

1781

TEXTO PARA DISCUSSÃO

CURVAS DE CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL: RESENHA E OPORTUNIDADES DE MITIGAÇÃO

**Ronaldo Seroa da Motta
Lilia Caiado Couto
Luiza Castro**

CURVAS DE CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL: RESENHA E OPORTUNIDADES DE MITIGAÇÃO*

Ronaldo Seroa da Motta**

Líliã Caiado Couto***

Luiza Castro****

* Este estudo faz parte do Projeto Estudo de Mercado de Carbono no Brasil, *Aspectos Regulatórios e de Eficiência*. Projeto CNPq 509.146/2010. Os autores agradecem a participação do bolsista CNPq IC Guilherme Szczerbacki Besserman Vianna.

** Técnico de Planejamento e Pesquisa da Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação, Regulação e Infraestrutura (Diset) do Ipea.

*** Economista, ex-bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Programa de Pesquisa para o Desenvolvimento Nacional (PNPD).

**** Mestranda do Programa de Planejamento Energético do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPE/Coppe/UFRJ).

Governo Federal

**Secretaria de Assuntos Estratégicos da
Presidência da República**
Ministro Wellington Moreira Franco

ipea Instituto de Pesquisa
Econômica Aplicada

Fundação pública vinculada à Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, o Ipea fornece suporte técnico e institucional às ações governamentais – possibilitando a formulação de inúmeras políticas públicas e programas de desenvolvimento brasileiro – e disponibiliza, para a sociedade, pesquisas e estudos realizados por seus técnicos.

Presidente

Marcelo Côrtes Neri

Diretor de Desenvolvimento Institucional

Luiz Cezar Loureiro de Azeredo

Diretora de Estudos e Relações Econômicas e Políticas Internacionais

Luciana Acioly da Silva

Diretor de Estudos e Políticas do Estado, das Instituições e da Democracia

Alexandre de Ávila Gomide

Diretor de Estudos e Políticas Macroeconômicas, Substituto

Claudio Roberto Amitrano

Diretor de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais

Francisco de Assis Costa

Diretora de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação, Regulação e Infraestrutura

Fernanda De Negri

Diretor de Estudos e Políticas Sociais

Rafael Guerreiro Osório

Chefe de Gabinete

Sergei Suarez Dillon Soares

Assessor-chefe de Imprensa e Comunicação

João Cláudio Garcia Rodrigues Lima

Ouvidoria: <http://www.ipea.gov.br/ouvidoria>

URL: <http://www.ipea.gov.br>

Texto para Discussão

Publicação cujo objetivo é divulgar resultados de estudos direta ou indiretamente desenvolvidos pelo Ipea, os quais, por sua relevância, levam informações para profissionais especializados e estabelecem um espaço para sugestões.

© Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – **ipea** 2012

Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília : Rio de Janeiro : Ipea , 1990-

ISSN 1415-4765

1. Brasil. 2. Aspectos Econômicos. 3. Aspectos Sociais. I. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.

CDD 330.908

As opiniões emitidas nesta publicação são de exclusiva e inteira responsabilidade do(s) autor(es), não exprimindo, necessariamente, o ponto de vista do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada ou da Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República.

É permitida a reprodução deste texto e dos dados nele contidos, desde que citada a fonte. Reproduções para fins comerciais são proibidas.

JEL: Q, Q5, Q6

SUMÁRIO

SINOPSE

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	7
2 CURVAS MAC PARA O BRASIL	10
3 ESTIMATIVAS DE CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO NA INDÚSTRIA BRASILEIRA	18
4 A QUESTÃO DOS CUSTOS NEGATIVOS.....	48
5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	50
6 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	55

SINOPSE

Este texto resenha as estimativas de curvas de custos marginais de abatimento – marginal abatement cost curves (MACC) – de gases de efeito estufa (GEE) para a economia brasileira, em particular para o setor industrial. Estudos sobre MACC de base tecnológica têm chamado a atenção de pesquisadores, uma vez que têm demonstrado uma quantidade significativa de possibilidades de mitigação com custo negativo de abatimento, o que implicaria oportunidades de mitigação sem custos diretos. Tal possibilidade motiva o debate sobre economia verde uma vez que a sua adoção poderia, inclusive, aumentar o crescimento. Então, inicialmente, apresenta-se a análise das curvas estimadas para o Brasil e, a partir delas, faz-se uma análise de sensibilidade para estimar parâmetros para discutir as opções de custo negativo. Finalmente concluímos que, apesar da existência de vieses de estimação, a mitigação de GEE no Brasil pode tirar grande proveito dessas opções de custos negativos.

Palavras-chave: custos de abatimento de GEE; economia brasileira; setor industrial.

ABSTRACTⁱ

This text review the current studies marginal abatement cost curves (MACC) of greenhouse gases (GHG) for the Brazilian economy, in particular for the industrial sector. Studies on technology-based curves has drawn attention of researchers since they have shown a significant amount of negative-cost abatement potential that would motivated the debate on green economy since growth could then increase if they were applied. So we first present the review of the estimated curves for Brazil and, based on them, we make a sensitivity analysis of estimating parameters to discuss the negative cost options. Finally we conclude that, despite the existence of estimation biases, GHG mitigation in Brazil can take advantage of low and negative cost options.

Keywords: GHG abatement costs; brazilian economy; industrial sector.

ⁱ *The versions in English of the abstracts of this series have not been edited by Ipea's editorial department.*
As versões em língua inglesa das sinopses (*abstracts*) desta coleção não são objeto de revisão pelo Editorial do Ipea.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil confirmou no Acordo de Copenhague, e na Conferência das Partes (COP 16) em Cancun, as suas metas nacionais voluntárias de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), com reduções entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020. Estas metas foram definidas na Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), objeto da Lei nº 12.187/2009. A PNMC determina princípios, diretrizes e instrumentos para a consecução das metas nacionais independentemente da evolução dos acordos globais de clima. Para tal, utilizam-se planos setoriais de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas visando à consolidação de uma economia de baixo consumo de carbono.

Em dezembro de 2010 foi assinado o decreto regulamentador da PNMC que desagrega as projeções das emissões para 2020 por setores da seguinte forma: *i*) mudança de uso da terra: 1.404 milhões de tCO₂eq (sendo 68% na Amazônia, 23% no Cerrado e os 9% restantes, na Mata Atlântica, na Caatinga e no Pantanal); *ii*) energia: 868 milhões de tCO₂eq; *iii*) agropecuária: 730 milhões de tCO₂eq; e *iv*) processos industriais e tratamento de resíduos: 234 milhões de tCO₂eq (Seroa da Motta, 2011).

Como, então, analisar os efeitos das ações de mitigação e políticas climáticas no crescimento econômico nos diferentes setores econômicos e na distribuição de renda? O ponto de partida é estimar quanto custa controlar as emissões de carbono. Esta é uma questão crucial para as políticas climáticas que incluem mitigação. Pesquisadores e formuladores de políticas têm utilizado amplamente as curvas de custos marginais de abatimento – marginal abatement cost curves (MACC), que contrastam os custos marginais de abatimento com o total de emissões abatidas.

No contexto das mudanças climáticas, as curvas MAC apresentam aos formuladores de políticas públicas e tomadores de decisões dos diversos setores, ainda que não estejam estabelecidas metas, onde estão as suas principais oportunidades de mitigação de emissões, considerando a relação entre o custo por tonelada de carbono evitada e a quantidade de toneladas que uma medida de abatimento, se realizada por um determinado setor, será capaz de evitar. Além disso, são utilizadas para estimar as quantidades de créditos de carbono que serão ofertadas e demandadas pelos diferentes setores de uma economia, caso se implementem metas de redução de emissões por

sistema de *cap-and-trade*. A partir do momento em que se estabelece uma meta, ou um cap, para as emissões de uma economia, pode-se identificar quanto do abatimento será feito internamente por cada setor, e quanto cada setor vai demandar ou ofertar créditos.

Segundo Naucér e Enkvist (2009, p. 20, apud Ekins, Kesicki e Smith, 2011, p. 8), as curvas MAC representam um ponto de partida para a discussão global sobre de que forma reduzir as emissões de GEE, demonstrando a importância dos diferentes setores, regiões e medidas de abatimento, e apresentando uma base concreta de custos. As MACC proporcionam um acesso individual às medidas, de forma que os custos e o potencial de mitigação de emissões podem ser isoladamente examinados, e ranqueados de acordo com seus custos desde o menor até o maior. Ainda segundo Ekins, Kesicki e Smith (2011, p. 8), nesta representação de custos, está implícito que a imposição de uma taxa sobre a emissão de carbono levaria à adoção de todas as medidas cujos custos se encontram abaixo do valor da taxa na curva MAC.

De maneira geral, as curvas MAC podem ser estimadas com uma abordagem tecnológica ou baseadas em modelos. As curvas MAC de abordagem tecnológica representam uma tentativa de descrever os custos de abatimento e a quantidade de medidas potenciais de abatimento, baseando-se nas práticas já utilizadas e/ou em projetos de engenharia, enquanto as curvas derivadas de modelos econômicos são baseadas no cálculo dos modelos *bottom-up* ou *top-down*.

Nas curvas de abordagem tecnológica, os custos são ordenados desde a tecnologia mais barata até a mais cara, associando-as aos níveis incrementais de redução das emissões. Ainda que essa abordagem ofereça detalhamento tecnológico, tende a falhar na cobertura de todos os custos e quanto às barreiras de implementação. Seus resultados são comumente superestimados e costumam apresentar custos negativos para grandes quantidades de abatimentos potenciais (isto é, medidas de mitigação que podem gerar lucros e não custos).

As curvas MAC baseadas em modelos são estimadas a partir de modelos *top-down*, com orientação econômica (equilíbrio geral) e de modelos *bottom-up* orientados pela engenharia (equilíbrio parcial). Ambos analisam como a economia descrita reage, em termos de preços de GEE, a diferentes limites de emissões ou à redução resultante associada a diferentes preços de GEE.

Uma vez que a simulação do modelo adota a otimização e assim depende das elasticidades preço e substituição relacionadas aos setores emissores, sua função derivada do abatimento não permite custos negativos e detalhamento tecnológico. Ao integrar as funções de oferta e demanda, os modelos podem abordar mais facilmente algumas falhas de mercado e barreiras do que os modelos com base tecnológica, que observam apenas custos de engenharia.

Entretanto, como indicado por Kuik *et al.* (2009), as estimativas dos custos nas curvas MAC baseadas em modelos econômicos são sensíveis a metas de estabilização, ao cenário-base das emissões, ao perfil do tempo, ao grau de regionalização e à variedade das fontes energéticas, o que pode também torná-las incertas e sub-representadas.

Os modelos *bottom-up* podem conter algum detalhamento tecnológico, mas não conseguem levar explicitamente em conta reações macroeconômicas e efeitos das políticas climáticas de mitigação sobre renda e comércio, como os modelos *top-down* (ver, por exemplo, Hourcade *et al.*, 2006). Portanto, a total confiança nas curvas MAC pode levar à estimação do potencial de abatimento sem considerar aspectos importantes que influenciam diretamente a implementação das opções tecnológicas e, conseqüentemente, o abatimento potencial efetivo será em alguma escala menor. E isso está particularmente relacionado à representação negativa dos custos.

A existência de opções a custos negativos tem sido amplamente discutida desde a primeira apresentação das MACC nos modelos de energia, durante o debate que ocorreu nos anos 1990 acerca da conservação energética. Como as opções com custos negativos ainda não foram adotadas? Tal debate levou a uma discussão muito conhecida a respeito do paradoxo energético ou da lacuna da eficiência (Jaffe e Stavins, 1994). Os custos negativos aparecem novamente na literatura das curvas MAC no contexto das políticas climáticas de mitigação.

A série de trabalhos de McKinsey & Company sobre curvas MAC para mitigação de GEE com base tecnológica chamou a atenção dos pesquisadores a partir do momento em que apresentou uma quantidade significativa de custos negativos de potencial de abatimento (chamados de “efeito McKinsey”). Essas opções implicariam opções *win-win* ou “sem arrependimentos” e têm motivado o debate acerca da economia verde, já que sua aplicação resultaria em aumento do crescimento.

No caso brasileiro, como mostrado a seguir, as estimativas de MAC adotam abordagem tecnológica e, assim, apresentam uma alta participação de custos negativos. Neste texto, analisam-se essas estimativas, em particular as relativas à indústria, discutindo com destaque os seus segmentos negativos.

Assim, são analisados inicialmente os resultados que as curvas MAC construídas para a economia brasileira apresentam, traçando posteriormente uma discussão acerca dos custos excessivamente negativos encontrados nas curvas de abordagem tecnológica. Na seção 2, são apresentadas as curvas construídas por instituições internacionais para a economia brasileira como um todo. A subseção 2.1 apresenta o trabalho da McKinsey & Company, enquanto na subseção 2.2 é apresentado o relatório produzido pelo Banco Mundial. Em seguida, desenvolve-se na seção 3 um panorama da indústria brasileira, consumo energético e emissões de CO₂e, relacionado à MAC industrial. A seção 4 faz uma análise econômica da questão dos custos negativos. A seção 5 conclui o trabalho.

2 CURVAS MAC PARA O BRASIL¹

Nesta seção são apresentadas inicialmente as estimativas de MAC para toda a economia brasileira, a saber: as curvas construídas pelas instituições McKinsey & Company e Banco Mundial. Em seguida analisam-se as curvas específicas para a indústria brasileira.

2.1 CAMINHOS PARA UMA ECONOMIA DE BAIXA EMISSÃO DE CARBONO NO BRASIL

Uma série de trabalhos da McKinsey & Company (2009a) consistiu em um grande estudo acerca do potencial econômico de mitigação de emissões de 21 países, analisando dez setores da sua atividade que, por sua vez, possuíam um total de 200 oportunidades de mitigação das emissões de gases de efeito estufa. O Brasil esteve entre os 21 países estudados, e o relatório nacional levou o nome de “Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil”.

1. Esta seção foi baseada em Couto (2012).

O trabalho considera um horizonte de 2005 a 2030 e coloca que, num cenário-base, no qual se mantém a atividade econômica na trajetória em que está, sem que se introduzam as mudanças com potencial de mitigação, em 2030 as emissões mundiais chegariam a 70 GtCO₂e. Porém, este valor poderia ser reduzido a 32 GtCO₂e introduzindo-se, globalmente, um conjunto de medidas com custos inferiores a €60/GtCO₂e.

A metodologia do estudo para o Brasil considerou um crescimento médio do Produto Interno Bruto (PIB) de 3,5% ao ano (a.a.) de 2010 a 2015 e um crescimento de 2,8% a.a. de 2015 a 2030. Assumiram-se preços e custos de 2005, um preço médio do barril de petróleo, para fim de cálculo de preços de outros energéticos, de US\$ 60,00 e uma taxa de desconto de 4%, pouco realista para o cenário da economia brasileira.

O cálculo das emissões abatidas até 2030 e do investimento necessário para a realização das oportunidades foi feito em um processo de quatro fases: a primeira fase determinou o caso base, que prevê a evolução das emissões futuras mantendo as tendências atuais, com base no Inventário de GEE, Comunicação Nacional (MCT, 2004). A segunda fase analisou as oportunidades de abatimento de emissões e seus respectivos custos. As medidas de “neutralização” do carbono consideradas englobam substituição de combustíveis fósseis, medidas de eficiência energética e novas tecnologias, porém sem considerar tecnologias ainda em fase experimental e mudanças de hábito de famílias, como a maior utilização de transportes públicos, por exemplo. Isso porque custos relacionados ao comportamento são de natureza não financeira, tonando difícil a tarefa de quantificá-los, como será retomado mais à frente.

