

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM
ENGENHARIA**

KAREN MIDORI NAGAI

**Curva de custo marginal de abatimento de gases do efeito
estufa**

**São Paulo
2014**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA EM
ENGENHARIA**

KAREN MIDORI NAGAI

**Curva de custo marginal de abatimento de gases do efeito
estufa**

Monografia apresentada ao curso de pós-graduação em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética do Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE) da Universidade de São Paulo

ORIENTAÇÃO: Prof. Dra. Patricia Helena Lara dos Santos Matai

**São Paulo
2014**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Nagai, Karen Midori.

Curva de custo marginal de abatimento de gases do efeito estufa / Karen Midori Nagai; orientadora Patricia Helena Lara dos Santos Matai. – São Paulo, 2014.

Monografia – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Curva de custo marginal de abatimento de gases do efeito estufa (curva MAC) 2. Gases do efeito estufa 3. Economia de baixo carbono.

Agradecimentos

Agradeço a minha família e, principalmente, aos meus pais por sempre apoiarem as minhas escolhas.

Aos meus colegas de trabalho que me proporcionaram e continuam me proporcionando novos desafios.

Ao Fernando A. Kushikawa e aos amigos que encontrei nessa jornada.

A minha orientadora que me direcionou até a conclusão deste trabalho.

RESUMO

NAGAI, K. M. Curva de custo marginal de abatimento de gases do efeito estufa. Monografia – Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Historicamente, os países desenvolvidos têm sido responsáveis por grande parcela das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE). Contudo, países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, China e Índia, são atualmente considerados como um dos países que mais emitem os GEE. As atividades antrópicas atrelada à necessidade em se atender a crescente demanda por produtos e serviços e, a diminuir a emissão desses gases para a atmosfera apontam para necessidade do uso de alternativas menos impactantes ao meio ambiente. Nesse contexto, a Curva de Custo Marginal de Abatimento de Gases do Efeito Estufa – CCMA (conhecida como “MAC” ou “MACC” do inglês *Marginal Abatement Cost Curves*) surge como uma ferramenta para avaliar o custo de reduzir emissões GEE em determinados setores e/ou medidas de mitigação. Desta forma, esta ferramenta visa contribuir para a tomada de decisão com base na adoção de melhores práticas de mercado no contexto do baixo carbono e que sejam economicamente viáveis. Adicionalmente, abre espaço para discussões e propostas estratégicas para formulação de políticas que incentivem tecnologias e medidas menos degradadoras do meio ambiente.

Palavras-chave: Curva de Custo Marginal de Abatimento de Gases do Efeito Estufa, Gases do Efeito Estufa, Economia de Baixo Carbono.

ABSTRACT

NAGAI, K. M. Marginal Abatement Cost Curve of Greenhouse Gases. Monograph – Programa de Educação Continuada em Engenharia (PECE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Historically, developed countries were responsible for large portion of global greenhouse gas (GHG) emissions. However, countries under development, as it is the case of Brazil, China and India, are currently considered one of the countries with large GHG emissions. The anthropogenic activities linked with the necessity in attending the growing demand for products and services and, decreasing the emission of these gases to the atmosphere indicates the necessity of using alternatives less impactful to environment. In this context, the Marginal Abatement Cost Curve of Greenhouse Gases (MACC) becomes as a tool to evaluate the cost of GHG emission reduction of determined sectors and/or mitigating measures. Therefore, this tool aims to contribute for investment decision based on the adoption of best market practices in the context of low carbon that are economically feasible. Furthermore, it provides space for discussions and strategic proposals for policymaking that incentive technologies and measures less impactful for environment.

Keywords: Marginal Abatement Cost Curve of Greenhouse Gases, Greenhouse Gases, Low-Carbon Economy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta total de energia primária, participação por fonte (1970 – 2012)	7
Figura 2 – Consumo final de energia por fonte (1970 – 2012)	8
Figura 3 – Evolução do consumo final de energia no Brasil em tep (2003 – 2012)...	10
Figura 4 – Consumo final de energia por subsetor industrial no Brasil em 10^3 tep (2005 – 2012)	11
Figura 5 – Mecanismo do efeito estufa.....	13
Figura 6 – Alterações na temperatura, nível do mar e cobertura de neve do Hemisfério Norte de 1850 a 2000.....	15
Figura 7 – Teia de relações dos impactos associados ao aquecimento global	16
Figura 8 – Representatividade das emissões totais brasileira de GEE em 2005	17
Figura 9 - Número de atividades de projeto no âmbito do MDL no mundo, em agosto de 2010	23
Figura 10 – Rateio de projetos MDL do México, Brasil, China e Índia em outubro de 2010	24
Figura 11 - Número de projetos por escopo setorial no Brasil em agosto de 2010 ...	25
Figura 12 – Emissões de GEE por setor em 2005 e projeções para 2030 (em GtCO ₂ e).....	27
Figura 13 – Oportunidades de abatimento de GEE no Brasil em 2030.....	32
Figura 14 – Curva MAC para a economia brasileira baseado em uma taxa de desconto de 4% de 2005 a 2030 - custo médio de abatimento de € 9/tCO ₂ e	33
Figura 15 – Curva de custo de redução de GEE no setor de siderurgia para 2030 – custo médio de abatimento de EUR 4/tCO ₂ e	34
Figura 16 – Curva de custo de redução de GEE no setor químico para 2030 - custo médio de abatimento de EUR -18/tCO ₂ e.....	35
Figura 17 – Curva de custo de redução de GEE no setor de cimento para 2030 - custo médio de abatimento de EUR -13/tCO ₂ e	36
Figura 18 – Estrutura utilizada nas projeções de demanda de energia.....	38
Figura 19 – Curva MAC baseada em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030 – custo de abatimento abaixo de USD 50 por tCO ₂ e	46
Figura 20 – Curva MAC baseada em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030 – custo de abatimento acima de USD 50 por tCO ₂ e.....	47

Figura 21 – Custo de abatimento por tipo de medida de mitigação de CO ₂ baseado em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030	48
Figura 22 – Custo de abatimento por tipo de medida de mitigação de CO ₂ baseado em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030 (medidas de eficiência energética agregada)	49
Figura 23 – Curva MAC industrial baseado em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030	50

LISTA DETABELAS

Tabela 1 – Representatividade do consumo final de energia por setor no Brasil de 2003 a 2012 (em %)	9
Tabela 3 – Potencial de aquecimento global (GWP) dos principais gases de efeito estufa.....	14
Tabela 4 – Medidas de redução de emissões de GEE analisadas no relatório McKINSEY&Co. (2009)	28
Tabela 5 – Medidas de redução de emissões de GEE analisadas no relatório Banco Mundial (2010)	39
Tabela 6 – Medidas no setor energético	41
Tabela 7 – Projeção das emissões no cenário de referência e cenário de baixo carbono em 2030 (em MtCO ₂ e).....	42
Tabela 8 – Potencial de redução de emissões no setor energético brasileiro de 2010 para 2030	43
Tabela 9 – Potencial de mitigação de GEE e custo de abatimento considerando cenários com 4%, 8% e 12% de taxa de desconto	44
Tabela 10–Preço do carbono para atratividade econômica empresarial (<i>break-even carbon price</i>).....	51
Tabela 11 – Barreiras e falhas de mercado que impactam na curva MAC.....	52

