% (em 2018), 33,5% (em 2019) e 34% (em 2020).

O Gráfico 5 apresenta os oito cenários, combinando os quatro cenários de produção com os dois cenários de emissão. No caso “super otimista BAU”, as emissões de CO₂eq para a fabricação de carvão vegetal utilizado pelos guseiros passariam de 9,0 milhões de toneladas em 2013, para 18,9 milhões de toneladas em 2020. Todavia, no “super otimista baixo carbono”, o valor final seria de 8,5 milhões de toneladas de CO₂eq, resultando numa retração de 5,5% frente ao volume inicial.

Supondo o cenário “otimista BAU”, as emissões dos guseiros alcançariam 12,6 milhões de toneladas de CO₂eq em 2020, enquanto o valor para o “otimista baixo carbono” seria de 5,7 milhões de toneladas. No cenário “estagnação BAU”, por definição, o nível de emissões é mantido constante

ao nível de 9,0 milhões de toneladas de CO₂eq. Já o cenário “estagnação baixo carbono” indica que tais emissões se reduziriam para 4,1 milhões de toneladas de CO₂eq em 2020, resultando numa queda de 55% comparativamente ao valor inicial. No cenário “declínio BAU”, o nível de emissões retrocederia para 7,6 milhões de toneladas de CO₂eq em 2020, enquanto no cenário “declínio baixo carbono”, a queda é ainda mais acentuada, finalizando em 3,4 milhões de toneladas de CO₂eq.

Gráfico 5 Cenários de emissões na produção de carvão vegetal empregado na fabricação de ferro-gusa pelos guseiros (milhões de toneladas de CO₂eq)



Fonte: CGEE (2014), elaboração própria

Analisando os oito cenários, observa-se uma substancial diferença no que tange às emissões de anuais de CO₂eq para a fabricação de carvão vegetal consumido pelos guseiros. De fato, os valores variam de 3,4 milhões de toneladas anuais no cenário “declínio baixo carbono” até 18,9 milhões de toneladas anuais no cenário “super otimista BAU”. Portanto, uma conclusão importante é a existência de um amplo espectro entre os mencionados valores, o que aponta para um considerável espaço de manobra para políticas públicas e para as estratégias empresariais. Os custos financeiros relativos ao aumento da autossuficiência de florestas plantadas e de tecnologias são discutidos no próximo capítulo.

8. Diretrizes de uma política setorial para a transição rumo à economia de baixo carbono

O setor guseiro não vive um bom momento em termos de volume de vendas e desempenho financeiro. Convivendo com uma elevada ociosidade e sem perspectivas de recuperação acentuada da produção, a capacidade instalada setorial vem regredindo. Uma característica importante do setor guseiro é que custo de manutenção de altos-fornos paralisados é relativamente baixo. Com isto, as empresas podem esperar uma retomada das vendas e não realizar definitivamente a perda do capital investido. Num contexto de recuperação, os custos para retomar as atividades não são consideráveis nem tampouco existe um risco de defasagem tecnológica, pois não se trata de uma atividade em que a fronteira tecnológica se mova rapidamente.

Tendo em vista estas considerações, pode-se afirmar que não existem barreiras tecnológicas e regulatórias relevantes à melhoria do padrão técnico setorial. O problema se resume às questões econômicas, em especial o fato de os incentivos ao investimento em modernização são pequenos, devido ao baixo dinamismo de mercado e à conduta dos concorrentes. Após esta breve contextualização, a seguir são abordadas as diretrizes de uma política setorial para a transição rumo à economia de baixo carbono.

8.1. Carvão vegetal

O recente relatório do CGEE (2014) é exaustivo na análise do uso do carvão vegetal na indústria do ferro-gusa, listando uma série de prioridades, tais como: a) melhoria da produtividade das florestas plantadas; b) aprimoramento da eficiência da conversão da madeira em carvão vegetal no processo de carbonização; c) redução do consumo específico de carvão vegetal na produção de ferro-gusa. A Tabela 2 mostra a necessidade de florestas plantadas pelos guseiros, conforme os oito cenários apresentados no Gráfico 5 e reproduzindo os mesmos coeficientes técnicos adotados pelo CGEE (2014), para garantir a comparabilidade.

Na Tabela 2, os déficits de florestas plantadas pelos guseiros, nos cenários “super otimista baixo carbono” e “otimista baixo carbono” foram elaborados por CGEE (2014). As outras seis estimativas foram realizadas por este autor, adotando as mesmas premissas, mas variando o volume de produção de ferro-gusa. No caso dos cenários “BAU”, em todas as situações, o RG foi mantido em 26%. Cabe mencionar, no entanto, a longa maturação dos investimentos florestais, pois as decisões atuais só resultam em capacidade de produção daqui a seis anos.

Tabela 2 Déficit de florestas plantadas pelos guseiros, 2014-2020 (mil hectares)

	Super Otimista		Otimista		Estagnação		Declínio	
	BAU	BC	BAU	BC	BAU	BC	BAU	BC
2014	557	557	421	417	387	387	364	364
2015	595	554	332	300	285	253	244	214
2016	504	391	239	159	198	119	143	70
2017	480	313	205	81	118	7	53	-47
2018	457	252	195	39	58	-67	-14	-125
2019	513	271	189	15	10	-119	-69	-180
2020	555	291	184	6	-31	-158	-117	-223
Total	3.662	2.629	1.765	1.017	1.025	422	604	71

Fonte: CGEE (2014) e elaboração própria

Pode-se concluir que a necessidade dos guseiros investirem em florestas plantadas varia consideravelmente conforme os cenários. Num extremo, no “super otimista BAU”, o valor é de 3,7 milhões de hectares até 2020. Noutro, no “declínio baixo carbono”, são requeridos apenas 71 mil hec-

tares para todo o período, embora sejam necessários 648 mil hectares até 2016 e “desinvestimento” a partir de 2017. No caso do “estagnação BAU”, o déficit é 1,0 milhão de hectares até 2020.

A partir da Tabela 2 é possível também estimar o valor do investimento em florestas plantadas. O problema é que o preço da terra varia consideravelmente entre as diversas regiões, dependendo inclusive da distância frente aos polos guseiros. Com o objetivo de apresentar uma ordem de grandeza, adotou-se um custo da floresta plantada (para o primeiro ciclo de produção) de R\$ 12 mil por hectare. Portanto, para se adequar ao cenário “estagnação BAU” seriam necessários R\$ 12,3 bilhões (ou US\$ 5,1 bilhões), o que mostra a grande magnitude no esforço que precisa ser empreendido pelo setor. Alternativamente, no cenário “estagnação baixo carbono”, o valor em florestas plantadas seria de US\$ 2,1 bilhões.

Para que os cenários “baixo carbono” se concretizem é fundamental melhorar o RG, além de melhoria da produtividade dos clones. Este autor estimou que as nove usinas que já utilizam os fornos retangulares de carvão representam 24% da capacidade instalada do setor. Estas mesmas companhias produzem cerca de 41% do ferro-gusa do segmento. Contudo, é raro que elas façam uso exclusivamente desta tecnologia. Assim, a difusão corresponderia a 16% da produção dos guseiros. Apesar do *payback* ser rápido (2,5 a 4 anos), o investimento em fornos retangulares (e outras técnicas que proporcionem maior RG) precisa ser articulado às inversões em florestas próprias, o que alonga o período de retorno, restringindo a difusão dos mencionados fornos. Uma análise mais rigorosa da questão exigiria conhecimento da situação de ativos florestais por guseiro, que é uma informação não disponível, pelo menos não publicamente.

Levando em conta a limitação acima indicada, procurou-se investigar quanto custaria para que a totalidade do ferro-gusa em 2020 fosse produzida em fornos retangulares, que de antemão é uma possibilidade muito remota de se concretizar. Em termos de ordem de grandeza, seriam necessários os seguintes investimentos, em ordem decrescente: “super otimista” (US\$ 1,55 bilhão), “otimista” (US\$ 995 milhões), “estagnação” (US\$ 674 milhões) e “declínio” (US\$ 546 milhões). Estes valores podem ser menores, pois uma difusão mais acelerada proporcionaria economias de escala, que não são consideradas nesta estimativa.

Resumidamente, a prioridade crucial do setor, no âmbito do paradigma de baixo carbono, é investir em florestas plantadas e em fornos retangulares, conforme detalhado no Quadro 4, que examina o cenário estagnação, considerado o mais provável por este autor.

Quadro 4 Prioridade para investimentos em florestas e fornos retangulares, considerando cenário estagnação

Metas	100% de florestas plantadas em 2020 100% de fornos retangulares em 2020
Potencial de redução de emissão de GEE	55% em 2020
Investimentos necessários	US\$ 2,1 bilhões em florestas plantadas US\$ 674 milhões em fornos retangulares
Cronograma de implantação	US\$ 3,8 bilhões em florestas plantadas até 2017, depois desinvestimento US\$ 96 milhões anuais em fornos retangulares
Atores envolvidos	Guseiros, governo federal e BNDES
Proposta de arcabouço institucional	Concessão de linhas de financiamento para investimentos em florestas próprias e fornos retangulares (ou outras tecnologias que proporcionem maior rendimento gravimétrico)
Monitoramento e governança	Levantamento anual de investimento em florestas plantadas, uso de madeira própria, difusão de fornos retangulares e rendimento gravimétrico

Fonte: elaboração própria

8.2. Central termoeletrica, injeção de finos de carvão e sinterização

Acredita-se que a maior contribuição deste capítulo tenha sido levantar a difusão de tecnologias modernizadoras (fornos retangulares, CTE, PCI e sinterização) nos guseiros. Diferentemente da questão do carvão vegetal (que diz respeito a uma etapa anterior), as três últimas tecnologias são aplicadas diretamente na usina. Apesar de serem muito importantes para a melhoria da eficiência produtiva, elas não têm a mesma relevância que a carbonização em termos de emissão de GEE. Mesmo assim, podem ser interpretadas como tecnologias auxiliares para um paradigma de baixo carbono.