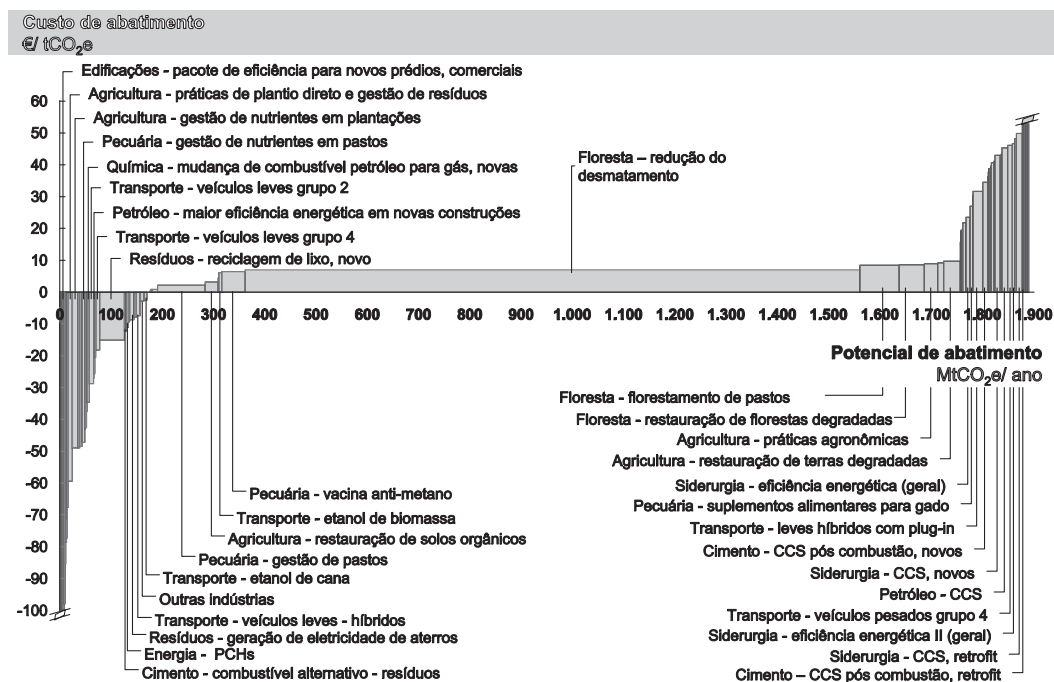
O custo de abatimento gerado por cada medida foi considerado o custo adicional para a sociedade se comparado ao custo da atividade no caso base. A terceira fase tratou de agregar os custos e volumes de abatimento, por ordem do menor para o maior custo, para a construção da curva de custos e a quarta e última fase utilizou a curva obtida para prever possíveis impactos sobre a economia brasileira caso houvesse alterações regulatórias.

No que tange às possibilidades do Brasil, o estudo indica que o país poderá reduzir 70% das suas emissões com relação ao cenário base até 2030, através de 120 das oportunidades de redução de emissões de GEE, nos dez principais setores da sua economia. Destas 120 iniciativas, 60, que correspondem a 10% do potencial total de mitigação do país, apresentaram custos negativos, ou seja, geram economias em maior

valor que o investimento necessário para que sejam implementadas. Além disso, nas 70 outras medidas de mitigação, 80% do potencial de abatimento apresentaram custos marginais inferiores a €10/tCO₂e, valor inferior àquele em que o carbono tem sido comercializado no mercado internacional de créditos de carbono.

O gráfico 1 apresenta as possibilidades encontradas por este estudo para cada setor analisado da economia, em que a altura da barra representa o seu custo marginal, em euros de 2005, por tonelada de carbono equivalente evitada, e a largura da barra representa a quantidade de toneladas de carbono que a medida é capaz de abater no período.

GRÁFICO 1
McKinsey & Company: MACC para a economia brasileira
Curva de custo de redução de gases de efeito estufa do Brasil em 2030



Fonte: McKinsey (2009a).

Obs.: Imagem reproduzida em baixa resolução em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação (nota do Editorial).

Os custos marginais calculados têm uma abordagem por setor da economia e, dentro de cada setor, há um custo calculado para cada medida em que se apresenta potencial. Porém, este estudo aborda a indústria de forma superficial, considerando apenas três dos seus setores. O que o presente trabalho vem acrescentar é um maior detalhamento dos custos marginais de abatimento da indústria brasileira, com abordagem semelhante àquela feita pela McKinsey & Company, adicionando, entretanto, setores.

Como esperado, o estudo constata que as principais oportunidades de mitigação do país estão no setor florestal. Em 2010, o desmatamento era responsável por 55% das emissões totais brasileiras de GEE, e projeta-se que, em 2030, seja responsável por 43%. Ainda segundo o estudo, 72% das oportunidades de abatimento no país residem na redução do desmatamento. Englobando a agricultura à questão florestal, tem-se 70% das emissões previstas para o país em 2030 e 85% das oportunidades de abatimento. É importante ressaltar a agricultura e a pecuária como fontes de desmatamento, já que o país tem extensa produção agrícola, suprindo grande parte da demanda mundial por alimentos, que é crescente, exportando cerca de 30% da soja mundial, por exemplo, e 25% da carne bovina.

Esses resultados estão alinhados com as metas da PNMC que são exatamente concentradas no controle do desmatamento e nas emissões da agropecuária.

Entre os outros setores com bom potencial de abatimento apresentados pela Mckinsey, estão os setores de energia e transportes terrestres, responsáveis por 13% das emissões totais projetadas para o país em 2030, frente a uma média global de 40% das emissões advindas destes mesmos setores. E isto se dá pelo fato de o Brasil possuir uma matriz de geração de energia elétrica considerada limpa, tendo o estudo estimado que 85% da energia é gerada em usinas hidroelétricas, e pela alta utilização do etanol como combustível do transporte rodoviário. Atualmente, a tecnologia *fuelflex*, ou seja, automóveis movidos por etanol e gasolina, já alcança aproximadamente 85% das vendas de veículos leves no Brasil. Estima-se que até 2020, a participação desta tecnologia nos veículos leves em circulação passe de 20% para 80% do total. Por fim, as edificações e o tratamento de resíduos somam 3% das emissões previstas para o final do período de análise mencionado e aproximadamente 3,5% das possibilidades de mitigação.

Já o setor industrial, tratado com mais detalhamento no presente trabalho, é responsável por 26% do total global de emissões esperadas para 2030. No Brasil, este número é consideravelmente menor mas, ainda assim, de notável importância, respondendo a indústria por 13% das emissões do país no mesmo ano. Segundo Mckinsey & Company (2009a), isso se deve ao fato de a energia produzida no Brasil se diferenciar por ser considerada mais limpa, e a algumas características intrínsecas da indústria brasileira, como a baixa intensidade de emissões da produção do petróleo nacional.

O estudo analisa apenas os segmentos industriais do cimento; siderurgia, que engloba a produção de ferro-gusa; o segmento químico; e o de petróleo e gás, envolvendo todos os outros segmentos na categoria “outras indústrias”. A instituição dá especial atenção ao setor siderúrgico, uma vez que suas plantas de produção de ferro-gusa instaladas no país são, atualmente, movidas a carvão vegetal e espera-se que em um horizonte de vinte anos este carvão venha a ser originário de florestas plantadas. O estudo prevê uma participação da indústria no abatimento total da economia brasileira de 2010 a 2030 de 7% do total.

2.2 ESTUDO DE BAIXO CARBONO PARA O BRASIL

O Banco Mundial (2010a), com um trabalho um pouco mais completo, elaborou relatórios técnicos setoriais, entre eles o chamado “Tema O”, *Emissões do setor da indústria*. Este estudo desenvolve um cenário de baixa emissão de carbono para a indústria brasileira dos anos de 2010 até 2030 frente a um cenário base, *Business as Usual*, que representa a evolução das emissões e dos custos de produção da indústria na trajetória em que se encontram, sem que se implementem medidas para a mitigação de emissões.

Comparando-se estes cenários, calcularam-se os investimentos necessários para que as medidas sejam implementadas e, dividindo-se a estimativa do investimento total de cada medida pela estimativa das toneladas de carbono abatidas, obteve-se um custo de abatimento. Isto foi feito subtraindo-se os custos e receitas que uma opção do cenário referencial apresentava dos custos e receitas que cada opção de baixo carbono, ano a ano, de 2010 a 2030. Calculou-se então o valor presente líquido (VPL) para 2009 desta diferença, calculando, por fim, a média ponderada do custo de cada medida, ao dividir o VPL pela quantidade de tCO₂ evitada no período. A abordagem dos custos marginais neste trabalho é feita por opção tecnológica, agregando todos os setores que apresentam potencial de implementação da mesma.

O trabalho contou com dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2007 para realizar as estimativas de consumo energético, e assumiu como cenário de crescimento econômico o cenário B1 do Plano Nacional de Energia (PNE 2030), no qual se considera um crescimento de 3,7% a.a. do PIB. A partir daí, estimaram-se o crescimento das emissões industriais no período para cada segmento e, a partir da suposição de um preço médio do petróleo de US\$ 40,00 por barril, foram calculados os preços dos demais energéticos. Por fim, supôs-se uma taxa interna de desconto de

8% a.a. para os fluxos de caixa no período. Segundo o próprio relatório, a maioria dos investimentos foi definida a partir de consulta à literatura especializada, mas também, conforme explicitado no mesmo, “através de cálculos indiretos com base nos valores de economia encontrados e de prazos de retorno típicos para cada tipo de medida (também de acordo com a literatura)” (Banco Mundial, 2010b, p. 9).

Tratando-se da economia como um todo, os resultados que o estudo apresenta são semelhantes àqueles apresentados pela McKinsey & Company e, conforme veremos, também alinhadas com a PNMC no que tange às opções de baixo custo concentradas no controle de desmatamento e agropecuária.

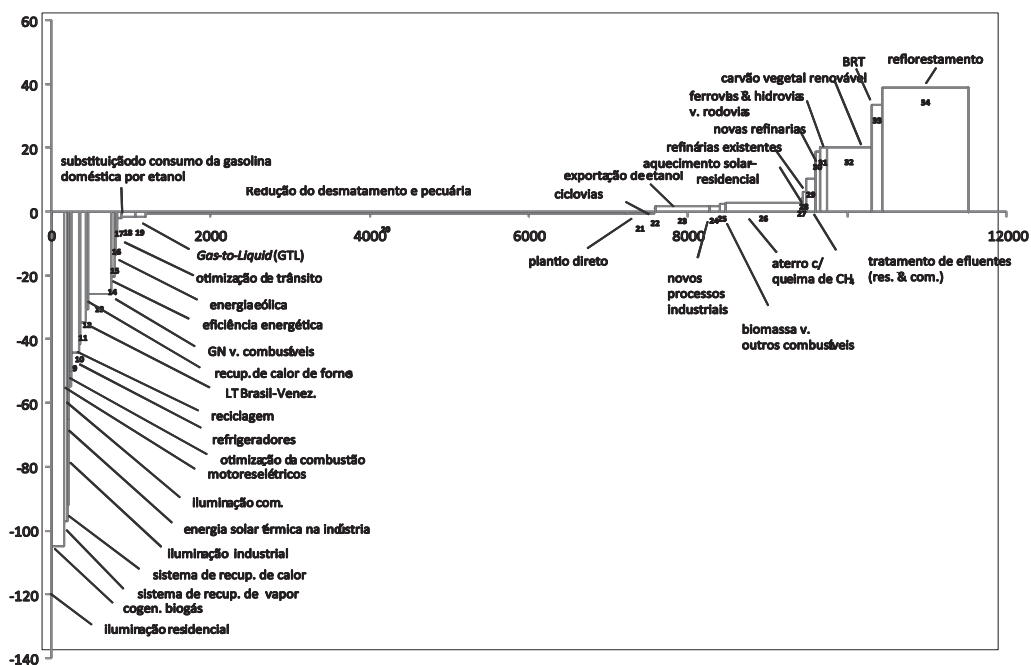
A parte central de sua curva é plana, representando os baixos custos e o grande potencial de abatimento por redução de desmatamento. Neste estudo, estima-se que pouco mais de 50% do volume de abatimento potencial residem nesta medida. Os custos mais baixos encontrados foram aqueles relacionados à eficiência energética, com custos negativos em torno de US\$ 100. O estudo atribui os custos negativos relacionados às medidas de eficiência energética ao *energysaving*, ou seja, à redução do consumo de energia.

As opções que apresentaram os maiores custos foram aquelas que demandaram maior volume de capital, com destaque para as refinarias e tratamento de resíduos de transportes ferroviários, tendo a construção de metrô e de trem bala e o tratamento de resíduos industriais emissores de CH₄ sido responsáveis pelos custos mais altos desta análise. As curvas para a economia brasileira como um todo foram divididas entre as opções com custos menores que US\$ 50/tCO_{2e} e as opções com custos maiores ou iguais a US\$ 50/tCO_{2e} e estão representadas nos gráficos 2A e 2B.

O relatório industrial apresenta um conjunto de medidas que consiste em doze opções tecnológicas. Seis delas compõem o grupo das medidas de eficiência energética, sendo elas: melhoria de eficiência da combustão, sistemas de recuperação de calor, recuperação de vapor, recuperação de calor em fornos, novos processos e um agrupamento das outras medidas de eficiência energética, chamado pelo trabalho e que aqui também será chamado de *Outras*. As demais opções tecnológicas são: reciclagem de materiais; troca intercombustíveis fósseis (em geral substituindo coque de petróleo e outros combustíveis por gás natural); substituição de combustíveis fósseis por biomassa, substituição de biomassa não renovável por biomassa renovável; e cogeração de energia nas plantas industriais.

GRÁFICO 2A

Banco Mundial: MACC para a economia brasileira – custos abaixo de US\$ 50/tCO₂e

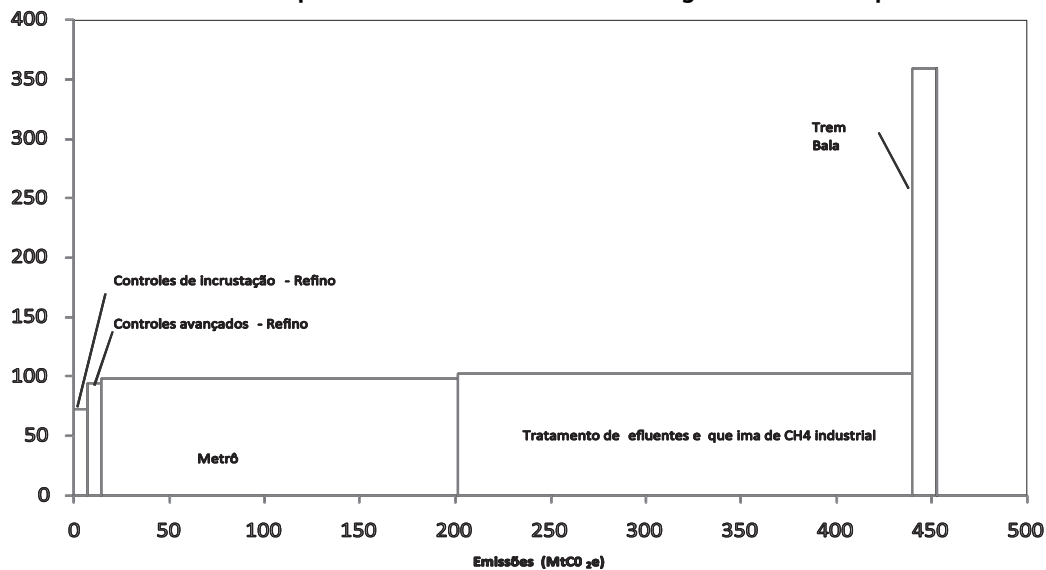


Fonte: Banco Mundial (2010a).