LISTA DE SIGLAS

- AND – Autoridade Nacional Designada
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- BEN – Balanço Energético Nacional
- CCS – Captura e Estoque de Carbono (do inglês *Carbon Capture and Storage*)
- CH₄ - Metano
- CHP – Calor e Energia Combinados (do inglês *Combined Heat and Power*)
- CIMGC – Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima
- CO₂ – Dióxido de carbono
- COP – Conferência das Partes
- CQNUMC - Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (“UNFCCC” do inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change*)
- DCP – Documento de Concepção de Projeto
- EOD – Entidade Operacional Designada
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- GEE – Gases do Efeito Estufa
- GN – Gás natural
- GSP – Processo de consulta pública global no âmbito do MDL (do inglês *Global Stakeholder Process*)
- GWP – Potencial de Aquecimento Global (do inglês *Global Warming Potential*)
- HFC – Hidrofluorocarboneto
- IEA – Agência Internacional de Energia (do inglês *International Energy Agency*)
- IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (do inglês *International Panel on Climate Change*)
- MAC – Custo marginal de abatimento de gases do efeito estufa (do inglês *Marginal Abatement Cost*)
- MCTI – Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação
- MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
- MELP – Modelo de Expansão de Longo Prazo

MIPE – Modelo Integrado de Planejamento Energético

MME – Ministério de Minas e Energia

N₂O – Óxido nitroso

PAC – Plano de Aceleração do Crescimento

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PFC – Perfluorocarboneto

PIB – Produto Interno Bruto

PNE – Plano Nacional de Energia

PNLT – Plano Nacional de Logística e Transporte

RCE – Redução de Emissão Certificada

RSU – Resíduo Sólido Urbano

SF₆ – Hexafluoreto de enxofre

TEP – Tonelada equivalente de petróleo (“toe” do inglês *tons oil equivalent*)

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (do inglês *United Nations Environment Programme*)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	5
2.	OBJETIVOS.....	5
3.	METODOLOGIA	6
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
4.1.	A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	7
4.2.	GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE)	12
4.3.	CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (CURVA MAC).....	18
4.4.	CRÉDITOS DE CARBONO	20
5.	OS MODELOS ESTUDADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS	26
5.1.	RELATÓRIO MCKINSEY&CO (2009).....	26
5.2.	RELATÓRIO BANCO MUNDIAL (2010)	37
5.3.	TESE DE DOUTORADO HENRIQUES JUNIOR (2010).....	47
5.4.	POTENCIALIDADES E FRAGILIDADES	52
6.	CONCLUSÃO	54
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Historicamente, os países desenvolvidos têm sido responsáveis por grande parcela das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE). Contudo, países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, China e Índia, são atualmente considerados como um dos países que mais emitem os GEE. As atividades antrópicas atreladas à necessidade em se atender a crescente demanda por produtos e serviços e, a diminuir a emissão desses gases para a atmosfera apontam para necessidade do uso de alternativas menos impactantes ao meio ambiente.

Nesse contexto, a Curva de Custo Marginal de Abatimento de Gases do Efeito Estufa (também conhecidas como “MAC” ou “MACC” do inglês Marginal Abatement Cost Curves) – considerada como “curva MAC” no presente trabalho – surge como uma ferramenta para avaliar o custo de reduzir emissões GEE em determinados setores e/ou medidas de mitigação. Desta forma, esta ferramenta visa contribuir para a tomada de decisão com base na adoção de melhores práticas de mercado no contexto do baixo carbono e que sejam economicamente viáveis. Adicionalmente, abre espaço para discussões e propostas estratégicas para formulação de políticas que incentivem tecnologias e medidas menos degradadoras do meio ambiente.

No presente trabalho, é realizada a análise do uso da curva MAC considerando os modelos relevantes existentes publicamente disponíveis.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral comparar os modelos e resultados das curvas MAC apresentados nos relatórios do Banco Mundial e da McKinsey&Co., e o estudo realizado por Henriques Junior em sua tese de doutorado.

Como objetivo específico, analisam-se setores e medidas disponíveis que possuam maior potencial de redução de emissões de GEE, considerando a hipótese de que o custo de investir em atividades que visem à sustentabilidade pode ser menor do que o custo de não investir.

3. METODOLOGIA

Considerando o objetivo proposto, a metodologia envolveu a análise dos modelos de curvas MAC existentes para o contexto brasileiro observando premissas adotadas, metodologias utilizadas, variação de resultados obtidos, cenários propostos, potencialidades e fragilidades da ferramenta. Assim, o presente estudo foi elaborado em 3 (etapas) etapas:

Primeira etapa: levantamento e análise do cenário brasileiro com relação ao consumo energético e emissões de GEE em cada setor. Para tanto, foram considerados o Balanço Energético Nacional – BEN 2012 (EPE, 2013) e a Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTI, 2010);

Segunda etapa: Levantamento e análise de literatura acerca do tema curva MAC;

Terceira etapa: Análise e avaliação das premissas e resultados, bem como avaliação de potencialidades e fragilidades dos modelos apresentados nos seguintes documentos:

- Relatório “Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil” preparado por McKinsey&Co. (2009);
- Relatório “Estudo de baixo carbono para o Brasil” preparado pelo Banco Mundial (2010);
- Tese de doutorado “Potencial Redução de emissão de gases do efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro” de Henriques Junior (2010).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. A MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Segundo IEA (2010), o Brasil possui uma das matrizes mais limpas do mundo considerando 44% de participação das fontes renováveis no fornecimento de energia primária total. Contudo, o Brasil continua sendo o terceiro maior emissor mundial de gases do efeito estufa (GEE).

Conforme Esparta, Lucon e Uhlig (2004)¹ *apud* Esparta (2008), em 2002, 55,8% da oferta de energia era proveniente de combustíveis fósseis. Considerando os dados completos disponíveis com base no ano de 2012 do Balanço Energético Nacional (EPE, 2013), 57,6% da oferta de energia primária² é proveniente de combustíveis fósseis conforme apresentado na Figura 1.