Não existe uma ordem necessária de implantação das três tecnologias aqui discutidas. Contudo, com base no Quadro 3 e na opinião dos entrevistados, a CTE tenderia ser a primeira a ser adotada, pois se mostra viável até para usinas de pequeno porte (abaixo de 120 mil toneladas anuais). De fato, a construção de uma CTE de 5 MW em planta de 240 mil toneladas anuais de ferro-gusa está orçada em US\$ 7,5 milhões. Ademais, o *payback* é estimado em três anos. A melhoria da qualidade da energia é outra vantagem não desprezível. Este autor estimou que a capacidade dos 16 guseiros que possuem CTE alcança 5,1 milhões de toneladas de ferro-gusa, perfazendo 36% do setor. Estas companhias fabricam 52% do ferro-gusa do setor. Assim, para que este último valor venha alcançar 100% em 2020, são requeridos os seguintes investimentos: “super otimista” (US\$ 270 milhões), “otimista” (US\$ 151 milhões), “estagnação” (US\$ 83 milhões) e “declínio” (US\$ 55 milhões).

A tecnologia PCI ajuda a melhoria da eficiência produtiva e ambiental, com um custo de inversão bastante modesto. O preço de implantação de um sistema de PCI capaz de abastecer dois altos-fornos com capacidade conjunta de 240 mil toneladas anuais é de US\$ 3,3 milhões,

com *payback* de 1,5 a 2,5 anos. Como indicado, trata-se de um retorno considerável, para um volume de capital relativamente modesto. Este autor estimou que a capacidade conjunta das treze empresas que instalaram PCI alcance 4,4 milhões de toneladas de ferro-gusa, ou seja, 31% do setor. Estas companhias fabricam 44% do ferro-gusa do setor. Desta forma, para que o último valor venha atingir 100% em 2020, são demandados os seguintes investimentos: “super otimista” (US\$ 125 milhões), “otimista” (US\$ 73 milhões), “estagnação” (US\$ 42 milhões) e “declínio” (US\$ 30 milhões).

A última tecnologia é a sinterização, com benefícios produtivos e ambientais. Todavia, corre-se o risco de efeitos ambientais adversos, no caso de falta de bons equipamentos de controle. Ademais, não se mostra uma solução apropriada para todas as usinas. No caso de uma usina com capacidade de 240 mil toneladas de ferro-gusa e com 100% de sínter na carga do alto-forno, o investimento giraria em torno de US\$ 9,6 milhões, com *payback* de 3 a 4,5 anos. Este autor estimou que a capacidade conjunta dos sete guseiros que possuem sinterização alcance 2,9 milhões de toneladas de ferro-gusa, isto é, 21% do setor. Estas companhias produzem 20% do ferro-gusa do setor. Para que este valor alcançasse 33% em 2020, são necessários os seguintes investimentos: “super otimista” (US\$ 108 milhões), “otimista” (US\$ 58 milhões), “estagnação” (US\$ 29 milhões) e “declínio” (US\$ 17 milhões). Ressalte-se que a temporalidade de tais investimento tenderia a ocorrer após CTE e PCI, no âmbito de cada usina.

Pode-se, então, afirmar que a prioridade secundária do setor, no contexto do paradigma do baixo carbono, é investir em CTE, PCI e, em menor intensidade, em sinterização, como examinado no Quadro 5.

Quadro 5 Prioridade para investimentos em central termoelétrica, injeção de finos de carvão e sinterização, considerando cenário estagnação

Metas	100% de central termoelétrica em 2020 100% de injeção de finos de carvão em 2020 33% de sinterização em 2020
Potencial de redução de emissão de GEE	Não quantificado diretamente, mas como apoio aos investimentos em florestas plantadas próprias e fornos retangulares
Investimentos necessários	US\$ 83 milhões em central termoelétrica US\$ 42 milhões em injeção de finos de carvão US\$ 29 milhões em sinterização
Cronograma de implantação	Investimento pode ser diluído ao longo do tempo, embora fosse mais coerente que priorizasse a seguinte ordem: central termoelétrica, injeção de finos de carvão e sinterização
Atores envolvidos	Guseiros, governo federal e BNDES
Proposta de arcabouço institucional	Concessão de linhas de financiamento para investimentos nos três tipos de equipamento, que hoje em grande medida já é atendido por Finame
Monitoramento e governança	Levantamento anual de investimento em central termoelétrica, injeção de finos de carvão e sinterização

Fonte: elaboração própria

Referências Bibliográficas

- ABREU, G. C. (2011). *Estudo da redução das emissões de gases efeito estufa através da utilização da biomassa renovável em substituição parcial ao coque e antracito utilizados no processo de fabricação do sinter*. Guaratinguetá: Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá (Tese de doutoramento);
- AÇO BRASIL (2010). *Proposição de limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos de fontes fixas existentes para a indústria siderúrgica em nível nacional*. Rio de Janeiro: Aço Brasil;
- ALTEROSA (2004). *Informativo Siderúrgica Alterosa*, v. 3, n. 7. Pará de Minas: Siderúrgica Alterosa;
- ASSIS, C. F. C. (2008). *Caracterização de carvão vegetal para sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto (Dissertação de mestrado);
- BARRINGTON, C. (2009). Overview of the merchant pig iron market and some current issues. *SBB steel markets North America 2009*. Chicago: Steel Business Briefing;
- CGEE (2010). *Siderurgia no Brasil 2010-2025; subsídios para tomada de decisão*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE);
- CGEE (2014). *Modernização da produção de carvão vegetal: subsídios 2014 ao Plano Siderurgia do MDIC*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) (versão preliminar);
- FELICIANO-BRUZUAL, C. & J. A. MATHEWS (2013). BIO-PCI, charcoal injection in blast furnaces: State of the art and economic perspectives. *Revista de metalurgia*, v. 49, n. 6, pp. 458-468;
- FROLOV, S. (2014). KOKS Group's member presentation. *IIMA members meeting*. Barcelona: International Iron Metallics Association (IIMA).
- GAMBARDELLA, M.F., B.P. OSSENBECK, T.K. LANGTON (2013). *Direct reduced iron: Steel's next megatrend positive for Nucor & fueled by the U.S. shale gas revolution*. New York: J.P. Morgan;
- HASSAN, A. (2013). Ore-based metallics: overview. *CRU Ryan's Notes metallics meeting*. Miami: CRU e Ryan's Notes;
- LEAL NETO, J. (2013). ArcelorMittal Tubarão: política e ações de eficiência energética. *34º Seminário de balanços energéticos globais & 28º encontro de produtores e consumidores de gases industriais*. Vitória: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração (ABM);
- MALLARD, A. A. M. (2009). *Avaliação ambiental do setor de siderurgia não-integrada a carvão vegetal do Estado de Minas Gerais*. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental / Universidade Federal de Ouro Preto (Universidade Federal de Ouro Preto);
- MELLO, A. A. A. *et alii* (2009). Competitividade e sustentabilidade ambiental da siderurgia brasileira. MARCOVITCH, J. (coordenador). *Mitigação de gases de efeito estufa: a experiência setorial e regional no Brasil*. São Paulo: Universidade de São Paulo (USP);
- MILLBANK (2007). *Merchant pig iron sees reasons for growth*. London: Steel Business Briefing (SBB Insight, 45);
- MMA (2010). *Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (Sumário executivo);
- OLIVEIRA, A. C. (2012). *Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal*. Viçosa: Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (Dissertação de mestrado);
- PLANTAR (2014). *Projetos de créditos de carbono do Grupo Plantar*. Belo Horizonte: Plantar;

- QUEIROZ GALVÃO (2014). *Relatório anual 2013*. Rio de Janeiro: Queiroz Galvão;
- SINDIFER (2014). *Anuário estatístico do setor de ferro gusa 2013*. Belo Horizonte: Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais (Sindifer);
- VALLADARES, R. K. (2011). Ferro gusa sustentável a carvão vegetal. *2nd CRU's Latin American iron & steel trends conference*. Rio de Janeiro: CRU;
- VAN HOEY, M. (2014). Solving overcapacity in the steel industry. *25o. Congresso Brasileiro do Aço*. São Paulo: Instituto Aço Brasil (IABr);
- VIDAL, M. H. F. & M. A. C. PINTO (2009). Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil. *BNDES Setorial*, n. 30, pp. 237 – 297.

Indústria Do Vidro

Mauro Akerman

1. Caracterização Setorial

O vidro é empregado em diversos tipos de produtos, que são divididos em famílias: vidros planos; embalagens; produtos de mesa ou domésticos; fibras de reforço; fibras ópticas; lâ de vidro; tubos; isoladores; telhas e tijolos; iluminação. A Abividro, Associação Técnica Brasileira dos Produtores Automáticos de Vidro, agrupa os vidros em quatro categorias. Além dos três primeiros tipos acima citados, plano, embalagem e doméstico, há um quarto tipo, denominado “vidros técnicos”, que engloba todos os demais.

Segundo o último anuário da associação, editado em 2009, os três primeiros tipos representaram 93,9% da capacidade de produção brasileira no ano anterior. O Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Minerais Não Metálicos de 2013, publicado pelo Ministério de Minas e Energia, indica uma proporção muito parecida: 93,7%. Por essa razão, o foco deste trabalho residirá naqueles três tipos principais de vidro. A seguir, discutimos as principais características de cada um deles.