Obs.: Imagem reproduzida em baixa resolução em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação (nota do Editorial).

GRÁFICO 2B

Banco Mundial: MACC para a economia brasileira – custos iguais ou maiores que US\$ 50/tCO₂e



Fonte: Banco Mundial (2010a).

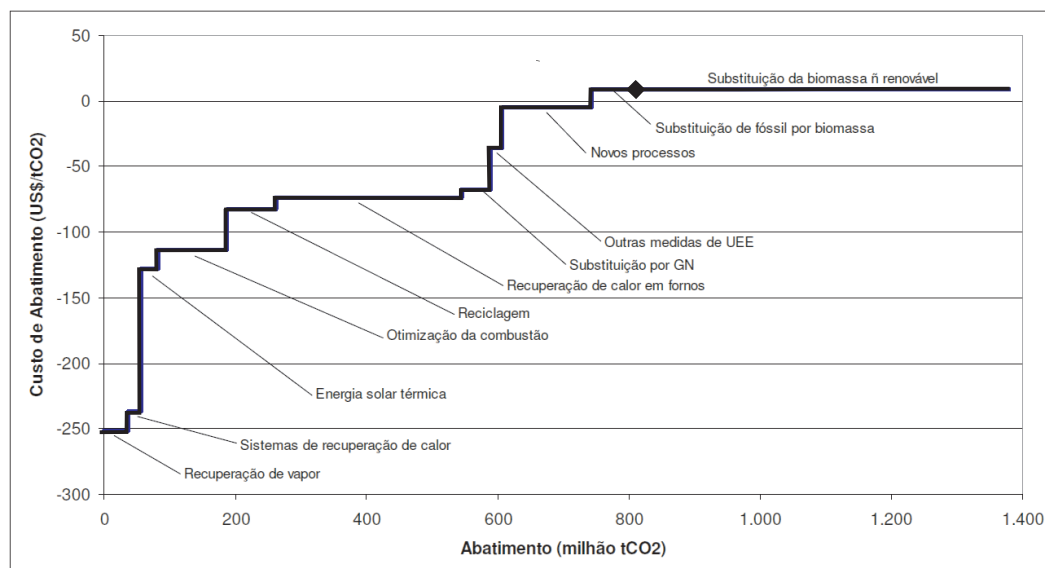
Obs.: Imagem reproduzida em baixa resolução em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação (nota do Editorial).

Os setores industriais, apresentados pelo *Estudo de baixo carbono para o Brasil*, do Banco Mundial (2010a), são os que apresentam melhores potenciais de abatimento na indústria brasileira – bebidas e alimentos; cerâmica; cimento; ferroligas; metais não ferrosos; mineração e pelletização; papel e celulose; siderurgia; e têxtil. Os setores analisados no presente trabalho serão os mesmos, uma vez que os dados para a realização dos cálculos foram provenientes do estudo feito pelo Banco Mundial.

A curva de custos marginais que o estudo apresenta para a indústria agrega todos os setores industriais, calculando custos por medida de mitigação, sem discriminar para os tomadores de decisões, dentro de cada setor, quais seriam os seus custos e melhores oportunidades, como representado no gráfico 3.

GRÁFICO 3

Banco Mundial: MACC industrial brasileira agregada por medida de mitigação



Fonte: Banco Mundial (2010a).

Obs.: Imagem reproduzida em baixa resolução em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação (nota do Editorial).

Como se pode ver, a curva é construída em “degraus” que representam a média dos custos de se implementar uma medida de mitigação em diversos subsetores, ponderada pelas tCO₂ abatidas em cada subsetor. Pode-se observar, em termos de oportunidades, que os menores custos encontrados correspondem a duas medidas de eficiência energética, recuperação de vapor e sistemas de recuperação de calor. E as medidas com

maior potencial de abatimento foram duas, também de eficiência energética, a saber, otimização da combustão e recuperação de calor em fornos, além de novos processos, e a medida com maior potencial foi substituição de biomassa não renovável, as quais são, porém, as medidas mais caras encontradas.

É, portanto, possível, observando esta curva, entender que a eficiência energética possui um papel crucial para o abatimento de emissões na indústria brasileira. E como isto está distribuído entre os seus subsetores é o que será apresentado mais adiante.

Pode-se perceber, nos resultados de ambos os trabalhos, a presença significativa de custos negativos. Na curva apresentada pela McKinsey & Company, 10% do potencial de abatimento, o que representa 6,7% das emissões totais, poderiam ser abatidos a custos negativos. Isso totaliza exatos 50% das opções tecnológicas apresentadas pelo estudo. Já o trabalho do Banco Mundial estima que algo em torno de 60% do seu potencial de abatimento possam ser adquiridos a custos negativos. A diferença entre os montantes de abatimento a custos negativos entre as duas curvas pode ser explicada pelo fato de a opção de redução do desmatamento, que representa mais de 50% do potencial de abatimento da economia brasileira, apresentar custo positivo para a McKinsey, e negativo para o Banco Mundial.

3 ESTIMATIVAS DE CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

As emissões industriais estão diretamente relacionadas à queima de combustíveis fósseis, que, por sua vez, representa o consumo energético da indústria. Segundo Henriques Júnior (2010, p. 36), desde 1972, o setor industrial é o principal consumidor de energia no Brasil e, de acordo com o BEN 2011 (Brasil, 2010b), foi responsável em 2010, por 36% do consumo final de energia nacional, o que equivale a 86 milhões de toneladas equivalentes de Petróleo (tep). É uma participação consideravelmente alta no consumo total do país se comparada com a dos países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), por exemplo, cuja indústria apresenta consumo médio de apenas 21% do total (Henriques Júnior, 2010). De acordo com Schaeffer *et al.* (2010, p. 24), de 2000 a 2007, o crescimento médio do consumo de energia na indústria foi de 4,1% a.a., com maior crescimento no

segmento de bebidas e alimentos (7,7% a.a.) e o mais baixo no setor cimenteiro, com um aumento de apenas 0,9% a.a.

Os setores que mais emitem GEE por queima de combustíveis fósseis no Brasil são os de transportes e o industrial, emitindo juntos cerca de 72% do total. As emissões totais do setor industrial nacional em 2007 totalizaram 143 milhões de toneladas de CO₂, tendo o setor de ferro e aço como principal agente emissor, seguido dos setores de refino de petróleo, química e cerâmica. Em seguida estão os setores da metalurgia de metais não ferrosos; cimento; bebidas e alimentos; mineração e pelotização; e papel e celulose. Os setores que apresentam as emissões mais baixas são os de ferroligas e têxtil (Schaeffer *et al.*, 2010; Henriques Júnior, 2010).

As emissões de dióxido de carbono na indústria derivam, segundo Schaeffer *et al.*, (2010, p. 26), em parte do elevado consumo de combustíveis fósseis e em parte do consumo de carvão vegetal não renovável, advindo do desmatamento. Ainda, segundo os mesmos autores, em Minas Gerais 50% do carvão utilizado em 2010 foram oriundos de desmatamento, e nos estados do Pará e Maranhão, este índice chegou a 90%. A tabela 1 apresenta as quantidades de CO₂ emitidas em 2007 por setor industrial e por fonte energética.

TABELA 1

Estimativa setorial das emissões de CO₂ e por fonte energética no ano de 2007

(Em mil toneladas)

Setor	Gás natural	Carvão mineral	Lenha	Derivados de petróleo	Carvão vegetal	Total	Participação
Industrial	20.113,9	47.714,2	11.590,0	50.774,0	12.815,7	143.007,8	100,0
Cimento	39,8	514,8	-	7.119,8	504,8	8.179,1	5,7
Ferro-gusa/aço	2.738,70	41.233,0	-	2.375,2	10.857,1	57.204,0	40,0
Ferroligas	4,7	448,70	197,8	619,9	1.400,6	2.671,7	1,9
Mineração/pelotização	633,8	2.898,4	-	3.469,7	-	7.001,9	4,9
Não ferrosos	1.246,5	1.149,3	-	5.687,4	20,5	8.103,7	5,7
Química	5.137,7	236,9	20,4	9.255,4	7,7	14.658,1	10,2
Alimentos/bebidas	1.293,3	163,1	3.804,5	1.703,6	-	6.964,5	4,9
Têxtil	764,0	-	38,4	377,6	-	1.180,7	0,8
Papel/celulose	1.321,4	330,2	-	1.662,4	-	3.314,0	2,3
Cerâmica	2.235,8	170,9	6.026,4	1.767,6	-	10.200,7	7,1
Outras	2.523,5	568,9	1.502,6	2.720,4	25,0	7.340,4	5,1
Refino de petróleo	2.174,0	-	-	14.015,0	-	16.189,0	11,3
Participação (%)	14	33,4	8,1	35,5	9	100,0	

Fonte: Henriques Júnior (2010).

As opções de mitigação para a indústria brasileira foram analisadas pelo recente estudo do Banco Mundial nos seis seguintes conjuntos de medidas: *i*) eficiência energética; *ii*) reciclagem de materiais; *iii*) cogeração; *iv*) substituição de combustíveis fósseis por gás natural; *v*) substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis; e *vi*) redução da utilização de biomassa não renovável.

Cada uma delas foi medida para um total de onze setores, que são os seguintes: bebidas e alimentos; papel e celulose; cerâmica; têxtil; química; não ferrosos; mineração; siderurgia; ferroligas; cimento; e refino.

Serão detalhados a seguir os conjuntos de medidas, e será apresentado um panorama de cada segmento industrial tratado em termos de mercado, cadeia produtiva, consumo energético e potencial de abatimento.

Cimento

O cimento é essencial para a produção do concreto que, por sua vez, é o material de construção mais utilizado mundialmente, além de ser de baixa substituição. Atualmente, o Brasil ocupa a oitava posição entre os principais produtores mundiais de cimento e a quinta posição entre os seus principais consumidores, sendo responsável por cerca de 1,7% da produção mundial e 1,8% do consumo (Brasil, 2009c).

Apesar da dispersão de suas 57 empresas pelo território nacional, este mercado é concentrado em apenas dez grupos com grande concentração de fábricas no Sudeste brasileiro (SNIC, 2010). São eles: Votorantim, João Santos, Cimpor, Holcim, Camargo Corrêa, Lafarge, Ciplan e Itambé, Soeicom e CP Cimento.

O cimento tem como principal componente o clínquer que resulta da moagem, homogeneização e calcinação da cal e da sílica. Após o resfriamento, este material é moído e recebe adição de gesso; outros componentes, como escórias, pozolanas e calcário, podem também ser adicionados, caracterizando diferentes tipos de cimento. No Brasil, quase só é utilizado o processo de produção via seca, pelo qual não há adição de água na homogeneização da matéria-prima, o que o torna mais eficiente energeticamente (Henriques Júnior, 2010, p. 49).

O setor consome grandes quantidades de energia, em especial nos fornos de calcinação. A matriz energética do setor evoluiu do óleo combustível como maior fonte para o carvão mineral, e atualmente o coque de petróleo (Brasil, 2010b). A partir da década de 1990, seu consumo energético específico caiu graças à introdução de processos fabris via seca e semisseca, e da maior utilização de aditivos (Henriques Júnior, 2010, p. 50).

Pouco mais da metade das emissões de CO₂ desta indústria ocorrem durante a transformação físico-química do calcário em clínquer, e a outra parcela é predominantemente resultante da queima de combustíveis no forno de clínquer (SNIC, 2010). A indústria nacional está entre as mais eficazes no controle de suas emissões, devido aos processos via seca, ao uso de cimentos com maior percentual de adições e ao uso de biocombustíveis (Brasil, 2010c).

As principais medidas de mitigação apontadas pelo Banco Mundial (2010b) para o setor são as seguintes: melhorias da combustão através da implantação de pré-aquecedores de múltiplos estágios e de pré-calcinador; reciclagem, através da utilização de aditivos na produção; substituição de combustíveis fósseis com alto fator de emissão como o coque de petróleo por outros de menor fator de emissão como o gás natural; cogeração de energia pelo aproveitamento do calor gerado na fabricação do clínquer.

Alumínio e metais não ferrosos

Apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, o alumínio é o metal mais recente em termos de uso industrial. Sua produção anual, tanto nacional quanto mundial, supera a soma da produção de todos os outros metais não ferrosos, como, por exemplo, cobre, zinco e silício metálico. O Brasil ocupa, atualmente, a sexta posição entre os maiores produtores de alumínio primário do mundo, e a terceira posição entre os países com maiores reservas do minério do qual o alumínio se origina, a bauxita (Brasil, 2008). Sabe-se que hoje a reciclagem desse material atinge 38% do consumo doméstico que retorna como sucata e, no caso das latas de alumínio, esse valor chega até 98,2% (Abal, 2008).

A produção de alumínio primário no Brasil é realizada por seis empresas com usinas nos seguintes estados da Federação: Pará, Maranhão, Bahia, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. Mesmo com a aparente dispersão espacial, 82% da produção

de alumínio primário se concentram em três unidades de produção: Pará, Maranhão e São Paulo. Essa produção atende aos segmentos de embalagem, transporte, máquinas e equipamentos, eletricidade, bens de consumo e construção civil (Brasil, 2008).

O crescimento do setor de alumínio no Brasil e no mundo tem gerado um significativo aumento na demanda por energia devido à intensidade energética requerida por sua produção. Seu consumo de energia elétrica pode representar até 35% dos custos de produção do setor. Ainda assim, os indicadores de consumo específico do país, tanto do alumínio quanto da alumina, apresentam uma tendência de queda nos últimos anos, já estando relativamente próximas as melhores práticas observadas mundialmente (Henriques Júnior, 2010, p. 68).

Além disso, o Brasil conta com um grande diferencial no que tange às emissões de GEE pelo setor. Como a principal fonte energética utilizada vem do Sistema Interligado Nacional, as emissões do setor são amenizadas. Outro dado relevante é a autoprodução de energia por parte das empresas do setor, o que, segundo a Abal (2008), corresponde a 31% da energia consumida.

O setor do alumínio representa um caso clássico de vantagens energéticas no que se refere à reciclagem, e apresenta possibilidades concretas de obter reduções de energia e de emissões por processos de reciclagem e economia de materiais. Há uma economia direta nos processos que utilizam sucata, e os ganhos econômicos não se esgotam na questão da energia, uma vez que em alguns casos o material reciclável apresenta também custos inferiores ao da matéria-prima original ou virgem, além das vantagens ambientais e sociais embutidas (Henriques Júnior, 2010, p. 66).

A reciclagem proporciona uma economia de 95% em relação à energia utilizada para produzir o metal primário a partir da bauxita/alumina. Além dessa economia, ocorre também economia de energia na fabricação da bauxita e da alumina, que poderiam ter sua demanda reduzida pelo maior uso de sucata de alumínio (Henriques Júnior, 2010, p. 67).

Mineração e pelotização

O setor de mineração engloba as atividades extrativas de minérios metálicos, como o minério de ferro, e não metálicos. Já a pelotização compreende os processos de fabricação

de pelotas (*pellets*) para compor a carga das usinas siderúrgicas. Os minerais metálicos representam a maioria das receitas do setor, aproximadamente 65%, e dentro desta categoria o minério de ferro representa algo em torno de 70% das receitas (Henriques Júnior, 2010).