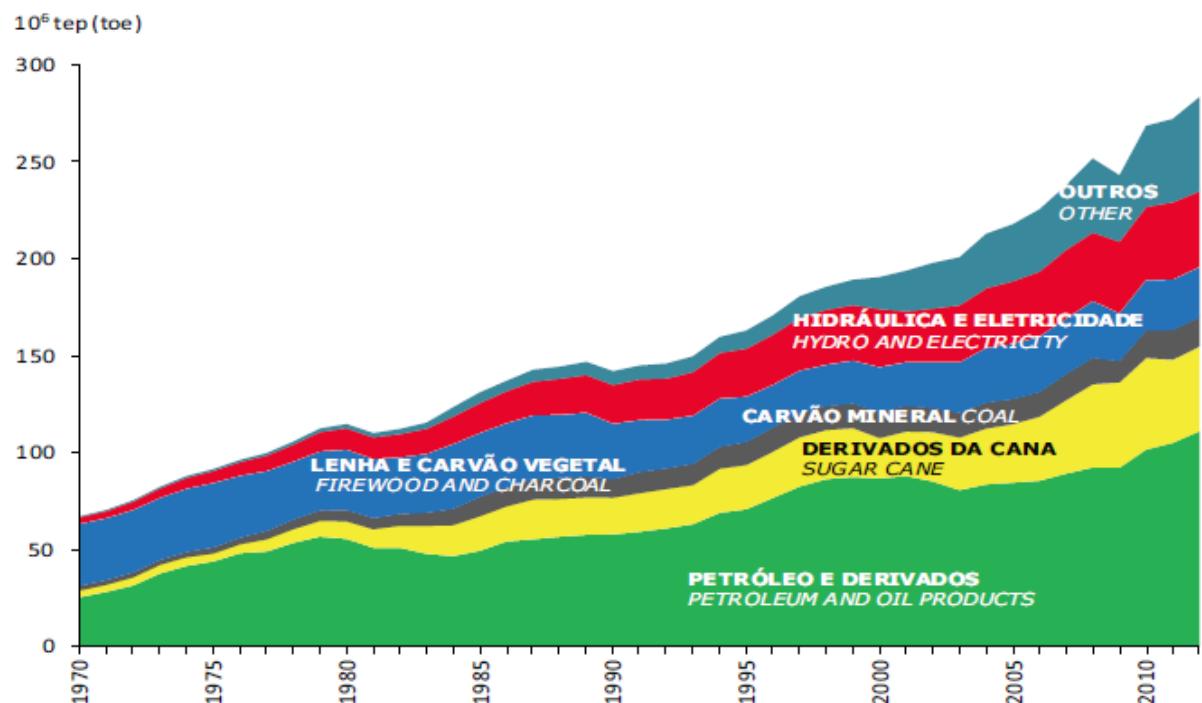


Figura 1 – Oferta total de energia primária, participação por fonte (1970 – 2012)

Fonte: EPE (2013).

¹ ESPARTA, A.R.J.; LUCON, O.S.; UHLIG, A. Energia Renovável no Brasil. X Congresso Brasileiro de Energia: Rio de Janeiro, 26 a 28 out 2004.

² Segundo EPE (2013), a oferta de energia primária está associada a produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica etc.

Verifica-se que na Figura 1 a participação do petróleo e seus derivados sempre foi predominante em relação às outras fontes na oferta de energia primária total do Brasil. A partir de 2000, pode-se observar um aumento significativo da participação de outras fontes de energia.

A Figura 2 apresenta a evolução do consumo final de energia por tipo fonte no período de 1970 a 2012.

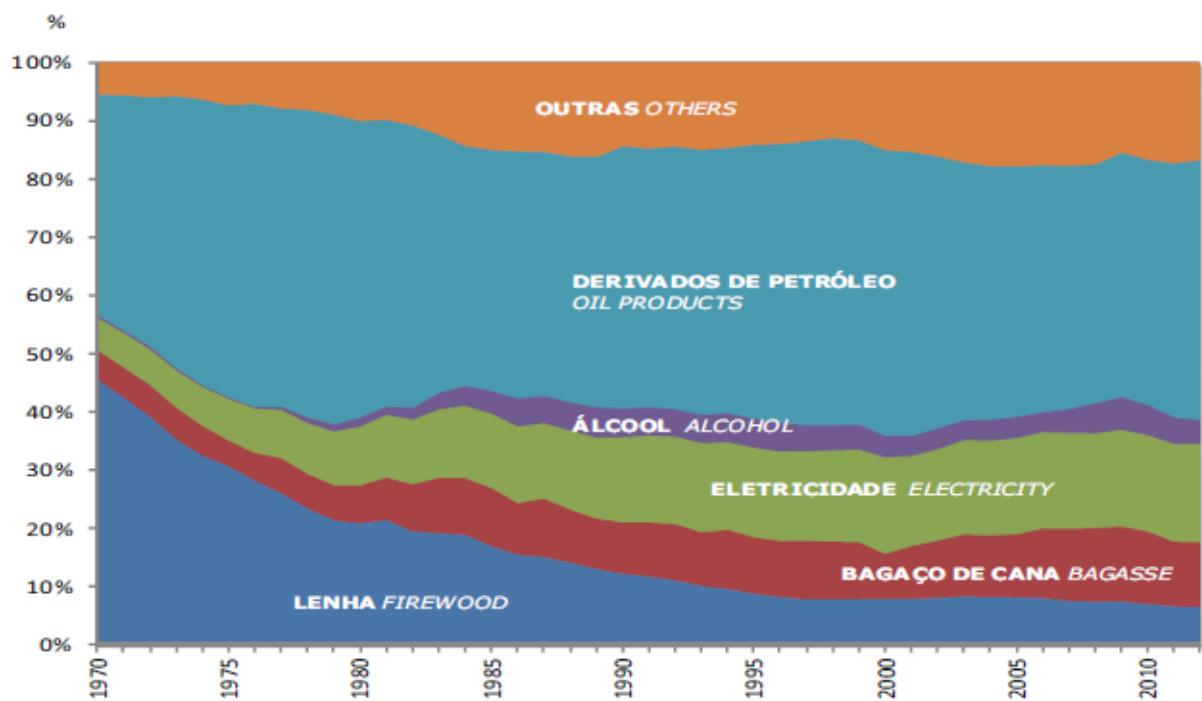


Figura 2 – Consumo final de energia por fonte (1970 – 2012)

Fonte: EPE (2013).

Acompanhada da oferta, a fonte de energia predominantemente no consumo final brasileiro é dos derivados de petróleo.

Conforme observado nas Figuras 1 e 2, a matriz energética brasileira é dependente de combustíveis fósseis. Os dados da Tabela 1 demonstram que grande parcela do consumo de energia é devido aos setores industrial e transporte, que representam respectivamente 35,1% e 31,3% do consumo total no Brasil em 2012.