Existe uma subdivisão importante entre os vidros planos: vidro liso, também denominado *float* pelo seu processo produtivo; e vidro impresso, também conhecido como vidro “fantasia”, que apresenta uma das faces com desenhos em relevo, o que o torna translúcido, mas não transparente.

O mercado de vidro plano se divide em quatro principais grupos:

- Vidro automobilístico: empregado em automóveis, ônibus, trens etc. Estes produtos sofrem transformação posterior como laminação e têmpera. Este grupo emprega exclusivamente vidro *float*.
- Vidros para eletrodomésticos: empregados em fornos, fogões, máquinas de lavar, refrigeradores, etc. Podem ser impressos e *float*.
- Vidros para a construção civil: empregado em portas, janela, pisos, telhados etc. Podem sofrer transformação como laminação e têmpera, além de revestimentos superficiais, ou ser empregados da forma como saem da vidraria. Podem ser impressos e *float*.
- Vidros empregados em móveis e decorações, incluindo os espelhos. Podem ser impressos e *float*.

A divisão entre vidros impresso e *float* é importante porque os requisitos de qualidade óptica do segundo tipo tornam o seu processo mais exigente em termos energéticos. A qualidade e o consumo dos vidros impressos são da mesma ordem de grandeza dos outros vidros descritos a seguir.

Os vidros embalagem subdividem-se em: potes, usualmente para conter alimentos; garrafas, embalagens dos diversos tipos de bebidas; e frascos, embalagens de medicamentos e produtos de perfumaria. Para efeito de consumo energético, podemos considerar todos como “embalagens”.

Os vidros domésticos ou de mesa incluem copos, pratos, jarras e demais utensílios utilizados na mesa e culinária. Apresentam nível de exigência de qualidade semelhante aos de embalagem e consumos energéticos compatíveis.

A produção do vidro se dá pela fusão de suas matérias primas em fornos específicos para esse fim. O material gerado, líquido e viscoso, é conformado enquanto esfria e tem sua viscosidade aumentada, até chegar à temperatura ambiente, quando sua forma e características são mantidas definitivamente.

A base do vidro é a sílica, usualmente originária de areias e que possui temperatura de fusão muito alta, à qual são adicionados outros componentes que tornam a composição final visada possível de se obter industrialmente de maneira economicamente viável. Estes componentes são fundamentalmente carbonatos de sódio, cálcio e magnésio, que geram a família de vidros sodo-cálcicos, a grande maioria da produção industrial.

A presença de carbonatos na composição gera no forno a emissão de CO_2 . Além do CO_2 emitido pela decomposição dos carbonatos, os fornos de vidro são majoritariamente aquecidos a combustão, emitindo também CO_2 proveniente da queima do combustível empregado.

O processo produtivo vidreiro é semelhante para todos os tipos de vidro. A variação se dá na etapa de conformação dos produtos a partir da massa fundida, que os vidreiros denominam “fabricação”. Os vidros de embalagem são conformados por sopro dentro de moldes, ao passo que vidros domésticos geralmente são prensados. Já os vidros planos impressos recebem sua forma final pela laminação entre dois rolos, dos quais um confere a textura superficial. Por fim, o vidro plano liso é produzido em sua totalidade pelo processo *float*, assim denominado por que efetivamente o vidro esfria e adquire a forma plana, com superfícies perfeitamente lisas e paralelas, flutuando sobre um banho líquido de estanho.

O processo industrial vidreiro envolve quatro etapas: dosagem e mistura das matérias primas; fusão das matérias primas para gerar a massa de vidro fundida; conformação da massa de vidro nos produtos; e recozimento para alívio de tensões residuais.

Pelas características de seu processo de produção intensivo em capital, as vidrarias em sua maioria pertencem a grandes grupos empresariais. Estes grandes grupos usualmente detêm sua própria tecnologia, projetando e construindo seus próprios fornos. Todavia, existem diversas empresas no mercado internacional que vendem tecnologia com resultados semelhantes em termos de desempenho.

Muito importante além dos equipamentos é o conhecimento técnico e especialização das equipes que operam as plantas. Não é raro que se invista nos equipamentos, mas não na formação do pessoal, situação que gera resultados negativos. Neste ponto, os grandes grupos têm vantagem, pois podem manter equipes técnicas de apoio em suas fábricas. Além disso, não existe formação técnica vidreira “aberta” e cada produtor obrigatoriamente deve formar suas equipes.

Desta maneira, as melhores técnicas vidreiras estão disponíveis no Brasil. Porém, ainda assim, são comuns diferenças significativas de rendimento (vidro vendável / vidro fundido), devido fundamentalmente ao aprimoramento técnico das equipes de produção.

2. Caracterização Econômica

Em termos da Classificação Nacional por Atividades Econômicas (CNAE - IBGE), o setor de vidro é classificado no grupo CNAE2.0 23.1 (Fabricação de vidro e de produtos do vidro). Em termos mais desagregados, esse grupo inclui as classes: 23.11 (Fabricação de vidro plano e de segurança), 23.12 (Fabricação de embalagens de vidro) e 23.19 (Fabricação de artigos de vidro). Portanto, esta classificação agrega dois grupos diversos de empresas, indústria de base e indústria de transformação, não permitindo obter dados representativos para o presente estudo, que diz respeito única e exclusivamente ao setor sensível em termos emissões de carbono, aquele que realiza a operação de fusão e é classificado como indústria de base.

A ABIVIDRO é a associação técnica do setor e tem o objetivo de zelar pelos interesses comuns do setor produtivo representado pela indústria de base. Embora o fizesse até 2009, desde então, não fornece dados estatísticos sobre o setor. Informações confiáveis e atualizadas sobre o nível de produção de vidro no Brasil são difíceis de serem encontradas.

As indústrias de base são responsáveis pela fusão do vidro e as indústrias de transformação, pela transformação do vidro, seja por meio da decoração, no caso das embalagens, seja por meio de uma nova cadeia produtiva, como no caso do vidro plano. Vale ressaltar que a cadeia de transformação de vidro plano é bem mais significativa em termos de número de empresas e emprego. Envolve cerca de 300 empresas e emprega em torno de 30 mil profissionais, além das mais de 40 mil vidraçarias espalhadas por todo território nacional (Abravidro, 2013).

Já o setor de base é bastante concentrado. Isso se deve principalmente ao fato de o processo produtivo ser muito intensivo em capital, exigir a produção em grandes lotes e o acesso a matérias-primas estratégicas. No Brasil, as indústrias fabricantes de vidro totalizam cerca de 20 empresas e empregam em torno de 12.000 profissionais. O maior número de empresas concentra-se nas áreas de vidros planos e embalagens, sendo o segmento de utilidades domésticas, para efeito de contabilização de produção, frequentemente agregado ao de embalagem, formando o que tradicionalmente se chama de setor de vidro oco.

A fabricação de vidro de base, além de concentrar as maiores empresas da cadeia vidreira, é também a atividade no qual ocorre a maior emissão de gases de efeito estufa (GEE). Os processos de transformação do vidro se dão por corte, lapidação, laminação, têmpera etc. As emissões de processo praticamente não ocorrem nessas atividades e as emissões oriundas do consumo de energia são muito baixas em função de a matriz energética brasileira ser bastante limpa. Sendo assim, é possível restringir a discussão de emissões ao segmento da indústria de base.

O saldo comercial do setor, em 2013, foi deficitário em US\$ 537 milhões. Esse déficit manifestou-se a partir de 2008. Anteriormente, a balança comercial setorial oscilava em torno do equilíbrio. É provável que a recente instalação de novos produtores se relacione com a oportunidade de mercado expressa no volume grande e crescente de importações. Até 2013, só havia dois fabricantes de vidro *float* no Brasil: Cebrace e Guardian. A partir de 2014, duas novas empresas se instalaram no país: a

japonesa AGC e a Vivix, totalmente nacional e pertencente ao Grupo Cornelio Brennand. Do lado dos vidros de embalagem, um dos produtores tradicionais iniciou a produção em uma nova fábrica em Porto Ferreira (SP) em novembro de 2014 e outra fábrica está sendo construída em Estância (SE) com início da operação previsto para 2015. Além disso, em agosto de 2014, a Vitro, uma empresa mexicana, anunciou a construção de uma fábrica de frascos para cosméticos no Brasil a ser localizada em Camaçari (BA). Com investimento de US\$ 90 milhões, deve entrar em operação em 2016. Por fim, pelo menos duas das empresas de vidro plano estabelecidas no Brasil (Vivix e Cebrace) já anunciaram novas unidades, ainda que não exista comunicado oficial de início de construção e operação.

Na Tabela 1, estão indicadas as 23 fábricas produtoras de vidro instaladas no Brasil, suas localizações, origem do capital e capacidades nominais estimadas.