O mercado do setor está em sistemática expansão por conta da crescente demanda doméstica e internacional, em especial a chinesa. Porém, existe uma vulnerabilidade no que se refere à especialização de suas exportações em um único produto, o minério de ferro é muito concentrado em um único destino, a China. Em 2009, o mercado chinês absorveu 59% do minério de ferro brasileiro e a participação desta substância no total das exportações nacionais era de 9% (Brasil, 2010d).

Tratando-se de mineração, o processo produtivo compreende primeiramente a lavra, e depois o transporte do minério, e o estéril, que consiste na separação do minério desejado da terra e outros minérios presentes. Posteriormente, há um processo de tratamento inicial dos minérios. Já a pelletização, no caso do minério de ferro, se dá em um processo térmico no qual ocorre a concentração e aglutinação dos óxidos de ferro na forma de *pellets* (Henriques Júnior, 2010, p. 55).

A crescente demanda dos mercados externo e interno por aço vem impulsionando o setor e com isso sua demanda energética também tem sido crescente. Sua matriz energética, composta na década de 1970, majoritariamente por óleo combustível, vem sofrendo mudanças e abrindo espaço para outros combustíveis como o carvão mineral, o coque de petróleo e, recentemente, em menor escala, o gás natural (Henriques Júnior, 2010, p. 56).

Segundo a Vale (Vale, 2012), 96% das suas emissões no ano de 2010 foram originárias das plantas de industriais de níquel, alumínio e pelletização. Já a Samarco afirma que a sua principal fonte de emissões é a queima de combustíveis fósseis, usados no processo de pelletização, e o consumo de óleo diesel nos caminhões fora da estrada, na mineração (Samarco, 2010).

O setor apresenta possibilidades de mitigação relacionadas às medidas de eficiência energética, através da recuperação de calor em fornos e da otimização de combustão. Além disso, o setor também possui um potencial médio de mitigação relacionado à

substituição de combustíveis fósseis com alto fator de emissão pelo uso do gás natural (Banco Mundial, 2010b).

Refino

O setor de refino de petróleo é um setor estratégico. É a partir dele que se obtêm os derivados do petróleo que não só geram combustíveis como também proveem insumos e matérias-primas para diversos setores da economia.

Segundo Tavares (2010), há uma tendência mundial de concentração desse mercado em grandes e modernas refinarias nas quais é possível a maximização dos ganhos de escala, já que existe uma forte barreira à entrada presente no fato de que as refinarias são intensivas em capital e necessitam de grandes investimentos para pequenas mudanças. Onze das treze refinarias brasileiras pertencem à Petrobras, sendo as duas restantes da iniciativa privada e representando apenas 2% da capacidade instalada.

A cadeia do refino depende diretamente da composição e qualidade do petróleo bruto processado e dos derivados que se deseja produzir. Assim, existem usinas simples e refinarias complexas. De forma geral, o petróleo passa por uma primeira destilação atmosférica; desse processo já se retira alguns produtos finais. No entanto, para melhorar o aproveitamento e retirar derivados mais nobres existem processos de craqueamento, fracionamento e reforma que possibilitam maior aproveitamento da matéria-prima (Henriques Júnior, 2010, p. 82).

Existe uma tendência de aumento da energia consumida por barril produzido no setor de refino do país. Isto porque se tem utilizado maior volume de petróleo nacional, mais pesado; há um aumento crescente da produção de diesel, e aumento nas exigências ambientais e nos requisitos de qualidade dos derivados. Quanto à matriz energética do setor, em 2006, o gás de refinaria era responsável por 60%, enquanto o óleo combustível participava em 19% e o gás natural 14,6%. Ademais, os gases liquefeitos de petróleo (GLP) e a eletricidade tinham pequena participação (Henriques Júnior, 2010, p. 83).

No que se refere às suas possíveis medidas de mitigação, segundo o Banco Mundial (2010b), o setor se destaca no âmbito da cogeração de energia por meio de subprodutos derivados de combustíveis fósseis de alguns processos fabris, como o gás de refinaria. Estes combustíveis gasosos já teriam algum tipo de queima dentro

das próprias empresas em que foram gerados e, através da cogeração, poderiam ter uma aplicação mais eficiente deslocando energia elétrica da rede. Além disso, o setor de refino no Brasil já emprega, como medida de mitigação, a técnica de integração de processos, que busca a otimização de projetos de trocadores de calor e de redes de trocadores.

Ferro e aço

Atualmente, o Brasil é o nono maior produtor de aço bruto do mundo, e primeiro da América Latina. Cerca de 80% da demanda nacional por aço são oriundos da construção civil, do setor automotivo e do setor de bens de capital. Apesar de o aço produzido no país atender principalmente à demanda interna, seu excedente representa um importante produto para as exportações nacionais (IBS, 2009).

Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS, 2010), a produção de aço no país conta atualmente com 27 usinas, administradas por oito grandes grupos empresariais. Além deles, existem apenas pequenos produtores que fornecem aço exclusivamente para fundições, representando uma única fase do processo. Segundo IBGE (2012), o setor de fabricação de aço e derivados gerou em 2009 um valor adicionado na ordem de R\$ 22.473 milhões em moeda corrente.

A cadeia produtiva do aço engloba quatro grandes setores da economia: Indústria extrativista; Metalúrgica; os setores consumidores de aço; e o setor de beneficiamento e comercialização de coprodutos, resíduos e sucata (IBS, 2010). Suas principais formas de produção são: através da redução do minério de ferro e sucata em altos fornos, em que se utilizam coque/carvão e a redução direta em fornos elétricos.

A Siderurgia é um setor energointensivo que utiliza o carbono para a geração de energia e também como agente redutor do minério de ferro no caso de usinas integradas (MCT, 2004). A etapa da produção do ferro-gusa consome mais da metade do total de energia utilizado por estas usinas, devido à utilização do coque como agente redutor na transformação do minério. A participação do gás natural na matriz energética do setor é crescente, em especial na última década, porém, o carvão mineral ainda é seu principal combustível. Reformas e modernizações nas plantas vêm gerando redução de consumo energético.

Parte do carbono utilizado no processo é incorporada aos produtos e a outra parte é emitida na forma de CO₂. Cerca de 75% das emissões de CO₂ provenientes da fabricação de aço são gerados durante a produção de ferro-gusa no alto forno, as demais resultam do transporte de matérias-primas, da geração de energia elétrica e calor (Henriques Júnior, 2010).

As maiores possibilidades de mitigação do setor, segundo o Banco Mundial (2010b), estão na eficiência energética, onde possui diversidade de possibilidades; medidas de redução da utilização do coque de petróleo; e a reciclagem que, além de tudo reduz o consumo de combustíveis fósseis. Porém, no que concerne a esta reciclagem, existem problemas, como a limitação técnica e a má qualidade da sucata.

Papel e celulose

Atualmente, o Brasil é o quarto maior produtor de celulose do mundo, e o nono maior produtor de papel. O setor tem apresentado uma taxa média de crescimento anual da ordem de 7,5% para indústria de celulose e 5,7% para indústria do papel. A pasta de celulose é o produto mais exportado do setor, sendo também muito significativo para as exportações do país. No ano de 2009, suas exportações obtiveram saldo comercial de US\$ 3,7 bilhões, representando, aproximadamente, 15% da balança comercial brasileira (Bracelpa, 2010). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2005), em 2005, o setor possuía um valor agregado de R\$ 10.810 milhões.

Não se pode considerar o segmento do papel muito concentrado, uma vez que sua empresa líder detinha, em 2008, apenas 18% da participação do mercado, e as quatorze principais empresas concentravam, em 2008, pouco mais de 60%. Já entre os produtores de pasta celulósica, sua principal empresa produtora detinha, em 2008, 24,5% do mercado, enquanto as dezoito maiores produtoras concentravam 98% do mesmo (Bracelpa, 2010).

A maior parte das etapas do processo produtivo desse setor é energointensiva. Porém, ainda que se utilizem outras formas de geração de energia como o óleo combustível e o gás natural, o licor preto, resultante do processo no qual o licor branco extrai a lignina presente na madeira, vem se tornando responsável pela principal parcela da matriz energética dessa indústria. Além disso, embora a produção do setor esteja em trajetória crescente, estudos mostram que o seu consumo específico vem diminuindo ao longo dos anos (Henriques Júnior, 2010, p. 78).

O setor possui potencial de mitigação na implantação de novos processos; boas possibilidades quanto à reciclagem; substituição de combustíveis fósseis por biomassa sob forma de lixívia negra, subproduto da sua produção; utilização de energia solar; e já apresenta resultados quanto à substituição de biomassa não renovável e à cogeração de energia (Banco Mundial, 2010b).

Químicos

O segmento químico é o terceiro setor industrial brasileiro em participação no PIB e é base para o processo de inúmeras outras indústrias de transformação. É um setor extremamente diversificado havendo divergências acerca do que deveria ou não ser considerado parte dele. Desta forma, o IBGE com a Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim) definiu pela Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) que as suas classificações 20 e 21 corresponderiam à indústria química.

Porém, o presente trabalho, assim como o Banco Mundial (2010b), só trata em detalhes as produções de petroquímicos, fertilizantes e cloro-álcalis, tratando as demais de maneira agregada.

Petroquímica: esse segmento produz matérias-primas utilizadas pelas indústrias de produtos orgânicos e praticamente todos os insumos para as indústrias de polímeros, englobando termoplásticos, elastômeros e resinas. Sua cadeia produtiva consiste em uma sequência de processos de transformação (Henriques Júnior, 2010).

O mercado petroquímico tem como característica envolver cadeias produtivas intensivas em capital e, por conseguinte, elevadas barreiras à entrada. Essas barreiras também podem ser impostas pela dificuldade no acesso às matérias-primas básicas: nafta e gás natural. Portanto, esse é um mercado concentrado. O mercado de petroquímica básica, ou de primeira geração, é controlado por duas grandes centrais petroquímicas: Brasken e Quattor. Já na segunda e terceira geração, o mercado apresenta maior diversidade com dezenas de empresas trabalhando com resinas termoplásticas (segunda geração) e milhares na indústria de transformação (terceira geração) (Abiquim, 2009).

No que se refere ao consumo energético, segundo Henriques Júnior (2010), considerando-se todo o segmento petroquímico, com todos os produtos básicos e

intermediários, o consumo total de energia deve estar em cerca de 2,5 milhões de tep, o que corresponde a 34% do consumo total do setor químico.

Fertilizantes: fertilizantes são compostos minerais ou orgânicos utilizados na agricultura como forma de suprir as deficiências do solo. Em um país agroprodutor e agroexportador como o Brasil, esse setor é estratégico para a economia nacional.

Segundo a Anda (2009), o Brasil é o quarto maior consumidor de nutrientes para a formulação de fertilizantes, representando cerca de 6% do consumo mundial, atrás apenas de China, Índia e Estados Unidos. Já na produção, o país contribui com cerca de 2% do total mundial. A taxa de crescimento de uso desse tipo de químico é maior que a capacidade produtiva de indústria doméstica.

De acordo com a Abiquim (*apud* Henriques Júnior, 2010, p. 61), a produção dos produtos intermediários da cadeia dos fertilizantes é responsável por cerca de 34% da produção física total da indústria brasileira de químicos, dos quais se destaca a produção de ácido sulfúrico. Sua cadeia produtiva tem como insumo básico a amônia, obtida por meio da combinação de nitrogênio e hidrogênio. Ainda segundo Henriques Júnior (2010), o segmento é composto por 30 plantas industriais, cujo consumo total de energia em 2006 foi de cerca de 1,5 milhão de tep, de acordo com estimativas do INT (2007), tendo sido destinados à produção de amônia cerca de 60% deste consumo.

Cloro-álcalis: esse ramo da indústria química inclui a fabricação de cloro, hidróxido de sódio e carbonato de sódio. As aplicações desses produtos são variadas. O hidróxido de sódio é empregado na própria indústria química e petroquímica (29%), na produção de papel e celulose (21%) e na metalurgia (18%). Já o cloro tem grande parte da sua demanda na petroquímica, seguida pela indústria papelreira, enquanto o carbonato de sódio (barrilha) tem aplicação na indústria de sabões e detergentes, vidros e em outros processos químicos (Abiquim, 2007 *apud* Henriques Júnior, 2010).

Outros: Elastômeros, termoplásticos e resinas são segmentos derivados da petroquímica de segunda e terceira geração. Os elastômeros incluem a produção de borrachas de forma geral, estireno, butadieno, polibutadieno, borracha nitrílica e látex de vários tipos. Já nos termoplásticos destacam-se os polietilenos, o cloreto de polivinila (PVC) e o poliestireno; além de outros plásticos como: poliamidas, policarbonato e

politereftalato de etileno (PET). No grupo das resinas os tipos predominantes são as alquídicadas, aminadas, de poliéster e epóxi.

Além desses segmentos, há também o bloco produtivo chamado de química fina, cujo nome deriva dos altos valores de seus produtos. Nesse grupo estão produtos farmoquímicos, corantes e pigmentos, e aditivos em geral (Henriques Júnior, 2010).

No que concerne ao consumo energético, em 2010 foram consumidos na indústria química de forma geral, 7,4 milhões de tep. As principais fontes de energia utilizada são, respectivamente, fontes secundárias de petróleo, energia elétrica e gás natural (Brasil, 2010b). No horizonte até 2030 as medidas de mitigação consideradas com alto potencial para o setor são na área de eficiência energética, troca de intercombustíveis e na cogeração de energia. Estas opções têm redução potencial de emissões de até 24% sobre o cenário-base até 2030 (Henriques Júnior, 2010; Banco Mundial, 2010b).

Cerâmica

O setor cerâmico é um setor amplo e heterogêneo da indústria, englobando diversos produtos. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2012), o conceito de cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos por tratamentos em altas temperaturas. O setor é composto por dois subsetores bastante distintos: o segmento da cerâmica vermelha, que inclui produtos da construção civil, como tijolos, telhas, canos, e o segmento da cerâmica branca, que inclui materiais de maior valor agregado, de mais alta tecnologia, como a cerâmica de revestimento sob a forma de azulejos, lajotas, a cerâmica sanitária, a louça de mesa, refratários etc. (Henriques Júnior, 2010).

O Brasil era, em 2010, o quarto maior produtor mundial de cerâmica branca, sendo ainda o segundo maior produtor de revestimentos cerâmicos do mundo. De acordo com Ministério das Minas e Energia (MME) (Brasil, 2009a, p. 11), em 2008 havia 86 empresas com 103 plantas, e as empresas líderes não chegavam a concentrar 15% da produção nacional. Já as outras cerâmicas brancas têm mercados mais concentrados. As louças sanitárias e de mesas contam apenas com dezoito e quinze empresas, respectivamente, e os isoladores elétricos contam com apenas sete empresas operando. As cerâmicas vermelhas apresentam mercado disperso, com um total de 5.500 firmas e predominância de pequenas empresas (Henriques Júnior, 2010; Sebrae, 2008).

Segundo Henriques Júnior (2010, p. 79), o consumo energético do setor cerâmico pouco cresceu entre 1970 e 2007, tendo apresentado um crescimento médio de 2,5% a.a. De acordo com o BEN 2011 (Brasil, 2010b), porém, na primeira década do milênio este crescimento médio passou para 4,5% a.a. e o setor cerâmico consumiu em 2010 aproximadamente 4,5 milhões de tep. O grande problema que este consumo apresenta é o fato de que mais de 50% dele têm como combustível a lenha, e Henriques Júnior (2010) estima ainda que entre 60% e 80% da lenha utilizada pelo setor sejam provenientes de florestas nativas.