**Tabela 1 – Representatividade do consumo final de energia por setor no Brasil
de 2003 a 2012 (em %)**

Sub-setor	Ano									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Consumo final	100									
Consumo final não-energético	6,9	6,8	6,8	7,1	6,6	6,5	6,8	7,3	6,8	6,6
Consumo final energético	93,1	93,2	93,2	92,9	93,4	93,5	93,2	92,7	93,2	93,4
Setor energético	8,7	8,6	9,0	9,3	9,8	10,9	10,8	10,1	9,0	9,0
Residencial	11,5	11,2	11,2	10,9	10,3	10,1	10,5	9,8	9,5	9,4
Comercial	2,8	2,7	2,8	2,8	2,8	2,7	2,9	2,8	2,9	3,0
Público	1,8	1,7	1,8	1,7	1,7	1,6	1,7	1,5	1,5	1,5
Agropecuário	4,5	4,3	4,3	4,2	4,2	4,4	4,3	4,2	4,1	4,1
Transporte - total	26,6	27,1	27,0	26,5	27,0	27,8	28,6	28,9	30,1	31,3
Rodoviário	24,4	24,8	24,6	24,2	24,6	25,4	26,1	26,5	27,6	28,7
Ferroviário	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Aéreo	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,5	1,5
Hidroviário	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6
Industrial - total	37,3	37,5	37,2	37,5	37,7	36,1	34,5	35,5	36,1	35,1
Cimento	1,5	1,4	1,5	1,5	1,6	1,7	1,7	1,7	2,1	2,1
Ferro-gusa e aço	8,9	9,1	8,7	8,1	8,2	7,8	5,9	6,8	7,1	6,6
Ferro-ligas	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
Mineração e pelotização	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,4	1,0	1,3	1,4	1,3
Não-ferrosos e outros da metalurgia	2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,6	2,4	2,7	2,9	2,7
Química	3,6	3,7	3,6	3,6	3,6	3,2	3,3	3,0	3,0	3,0
Alimento e bebidas	9,2	9,2	9,2	9,9	9,9	9,1	9,8	9,6	9,4	9,5
Têxtil	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Papel e celulose	3,9	3,8	3,9	4,0	4,0	4,0	4,2	4,2	4,1	4,0
Cerâmica	1,7	1,7	1,7	1,7	1,8	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
Outros	2,9	3,0	3,0	3,0	3,0	3,1	3,1	3,0	3,2	3,0

Fonte: EPE (2013).

Conforme apresentado na Tabela 1, a representatividade das emissões no setor de transporte aumentou constantemente no período de 2003 a 2012, ao

contrário do setor industrial, que apresentou uma pequena variação para o mesmo período.

A Figura 3 apresenta a evolução do consumo final de energia no Brasil em tonelada equivalente de petróleo (tep)³ de 2003 a 2012.

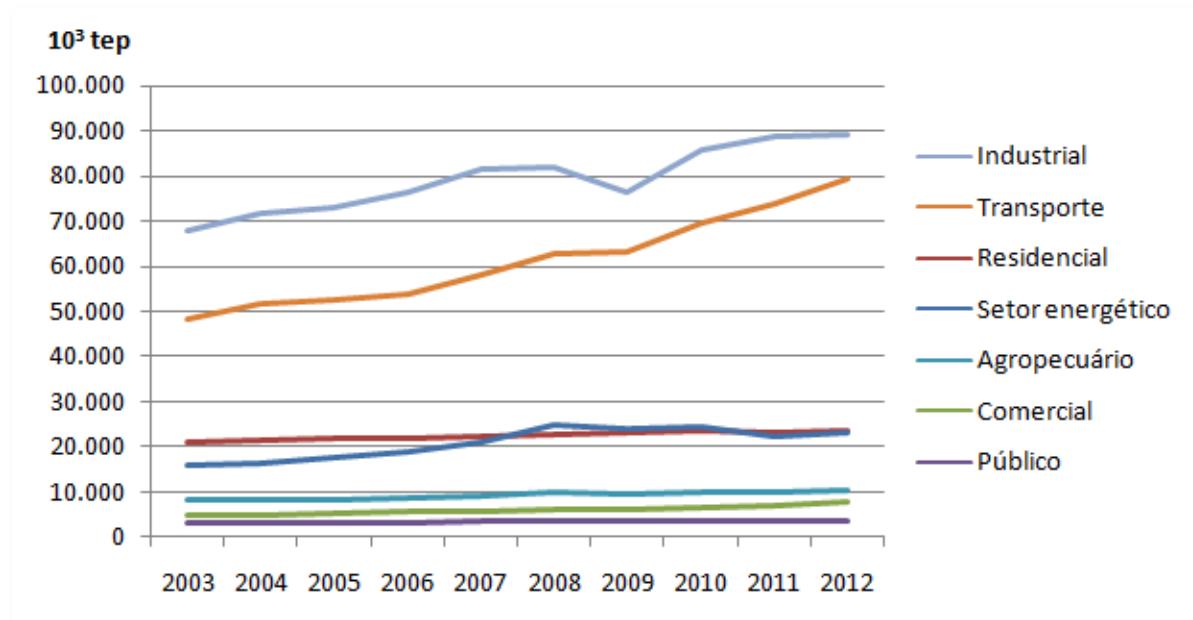


Figura 3 – Evolução do consumo final de energia no Brasil em tep (2003 – 2012)

Fonte: EPE (2013).

Conforme apresentado na Figura 3, o consumo final de energia no Brasil passou de 181.566×10^3 tep em 2003 para 253.422×10^3 tep em 2012 (39,6% de aumento). Observa-se na Figura 3, que o setor que mais aumentou o consumo de energia foi o setor de transporte, que aumentou aproximadamente 64,2% entre 2003 a 2012, passando de 48.291×10^3 para 79.308×10^3 tep. Por outro lado, o setor residencial foi aquele com menor aumento (13,7%), passando de 20.902×10^3 para 23.761×10^3 tep.

³ Tep – tonelada equivalente de petróleo (“toe” em inglês *tons oil equivalent*). Unidade de medida utilizada na comparação do poder calorífico de diferentes formas de energia com o petróleo. A tep corresponde a energia que se pode obter a partir de uma tonelada de petróleo padrão (ANEEL, 2008).

A Figura 4 apresenta a evolução do consumo final de energia por subsetor industrial no Brasil em 10^3 tep no período de 2005 a 2012.