Tabela 1 Relação das fábricas de vidro brasileiras

	Estado	Cidade	empresa	produto	fornos	capac. t/dia	origem
1	Ceará	Fortaleza	OI	embal	1	90	EUA
2	Pernambuco	Recife	OI	embal	2	490	EUA
3		Vitória de S ^o Antão	OI	embal	2	220	EUA
4		Goiana	Vivix	plano float	1	900	Brasil
5	Rio de Janeiro	Rio	OI	embal+doméstico	2	500	EUA
6		Rio	Ambev	embal	1	350	Brasil
7		Porto Real	Guardian	plano float	1	600	EUA
8	São Paulo	Guaratingueta	AGC	plano float	1	600	Japão
9		Caçapava	Cebrace	plano float	1	600	Japão/França
10		Jacarei	Cebrace	plano float	3	2.400	Japão/França
11		Itaquaquecetuba	Nadir	embal+doméstico	2	400	Brasil
12		Tatui	Guardian	plano float	1	830	EUA
13		Porto Ferreira	Saint Gobain	embal	1	400	França
14		Porto Ferreira	Vidroporto	embal	2	300	Brasil
15		São Bernardo	Wheaton	embal+doméstico	4	200	Brasil
16		São Vicente	SG Glass	plano impresso	1	180	França
17		São Paulo	OI	embal	3	1.000	EUA
18		São Paulo	Saint Gobain	embal	1	400	França
19		São Paulo	SGD	embal	2	260	EUA
20		São Paulo	UBV	plano impresso	1	240	Brasil
21		São Paulo	Anchieta	embal	1	80	Brasil
22	Santa Catarina	Barra Velha	Cebrace	plano float	1	600	Japão/França
23	Rio G do Sul	Campo Bom	Saint Gobain	embal	1	300	França
			Total		36	11.940	

Fonte: Elaboração própria.

As 23 vidrarias pertencem a um total de 13 grupos empresariais. Na produção de vidro plano pelo processo *float* são quatro as empresas instaladas no país: Cebrace, que é uma joint-venture entre a Saint Gobain (francesa) e a Pilkington (japonesa), Guardian (americana), AGC (japonesa) e Vivix (brasileira). Na produção de vidro plano impresso atuam duas empresas, ambas instaladas

em São Paulo: Saint Gobain Glass (francesa) e União Brasileira de Vidros (brasileira). Na produção de embalagens voltadas a bebidas e alimentos, são quatro os produtores: Owens Illinois (americana), Verallia (francesa, pertencente ao grupo Saint Gobain), Vidroporto (brasileira) e Ambev (brasileira, pertencente à empresa de bebidas homônima). Na produção de frascos, também são quatro os fabricantes, todos localizados em São Paulo: Wheaton Brasil Vidros (brasileira), Anchieta (brasileira), SGD (americana) e Owens Illinois (americana). Por fim, orientadas ao segmento de domésticos atuam três empresas: Nadir Figueiredo (brasileira), Wheaton Brasil Vidros (brasileira) e Owens Illinois (americana). A capacidade nominal instalada total é estimada por 11.940 toneladas dia ou 4,4 milhões de toneladas ao ano.

3. Impactos Ambientais

As vidrarias têm impacto ambiental local relativamente baixo. A maioria delas se encontra instalada em áreas urbanas, até mesmo em bairros que ao longo dos anos perderam suas características industriais e adquiriram um perfil residencial. Nestes casos é comum que elas sejam levadas a se realocar pela valorização imobiliária.

Uma característica do processo vidreiro é que todo o material que é enfiado nos fornos se transforma em produto. Caso haja algum rejeito, como uma peça que não cumpriu os requisitos de qualidade, pode retornar inteiramente ao forno. Por outro lado, os circuitos de água, utilizada para resfriamento, são fechados. A única emissão relevante ao meio ambiente são os efluentes gasosos provenientes da decomposição dos carbonatos que participam das matérias-primas e da combustão nos fornos.

Por exigência da legislação ambiental, os fornos instalados nos centros urbanos dispõem de filtros para captação de particulados e eventuais gases sulfurosos das fumaças antes de estas serem encaminhadas às chaminés.

A reciclagem é prática comum e secular na vidraria, pois o vidro de fato é 100% reciclável e ao empregar caco em substituição às matérias primas minerais obtêm-se diversas vantagens para o processo. A energia necessária para elaborar um vidro com exatamente as mesmas características do originário de matérias primas é bem menor a partir do caco. Enquanto são necessários 2,889 GJ/t para a produção do vidro a partir de matérias-primas, apenas 1,616 GJ/t são exigidas quando o insumo é o caco.

O caco ao se transformar em vidro fundido não emite gases de processo. Além disso, como as composições com mais caco exigem menos energia, isso também implica menores emissões pela queima de combustíveis. Menor exigência energética também se traduz em maior longevidade dos fornos.

Conforme dados da Abividro, no Brasil em 2011 foram recicladas 40% das embalagens de vidro pós-consumo. O custo baixo do vidro e as distâncias continentais de nosso país dificultam bastante a logística da reciclagem. A adoção de sistemas de coleta seletiva e logística reversa que permitiriam

ampliar esse percentual embute, desse modo, um grande potencial de redução de emissões de GEE, além das vantagens mais diretas, que são a destinação dos resíduos que assim não necessitam ser descartados e a menor necessidade de exploração de bens minerais.

3.1. Estimativas de Emissões de CO₂

Este tópico apresenta estimativas para as emissões de CO₂, único gás de efeito estufa emitido nos processos de fusão do vidro, derivadas da produção industrial no setor do vidro. Essas estimativas consideram as composições químicas típicas dos principais tipos de vidro e as formulações de matérias-primas necessárias para obter aquelas composições, além das relações estequiométricas envolvidas nas transformações químicas que geram aqueles gases. Não são considerados neste estudo os gases emitidos na geração de energia elétrica utilizada nos processos para movimentação de motores, iluminação etc., assim como os gases emitidos pelo transporte das matérias primas e produtos acabados.

As composições químicas empregadas pelos diversos produtores na produção de vidro não são necessariamente iguais. Podem inclusive variar para o mesmo produtor. Elas são determinadas principalmente pelo tipo de produto, mas também pelos meios disponíveis, como fornos e máquinas de conformação. O fator chave para definir a formulação a ser empregada é a viscosidade ou como a viscosidade varia em função da temperatura. A viscosidade depende da composição química e da temperatura. Como o controle da viscosidade é muito complexo, os vidreiros fixam determinadas composições químicas e nos seus processos controlam a viscosidade através da temperatura. A Tabela 2 indica composições químicas típicas de vidros industriais.

Tabela 2 Composições químicas típica dos vidros industriais – % em peso

	Plano Float	Plano impresso	Doméstico Extra claro	Embalagem Incolor	Embalagem Âmbar	Embalagem Verde
SiO ₂	72,24	70,05	73,84	72,97	71,46	71,26
Al ₂ O ₃	0,70	1,30	1,90	1,90	2,40	2,40
CaO	8,60	10,60	10,70	11,00	10,70	10,70
MgO	3,90	3,90	0,00	0,30	1,00	1,00
Na ₂ O	13,80	13,20	13,40	12,80	13,20	13,20
K ₂ O	0,40	0,70	0,00	0,80	0,80	0,80
Fe ₂ O ₃	0,10	0,05	0,02	0,05	0,40	0,40
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
SO ₂	0,26	0,20	0,14	0,18	0,04	0,04
soma	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria.

Outros componentes adicionados voluntariamente, como os colorantes, ou involuntariamente, como impurezas, podem estar presentes na composição química, além dos óxidos reportados na tabela. Eles não foram considerados, pois raramente sua soma supera 0,1%. A partir da composição química desejada e das matérias-primas disponíveis, determina-se o “cálculo da composição”, isto é, a formulação que deve ser preparada para que na saída do forno se tenha o vidro almejado. A Tabela 3 fornece composições químicas típicas, em porcentagem de peso, de matérias-primas empregadas industrialmente.

Tabela 3: Composições químicas típicas das matérias primas – % em peso.

	Componentes que permanecem no vidro								Comp. gasosos	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	CO ₂	SO ₃
Alumina Calcificada	0,02	97,80					0,013			
Areia	99,80	0,04					0,029			
Barrilha					58,20				41,30	
Calcário	0,30	0,10	55,20	0,30			0,030		43,73	
Dolomita	1,40	0,23	31,20	21,30			0,100		47,96	
Feldspato	66,78	17,98	0,09		3,90	9,90	0,167			
Carvão mineral									355,67	
Hematita							97,800			
Sulfato de Sódio					43,60					56,20
Cromita	0,20	0,20					15,600	44,90		
Hematita							97,800			

Fonte: Elaboração própria.

Em relação à Tabela 3, cabem algumas observações. Nesta tabela os componentes estão expressos em óxidos. Nem sempre eles se encontram desta forma no material, como no caso do carvão, que é composto praticamente só de carbono (C). Expressando sua composição em óxido (CO₂), chega-se a um valor acima de 100%, pois estamos considerando também o oxigênio ligado ao carbono, o que só ocorre depois da combustão. Quando a soma não chega a 100%, existem outros componentes não considerados na tabela, como a água que pode fazer parte da constituição de alguns materiais.

Considerando as formulações dos vidros apresentadas na Tabela 2 e a composição química das matérias primas apresentada na Tabela 3, chegamos às seguintes porcentagens de emissões de CO₂ em peso em relação à massa de vidro produzida: plano float (20,7%), plano impresso (21,7%), doméstico (14,3%) e embalagem (17,0%).

Além das emissões decorrentes do processo, é preciso considerar as emissões decorrentes da queima de combustíveis. O consumo energético de um forno de vidro varia principalmente com o teor de caco e o tipo de forno. Outros fatores que influenciam no consumo específico são o envelhecimento do forno, a qualidade da manutenção e a cor do vidro.

O consumo de um forno é a soma de dois fatores:

- Consumo estacionário, que é a energia despendida para manter o forno aquecido na temperatura de operação e que independe da produção. Os vidreiros também chamam esse fator como “perda em vazio”.
- Consumo relativo à elaboração do vidro. Este fator depende da extração do forno, da formulação e do teor de caco empregado.