As medidas de mitigação para as quais o setor possui bom potencial são em especial medidas de eficiência energética, a energia solar térmica para operações de secagem, a economia de materiais através da redução da perda durante o processo produtivo, e a substituição de biomassa não renovável, já que é muito intensiva em lenha proveniente de mata nativa. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2019) (Brasil, 2010a), o segmento destaca-se dos demais industriais em termos de potencial de conservação de energia com possibilidades de conservar 7,7% do seu consumo total energético, frente a uma média do setor industrial de 4,2%.

Têxtil

O setor têxtil é um segmento tradicional da indústria brasileira. Apesar do declínio que se observou no setor nos anos 1990 por desatualização tecnológica (Henriques Júnior, 2010, p. 69), segundo a Associação Brasileira da Indústria Têxtil (ABIT, 2012), o Brasil ocupava, em 2011, a posição de quinto maior produtor mundial de têxteis, sendo o terceiro maior produtor mundial de malhas.

Em termos de mercado, o setor é bastante desconcentrado, possuindo atualmente cerca de 30 mil empresas (ABIT, 2012) entre indústrias de grande porte com processos completos de fiação, tecelagem, beneficiamento e confecção, e microempresas no ramo da confecção (Henriques Júnior, 2010, p. 69).

Seu consumo energético é baixo, tendo consumido apenas 1,2 milhão de tep em 2010, além de praticamente não ter apresentado qualquer crescimento na última década. De 1970 a 2010, segundo Henriques Júnior (2010), o crescimento médio do consumo energético do setor foi de 1,2% a.a. De acordo com o BEN 2011 (Brasil, 2010b), 60% da matriz energética do setor é composta por eletricidade e 27% por gás natural.

Segundo o Banco Mundial (2010b, p. 29), o setor possui bom potencial de abatimento em eficiência energética através da adoção de novos processos; possibilidades de trocas intercombustíveis fósseis, energia solar térmica para os processos de secagem, e redução de biomassa não renovável, já que o setor utiliza lenha, ainda que em menor escala.

Ferroligas

O segmento industrial de ferroligas representa a produção de ligas metálicas, insumo indispensável à siderurgia (Banco Mundial, 2010b; Henriques Júnior, 2010). São ligas concentradas de ferro e com um ou mais metais, cuja produção envolve o processo metalúrgico de redução, que resulta em emissões de CO₂ (Brasil, 2010b). É o segmento da indústria nacional que tem apresentado maior crescimento nas últimas décadas, e o país é atualmente o sexto maior produtor mundial, responsável por aproximadamente 4,5% da produção total.

O setor é fortemente voltado para o mercado externo, estando entre os setores brasileiros que mais exportam em valor. Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Ferroligas (Abrafe), a produção nacional supre 95% da demanda interna e exporta 56% da sua produção. São apenas onze empresas atuando no setor, o que faz dele um setor bastante concentrado.

Seu consumo energético é baixo, tendo atingido cerca de 1,6 milhão de tep em 2010, de acordo com o BEN 2011 (Brasil, 2010b). Ainda segundo este balanço, 39% da sua matriz energética é composta por eletricidade e 41% por carvão vegetal. Entretanto, o consumo desta biomassa advém majoritariamente de florestas de eucalipto plantadas, e, segundo a Abrafe, a indústria de ferroligas e silício metálico possui aproximadamente 120 mil hectares dessas florestas para suprir suas necessidades energéticas.

Como o setor é recente na indústria brasileira, com inserção significativa somente a partir da década de 1980 (Brasil, 2009c, p. 5), pode-se observar uma tendência às adaptações que a competitividade internacional requer em termos ambientais. Desta forma, o setor possui poucas possibilidades de abatimento, com potencial reduzido de substituição de biomassa não renovável e maior utilização de gás natural. São opções com altos custos e baixo potencial de abatimento.

Bebidas e alimentos

O setor de bebidas e alimentos é mais um setor fortemente diversificado da indústria brasileira. Engloba produtos como açúcar, carnes, aves, pescados, laticínios, café, cervejas, refrigerantes, massas, pães, biscoitos, grãos diversos, óleos, gorduras, congelados prontos, entre outros. Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Alimentos (Abia, 2008 *apud* Henriques Júnior, 2010, p. 72), o Brasil é atualmente o segundo maior produtor mundial de biscoitos, o terceiro maior em massas e refrigerantes, o quinto maior em cervejas e laticínios e, além disso, é o maior exportador de aves e bovinos do mundo em toneladas.

É um setor tradicional da indústria nacional, com processos fabris de baixa complexidade que incluem lavagem, secagem, pasteurização e concentração, todos realizados a baixas temperaturas (Henriques Júnior, 2010, p. 72). O setor, no entanto, é o que mais consome energia na indústria. Em 2010, segundo o BEN 2011 (Brasil, 2010b), foram consumidas 23,6 milhões de tep.

Como alguns itens são produzidos em quantidades muito maiores que outros, seu consumo específico acaba por influenciar consideravelmente o consumo absoluto, como é o caso do açúcar, que tem a maior produção em toneladas do setor (Henriques Júnior, 2010). Por conta desta produção, o bagaço de cana é o insumo energético mais utilizado pelo setor, sendo responsável por 75% da sua matriz energética (Brasil, 2010b). Seus outros combustíveis relevantes são a lenha e a eletricidade, ambas com aproximadamente 9% da matriz.

No que tange às opções de mitigação, o setor tem possibilidades de melhoras de eficiência energética através de novos processos, como pasteurização por feixe de elétrons, recuperação de calor de baixas temperaturas, adoção de coletores de energia solar térmica para o cozimento, secagem e esterilização, e a cogeração de energia, com potencial somente no segmento sucroalcooleiro.

3.1 AS OPÇÕES TECNOLÓGICAS PARA MITIGAÇÃO

O Estudo de Baixo Carbono para o Brasil (Banco Mundial, 2010a) avalia um conjunto de tecnologias já disponíveis no mercado, organizadas em seis grupos de opções de mitigação a serem considerados pelos diferentes subsetores descritos a seguir.

- 1) Eficiência energética: por definição, eficiência energética é: “produzir determinado bem, produto ou serviço, fazendo uso de uma menor quantidade de energia, mantendo, entretanto, a qualidade do produto ou o padrão de serviço” (Henriques Júnior, 2010, p. 90). Segundo o Banco Mundial (2010b, p. 27), a preocupação com o uso eficiente da energia já existe há algum tempo, em especial após o segundo choque do petróleo, em 1979, elevando os custos da indústria com energia e assim tornando o desperdício de energia uma forma de redução da competitividade.

Para realizar uma avaliação mais detalhada das opções contidas no grupo de eficiência energética, dividiu-se este grupo em sete medidas:

- a) Melhorias de combustão: segundo Henriques Júnior (2010, p. 91), os processos de combustão estão presentes em quase todos os segmentos da indústria e são cruciais para a otimização do consumo de energia em equipamentos de altas temperaturas. Porém, tais processos costumam apresentar problemas de ineficiência energética, por limitações dos equipamentos ou por questões operacionais, especialmente equipamentos desregulados (Banco Mundial, 2010b, p. 27). De maneira geral, as formas mais simples e baratas de se obter melhorias de combustão são, de acordo com o Banco Mundial (2010b, p. 27), o controle dos gases de combustão, o ajuste da razão combustível e a manutenção de queimadores em caldeiras e fornos industriais. Outras soluções possíveis, porém mais caras, são queimadores de rendimento superior e utilização de ar enriquecido com oxigênio.
- b) Recuperação de calor: a recuperação de calor em processos consiste no aproveitamento de calor residual de diversos processos industriais em temperaturas intermediárias (entre 180°C e 450°C), reduzindo a demanda por energia externa (Banco Mundial, 2010b, p. 27; Henriques Júnior, 2010, p. 97). De acordo com Henriques Júnior, Dantas e Schaeffer (2010, p. 97), correntes quentes de diferentes fluidos preaquecem outros fluidos do processo através de recuperadores e trocadores de calor. Quanto maiores os diferenciais de temperatura, maiores os ganhos energéticos; quanto menores os diferenciais de temperatura, maiores os custos, pois

maiores têm de ser as superfícies de trocas de calor. Esta opção se aplica em especial às indústrias químicas e petroquímicas.

- c) Recuperação de vapor: a recuperação de vapor consiste em uma forma de recuperação de calor através da otimização, geração, distribuição e do uso de vapor. Como isto em geral envolve processos de baixas temperaturas (até 180°C), esta opção tende a apresentar investimento necessário baixo, e rápido retorno econômico. Além disso, os sistemas de vapor estão presentes em diversos segmentos da indústria, como Papel e celulose, Bebidas e alimentos, Têxtil e químicos (Banco Mundial, 2010b, p. 28).
- d) Recuperação de calor em fornos: esta forma de recuperação de calor se dá em processos de elevadas temperaturas (acima de 450°C), empregando-se recuperadores de calor que reaproveitam o calor proveniente de gases de exaustão dos fornos. São utilizados para preaquecer o ar de combustão, cargas ou fluidos de processos, podendo ainda ser utilizados para a geração de vapor em sistemas de maior porte. As indústrias que comumente utilizam esta opção são indústrias intensivas em calor, como cimento, aço, petroquímica e pelletização. Embora esta prática já esteja bastante difundida, ainda há potencial considerável de economia de energia através do seu emprego na indústria brasileira. Os empecilhos que se apresentam são o alto investimento necessário e os retornos de médio a longo prazo (Banco Mundial, 2010b, p. 28).
- e) Novos processos: a adoção de processos mais modernos e energeticamente eficientes pode significar o emprego de equipamentos de tecnologia inovadora, uma nova organização do processo produtivo, uma mudança na utilização de insumos, englobando tanto as tecnologias já disponíveis no mercado, quanto tecnologias atualmente em desenvolvimento, com perspectivas de entrar no mercado em um horizonte de dez a vinte anos. São bons exemplos da adoção de novos processos a modernização dos fornos de refino e fusão de aço na década de 1970 e a migração da produção cimenteira de um processo úmido para um processo seco ou semisseco, menos intensivo em calor (Banco Mundial, 2010b, p. 28).

- f) Cogeração de energia: de acordo com Nogueira (1996 *apud* Henriques Júnior, 2010, p. 114), a cogeração de energia é, por definição, “a produção simultânea e sequenciada de energia térmica e elétrica, a partir de um mesmo combustível, possibilitando uma maior eficiência energética do sistema como um todo, em comparação com a produção independente das duas formas de energia.” A medida já vem sendo adotada por setores como o químico/petroquímico, de papel e celulose, de refino de petróleo e aço, já que a cogeração proporciona maior economia de energia e segurança do que a energia elétrica adquirida das distribuidoras (Henriques Júnior, 2010, p. 114).
- g) Outras medidas de eficiência energética: as outras medidas que estão incluídas no grupo de eficiência energética são, de um maneira geral, operacionais. Envolvem medidas de planejamento, controle e manutenção como, por exemplo: planejamento de produção, instalação ou reparo de isolamentos térmicos, eliminação de vazamentos de vapor ou calor, regulagem e controle de temperatura de equipamentos, redução de pressão em sistemas de vapor. Estas medidas tendem a apresentar investimentos baixos e prazos de retorno extremamente rápidos (Henriques Júnior, 2010, p. 104).
- 2) Reciclagem e economia de materiais: a reciclagem de materiais proporciona em alguns casos economias em termos de matérias-primas e, em outros casos economia de energia, quando subprodutos do processo produtivo são utilizados para a geração de energia. Desta forma, considera-se que esta opção poderia estar inserida no conjunto da eficiência energética. Os segmentos da indústria com maior potencial de reciclagem são o cimento, pelo uso de aditivos que poupam a utilização de clínquer, papel e celulose, tanto pela reciclagem do papel quanto pela utilização de lixívia negra para a geração de energia, a cerâmica, pela redução das perdas de materiais; e ferro, aço e alumínio, ambos pela reutilização da sucata (Banco Mundial, 2010b, p. 30; Henriques Júnior, 2010, p. 105).
- 3) Substituição inter-energéticos (combustível fóssil por combustível fóssil): esta medida trata da substituição de combustíveis fósseis de altos níveis de emissões, como óleo combustível, coque de petróleo e carvão mineral para

combustíveis também fósseis, porém com níveis de emissões mais baixos, como o gás natural. Estas trocas, no entanto, também vêm sendo feitas entre energéticos de alto fator de emissões no Brasil, desde a década de 1980. Por exemplo, o segmento do cimento em um primeiro momento substituiu o óleo combustível por carvão mineral, passando posteriormente para a utilização de coque de petróleo.

De maneira geral, segundo Henriques Júnior (2010, p. 110), não são representativas as dificuldades técnicas que se apresentam para a implementação do gás natural, e as adaptações necessárias tendem a ser pouco complexas e de baixo custo. Porém, existe um problema no que tange à oferta e à distribuição do gás, encarecendo muito a opção.

- 4) Substituição de fontes fósseis por fontes renováveis: este grupo engloba duas opções distintas: a utilização de biomassa renovável e o emprego de energia solar.

Uso de biomassas renováveis: as biomassas renováveis consideradas pelo Banco Mundial (2010b, p. 33) consistem em lenha, carvão vegetal e resíduos como a lixívia negra e o bagaço de cana. Estas biomassas têm sido utilizadas como combustível em diversos segmentos da indústria; a lenha, considerada neutra em carbono, se proveniente de florestas plantadas, é amplamente utilizada, em especial nos segmentos de alimentos e bebidas, papel e celulose e cerâmica. O bagaço de cana já é muito representativo para a matriz energética brasileira e seu consumo traçou uma trajetória crescente na última década, tendo, em 2009, sido responsável por 21,2% do consumo energético total do setor industrial brasileiro (Brasil, 2010b).

O carvão vegetal é um combustível de notória participação nos segmentos ferro e aço e ferro-gusa, representando 20,3% da matriz energética destes segmentos em 2009, segundo o BEN 2010 (Brasil, 2010b). No entanto, a maior parte deste carvão vegetal não é originária de florestas plantadas para este fim, mas de matas nativas, tornando-o não renovável, com o agravamento de também ameaçar a conservação da biodiversidade e outros serviços ecossistêmicos providos pelas florestas naturais. No caso de segmento

de papel e celulose, a lixívia negra, apesar de subproduto do seu processo produtivo, é contabilizada como uso de biomassa renovável. Assim, a lixívia negra e a lenha de florestas plantadas com fim energético somam 85% dos insumos totais para fins térmicos do segmento (Banco Mundial, 2010b, p. 33).

Por fim, existem outros resíduos úteis, como biomassa combustível, provenientes de processos agroindustriais que compreendem resíduos da soja, resíduos do milho, palha e cascas de arroz e folhas e pontas da cana de açúcar que, segundo o PNE 2030 *apud* Henriques Júnior (2010, p. 111), têm potencial para gerar uma oferta energética de 184,6 milhões de tep.

- 5) Energia solar térmica: a utilização da energia solar térmica considerada consiste em sistemas complementares para o aquecimento da água empregada em processos de baixas temperaturas em segmentos que possuem procedimentos de cozimento, lavagem, secagem, entre outros. Os segmentos com melhores oportunidades de adoção das placas solares são papel e celulose, cerâmica, bebidas e alimentos e têxtil, mas, existe uma restrição para sua implementação no que concerne à disponibilidade de área para instalação dos coletores solares (Banco Mundial, 2010b, p. 35).
- 6) Redução do uso de biomassas não renováveis (provenientes do desmatamento): esta é uma medida de notória importância, uma vez que as biomassas não renováveis vêm sendo amplamente empregadas na matriz energética industrial brasileira. Segundo Henriques Júnior (2010, p. 113), cerca de 70% do carvão vegetal utilizado no Brasil são provenientes de desmatamentos.