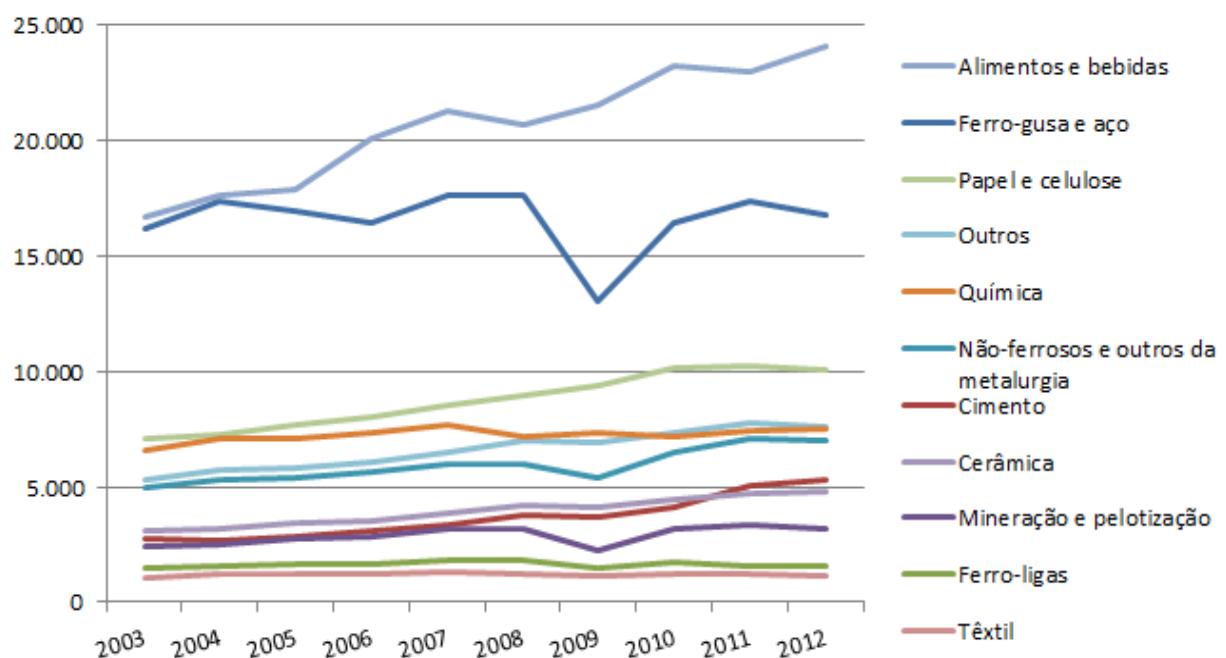


Figura 4 – Consumo final de energia por subsetor industrial no Brasil em 10^3 tep (2005 – 2012)

Fonte: EPE (2013).

A partir da Figura 4, no caso do setor industrial, verifica-se um aumento de 31,4% de consumo de energia de 2003 a 2012, passando dos 67.688×10^3 para 88.966×10^3 tep, com expressiva contribuição do aumento do consumo de energia do subsetor de cimento. O referido subsetor teve um aumento de 92,2% de consumo de energia passando dos 2.768×10^3 tep em 2003 para 5.320×10^3 tep em 2012.

A Tabela 2 apresenta a evolução da representatividade do consumo de energia por subsetor industrial. Analisando o consumo energético do setor industrial em 2012, é possível verificar que o subsetor de alimentos e bebidas representa a maior parcela do consumo energético (24.052×10^3 tep, ou seja, 27,0% do total), seguido pelo subsetor ferro-gusa e aço (18,9% do total) e papel e celulose (11,3% do total).

**Tabela 2– Representatividade do consumo de energia por subsetor industrial
(2005 – 2012)**

Sub-setor	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Cimento	4,1%	3,7%	3,9%	4,1%	4,1%	4,6%	4,8%	4,9%	5,7%	6,0%
Ferro-gusa e aço	23,9%	24,3%	23,2%	21,6%	21,8%	21,6%	17,1%	19,2%	19,6%	18,9%
Ferro-ligas	2,2%	2,2%	2,2%	2,1%	2,2%	2,2%	1,9%	2,0%	1,8%	1,8%
Mineração e pelotização	3,6%	3,5%	3,8%	3,8%	3,9%	3,9%	3,0%	3,7%	3,8%	3,6%
Não-ferrosos e outros da metalurgia	7,4%	7,4%	7,4%	7,5%	7,3%	7,3%	7,0%	7,6%	8,0%	7,8%
Química	9,7%	9,9%	9,8%	9,7%	9,5%	8,8%	9,6%	8,4%	8,4%	8,4%
Alimentos e bebidas	24,6%	24,6%	24,6%	26,5%	26,2%	25,4%	28,3%	27,2%	25,9%	27,0%
Têxtil	1,6%	1,7%	1,7%	1,6%	1,6%	1,5%	1,5%	1,4%	1,4%	1,3%
Papel e celulose	10,5%	10,2%	10,6%	10,5%	10,5%	11,0%	12,3%	11,8%	11,5%	11,3%
Cerâmica	4,6%	4,5%	4,7%	4,6%	4,7%	5,1%	5,4%	5,2%	5,3%	5,4%
Outros	7,9%	8,0%	8,0%	8,0%	8,0%	8,6%	9,1%	8,5%	8,7%	8,5%

Fonte: EPE (2013).

A evolução do consumo de energético apresenta um aumento do consumo final de energia no Brasil e a tendência aponta para a continuação deste aumento. De acordo com MME/EPE (2012), é estimado um aumento de consumo final de energia de 4,8% de 2011 a 2021. Para o mesmo período, é estimado um aumento de 4,4% no consumo de energia no setor industrial.

Dessa forma, é possível verificar a importância da análise de alternativas que visem à redução do consumo de energia e ao uso eficiente, principalmente, no caso das indústrias eletrointensivas como é o caso do alumínio, siderurgia, ferro-ligas, pelotização, cobre, celulose e papel, soda-cloro, petroquímica e cimento responde por parcela expressiva do consumo de energia elétrica que chega a 40% do consumo total industrial (MME/EPE, 2012).

4.2. GASES DO EFEITO ESTUFA (GEE)

O balanço de energia na Terra está associado à radiação solar. Considerando todos os comprimentos de onda, 50% da luz incidente na Terra alcança a superfície/atmosfera onde é absorvida, outros 20% são absorvidas por gotículas de água presentes no ar e gases – ozônio estratosférico e oxigênio diatômico no caso

da luz ultravioleta e dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) no caso da luz infravermelha –, e os 30% restante são refletidos de volta para o espaço pelas nuvens, gelo, neve, areia e outros corpos refletores (BAIRD, 2002).

Alguns gases presentes na atmosfera podem absorver temporariamente luz infravermelha térmica de comprimentos de ondas específicos refletidos pelo Sol. Sendo assim, nem toda radiação infravermelha emitida pela Terra retorna para o espaço. Logo após a sua absorção por alguns gases, a luz infravermelha é reemitida aleatoriamente, de modo que parte é redirecionada para a superfície da Terra (Figura 5).



Figura 5 – Mecanismo do efeito estufa

Fonte: figura adaptada de BUTCHER (2007).

Os Gases de Efeito Estufa (GEE) são responsáveis por reter o calor na atmosfera de modo que a temperatura permaneça dentro de uma faixa adequada à sobrevivência dos ecossistemas. São considerados gases do efeito estufa o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o hexafluoreto de enxofre (SF_6), a família de hidrofluorocarbonetos (HFCs) e a família de perfluorocarbonetos (PFCs) (LOPES, 2002).

O potencial de aquecimento global (“GWP” do inglês Global Warming Potential) é a métrica comumente utilizada para comparar o potencial de aquecimento de cada gás do efeito estufa. Assim, as emissões de CH₄, N₂O, SF₆, HFCs e PFCs são expressas como CO₂ equivalente (CO₂e) considerando o respectivo GWP de cada gás, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Potencial de aquecimento global (GWP) dos principais gases de efeito estufa

Gases	Família / Tipo	GWP (horizonte de 100 anos)
CO ₂	CO ₂	1
CH ₄	CH ₄	25
N ₂ O	N ₂ O	298
SF ₆	SF ₆	22.800
HFC-23	HFC	14.800
HFC-32	HFC	675
HFC-125	HFC	3.500
HFC-134a	HFC	1.430
HFC-143a	HFC	4.470
HFC-152a	HFC	124
HFC-227ea	HFC	3.220
HFC-236fa	HFC	9.810
HFC-245fa	HFC	1.030
HFC-365mfc	HFC	794
HFC-43-10mee	HFC	1.640
PFC-218 (C3F8)	PFC	8.830
PFC-116 (C2F6)	PFC	12.200
PFC-14 (CF4)	PFC	7.390
Perfluorbutano (PFC 3-1-10)	PFC	8.860
Perfluorciclobutano (PFC-318)	PFC	10.300
Perfluorpentano (PFC-4-1-12)	PFC	9.160
Perfluorhexano (PFC 5-1-14)	PFC	9.300
PFC-9-1-18	PFC	> 7.500

Fonte: IPCC (2007)

Ao aumentar a capacidade da atmosfera de absorver irradiação infravermelha, a intensificação das emissões de GEE perturba a forma com que o clima mantém o equilíbrio entre a radiação que penetra na Terra e a que é refletida para o espaço.