Portanto, sempre que se determina o consumo específico de um forno, deve ser considerado o teor de caco empregado.

O BAT da Comissão Europeia de 2013 indica os seguintes valores típicos de consumo:

- Fornos tipo *float* operando com 20% de caco: 6,3 GJ/t de vidro.
A energia de elaboração do vidro com 20% de caco é de 2,61GJ/t e a energia estacionária do forno nestas condições é: $6,3 - 2,61 = 3,69$ GJ/t.
- Forno tipo embalagem operando com 70% de caco: 3,8 GJ/t de vidro.
A energia de elaboração do vidro com 70% de caco é de 1,88 GJ/t e a energia estacionária do forno: $3,8 - 1,88 = 1,92$ GJ/t.

Em âmbito nacional, o Balanço Energético não publica o consumo energético nem tampouco a matriz energética da indústria brasileira do vidro de forma discriminada. Porém, segundo o “Estudo de Emissões de Gases de Efeito Estufa Indústria Brasileira de Vidro”, publicado pela ABIVIDRO, o principal combustível utilizado nos fornos de fusão é o gás natural. Para efeito dos cálculos subsequentes, admitir-se-á que é o único empregado.

O cálculo do consumo de gás natural será estimado empregando dados da literatura de consumo energético para a produção do vidro plano tipo float e vidro oco e a emissão de gases de efeito estufa será relacionada com as quantidades de gás natural consumido.

O consumo de fornos de fusão varia, como já se disse, em função dos volumes produzidos e também do teor de caco empregado. Para calcular consumos equivalentes a diferentes taxas de caco, foram empregadas as seguintes fórmulas, que preveem a energia de elaboração do vidro em função do teor de caco empregado (C): – fonte: Documento “Térmica de Fornos” Miguel Zorrozuza - Escola do Vidro Saint Gobain 2003:

$$\text{Consumo vidro embalagem (GJ/t)} = 1,802 + 2,889 - 1,273C = 4,691 - 1,273C$$

$$\text{Consumo vidro plano (GJ/t)} = 3,666 + 2,889 - 1,273C = 6,555 - 1,273C$$

Para calcular um fator que forneça a quantidade de CO₂ produzida por Nm³ de gás natural queimado, é preciso levar em conta a composição típica encontrada no GN comercializado no Brasil (Basílio, 2013):

Metano (CH ₄)	89,35%
Etano (C ₂ H ₆)	8,03%
Propano (C ₃ H ₈)	0,78%
Butano (C ₄ H ₁₀)	0,07%
Pentano (C ₅ H ₁₂)	0,01%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,48%
Nitrogênio (N ₂)	1,28%

O poder calorífico inferior (PCI) desse gás natural é de 8.650 kcal/Nm³, ou seja, 0,0362GJ/Nm³. Portanto, a geração de CO₂ com a queima do gás natural é de 2,13 kg/Nm³ de gás ou 58,82 kg CO₂/Gj.

Note-se que a combustão nos fornos de vidro se dá em ambiente em torno de 1.600 °C e com excesso de comburente, o que garante a combustão completa do gás. Por outro lado, pelas suas características, os fornos de fusão de vidro não emitem N₂O, mas eventualmente NO_x, que não é considerado como gás de efeito estufa, sendo, entretanto, controlado pela legislação ambiental.

Para estimar o volume de emissões, naturalmente é preciso dispor de informações sobre a quantidade produzida de vidro. Nem todo o vidro fundido nos fornos de fusão se transforma em produto e toda linha de produção apresenta uma quantidade de vidro fundido e uma quantidade, inferior, de vidro que efetivamente é transformada em produto vendável. Para cálculo das emissões, deve ser considerada a tonelagem fundida. A relação entre esses dois valores é definida como “rendimento de fabricação”. Esse rendimento pode variar de acordo com diversos fatores, como a escala de produção, a variedade de formatos de produto, a produção de formas mais complexas etc. Fatores como expertise da equipe, matérias primas utilizadas, tipo e geração dos fornos podem também afetar significativamente o rendimento de fabricação.

Outro fator importante a ser considerado no estudo de emissões é a taxa de utilização dos fornos. A taxa de utilização é a relação entre a quantidade de vidro fundido (não necessariamente fabricado) e a capacidade nominal de fusão do forno.

Para levantamento da produção das indústrias vidreiras que constituem foco deste trabalho foram consultadas as seguintes publicações: (i) Anuário da Abividro de 2009 (dados até 2008); (ii) Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Minerais não Metálicos do MME (Ministério de Minas e Energia) de 2013 (dados até 2012); e (iii) Panorama Vidreiro da Abravidro (Associação Brasileira de Distribuidores de Vidros Planos) de 2014 (dados até 2014). Todos eles mencionam “produção” para capacidade instalada, o que dá a entender se tratar de produtos vendáveis, porém quando os vidreiros mencionam características dos fornos se referem à capacidade de fusão. Neste trabalho, serão considerados os seguintes parâmetros para os dois fatores mencionados acima: taxa de utilização dos fornos, 90%; rendimento de fabricação, 80%. Note-se que esses valores são compatíveis com a experiência da indústria brasileira nos últimos anos, como é demonstrado no relatório completo que resultou deste estudo (Akerman, 2014b: 45-46).

Para estimar os GEE emitidos, consideraremos, portanto, neste estudo a quantidade fundida de vidro com base na capacidade instalada dos fornos e uma taxa de utilização de 90%. Empregando dados de capacidade instalada disponíveis no Panorama Vidreiro para o vidro plano e estimando os dados para o segmento de vidro oco o autor construiu a Tabela 4, que fornece estimativas da capacidade instalada das vidrarias brasileiras em 2014 e da geração de CO₂ da indústria vidreira brasileira em 2014. Nela se considerou que os fornos que iniciaram neste ano trabalharam por todo o período. A emissão de CO₂, em 2014, pode ser, portanto, estimada em 1.830.000 toneladas para o total da indústria vidreira brasileira.

Tabela 4 Estimativa de emissões de CO₂ da indústria de vidro em 2014

	Estado	Cidade	empresa	produto	fornos	capac. t/dia	90% cp. t/dia	% caco	Gj/t	Gj	t CO2 comb.	t CO2 calcin.	t CO2 total
1	Ceará	Fortaleza	OI	embal	1	90	81	50	4,08	328,4	19,3	6,9	26,2
2	Pernambuco	Recife	OI	embal	2	490	441	50	4,08	1788,0	105,2	37,5	142,7
3		Vitória S ^{to} Antão	OI	embal	2	220	198	50	4,08	802,8	47,2	16,8	64,1
4		Goiana	Vivix	plano float	1	900	810	10	6,41	5206,4	306,2	153,1	459,3
5	Rio de Janeiro	Rio	OI	embal+dom.	2	500	450	30	4,36	1939,1	114,1	53,6	167,6
6		Rio	Ambev	embal	1	350	315	30	4,36	1357,4	79,8	37,5	117,3
7		Porto Real	Guardian	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
8	São Paulo	Guaratingueta	AGC	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
9		Caçapava	Cebrace	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
10		Jacarei	Cebrace	plano float	3	2.400	2.160	10	6,41	13883,8	816,6	408,2	1.224,9
11		Itaquaquecetuba	Nadir	embal+dom.	2	400	360	20	4,5	1597,1	93,9	51,8	145,8
12		Tatui	Guardian	plano float	1	830	747	10	6,41	4801,5	282,4	141,2	423,6
13		Porto Ferreira	Saint Gobain	embal	1	400	360	60	3,94	1413,8	83,2	24,5	107,6
14		Porto Ferreira	Vidroporto	embal	2	300	270	60	3,94	1060,3	62,4	18,4	80,7
15		São Bernardo	Wheaton	embal+dom.	4	200	180	20	4,5	798,6	47,0	31,7	78,7
16		São Vicente	SG Glass	plano impr.	1	180	162	50	4,08	656,8	38,6	17,8	56,5
17		São Paulo	OI	embal	3	1.000	900	50	4,08	3649,1	214,6	76,5	291,1
18		São Paulo	Saint Gobain	embal	1	400	360	50	4,08	1459,6	85,9	30,6	116,5
19		São Paulo	SGD	embal	2	260	234	20	4,5	1038,1	61,1	31,8	92,9
20		São Paulo	UBV	plano impr.	1	240	216	40	4,22	903,3	53,1	28,5	81,6
21		São Paulo	Anchieta	embal	1	80	72	20	4,5	319,4	18,8	10,4	29,2
22	Santa Catarina	Barra Velha	Cebrace	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
23	Rio G do Sul	Campo Bom	Saint Gobain	embal	1	300	270	60	3,94	1060,3	62,4	18,4	80,7
				Total dia	36	11.940	10.746			57947,7	3.408,5	1.603,3	5.011,8
				Total ano						21.150.924	1.244.097	585.216	1.829.314

Fonte: Elaboração própria.

4. Projeções de Emissões para 2020

O cenário previsto para a produção de vidro é que as atuais fábricas continuem operando nos patamares atuais de produção e que algumas novas passem a se incorporar o parque nacional.

Como já mencionado, no final de 2014 uma nova fábrica de embalagens de alimentos iniciou a operação, a da Vidroporto em Porto Ferreira (SP), e outra, da Verallia (Saint Gobain) em Estância (SE), deve começar a operar em 2015. Cada uma delas tem com capacidade estimada de produção de 300 t/dia. Para 2016, foi recentemente anunciada a entrada de uma empresa mexicana, a Vitro, que será instalada em Camaçari (BA). Sua capacidade de produção não foi anunciada, mas estimamos que seja também da ordem de 300 t/dia. Do lado do vidro plano, pelo menos duas das empresas já estabelecidas no país anunciaram novos fornos: a Cebrace na Bahia e a Vivix na região

Sudeste, porém sem datas definidas. Para o nosso cenário de produção, vamos considerar esses dois novos fornos com início de produção entre 2016 e 2020. Desta maneira, em 2020 a produção seria a de 2014 acrescida das fábricas indicadas na Tabela 5.