A medida consiste na substituição da lenha e do carvão vegetal de florestas nativas pelas biomassas oriundas de florestas plantadas, em especial florestas de eucalipto. De acordo com a Embrapa (*apud* Henriques Júnior, 2010, p. 113), na silvicultura atual são praticados rendimentos que variam entre 30 e 40 m³/ha/ano, mas se pode chegar a 100 m³/ha/ano adotando-se mudas e técnicas de irrigação e tratamento do solo adequadas. Acontece que a medida requer investimentos altos e prazo médio de retorno, tendo o eucalipto um prazo de sete anos para o crescimento das árvores (Banco Mundial, 2010b, p. 35). Com isso, se fazem necessárias ações nos campos político e jurídico para combater a extração de madeira nativa e incentivar a adoção desta medida.

3.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Os cálculos dos custos que serão apresentados foram realizados por Henriques Júnior durante o processo de construção do Estudo de Baixo Carbono para o Brasil, desenvolvido pelo Banco Mundial entre 2008 e 2010. A metodologia utilizada foi muito semelhante àquela empregada para cálculo dos custos agregados para a indústria como um todo, apresentada no capítulo I. Foram considerados um cenário-base, no qual a indústria se mantém na trajetória atual de emissões e de mudanças tecnológicas, e um cenário alternativo, pelo qual as opções de mitigação vão sendo implementadas, no período de 2010 a 2030.

Como o cenário-base não conta com a implementação de nenhuma das medidas propostas, seu investimento é zero e seus custos são apenas os custos com energia. Para calculá-los, supôs-se um preço médio do barril de petróleo no período de US\$ 40, tomado como base para o cálculo dos preços médios de diversos outros energéticos utilizados como, por exemplo, a gasolina, o óleo diesel e o óleo combustível. Assim, os custos considerados de cada setor para um cenário-base foram obtidos ano a ano da seguinte forma:

$$C_{Bj}^a = \sum_{i=1}^n E_i \times p_{Ei}$$

onde:

C_{Bj}^a = custo-base no ano a do setor j ;

i = energético utilizado pelo setor;

E_i = consumo do energético i ; e

p_{Ei} = preço do energético i .

E o total destes custos anuais para o período de 2010 a 2030 foi calculado através do somatório do valor presente de cada C_{Bj}^a para o ano de 2009.

$$C_j^T = \sum_{a=2010}^{2030} \frac{C_{Bj}^a}{(1+d)^{(a-2009)}}$$

Considerando-se um crescimento médio anual da economia de 3,7% no período da análise, que é aplicado a todos os setores, e uma taxa de desconto social também uniforme de 8% a.a.,² calculam-se os custos de se implementar cada opção de mitigação dentro de cada setor. Para tal, considera-se um custo total de bens de capital no período estimado com base na experiência dos autores das opções existentes atualmente em uso.³

Assim, apenas tais custos de bens de capital são anualizados com o fim de obter um custo total anual para que se pondere a média final do custo por tonelada evitada.

$$C_K^a = \frac{C_K}{P_R} \times (1 + 0,37)^{(a-2009)}$$

onde:

C_K = custo total com bens de capital;

C_K^a = custo anual com bens de capital;

a = ano de 2010 a 2030; e

P_R = prazo de retorno da opção de mitigação, estabelecido pelos autores.

Assim, o custo do investimento total considerado para a implementação de cada medida dentro de cada setor é a soma do custo de bens de capital a outros custos agregados.

A evolução das emissões de CO₂e foi considerada, no cenário-base, com uma taxa de crescimento igual àquela referente à economia, ou seja, 3,7% a.a. Com isso, o cálculo das emissões anuais foi feito da seguinte forma:

$$tCO_2e^a = CO_2e^{2009} \times (1 + 0,037)^{(a-2009)}$$

2. Taxa social de longo prazo para o Brasil utilizada pelo PNE 2030, considerando os valores praticados para projetos financiados pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

3. Estas podem ser nacionais ou importadas e os custos são estimados de acordo.

onde:

CO_2e = emissões de equivalente de dióxido de carbono; e

a = ano de 2010 a 2030.

As emissões do cenário alternativo são exógenas a este cálculo, determinadas pelos autores com base na redução do consumo de cada combustível que a medida consegue em cada setor.

O custo total anual do cenário de baixo carbono é considerado o custo total do investimento na implementação da medida somado ao custo com energia, que tende a ser expressivamente inferior àquele observado no cenário-base.

$$C_{BC}^a = CI_a + C_a^{O\&M} + C_E^a$$

onde:

C_{BC}^a = custo anual no cenário de baixo carbono;

CI_a = custo do investimento no ano a ;

$C_a^{O\&M}$ = custos com operação e manutenção no ano a ; e

C_E^a = custo com energia no ano a no cenário de baixo carbono.

O resultado líquido consiste no custo total do cenário alternativo descontadas as suas receitas, quando há, em medidas como a cogeração de energia e a redução de biomassa por desmatamento que podem gerar a venda de excedentes energéticos, subtraindo ainda esta mesma conta referente ao cenário-base.

$$RL_a = C_{BC}^a - R_{BC}^a - C_B^a + R_B^a$$

onde:

RL_a = resultado líquido anual;

C_{BC}^a = custo anual no cenário de baixo carbono;

R_{BC}^a = receita anual no cenário de baixo carbono;

C_B^a = custo anual no cenário-base; e

R_B^a = receita anual no cenário-base.

Os autores estimaram a vida útil dos bens de capital para cada medida, o fator de recuperação do capital da seguinte maneira:

$$FRC = \frac{(1+d)^{VU-d}}{(1+d)^{VU-1}}$$

onde:

FRC = fator de recuperação do capital;

d = taxa de desconto (8%); e

VU = vida útil dos bens de capital.

Aplicou-se o fator de recuperação do capital ao investimento ano a ano:

$$I \times FRC = FRC \times \sum_{a=n-1}^n I$$

onde:

I = investimento

Calcula-se então o resultado anual entre os dois cenários da seguinte forma:

$$Resultado_a = (R_{BC}^a - R_B^a) - (O \& M_{BC}^a - O \& M_B^a) - (C_{BC}^{Ea} - C_B^{Ea})$$

onde:

R_{BC}^a = receita anual no cenário de baixo carbono;

R_B^a = receita anual no cenário-base;

$O \& M_{BC}^a$ = custos anuais com operação e manutenção no cenário de baixo carbono;

$O \& M_B^a$ = custos anuais com operação e manutenção no cenário-base;

C_{BC}^{Ea} = custos anuais com energia no cenário de baixo carbono; e

C_B^{Ea} = custos anuais com energia no cenário-base.

E subtraindo deste valor a economia anual com energia, obtém-se um custo nivelado anual:

$$CN_a = I \times FRC - Resultado_a$$

Este custo é dividido pelas toneladas de CO₂e evitadas no mesmo ano, chegando-se a um custo médio da tonelada evitada para cada ano:

$$CtCO_2e_a = \frac{CN_a}{tCO_2e\ evitadas_a}$$

onde:

$CtCO_2e_a$ = custo da tonelada de equivalente de dióxido de carbono evitada anualmente; e

$tCO_2e\ evitadas_a$ = quantidade anual de toneladas de CO₂e evitadas pela medida de mitigação.

Por fim, foi calculada uma média dos custos anuais por tonelada evitada ponderada pelo volume total de emissões evitadas a cada ano para se obter um custo médio da tonelada de CO₂e evitada no período de 2010 a 2030:

$$CM_{tCO_2e_{2010-2030}} = \frac{\sum_{a=2010}^{2030} (CtCO_2e_{evitadas_a} \times tCO_2e_{evitadas_a})}{\sum_{a=2010}^{2030} tCO_2e_{evitadas_a}}$$

Assim, tendo acesso a estes cálculos, pôde-se perceber que o potencial total de abatimento que as 63 opções do cenário alternativo oferecem frente às emissões do cenário base é de 34% das emissões totais. Organizam-se então os custos referentes a cada combinação de medida e setor em ordem crescente e calcula-se a participação que cada medida possui nestes 34%. Com isso, foi possível identificar o percentual das emissões tendenciais que a indústria brasileira pode abater caso sejam implementados conjuntos destas medidas. A estes percentuais chamamos de *share*:

$$Share \text{ do conjunto} = \sum_{i=1}^{63} OM_i$$

onde:

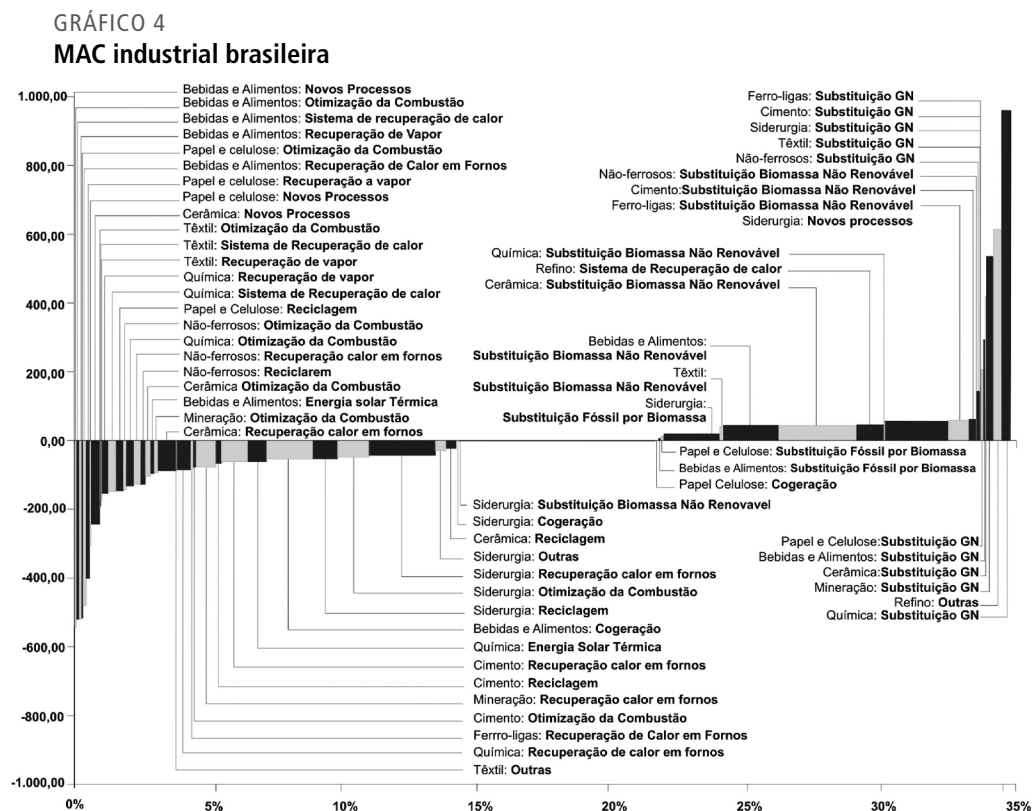
$$OM_i = \textit{share} \text{ da opção de mitigação } i.$$

Assim, pode-se gerar um gráfico de dispersão de pontos no qual o eixo *X* representa o *share* e o eixo *Y* representa os custos em dólares americanos de 2009 por tCO₂e, obtendo-se a curva que será apresentada a seguir.

É importante colocar que o conceito de potencial de mitigação, segundo Henriques Júnior (2010, p. 122), expressa o grau de redução de GEE “que pode ser conseguido através de uma determinada medida a um custo definido por tonelada de carbono evitado num certo período de tempo, em comparação com uma linha de base.” E este potencial pode ser calculado sob três diferentes pontos de vista.

O primeiro é o potencial técnico, ou seja, o potencial da tecnologia mais eficiente disponível que funciona como um limite superior do abatimento que se pode alcançar. O segundo é o potencial econômico, que apresenta restrição com relação ao primeiro.

Está relacionado aos custos e ao investimento necessário, que tornam a medida economicamente atrativa ou não, ainda que seja tecnicamente viável. O terceiro, ainda mais restritivo, é o potencial de mercado, que, segundo Henriques Júnior (2010, p. 123), incorpora apenas medidas viáveis, técnica e economicamente, mas que têm de fato chances de ser adotadas. Reflete preferências do consumidor (empreendedor) diante de um conjunto de fatores externos, incluindo o mercado propriamente dito, comportamento de preços de energéticos, evolução tecnológica, políticas de governo e barreiras de um modo geral (Henriques Júnior, 2010).



Como se pode observar, a curva a seguir apresenta medidas com custos extremamente negativos, o que significa que, de acordo com estes cálculos, a implementação destas medidas geraria expressivas receitas, porém, com potencial de abatimento muito reduzido. Estas medidas são, em sua maioria correlacionadas ao grupo da eficiência energética, correspondendo às expectativas de semelhante às curvas

construídas para outros países do mundo. A China, por exemplo, tem na cogeração de energia as suas melhores possibilidades de abatimento de GEE, em especial nos setores de cimento, mineração e siderurgia (McKinsey & Company, 2009b). O mesmo acontece com a Rússia e a Índia (McKinsey & Company, 2009c, 2009d), caracterizando os componentes do BRICs, nos quais o Brasil se inclui.

Os dados para elaboração desta curva estão listados na tabela 2.

TABELA 2
Custos (US\$/tCO₂e) por setor, medida e share

Setor	Tecnologia	Custo original (US\$/tCO ₂)	Share (%)
Bebidas e alimentos	Novos processos	-998,96	0,02
Bebidas e alimentos	Otimização da combustão	-541,53	0,11
Bebidas e alimentos	Sistema de recuperação de calor	-519,95	0,20
Bebidas e alimentos	Recuperação de vapor	-519,95	0,29
Papel e celulose	Otimização da combustão	-517,57	0,35
Bebidas e alimentos	Recuperação calor/forno	-480,87	0,47
Papel e celulose	Recuperação de vapor	-402,08	0,60
Papel e celulose	Novos processos	-305,72	0,65
Cerâmica	Novos processos	-243,68	0,98
Têxtil	Otimização da combustão	-197,07	0,99
Têxtil	Sistema de recuperação de calor	-191,49	1,01
Têxtil	Recuperação de vapor	-176,08	1,05
Química	Recuperação de vapor	-156,52	1,29
Química	Sistema de recuperação de calor	-151,29	1,57
Papel e celulose	Reciclagem	-146,76	1,84
Não ferrosos	Otimização da combustão	-141,00	1,94
Química	Otimização da combustão	-134,72	2,23
Não ferrosos	Recuperação calor/forno	-129,55	2,50
Não ferrosos	Reciclagem	-129,54	2,67
Cerâmica	Otimização da combustão	-105,73	2,87
Bebidas e alimentos	Energia solar térmica	-96,59	3,01
Mineração	Otimização da combustão	-93,69	3,15
Cerâmica	Recuperação calor/forno	-89,94	3,81
Têxtil	Outras	-88,60	3,82
Química	Recuperação calor/forno	-85,95	4,33
Ferroligas	Recuperação calor/forno	-83,40	4,43
Cimento	Otimização da combustão	-79,72	4,54
Mineração	Recuperação calor/forno	-78,07	5,27
Cimento	Reciclagem	-68,34	5,48

(continua)

(continuação)