De acordo com o IPCC (2007), vários dos sistemas naturais estão sendo afetados pelas mudanças climáticas causadas pelo aumento da concentração de GEE e, consequentemente, aumento de temperatura na Terra. A Figura 6 apresenta as alterações na temperatura, nível do mar e cobertura de neve do Hemisfério Norte no período de 1850 a 2000.

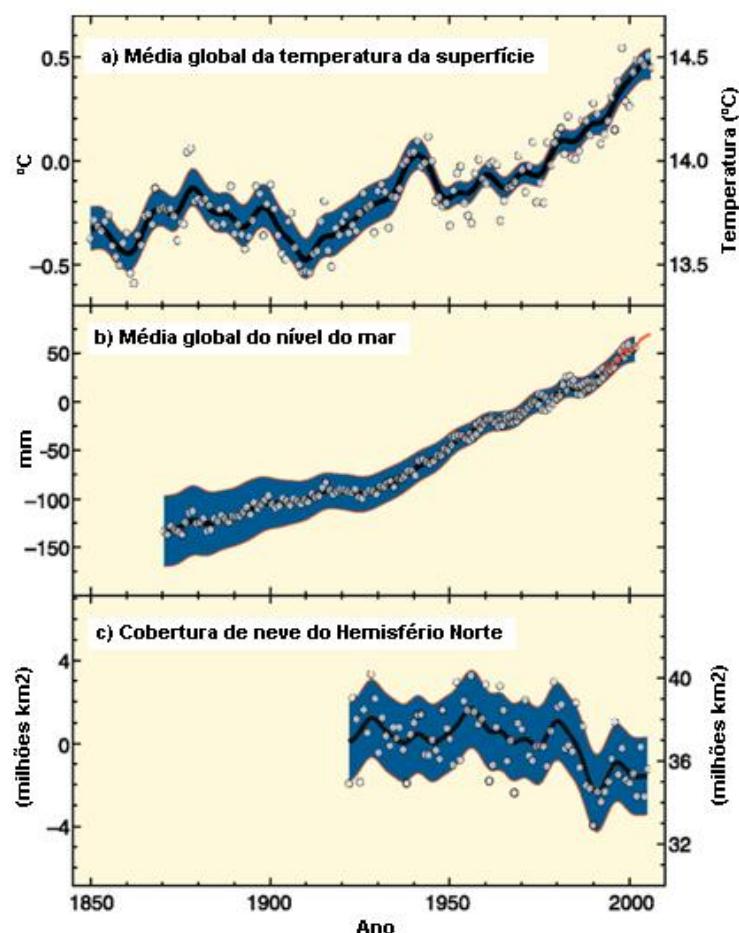


Figura 6 – Alterações na temperatura, nível do mar e cobertura de neve do Hemisfério Norte de 1850 a 2000

Fonte: IPCC (2007).

Como pode ser observado na Figura 6, houve um aumento da média global de temperatura da superfície e, consequentemente, o aumento da média global do nível do mar e a redução da cobertura de neve do Hemisfério Norte.

Considerando que a queima dos combustíveis fósseis é considerada como sendo a maior responsável pelo lançamento de GEE para a atmosfera (principalmente do CO₂), estudos indicam o aumento da concentração de GEE durante os últimos anos devido intensificação das atividades antrópicas. De acordo com o IPCC (2007), a concentração de CO₂ na atmosfera se intensificou a partir da revolução industrial (final do século XVIII), que demandou a queima de carvão mineral e petróleo como fontes de energia. Desde então, a concentração de CO₂ passou de 280 ppm (partes por milhão) no ano de 1750 para 400 ppm em 2013, o que representa um incremento de aproximadamente 43% (UNEP, 2013).

As mudanças climáticas e seus possíveis efeitos impactam não só o meio ambiente, mas o modo de vida dos seres humanos e todas as formas de vida na Terra (Figura 8).

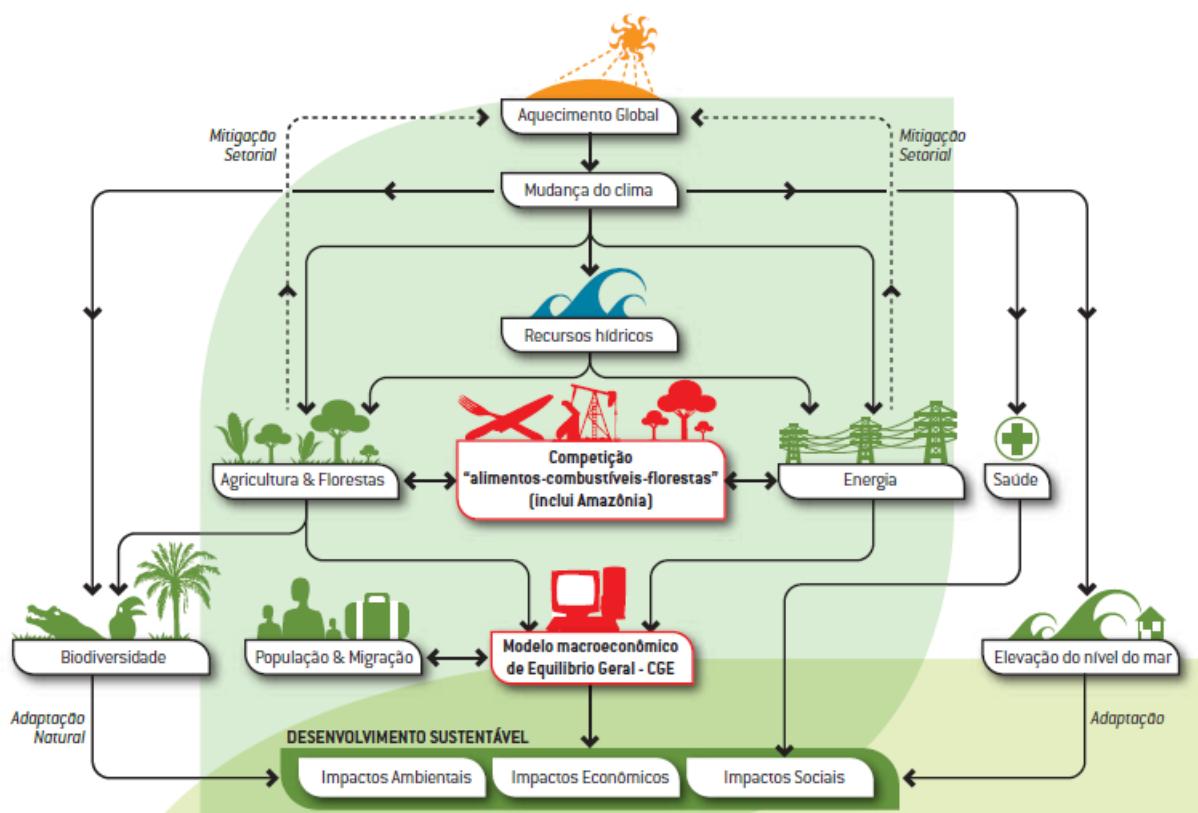


Figura 7 – Teia de relações dos impactos associados ao aquecimento global

Fonte: MARGULIS e DUBEUX (2010).