Tabela 5 Previsão de novas vidrarias no período 2015-2020

Estado	Cidade	empresa	produto	fornos	cap.
24 São Paulo	Porto Ferreira	Vidroporto	embal	1	300
25 Sergipe	Estância	Verallia	embal	1	300
26 Bahia	Camaçari	Vitro	embal	1	300
27 ?	?	?	plano float	1	900
28 ?	?	?	plano float	1	900
			Total 2020	41	14.640

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com este cenário, a capacidade instalada em 2020 passaria a ser de 5.344.000 toneladas de vidro fundido ao ano, 23,9% a mais do que em 2014 (Tabela 4). Se considerarmos a taxa de utilização de 90%, chegamos a 4.810.000 toneladas de vidro fundido. Aplicando o rendimento de fabricação de 80%, chegamos a 3.848.000 toneladas de produtos vendáveis.

O documento da Abividro “Estratégia Baixo Carbono para a Indústria Brasileira de Vidro” indica uma previsão de vidro fundido para 2020 de 5.000.000 toneladas de vidro fundido, uma diferença de 4% em relação à nossa previsão. Por outro lado, uma projeção econométrica elaborada no âmbito desta pesquisa (Akerman, 2014b: 71) prevê para 2020 um consumo aparente de produtos de vidro de 4.011.000 toneladas, o que representa novamente uma diferença de 4%. Estes comparativos mostram que os resultados da estimativa aqui apresentada são bastante razoáveis e, portanto, serão empregados para o cálculo da emissão prevista para 2020. A emissão total de CO₂ pela indústria brasileira de vidro prevista para 2020 dentro deste cenário é apresentada na Tabela 6 a seguir.

Em síntese, a previsão de emissão de CO₂ em 2020 é de 2.285.000 toneladas anuais. Portanto, dentro de um cenário BAU (*business as usual*), pode-se projetar um crescimento de 24,9% nas emissões setoriais entre 2014 e 2020.

Tabela 6 Previsão de emissões de CO₂ em 2020

	Estado	Cidade	empresa	produto	fornos	capac. t/dia	90% cp. t/dia	% caco	Gj/t	Gj	t CO2 comb.	t CO2 calcin.	t CO2 total
1	Ceará	Fortaleza	OI	embal	1	90	81	50	4,08	328,4	19,3	6,9	26,2
2	Pernambuco	Recife	OI	embal	2	490	441	50	4,08	1788,0	105,2	37,5	142,7
3		Vitória S ^{to} Antão	OI	embal	2	220	198	50	4,08	802,8	47,2	16,8	64,1
4		Goiana	Vivix	plano float	1	900	810	10	6,41	5206,4	306,2	153,1	459,3
5	Rio de Janeiro	Rio	OI	embal+dom.	2	500	450	30	4,36	1939,1	114,1	53,6	167,6
6		Rio	Ambev	embal	1	350	315	30	4,36	1357,4	79,8	37,5	117,3
7		Porto Real	Guardian	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
8	São Paulo	Guaratingueta	AGC	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
9		Caçapava	Cebrace	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
10		Jacarei	Cebrace	plano float	3	2.400	2.160	10	6,41	13883,8	816,6	408,2	1.224,9
11		Itaquaquecetuba	Nadir	embal+dom.	2	400	360	20	4,5	1597,1	93,9	51,8	145,8
12		Tatui	Guardian	plano float	1	830	747	10	6,41	4801,5	282,4	141,2	423,6
13		Porto Ferreira	Saint Gobain	embal	1	400	360	60	3,94	1413,8	83,2	24,5	107,6
14		Porto Ferreira	Vidroporto	embal	2	300	270	60	3,94	1060,3	62,4	18,4	80,7
15		São Bernardo	Wheaton	embal+dom.	4	200	180	20	4,5	798,6	47,0	31,7	78,7
16		São Vicente	SG Glass	plano impr.	1	180	162	50	4,08	656,8	38,6	17,8	56,5
17		São Paulo	OI	embal	3	1.000	900	50	4,08	3649,1	214,6	76,5	291,1
18		São Paulo	Saint Gobain	embal	1	400	360	50	4,08	1459,6	85,9	30,6	116,5
19		São Paulo	SGD	embal	2	260	234	20	4,5	1038,1	61,1	31,8	92,9
20		São Paulo	UBV	plano impr.	1	240	216	40	4,22	903,3	53,1	28,5	81,6
21		São Paulo	Anchieta	embal	1	80	72	20	4,5	319,4	18,8	10,4	29,2
22	Santa Catarina	Barra Velha	Cebrace	plano float	1	600	540	10	6,41	3471,0	204,2	102,1	306,2
23	Rio G do Sul	Campo Bom	Saint Gobain	embal	1	300	270	60	3,94	1060,3	62,4	18,4	80,7
				Total dia	36	11.940	10.746			57947,7	3.408,5	1.603,3	5.011,8
				Total ano						21.150.924	1.244.097	585.216	1.829.314
Vidriarias brasileiras novas 2015 - 2020													
24	São Paulo	Porto Ferreira	Vidroporto	embal	1	350	315	60	3,94	1237,1	72,8	21,4	94,2
25	Sergipe	Estância	Verallia	embal	1	350	315	60	3,94	1237,1	72,8	21,4	94,2
26	Bahia	Camaçari	Vitro	embal	1	350	315	20	4,5	1397,5	82,2	45,4	127,6
27	?	?	?	plano float	1	900	810	10	6,41	5206,4	306,2	160,4	466,6
28	?	?	?	plano float	1	900	810	10	6,41	5206,4	306,2	160,4	466,6
				Total dia 2020	40	14.790	13.311			72.232,2	4.248,7	2.012,3	6.261,0
				Total ano 2020						26.364.758	1.550.775	734.487	2.285.262

Fonte: Elaboração própria.

5. Medidas de Mitigação

Existem vários meios tecnicamente viáveis para reduzir as emissões de CO₂ na produção de vidro. A seguir, a viabilidade dos mais relevantes deles no contexto brasileiro atual será discutida.

5.1. Formação Técnica Especializada

Um aspecto muito importante da indústria do vidro é que somente ter a disposição equipamentos com as mais avançadas tecnologias disponíveis no mercado (BAT) não garante os melhores níveis de desempenho da indústria, que dependem do nível de conhecimento e experiência da equipe técnica.

A produção industrial do vidro é contínua. Não se elabora e estoca vidro para depois conformá-lo. Ele é elaborado e, na sequência, conformado. Sua elaboração se dá em fornos onde

existe uma cuba, um grande tanque, onde está o banho, que é constantemente alimentado pela mistura das matérias primas previamente dosadas, ao mesmo tempo em que parte da massa é retirada para a conformação dos produtos. Erros de dosagem ou contaminações comprometem todo o banho e não há possibilidade de correções. Variações de composição química necessariamente geram diferenças de propriedades no vidro e afetam o rendimento de produção. Quando ocorre um desvio de composição química, só se pode corrigi-lo passando a enformar mistura correta e aguardar que o banho retorne à composição correta ou elimine a contaminação, o que pode significar dias de produção perdida.

A formação técnica das equipes das vidrarias é bastante problemática pela inexistência de cursos específicos. As vidrarias devem cuidar elas mesmas da formação específica de seu pessoal e as pressões econômicas imediatas têm feito com que a maioria descuide deste ponto fundamental.

Por estimativas do autor, a implantação de um curso técnico vidreiro em uma escola técnica já em funcionamento, que implica criação do currículo, instalação de laboratórios e capacitação de professores, tem custo da ordem de R\$ 2 milhões. Cursos de mestrado profissionalizante e de especialização para profissionais de nível superior que já tenham curso de engenharia de materiais poderiam ser implantados com custo bastante reduzido, principalmente contando com apoio da indústria através da Abividro

Uma forma de estimar o efeito da formação técnica na emissão de GEE é avaliar os rendimentos de fabricação. O rendimento médio da indústria gira em torno de 80%. Cerca da metade desse valor é atribuído a fatores do processo, como trocas de fabricação e destaque dos bordos das chapas de vidro plano. Porém, a outra metade pode ser atribuída a defeitos provenientes da falta de expertise das equipes, o que com treinamento eficiente poderia ser reduzido.

Cada 1% de aumento no rendimento significa 1% de redução na produção fundida e não vendida e, conseqüentemente, de emissões. Porém, significa 1% a menos de caco disponível, o que, conforme calculado no item reciclagem, significa um aumento de 0,5% na emissão. No total, haverá 0,5% de redução de emissão por cada 1% de aumento de rendimento.

5.2. Reciclagem

Segundo informação da Abividro, a taxa de reciclagem no Brasil no setor de embalagens é de 40%.

A reciclagem do vidro apresenta algumas características próprias que dificultam a sua realização. As vidrarias estão localizadas nos grandes centros e as distâncias no Brasil são continentais. É comum ter cidades afastadas por mais de mil quilômetros da vidraria mais próxima. Por outro lado, o custo do vidro é baixo em relação ao volume.

Teoricamente todo o vidro pode ser reciclado. Existe restrição de cores, pois vidros coloridos não podem ser aplicados na produção de vidros incolores. Entretanto, o maior problema que restringe a reciclagem é a presença de contaminantes. Por essa razão, os fabricantes de vidro plano tipo

float preferem, por segurança, empregar somente caco gerado nas suas linhas de produção. Caso o caco esteja limpo, nada impede sua utilização.