Setor	Tecnologia	Custo original (US\$/tCO2)	Share (%)
Cimento	Recuperação calor/forno	-64,24	6,47
Química	Energia solar térmica	-63,04	7,15
Bebidas e alimentos	Cogeração	-55,86	8,89
Siderurgia	Reciclagem	-54,81	9,79
Siderurgia	Otimização da combustão	-49,86	10,97
Siderurgia	Recuperação calor/forno	-44,89	13,43
Siderurgia	Outras	-31,01	13,82
Cerâmica	Reciclagem	-24,32	14,20
Siderurgia	Cogeração	-2,70	14,31
Siderurgia	Substituição biomassa não renovável	-1,73	21,60
Papel e celulose	Cogeração	-0,44	21,70
Bebidas e alimentos	Substituição fóssil por biomassa	6,07	21,81
Papel e celulose	Substituição fóssil por biomassa	11,65	21,91
Siderurgia	Substituição fóssil por biomassa	19,17	23,98
Têxtil	Substituição biomassa não renovável	39,16	24,14
Bebidas e alimentos	Substituição biomassa não renovável	42,60	26,17
Cerâmica	Substituição biomassa não renovável	42,60	29,06
Refino	Sistema de recuperação de calor	44,06	30,10
Química	Substituição biomassa não renovável	45,11	30,11
Siderurgia	Novos processos	55,83	32,48
Ferroligas	Substituição biomassa não renovável	58,70	33,25
Cimento	Substituição biomassa não renovável	61,61	33,52
Não ferrosos	Substituição biomassa não renovável	61,61	33,53
Não ferrosos	Substituição GN	142,87	33,65
Têxtil	Substituição GN	150,03	33,66
Siderurgia	Substituição GN	154,07	33,68
Cimento	Substituição GN	157,33	33,69
Ferroligas	Substituição GN	164,43	33,70
Papel e celulose	Substituição GN	204,16	33,78
Bebidas e alimentos	Substituição GN	293,20	33,85
Cerâmica	Substituição GN	418,54	33,90
Mineração	Substituição GN	533,62	34,17
Refino	Outras	612,44	34,45
Química	Substituição GN	959,29	34,80

Custo agregado	-4934601665,67
Custo médio	-2,94
Share original abatido a custos negativos (%)	0,22

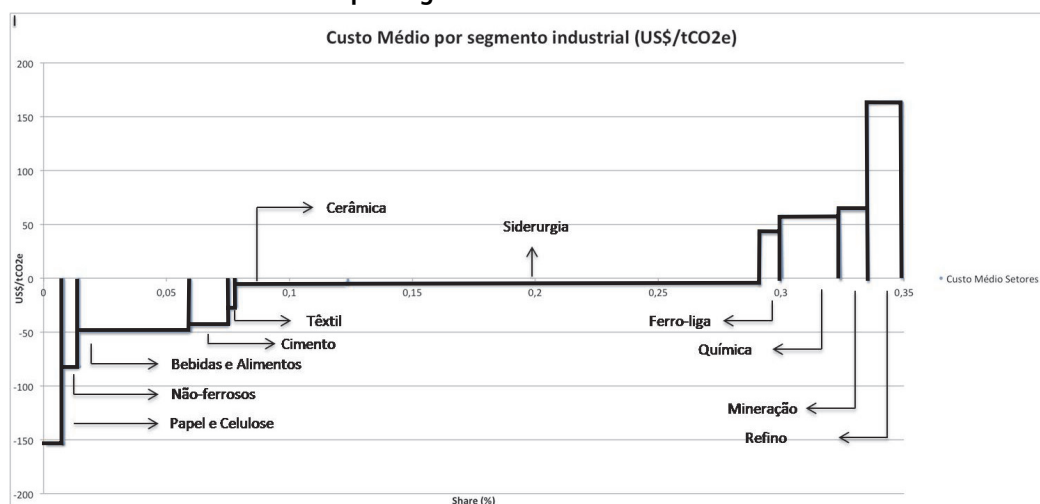
Fonte: Henriques Júnior (2010). Elaboração dos autores.

Como dito anteriormente, a dependência da trajetória foi assumida priorizando a eficiência energética. No entanto, com o domínio da eficiência energética, pode-se esperar que haja vieses de inércia, efeito ricochete, informação incompleta, barreiras de financiamento, comportamentais e de agência, ainda que estas fontes tendam a estar associadas às instalações residenciais e às pequenas plantas comerciais e industriais, não sendo expressivas em grandes plantas industriais, como aquelas aqui analisadas.

A partir dos mesmos dados, pôde-se construir uma curva por setor da indústria, com custos médios das medidas nas quais cada setor possui potencial de abatimento. Esta curva segue os moldes das curvas construídas pelo Banco Mundial, que, no sentido oposto, apresentavam custos por medida através de uma média dos custos apresentados pelos diferentes setores, neutralizando a heterogeneidade que existe entre os segmentos industriais no Brasil.

Como se pode observar nos gráficos 4 e 5, em uma abordagem desagregada por segmento industrial, o abatimento de até 21,8% das emissões da indústria, de um potencial total de 34,8%, poderia ser adquirido a custos negativos, totalizando 40 de 63 opções tecnológicas. Isto representa algo em torno de dois terços do total de opções analisadas em todos os setores, excluindo cimento e refino, as quais essas tecnologias não se incluem. A custos abaixo de US\$ 50/tCO_{2e}, existem 48 opções. Entre as opções com custos negativos, como visto na tabela 2, estão todas aquelas relacionadas à eficiência energética, reciclagem e cogeração, enquanto todas as opções positivas estão relacionadas à substituição de combustíveis fósseis.

GRÁFICO 5
MAC industrial brasileira por segmento da indústria



Obs.: Imagem reproduzida em baixa resolução em virtude das condições técnicas dos originais disponibilizados pelos autores para publicação (nota do Editorial).

Já a abordagem que agrega as medidas apresentando custos por segmento estima que o abatimento de até 29% das emissões, do mesmo potencial total de 34,8%, poderia ser adquirido a custos negativos. Este potencial representa sete dos onze segmentos analisados, a saber: papel e celulose, não ferrosos, bebidas e alimentos, cimento, têxtil, cerâmica e siderurgia.

4 A QUESTÃO DOS CUSTOS NEGATIVOS

As curvas MAC apresentam um potencial máximo de abatimento caso omitam uma série de fontes de custos e barreiras de implementação geralmente difíceis de identificar e medir, e advém de barreiras e falhas técnicas de mercado, tais como:

Barreiras técnicas: a estimativa dos custos não é trivial e muitas informações e processos de interação são necessários para capturar todas as fontes de custos e normalmente a abordagem dos modelos falha em incorporá-los. Por exemplo:

Dependência da trajetória: a trajetória que as emissões percorrem está sujeita a dinâmicas intertemporais na medida em que os custos de redução serão dependentes das ações de mitigação em períodos anteriores e posteriores de tempo (Kesicki, 2009; Ekins, Kesicki e Smith, 2011; Golove e Eto, 1996).

Heterogeneidade: mesmo que uma dada tecnologia seja em média custo-eficiente, ela provavelmente não o será para algumas firmas ou indivíduos. Se os usuários relevantes são heterogêneos no que tange à quantidade de energia que utilizam, custos locais e outros fatores idiossincráticos, isso significa que esta tecnologia será rentável para a média das firmas ou domicílios (Golove e Eto, 1996; Jaffe e Stavins, 1994).

Efeito ricochete: melhorias de eficiência energética reduzem os custos dos seus serviços e geram economias de energia. Porém, a redução dos custos provoca aumento na demanda por serviços energéticos que acaba compensando alguns benefícios das economias de energia geradas.

Barreiras de mercado: a implantação de ações de mitigação pode ser atrasada, ou reduzida, por conta de custos intrínsecos relacionados à sua possível eficácia resultando

em incerteza quanto aos seus resultados e benefícios que se tinha com a tecnologia a ser substituída. Por exemplo:

Incerteza: a incerteza quanto aos preços futuros da energia e às economias reais geradas pelo uso de tecnologias energéticas, combinada à natureza irreversível do investimento em eficiência, aumenta o risco relacionado às opções de abatimento e, portanto, faz com que a taxa de desconto apropriada para a análise do valor presente líquido seja expressivamente maior que aquelas normalmente utilizadas nos projetos convencionais (Kesicki, 2009; Ekins, Kesicki e Smith, 2011; Golove e Eto, 1996; Jaffe e Stavins, 1994).

Inércia: os custos de adoção incluem perdas de externalidades de redes de conhecimentos ou atributos qualitativos relacionados à tecnologia substituída, além de custos de capacitação para manejar a nova tecnologia e mudanças na estrutura interna, cultura e estratégias. Se a inércia for causada por alguma forma de falha de mercado no que tange às informações, ela pode então ser eliminada através de incentivos apropriados e não deve ser considerada (Ekins, Kesicki e Smith, 2011; Kesicki, 2009; Turrentine e Kurani, 2007; Golove e Eto, 1996; Jaffe e Stavins, 1994).

Falhas de mercado: informação incompleta e assimétrica e fatores comportamentais podem representar falhas de mercado para a implantação de opções de abatimento custo-eficientes. Tais barreiras não consistirão em um custo se puderem ser removidas com uma regulação que combine retornos quanto a informação, normas sociais e práticas de estabelecimento de metas para fornecer aos usuários o contexto necessário para que façam melhor uso das informações quanto ao consumo da energia.

Informação incompleta: a carência de informação pode representar uma barreira para a adoção de tecnologias custo-eficientes em especial se são tecnologias novas e ofertadas por poucos fornecedores (Golove e Eto, 1996; Jaffe e Stavins, 1994).

Barreiras de financiamento: a adoção de uma nova tecnologia pode exigir grandes pagamentos antecipados enquanto o retorno das economias geradas só virá após alguns anos. E indivíduos de baixa renda ou pequenas firmas podem não ter acesso suficiente ao capital para realizar os investimentos. Isto pode ser tomado como exemplo de falhas de informação que inibem preços ajustados pelo risco no mercado de financiamento.

Custos de agência: se o indivíduo que adota uma tecnologia não é aquele que se beneficia dela, surge então um problema principal/agente. Este é o caso de incentivos mal colocados, ou divididos, e tem sido utilizado para descrever primariamente as relações entre proprietários e inquilinos no que tange à aquisição de equipamentos energeticamente eficientes quando o inquilino é responsável pelo pagamento das contas de energia e utilidades, de forma que os proprietários pouco se interessam em fornecer instalações de maior eficiência energética, porém mais caras, se o mercado imobiliário falha em internalizar tais benefícios em seus preços (Kesicki, 2009; Ekins, Kesicki e Smith, 2011; Golove e Eto, 1996; Jaffe e Stavins, 1994).

Comportamento: quando os custos da unidade de energia são baixos, as economias são geralmente muito pequenas e insuficientes para atrair a atenção de indivíduos e firmas a se motivarem a agir. Energia barata não sensibiliza os usuários a serem racionais. Neste caso, a implantação se dará caso os preços da energia aumentem ou metas mandatórias de economia de energia sejam estabelecidas.

A negligência a esses aspectos acima detalhados subestima os custos de abatimento e as barreiras de implementação, incluindo a representação de custos negativos de abatimento.

A superestimação do potencial de abatimento não é a única consequência de falsos custos negativos. Como colocado por Kasecki (2009), se estes custos negativos resultam da presença de falhas de mercado e barreiras, então instrumentos de mercado, como taxas e o *cap-and-trade*, podem ser ineficientes na criação de incentivos para a adoção. Neste caso, instrumentos que não dão escolha ao mercado podem ser necessários quando imperfeições irremovíveis ou inevitáveis existem.

Portanto, para a avaliação de instrumentos de incentivo com a aplicação de curvas MAC, como faremos, é crucial que se detalhe a apropriação dos custos e que se assegure de que os valores negativos são apenas uma questão de falhas de mercado não resultantes de custos ocultos.

5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com a disponibilidade dos dados em Henriques Júnior (2010), gentilmente cedidos pelo autor, vamos realizar uma análise dos fatores acima discutidos relacionados com custos negativos.

Como dito anteriormente, a dependência da trajetória foi assumida priorizando a eficiência energética. No entanto, com o domínio da eficiência energética, pode-se esperar que houvesse vieses de inércia, efeito ricochete, informação incompleta, barreiras de financiamento, comportamentais e de agência, ainda que estas fontes tendam a estar associadas às instalações residenciais e às pequenas plantas comerciais e industriais, não sendo expressivas em grandes plantas industriais, como aquelas aqui analisadas.

Assim vamos nos concentrar na sensibilidade dos parâmetros relacionados com a incerteza e a heterogeneidade que são fontes de forte viés para a subestimação, enquanto as outras, ainda que também relevantes, não são de grande significância.

Para corrigir estes vieses, vamos realizar uma análise de sensibilidade desses custos ajustando os parâmetros e valores utilizados na estimativa da curva original, tais como: *i*) taxa de desconto para lidar com incerteza; e *ii*) os valores de investimento e emissões abatidos para capturar a heterogeneidade.

A taxa de desconto de 8% a.a. assumida na estimativa da curva original é bastante apropriada para os custos de oportunidade livres de risco do capital na economia brasileira, porém, demasiado baixa para capturar o risco. A literatura de finanças sugere uma taxa em torno de 15%-25% quando há risco, e um aumento na taxa utilizada deve ser feito para lidar com a incerteza (Assaf Neto, Lima e Araujo, 2008).

Dada a variedade da safra do capital e a dispersão territorial da indústria brasileira, deve haver um alto grau de heterogeneidade entre os custos de abatimento para uma mesma tecnologia. Portanto, os valores dos investimentos e da eficiência do abatimento podem apresentar uma larga dispersão, de forma que poucas observações não são capazes de capturar a média dos procedimentos.

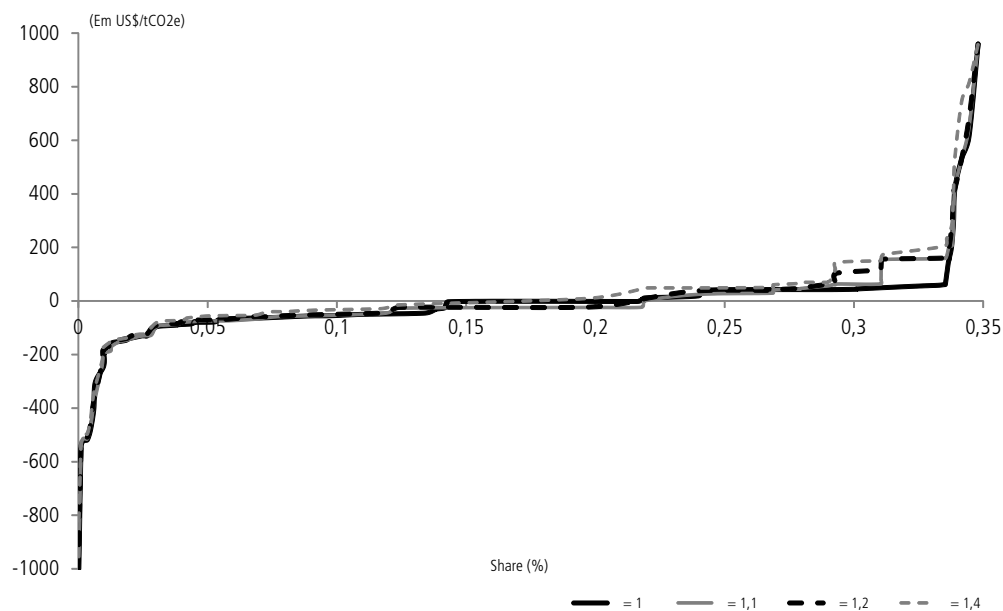
Em suma, a incerteza e a heterogeneidade são fontes de forte viés para a subestimação, enquanto as outras, ainda que também relevantes, não são de grande significância.

Para corrigir estes vieses, podem-se ajustar os parâmetros e valores utilizados na estimativa da curva original, tais como: *i*) taxa de desconto para lidar com incerteza; e *ii*) os valores de investimento e emissões abatidas para capturar a heterogeneidade.