No contexto brasileiro e considerando os dados mais recentes publicamente disponíveis, em 2005, as emissões entre os setores de energia, processos industriais, uso de solventes e outros produtos, agropecuária, tratamento de

resíduos, mudança do uso da terra e florestas somaram 2.192.522 tCO₂e (MCTI, 2010)⁴ (Figura 8).

Desta forma, o Brasil é responsável por 5% das emissões de GEE totais, ou seja, é o terceiro maior emissor mundial (IEA, 2010).

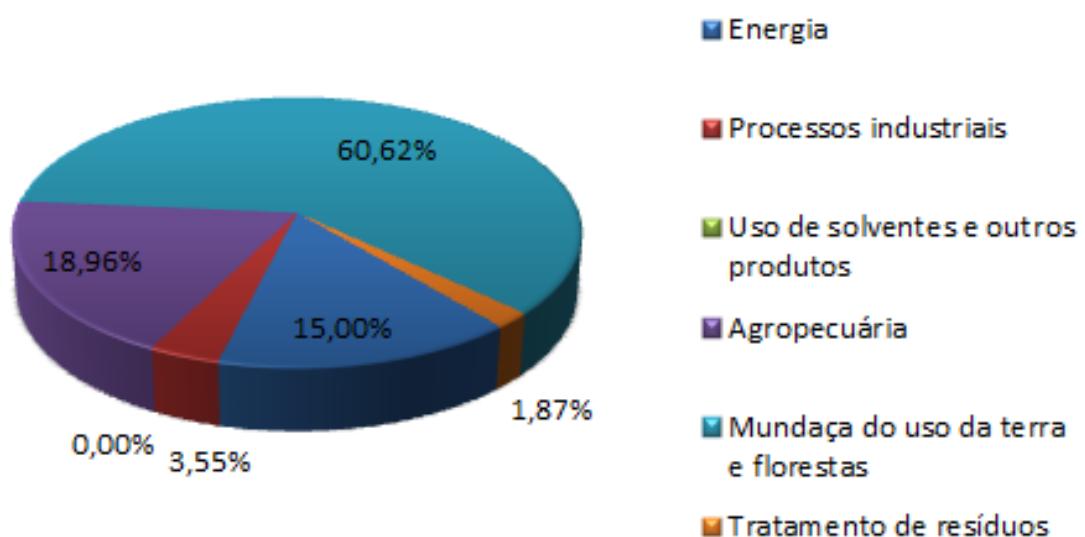


Figura 8 – Representatividade das emissões totais brasileira de GEE em 2005

Fonte: MCTI (2010).

Como observado na Figura 8, as maiores emissões de GEE estão associadas à mudança do uso da terra e florestas (60,62%), seguido pela agropecuária (18,96%) e o setor energético (15%).

Com relação às emissões de GEE do setor industrial, deve-se considerar as emissões de processos industriais (que representam 3,55% do total de emissões) e a parcela das emissões devido à combustão de combustíveis do setor de energia. A parcela de emissões industriais no setor energético equivale a 78.858 tCO₂e, ou seja, 24,0% das emissões do setor energético. Desta forma, as emissões devido a processos industriais (77.927 tCO₂e) somadas as emissões do setor energético (78.858 tCO₂e) resultam num total de 156.785 tCO₂e de emissões do setor industrial (processos industriais e consumo de energia). Tais emissões representam 7,2% do total de emissões de GEE brasileiras.

⁴ Para a contabilização das emissões foi considerado o Potencial de Aquecimento Global (do inglês Global Warming Potential – GWP), que é a métrica mais comumente utilizada para contabilizar gases de efeito estufa.

Por fim, temos as emissões do setor de resíduos, que representam 1,87% do total de emissões de GEE e, zero de emissões de GEE devido ao uso de solventes e outros produtos uma vez que estes emitem apenas compostos orgânicos voláteis e, portanto, não são considerados GEE.

4.3. CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (CURVA MAC)

Conforme CANELAS (2012), Curvas de Custo Marginal de Abatimento – CCMA (também conhecidas como “MAC” ou “MACC” do inglês Marginal Abatement Cost Curves) são curvas de oferta de opções de abatimento de emissões em um ano específico, ou seja, quantidade de oferta de GEE (Q) por determinado custo de abatimento (P).

O BANCO MUNDIAL (2010) afirma que a curva MAC é “*usada amplamente para analisar políticas de mitigação de GEE, e representa em forma de gráfico a atração econômica de dada opção de mitigação em relação ao seu tamanho potencial de mitigação*”. Graficamente, a largura da barra representa o potencial de abatimento de emissões de GEE de determinada medida/tecnologia/setor e a altura da barra o custo médio para evitar a emissão de 1 tCO₂e.

Para a elaboração das curvas MAC existem 2 (duas) abordagens (CANELAS, 2012):

- *Bottom-up*: análise mais tecnológica (de engenharia), baseada nas emissões de determinada tecnologia. É recomendada para análise de emissões e custos de uma determinada organização. Envolve os seguintes modelos: modelos de otimização, simulação, de equilíbrio parcial e multi-agentes;
- *Top-down*: análise mais macroeconômica, baseada no comportamento de variáveis econômicas. É recomendada para análise de emissões e custos de uma atividade econômica, município, estado ou país. Envolve os seguintes modelos: modelos de insumo-produto, de equilíbrio geral, econométrico, de sistemas complexos.

Na maioria dos casos, são utilizadas as abordagens *bottom-up* e *top-down* em conjunto – os chamados modelos híbridos.

Para a elaboração da curva MAC, as Equações 1, 2 e 3 são utilizadas (BANCO MUNDIAL, 2010). A Equação 1 refere-se ao custo de atividade/tecnologia de mitigação de GEE para o ano n .

$$AC_n^{Activity} = \frac{ANC_n^{abatement} - ANC_n^{base}}{AE_n^{base} - AE_n^{abatement}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$AC_n^{Activity}$ = Custo de abatimento de atividade/tecnologia de mitigação de GEE para o ano n ;

$ANC_n^{abatement}$ = Custo anual líquido da tecnologia de abatimento para o ano n ;

ANC_n^{base} = Custo anual líquido da tecnologia usada no Cenário de Referência para o ano n ;

$AE_n^{abatement}$ = Emissão anual de GEE com tecnologia de abatimento para o ano n

AE_n^{base} = Emissão anual de GEE com tecnologia usada no Cenário de Referência para o ano n .