Uma chapa de vidro plano com 10 mm de espessura e 10 m² de área pesa 250 kg, que podem ser reprovados por uma simples inclusão, inferior a 1mm. Boa parte do vidro plano produzido é temperado. No processo de têmpera, a presença de inclusões causa a quebra da chapa ainda durante o processo. Independentemente de ser temperado ou não, inclusões na massa de vidro são pontos preferenciais de início de trincas e, portanto, fragilizam o produto. Vidros de embalagens sofrem menos com a presença de eventuais inclusões, pois os produtos são menores, raramente ultrapassando 1 kg e nunca são temperados.

Sistemas eficientes de coleta e transporte do caco poderiam modificar esta situação, ampliando o escopo de aplicação do caco. Já existe tecnologia disponível de usinas de beneficiamento de caco automáticas que, além de eliminarem a quase totalidade das impurezas, conseguem classificar o caco por cor, separando as três principais cores de embalagens: incolor, verde e âmbar. A Vidroporto instalou em 2013 uma usina automática fabricada pela empresa espanhola Picvisa, com orçamento de R\$ 2 milhões, e está obtendo excelentes resultados.

Um aumento de 10% no teor de caco na composição gera uma redução de 0,14 GJ de energia por tonelada de vidro produzida. Em termos de CO₂ emitido, representa para o vidro float uma redução de 10% nas emissões de calcinação (21 kg de CO₂ por t de vidro) e de 0,1273 GJ por tonelada de vidro na energia de combustão (7,5 kg de CO₂ por t), ou seja, uma diminuição total de 28,5 kg de CO₂ por tonelada de vidro. No caso do vidro oco, há também uma redução de 10% na emissão de calcinação (17 kg de CO₂ por t de vidro) e de 0,1273 GJ/t na energia de combustão (7,5 kg de CO₂ por t), resultando numa diminuição total 24,5 kg por t de vidro. Considerando, segundo a Tabela 1, a produção brasileira, em 2014, de vidro float (2.145.000 t) e vidro oco (1.744.000 t), um aumento de 10% no teor de caco empregado representaria uma redução de 103.860 t no CO₂ emitido (4,5%).

Cabe ressaltar que nesta área é difícil estimar custos, pelo grande número de instituições envolvidas na criação de um eficiente sistema de logística reversa.

5.3. Qualidade do Gás Natural

Devido ao grande consumo de energia na elaboração do vidro e à influência do contato dos gases de combustão com o banho de vidro na qualidade do produto, o domínio da combustão é muito importante para a obtenção de bons resultados de qualidade e também de emissões.

Para garantir a total queima do combustível, sempre se adiciona um excesso de comburente à mistura de gases que gerará a combustão. Se este excesso de comburente não for suficiente para a queima total do combustível, desperdiça-se energia e gera-se uma atmosfera redutora, que pode prejudicar a qualidade da produção e acelerar o desgaste dos fornos, pois tanto o vidro como os refratários que revestem os fornos são constituídos de óxidos. Por outro lado, se o teor de comburente

for excessivo, se desperdiçará energia no aquecimento deste excesso, que não entrará na reação e roubará parte da energia da combustão.

A quantidade de ar necessária para a combustão de determinado volume de gás depende da composição química desse gás. O controle da combustão nos fornos de fusão é feito por meio de um sistema de controle que garante uma relação constante entre combustível e comburente. Esta relação é fixada com base na composição química do gás e confirmada pela análise dos gases de combustão. Fixada esta relação, sempre que o operador do forno de fusão necessitar mais ou menos energia aumentará ou reduzirá o fluxo de combustível e o sistema automaticamente alterará a quantidade de comburente, mantendo a relação.

Variações na composição química do gás exigem correção na relação combustível / comburente. Desta maneira, a instabilidade nos teores dos gases que compõem o gás natural é prejudicial tanto ao processo como às emissões, pois na prática é difícil se ajustar continuamente a relação de combustão.

A obtenção de bons resultados na produção de vidro requer a estabilidade de todos os parâmetros envolvidos no processo. Por informações de pelo menos uma vidraria pesquisada e que possui equipamento de análise de gás, a composição do gás natural é bastante variável, ainda que dentro da faixa contratada com o fornecedor.

5.4. Fusão elétrica

Os fornos de fusão podem ser parcial ou totalmente alimentados por energia elétrica. A alimentação parcial, usualmente chamada de “boosting” ou “apoio elétrico”, pode ter como objetivo a substituição parcial da energia proveniente da combustão. Normalmente ela é aplicada para aquecer determinados pontos do forno na produção de vidros coloridos, que dificultam a passagem da radiação infravermelha, o que tende a esfriar regiões da sola dos fornos.

A substituição total é tecnologia conhecida, produzindo vidro de excelente qualidade e com diversas vantagens. No entanto, o grande empecilho para se adotar este sistema é o custo, além da disponibilidade de energia elétrica. Atualmente no Brasil só se encontram em funcionamento fornos elétricos para determinados vidros que não podem ser produzidos em fornos a combustão, como os vidros opais a base de flúor.

5.5. Oxi-combustão

A composição volumétrica do ar é de aproximadamente 21% de oxigênio (O_2) e 79% de nitrogênio (N_2). O gás que efetivamente participa da reação de combustão é o oxigênio, porém todo o calor gerado acaba aquecendo o nitrogênio, que desta forma dilui a energia. Podemos dizer que o nitrogênio “rouba” parte significativa da energia, que é perdida com sua saída pela chaminé. Para evitar esse desperdício de energia, pode ser aplicado oxigênio puro para reagir com o combustível.

Desta maneira, produzem-se temperaturas muito mais elevadas de chamas e reduz-se em torno de 80% a fumaça. Com a oxi-combustão pode-se então reduzir a quantidade de combustível utilizada, conseqüentemente reduzindo a emissão.

O oxigênio pode também ser aplicado como substituto parcial do ar de combustão em situações especiais, como fornos em fim de campanha, quando o desgaste dos regeneradores implica aumento de consumo e perda de capacidade produtiva do forno.

A produção de oxigênio exige grande emprego de energia elétrica e tem seu custo atrelado ao deste insumo. Existem no Brasil alguns fornos que empregam oxi-combustão, mas a razão nunca é reduzir o custo energético, pois na prática o custo do oxigênio acaba anulando a economia de combustível.

A empresa Praxair, tradicional fornecedora de oxigênio e tecnologia para suas aplicações em fornos de vidro, apresentou no Congresso Internacional do Vidro (ICG), realizado em Praga em julho de 2013, uma nova tecnologia de regeneração termoquímica do gás natural, de forma a aumentar a competitividade da oxi-combustão. Esta tecnologia ainda está em testes e no momento não há perspectiva de sua aplicação industrial.

5.6. Pré-aquecimento do caco e composição

Já existem no mercado instalações que se propõem a transferir parte do calor perdido com as fumaças ao caco e também à composição nova. Desta maneira, aumenta-se o rendimento térmico do forno e conseqüentemente são reduzidas as emissões.

Essa técnica exige que a composição seja seca, o que não é interessante para o processo. O enforamento de carga úmida evita perdas de material e desgaste de equipamento e revestimento refratário. Uma maneira de se contornar os inconvenientes de enforar composição seca seria a peletização da mesma. A prática da peletização não é comum em vidrarias industriais e sua introdução implica investimentos e tecnologia específica. Nesta área não estão disponíveis na literatura quantidades de redução de energia nem custos de implantação dos equipamentos necessários.

5.7. Substituição de fornos antigos por fornos maiores e de melhor desempenho

Muitas vidrarias contam com fornos antigos de baixo desempenho energético. A troca destes fornos por equipamentos modernos certamente reduziria o consumo energético específico. Porém, a troca de um forno exige um investimento significativo, que pode tornar inviável o negócio. Além disso, a substituição de fornos ou a implantação de novas tecnologias só podem ser implementadas durante as paradas para reforma.

Os fornos de fusão trabalham continuamente por um período que é denominado de “campanha”. Ao final da campanha, ele é drenado, esfriado e tem todas as suas partes de refratário trocadas. A partir daí, inicia-se uma nova campanha, que no caso de vidros planos

pode durar até 18 anos e no caso de vidros ocos, 12 anos. As paradas, considerando tempo de drenagem, esfriamento, reparações, aquecimento e enchimento, prolongam-se por períodos da ordem de três meses.

As empresas se recusam a informar o consumo específico de seus fornos e é difícil estimar o quanto se poderia ganhar com essas trocas.

Para a produção de vidro oco, o forno mais empregado é o de queimadores posteriores (*end port*). Porém, muitas vidrarias ainda empregam fornos antigos de queimadores laterais (*side port*), que despendem mais energia. O custo e o tempo despendido na transformação dos fornos explicam por que esses equipamentos seguem em uso. Na troca de um tipo de forno por outro, o antigo deve ser demolido e o novo, construído no local. Em uma simples reforma, entre duas campanhas, quando se necessita somente trocar as partes de refratário que foram desgastadas, emprega-se o mesmo projeto, preservando-se toda a estrutura metálica que dá sustentação aos refratários, os edifícios e equipamentos periféricos necessários ao funcionamento do forno.

Um forno para produzir vidro embalagem com extração de 350 t/dia custa, segundo informações da Horn, empresa alemã que comercializa fornos de vidro, € 11 milhões. Estima-se que a montagem deste forno custe € 2,5 milhões e, portanto, a troca de um forno antigo por um novo com estas características pode custar € 13,5 milhões, mesmo mantendo todos os equipamentos adicionais para o funcionamento do forno.