Nos gráficos 6 e 7, são apresentados tais ajustes dentro de uma gama selecionada para cada um deles separadamente, demonstrando o quão sensível a eles a curva é. As

variações da taxa de desconto estiveram entre 8% e 25% e os valores de investimento foram aumentados em até 40%.

GRÁFICO 6
Sensibilidade do custo à taxa de desconto



Foi feito então um ajuste de limite superior, ou seja, que reestimou os custos a partir de mudanças em ambos os parâmetros e valores utilizados no cálculo da curva original. Carecendo de conhecimentos suficientes sobre o grau e a distribuição da incerteza e da heterogeneidade, assumimos valores *ad hoc* que podem representar ajustes superiores dos dois vieses de estimação. Para isso, selecionamos uma taxa de desconto de 25% para lidar com a incerteza, muito superior à taxa original de 8%, o que representa um retorno baixo ao investimento. Para capturar heterogeneidade utilizamos, *ad hoc*, um aumento no valor do investimento de 40%, uma variação bastante alta.

Como pode ser visto nos três casos, a curva MAC original se desloca para cima. Entre as variações adotadas, os valores de investimento parecem capturar o maior ajuste no seu limite superior, enquanto as variações da taxa de desconto foram as que pior capturaram. No entanto, ainda persiste um grande segmento negativo nas curvas reestimadas indicando que, além da incerteza e heterogeneidade, poderá haver outras fontes de subestimativa. Ou que realmente há essas possibilidades de custos negativos

e que políticas climáticas deveriam então procurar instrumentos para que o setor produtivo seja capaz de capturar essas oportunidades.

GRÁFICO 7
Sensibilidade do custo aos valores do investimento

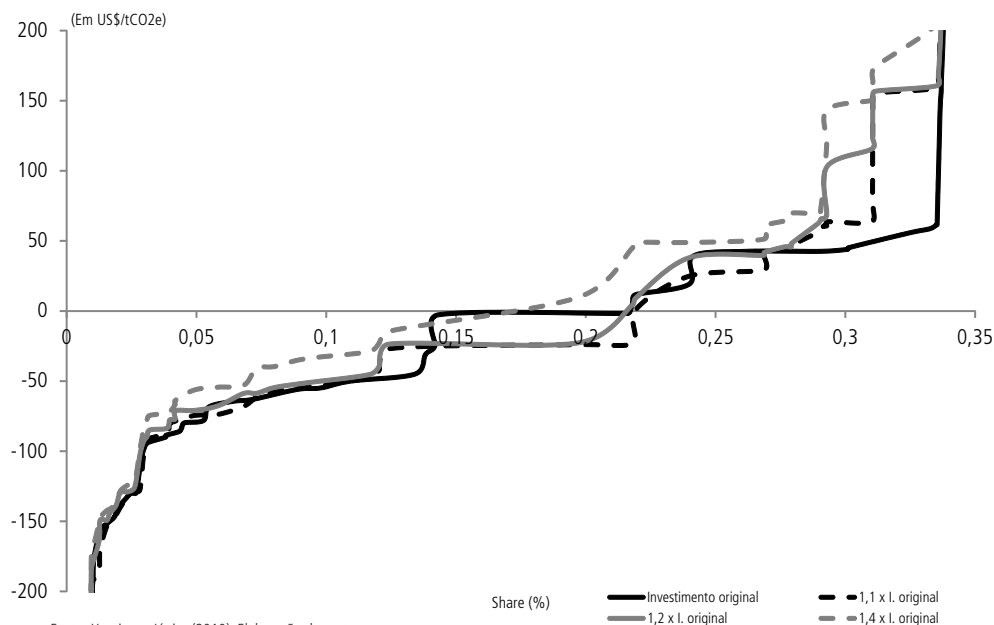
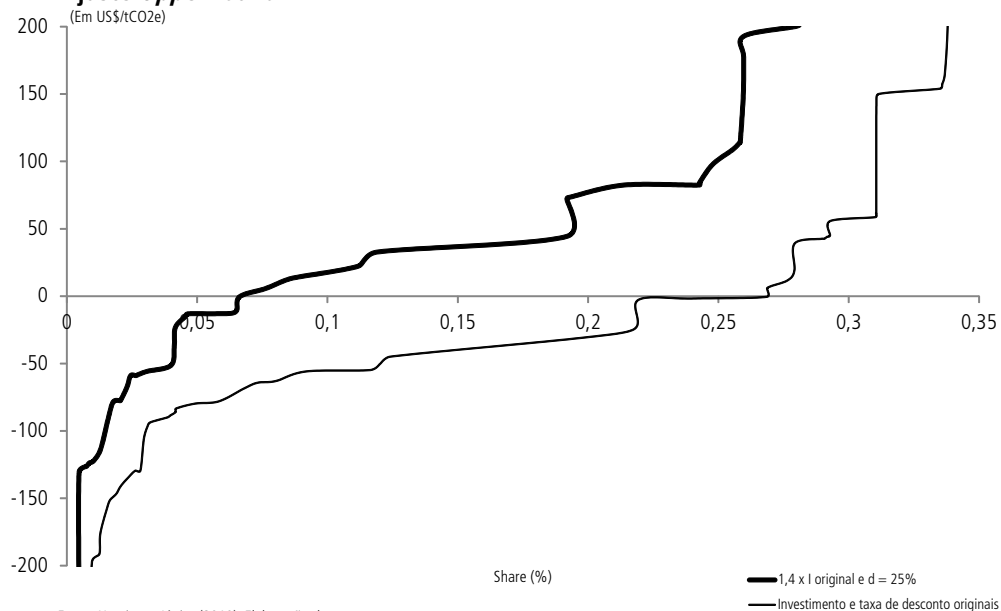


GRÁFICO 8
Ajuste *UpperBound*



6 CONCLUSÕES

A migração para uma economia de baixo carbono pode representar uma estratégia de desenvolvimento, em vez do *trade-off* que se costuma colocar entre crescimento e preservação. Importantes benefícios são gerados ao desenvolvimento socioeconômico por uma economia de baixo carbono, como a economia de energia, redução de custos de produção industriais, geração de empregos, conservação da biodiversidade, além do manejo de resíduos e a redução da poluição que representam melhora na qualidade de vida da população, em especial a população de baixa renda.

Neste contexto, as MACCs representam um instrumento para se discutir globalmente sobre de que forma mitigar emissões de gases de efeito estufa, à medida que permitem acesso às diferentes opções tecnológicas, aos seus custos e potenciais de abatimento em diferentes setores ou regiões de uma economia. Ocorre que a construção destas curvas, realizadas por abordagem tecnológica, tem apresentado expressivos volumes de abatimento que poderiam ser obtidos a custos negativos, ou seja, ações de abatimento que gerariam receitas. Isto se observa em todas as curvas construídas para a economia brasileira.

A questão dos custos negativos encontrados leva à discussão acerca das possíveis razões para que as medidas de abatimento, que gerariam lucros, ainda não estejam sendo implementadas. Possíveis razões poderiam residir na subestimação de parâmetros de cálculo dos custos como a taxa de desconto e os níveis de investimento necessários, refletindo, respectivamente, a incerteza e a heterogeneidade como fontes de subestimativa. Porém, o trabalho demonstrou que ainda que haja sensibilidade a estes parâmetros, os custos negativos persistem em largas medidas quando os parâmetros variam positivamente. E, desta forma, conclui-se que, ou existem outras fontes de subestimação de custos, ou de fato há possibilidades de custos negativos e as políticas climáticas deveriam procurar instrumentos para incentivar o setor produtivo a capturar tais oportunidades.

Assim, pode-se concluir que as curvas MAC para o Brasil, embora ainda carreguem elementos de apropriação de custos que precisam ser mais detalhados para se poder refletir com mais acuidade os verdadeiros custos de abatimento, apresentam sempre uma gama variada de ações mitigatórias altamente atrativas.

Em suma, já existem inúmeras evidências de que há oportunidades de mitigação de custos muito baixos ou mesmo negativos, indicando que a trajetória de baixo carbono pode ser atingida sem que ocorram perdas econômicas significativas.

REFERÊNCIAS

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Relatório de sustentabilidade da indústria do alumínio 2006/2007**. São Paulo, 2008

ABCERAM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/site/>>. Acesso em: 20 mar. 2012.

ABIA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS. 2008. Disponível em: <<http://www.abia.org.br>>. Acesso em: 19 mar. 2012.

ABIQUIM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. 2009. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/conteudo.asp?princ=ain&pag=conc>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

ABIT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL. Disponível em: <http://www.abit.org.br/site/navegacao.asp?id_menu=1&id_sub=4&idioma=PT>. Acesso em: 20 mar. 2012.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes**, 2009.

ASSAF NETO, A.; LIMA, F. G.; ARAÚJO, A. M. P. Uma proposta metodológica para o cálculo do custo de capital no Brasil. **Revista de administração**, São Paulo, v. 43, n. 1, p. 72-83, 2008.

BANCO MUNDIAL. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Washington, 2010a.

_____. **Emissões do setor da indústria – Tema O**. Relatório Técnico. Washington, 2010b.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. 2010. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br>>. Acesso em: 29 out. 2010.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. Produto 37: Cadeia do Alumínio. 2008 (Relatório Técnico, n. 62: Perfil do Alumínio).

_____. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. Produto 43: Cadeia da Cerâmica de Revestimento. 2009a (Relatório Técnico, n. 69: Perfil da Cerâmica de Revestimento).

_____. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral**. Produto 34: Cadeia de Ferroligas. 2009b (Relatório Técnico, n. 60: Perfil de Ferroligas).

_____. **Desenvolvimento de estudos para elaboração do Plano Duodecenal (2010-2030) de geologia, mineração e transformação mineral.** Produto 68: Perfil do Cimento. 2009c.

_____. **Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2019/Ministério de Minas e Energia.** Brasília: MME/EPE, 2010a.

_____. **Balanco Energético Nacional 2011** – base 2010. Brasília: EPE/MME, 2010b. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

_____. **Empresa de Pesquisa Energética** – Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa/Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília: MCT, 2010c.

_____. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030).** Brasília: MME, 2010d.

COUTO, L. **Custos marginais de abatimento de gases de efeito estufa para o Brasil:** uma análise industrial. 2012. 70 f. Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

EKINS, P.; KESICKI, F.; SMITH, A. **Marginal abatement cost curves:** a call for caution. Energy Institute, University College London, 2 abr. 2011.

GOLOVE, W. H.; ETO, J. H. **Market barriers to energy efficiency:** a critical reappraisal of the rationale for public policies to promote energy efficiency. Energy & Environment Division Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, Mar. 1996.

HENRIQUES JÚNIOR, M. F. **Potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro.** 2010. 340 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

_____.; DANTAS, F.; SCHAEFFER, R. Potential for reduction of CO2 emissions and a low-carbon scenario for the Brazilian industrial sector. **Energy policy**, v. 38, 1946-1961, 2010.

HOURCADE, J.-C. *et al.* Hybrid modeling: new answers to old challenges – introduction to the special issue of the energy journal. **Energy journal**, v. 27, p. 1-11, 2006.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Matriz de insumo-produto:** Brasil 2000/2005. IBGE, 2005. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/matrizinsumo_produto.shtm>. Acesso em: 26 abr. 2010.

_____. **Contas Nacionais.** 2012. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/contasnacionais/2009/default.shtm>>. Acesso em: 12 abr. 2012.

IBS – INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA. **Relatório de sustentabilidade.** 2009. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br/>>. Acesso em: 19 out. 2010.

_____. 2010. Disponível em: <<http://www.ibs.org.br/>>. Acesso em: 19 out. 2010.

INT – INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. **Relatório de levantamento de dados sobre o setor industrial**. Projeto Mapeamento Tecnológico do Uso do Gás, 2007.

JAFFE, A. B.; STAVINS, R. N. The energy-efficiency gap: what does it mean? **Energy policy**, v. 22, n. 10, p. 804-810, 1994.

KESICKI, F. **Marginal abatement cost curves for policy making** – expert-based vs. model-derived curves. Energy Institute, University College London, 2009.

KUIK, O.; BRANDER, L.; TOL, R. S. J. Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: a meta-analysis. **Energy policy**, v. 37, p. 1.395-1.403, 2009.

MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de GEE**: emissões e remoções de dióxido de carbono por conversão de florestas e abandono de terras cultivadas. Brasília: MCT, 2004.

MCKINSEY & COMPANY. **Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil**. São Paulo: McKinsey & Company, 2009a. 47 p.

_____. **China's green revolution**: prioritizing technologies to achieve energy and environmental sustainability. McKinsey & Company, 2009b. 140 p.

_____. **Environmental and energy sustainability**: an approach for India. McKinsey & Company, 2009c. 90 p.

_____. **Pathways to a low carbon and energy efficient Russia**: opportunities to increase energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions. McKinsey & Company, 2009d. 134 p.

SAMARCO. 2010. Disponível em: <<http://www.samarco.com.br/modules/system/viewPage.asp?P=2&VID=DEFAULT&SID=269827335848131&S=1&C=7335>>. Acesso em: 20 dez. 2010.

SCHAEFFER, R. *et al.* **Sistema brasileiro de cap-and-trade. Setor industrial**: vantagens, desafios, reflexos na competitividade internacional e barreiras a implementação. Rio de Janeiro: PPE/COPPE/UFRJ, 2010.

SEBRAE – SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. **Estudos de mercado Sebrae/ESPM**: cerâmica vermelha. 2008. (Relatório completo).

SEROA DA MOTTA, R. *et al.* (Ed.). **Mudança do clima no Brasil**: aspectos econômicos, sociais e regulatórios. Brasília: Ipea, 2011.

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual, 2010**. Disponível em: <<http://www.snic.org.br/25set1024/abre.asp?pagina=numeros>>. Acesso em: 22 mar. 2012.

TAVARES, M. **Análise do refino no Brasil**: estado e perspectivas – uma análise *cross-section*. 2005. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

TURRENTINE, T. S.; KURANI, K. S. Car buyers and fuel economy? **Energy policy**, n. 35, p. 1.213-1.223, 2007.

VALE – COMPANHIA VALE DO RIO DOCE. Disponível em: <<http://www.vale.com/Util/landing/default.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2012.

EDITORIAL

Coordenação

Cláudio Passos de Oliveira

Supervisão

Andrea Bossle de Abreu

Revisão

Cristina Celia Alcantara Possidente

Eliezer Moreira

Elisabete de Carvalho Soares

Lucia Duarte Moreira

Luciana Nogueira Duarte

Míriam Nunes da Fonseca

Editoração eletrônica

Roberto das Chagas Campos

Aeromilson Mesquita

Aline Cristine Torres da Silva Martins

Carlos Henrique Santos Vianna

Maria Hosana Carneiro Cunha

Capa

Luís Cláudio Cardoso da Silva

Projeto Gráfico

Renato Rodrigues Bueno

Livraria do Ipea

SBS – Quadra 1 – Bloco J – Ed. BNDES, Térreo.

70076-900 – Brasília – DF

Fone: (61) 3315-5336

Correio eletrônico: livraria@ipea.gov.br

Composto em Adobe Garamond Pro 12/16 (texto)
Frutiger 67 Bold Condensed (títulos, gráficos e tabelas)
Impresso em offset 90g/m²
Cartão supremo 250g/m² (capa)
Rio de Janeiro-RJ

Missão do Ipea

Produzir, articular e disseminar conhecimento para aperfeiçoar as políticas públicas e contribuir para o planejamento do desenvolvimento brasileiro.