6. Custos e Benefícios das Medidas de Mitigação

Como resumo sobre os desenvolvimentos possíveis para redução de emissões, não só os aqui listados, mas diversos outros, que podem variar de uma simples alteração de granulometria de matérias primas a grandes alterações de equipamentos, podemos dizer que todos acabam se encaixando nos dois primeiros itens da lista precedente: aumento da reciclagem ou aumento do conhecimento técnico do processo.

O domínio sobre a técnica de produção vidreira, fugindo do empirismo, além de permitir melhores rendimentos de produção, abre as portas para a aplicação de novas técnicas, estabelecimento de parcerias com fornecedores e inovação em produtos e processos que melhor atendam as demandas da sociedade.

Mudanças tecnológicas na indústria do vidro tendem a ser lentas, pois implantações de equipamentos que exigem modificações importantes nas instalações devem ser realizadas, como já se discutiu, durante as paradas dos fornos para reformas. As campanhas dos fornos, isto é, o período entre o aquecimento de uma instalação nova ou que tenha sido reformada, até a sua próxima parada para manutenção e troca das peças desgastadas, têm aumentado significativamente nas últimas décadas, graças ao desenvolvimento dos materiais, principalmente dos refratários, mas também às técnicas de condução e manutenção. Fornos de vidro plano *float* atualmente apresentam campanhas de 16 a 18 anos e de vidro oco, de 8 a 10 anos, podendo atingir 12 anos.

Além do longo período das campanhas, o preparo para elas deve se iniciar com pelo menos dois anos de antecedência à parada da produção. Os refratários são confeccionados sob medida e, afora o tempo de fabricação em si, deve-se prever o tempo de espera para disponibilidade do fabricante, período de inspeção do produto antes do embarque e tempo de transporte até a vidraria. Portanto, modificações devem ser sugeridas, estudadas e analisadas pelo menos dois anos antes da sua implementação.

6.1. Troca de fornos de baixo desempenho

Considerando o período de seis anos entre 2014 e 2020, a chance de termos modificações importante nas linhas de produção é muito pequena. Seriam viáveis apenas para fornos com paradas previstas entre 2018 e 2020.

Para cálculo de potenciais ganhos na troca de fornos antigos por modernos, consideremos somente os fornos não float, pois estes usualmente já foram concebidos dentro das melhores técnicas disponíveis.

Considerando-se o número de fornos desse tipo existentes no país (27) e o tempo médio de campanha (8 anos), pode-se inferir um número médio de reformas ano ($3,4 = 27 / 8$). Admitindo que metade dos fornos sejam equipamentos de baixo desempenho energético, poderiam ser realizadas no prazo restante de três anos (2018 a 2020) cerca de cinco reformas com potencial para reduzir o consumo energético ($5 \cong 3 \times 1,7$). Levando em conta adicionalmente que o potencial de redução de consumo de energia seja de 30% e uma participação de 68% do CO₂ emitido pelo forno no total das emissões, pode-se estimar que a redução das emissões corresponderia ao consumo de um forno ($1 \cong 5 \times 30\% \times 68\%$).

Portanto, a modernização dos fornos reduziria o equivalente ao consumo de um forno. Como em 2020, são previstos 40 fornos em operação, a redução de emissão é da ordem de 2,5%. Considerando que quando se reforma um forno o custo desta reforma é de 60% do custo de um forno totalmente novo, para trocarmos os cinco fornos antigos por modernos, o investimento, além do previsto nas reformas que seriam normalmente executadas até 2020, seria de € 39,5 milhões (€ 39,5 milhões = 5 fornos x 60% x € 13,5 milhões).

6.2. Implantação de formação técnica

A implantação de um curso técnico, que dura três anos, pode ser realizada em um ano e em quatro anos poderíamos já ter técnicos formados no mercado, de modo, que até 2020 teríamos já duas turmas. O custo estimado de implantações de cursos técnicos é de R\$ 2 milhões.

Um curso de mestrado profissionalizante de duração de um ano também poderia ser implantado em um ano e já a partir de 2017 teríamos especialistas formados no mercado. Outras ações na área de formação, como seminários, também poderiam ser implantadas rapidamente.

Se pensarmos que todas essas ações possam aumentar o rendimento de produção em 2% até 2020, isso implicaria em 1% de redução de emissões de GEE.

6.3. Aumento do uso de caco reciclado

Considerando um aumento de emprego de caco de 10% até 2020, teríamos uma redução de 4,5% na emissão de CO₂. Esse aumento implica adoção de políticas de captação de vidro descartado e envolve não só empresas, mas também órgãos governamentais e políticas públicas, o que torna difícil estimar os investimentos necessários.

6.4. Outras inovações tecnológicas

Considerando o curto período de 6 anos até 2020 em relação ao tempo de duração das campanhas dos fornos somado ao período de preparação de eventuais alterações nos processos a implantação de outras inovações tecnológicas, além das já descritas, apresentam baixo potencial de ganhos em termos de emissões.

O quadro a seguir resume os investimentos e potenciais ganhos.

Quadro 1 Resumo de ganhos potenciais em emissões de CO₂

Ação	Formação Técnica	Reciclagem	Troca de Fornos	Outras tecnologias
Investimento	2 x 10 ⁶ R\$?	41,3 x 10 ⁶ Euros	?
Redução CO ₂	1%	4,5%	2,5%	baixo
Viabilidade	alta	média	baixa	baixa

Considerando a adoção de todas essas medidas, seria obtida uma redução de 8% do total de CO₂ emitido em 2020, ou seja, de 2,29 milhões de toneladas para 2,1 milhões de toneladas. Este pode ser considerado o cenário de baixo carbono viável neste horizonte temporal.

Referências Bibliográficas

- ABIVIDRO (2014a) Estratégia Baixo Carbono para a Indústria Brasileira de Vidro – Produto 1: Análise de Emissões no Setor Vidreiro. Abividro.
- ABIVIDRO (2014b) Estratégia Baixo Carbono para a Indústria Brasileira de Vidro – Produto 2: Análise de Medidas de Mitigação. Abividro.
- ABIVIDRO (2014c) Estratégia Baixo Carbono para a Indústria Brasileira de Vidro Produto 3: Análise dos Cenários de Referência. Abividro.
- ABIVIDRO (2009) *Anuário ABIVIDRO 2009*. Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro.
- ABRAVIDRO (2014) *Panorama Vidreiro 2014*. ABRAVIDRO – Associação Brasileira de Distribuidores de Vidros Planos.
- Akerman, M. (2014a) *Introdução ao Vidro e Sua Produção*. Disponível em <http://www.certev.ufscar.br/documentos/arquivos/introducao-ao-vidro>, acessado em 22/8/2014.

- Akerman, M. (2014b) Indústria do Vidro. Relatório final do projeto “Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas”. Disponível em <http://www.ebc.fearp.usp.br/publicacoes.php>.
- Azevedo, T. & Rittl, C. (2014) *Análise da evolução das emissões de GEE no Brasil (1990-2012)*. Observatório do Clima.
- Basílio, E. (2013) *Apostila Combustão Industrial*. Escola do Vidro – Módulo “Combustão”, 25 e 26 de junho de 2013.
- Beerkens, R. (s/d) *Energy Efficiency of Glass Furnances & Controlling Energy & Emissions*. CelSian Glass and Solar – 1st Glass Manufacturing Optimization Forum & Increased Enterprise Profitability.
- CEMPRE (2014) *Compromisso Empresarial para a Reciclagem*. Disponível em http://www.cempre.org.br/ft_vidros.php, acessado em 22/8/2014.
- Egenhofer, C., Schrefler, L., Marcu, A., Roth, S. & Stoefs, W. (2014) *Composition and Drivers of Energy Prices and Costs in Energy Intensive Industries: the case of the flat glass industry*. Centre for European Policy Studies, 46p.
- Kasper, A. (s/d) *Origine et Réduction de la Pollution Atmosphérique des Fours Verriers*. Saint Gobain – Herzogenrath R&D Center
- Kuenen, J. (2013) *EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2013*. European Environment Agency.
- MME (2013) *Anuário Estatístico do Setor Transformação de Não Metálicos 2013*. Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral.
- Scalet, B. M., Garcia Muñoz, M., Sissa, A. Q., Roudier, S. & Delgado Sancho, L. (2013) *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass - Industrial Emissions Directive 2010/75/EU*.
- Schmitz, A., Kamiński, J., Scalet, B. M. & Soria, A. (2011) “Energy Consumption and CO₂ Emissions of the European Glass Industry”. *Energy Policy*, 39, pp. 142–155.
- Worrell, E., Galitsky, C., Masanet, E. & Graus, W. (2008) *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry - An ENERGY STARGuide for Energy and Plant Managers*. Ernest Orlando Lawrence Berkley National Laboratory
- Zorrozua, M. (2003) *Térmica de Fornos - Escola do Vidro Saint Gobain*.

Equilíbrio Geral

Cimento

RESTRIÇÃO

Biocombustíveis

IMPACTO

Alumínio

Siderurgia

ECONOMIA

Cal

TECNOLOGIA

Aeronáutica

Vidro

Terra, Grãos e Pecuária

BAIXO CARBONO

Ferro-Gusa

Patentes Verdes

Petróleo e Petroquímica

BRASILEIRA

Automobilística

AMBIENTE

MUDANÇA

Bioenergia e Biorefinarias

ISBN 978-85-7747-103-4



9 788577 471034



FUNPEC-Editora