A Equação 2 é empregada para o cálculo do custo anual líquido da tecnologia de abatimento ($ANC_n^{abatement}$) ou do cenário de referência (ANC_n^{base}) do ano x (atual) para o ano n (ano que se quer analisar).

$$ANC_n = \frac{\text{INV. } r \frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} + AOMC_n + AFC_n - AREV_n}{(1 + r)^{(n-x)}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

ANC_n = Custo anual líquido da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência (ano x) para o ano n ;

INV = Investimento total ou custo capital de da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência;

AOMC = Custo anual de operações e manutenção da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência;

AFC = Custo anual de combustíveis de tecnologia da tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência;

AREV = Receita anual gerada pela tecnologia de abatimento ou do Cenário de Referência;

r = Taxa de desconto;

t = Vida útil da tecnologia;

x = Ano do Cenário de Referência;

n = Ano.

Vale ressaltar que os custos de abatimento podem variar a cada ano e, dessa forma, devem ser ponderados com a mitigação anual correspondente. Assim, o custo de abatimento anual médio de determinada atividade/medida é dado pela Equação 3.

$$AAAC^{Activity} = \frac{\sum_n AC_n^{Activity} \times MIT_n^{Activity}}{\sum_n MIT_n^{Activity}}$$
 Equação 3

Onde:

$AAAC^{Activity}$ = Custo de abatimento anual médio da atividade/tecnologia de mitigação de GEE no período analisado;

$AC_n^{Activity}$ = Custo de abatimento da atividade/tecnologia de mitigação de GEE no ano n;

$MIT_y^{Activity}$ = Mitigação de GEE da atividade/tecnologia no ano n.

4.4. CRÉDITOS DE CARBONO

Considerando o aumento das emissões de GEE (principalmente do CO₂) e, consequentemente, o aumento de temperatura na Terra, surge a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), adotada durante a Eco-92⁵ com o objetivo de estabilizar as concentrações de GEE que causam o aumento da temperatura na Terra.

⁵ Eco-92 ou Cúpula da Terra foi uma das reuniões realizadas pela Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), realizada entre 3 a 14 de junho de 1992, no Rio de Janeiro.

Assim, em 1997, surgiu o Protocolo de Quioto com o objetivo de reduzir em 5% em média do GEE com base nos níveis de emissões na década de 1990. As metas são diferenciadas entre as Partes, em consonância com o princípio das responsabilidades comuns, porém diferenciadas, adotado pela CQNUMC, devendo ser atingidas no período compreendido entre 2008 e 2012, considerado como o primeiro período de compromisso do Protocolo de Quioto (LOPES, 2002). Para atingir tal meta, foram estabelecidos três mecanismos:

- I. Implementação Conjunta (*joint implementation*);
- II. Comércio de Emissões (*trade emissions*);
- III. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*clean development mechanism*).

A Implementação Conjunta e o Comércio de Emissões são destinados somente aos países que possuem metas de reduções de emissões, ou seja, aos Países “Anexo I”⁶ através da aquisição ou transferência de Unidades de Redução de Emissões (UREs) ou alterações da Unidade de Quantidade Atribuída (UQA).

Dentre os mecanismos do Protocolo de Quioto, o MDL é o único que possibilita a participação de países em desenvolvimento, os chamados países “não-Anexo I”, como é o caso do Brasil (LOPES, 2002). No MDL, as Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) são originadas em projetos desenvolvidos nos países “não-Anexo I” e vendidos para os Países Anexo I. Para a elaboração de um projeto MDL no Brasil, 1 (uma) RCE equivale a 1 tonelada de CO₂e. No âmbito do MDL, as seguintes etapas devem ser seguidas (UNFCCC, 2005):

- (i) Elaboração de Documento de Concepção de Projeto (DCP): DCP é um documento realizado pelos proponentes do projeto e/ou empresas contratadas de consultoria que deve conter: descrição geral da atividade de projeto, aplicação da metodologia de linha de base e monitoramento, duração da atividade de projeto e período de créditos, impactos ambientais, comentários dos atores locais envolvidos, contato dos

⁶ Austrália, Áustria, Belarus, Bélgica, Bulgária, Canadá, Croácia, República Tcheca, Dinamarca, Estônia, União Européia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Romênia, Federação Russa, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Ucrânia, Estados Unidos, Reino Unido e Irlanda do Norte.

- participantes do projeto, informação sobre financiamento público e plano de monitoramento.
- (ii) Validação: é uma avaliação da atividade de projeto realizada pelas Entidades Operacionais Designadas (EODs). EODs são entidades credenciadas junto à CQNUMC responsáveis pela avaliação do projeto com relação à conformidade local, regional e nacional, bem como as regras do Comitê Executivo do MDL e metodologias. O processo de validação inclui uma visita no local do projeto e um processo de consulta pública (do inglês *Global Stakeholder Process - GSP*), no qual o projeto fica disponível por 30 (trinta) dias para receber comentários. Se a atividade de projeto cumpre com todos os requisitos, um Relatório de Validação e Certificação positivo é emitido.
- (iii) Aprovação do País Anfitrião: A Autoridade Nacional Designada (AND) deve confirmar que a atividade projeto proposta contribui para o desenvolvimento sustentável do País Anfitrião. Esta confirmação é obtida através da emissão da Carta de Aprovação do projeto. A AND brasileira, representada pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC), exige vários requerimentos para a emissão da Carta de Aprovação como por exemplo: licenças válidas, um relatório que contem informações sobre como o projeto contribui para o desenvolvimento sustentável do País Anfitrião – conhecido como o “Anexo III” –, realização de consulta pública local, um Relatório de Validação positive, um DCP, declarações do participante do projeto confirmado o canal de comunicação com a Comissão e conformidade com a legislação ambiental e trabalhista (CIMGC, 2008).
- (iv) Registro na CQNUMC: é a aceitação formal pelo Comitê Executivo do MDL de um projeto validado.
- (v) Verificação: é uma auditoria também realizada pelas EODs, necessária para a emissão das Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) relacionadas a uma atividade de projeto registrada. Se o projeto segue todos os requisitos necessários, um Relatório de Verificação e Certificação positivo é emitido.
- (vi) Renovação do período de crédito: de acordo com as regras do MDL, uma atividade de projeto pode ter a) máximo de 7 (sete) anos que pode

ser renovável 2 (duas) vez ou b) máximo de 10 (anos) com não opção de renovação. Quando um projeto é renovado, o projeto retorna para o início do ciclo do MDL com a elaboração de um DCP, contudo, não é necessário receber a Carta de Aprovação do projeto pela AND do País Anfitrião.

Conforme verifica-se na Figura 9, o Brasil ocupava o terceiro lugar no *ranking* de projetos de MDL em meados de 2010 (com 457 projetos) estando longe da China (2.470 projetos) e Índia (1.752 projetos) apesar do enorme potencial brasileiro para esse mercado de reduções de emissão.

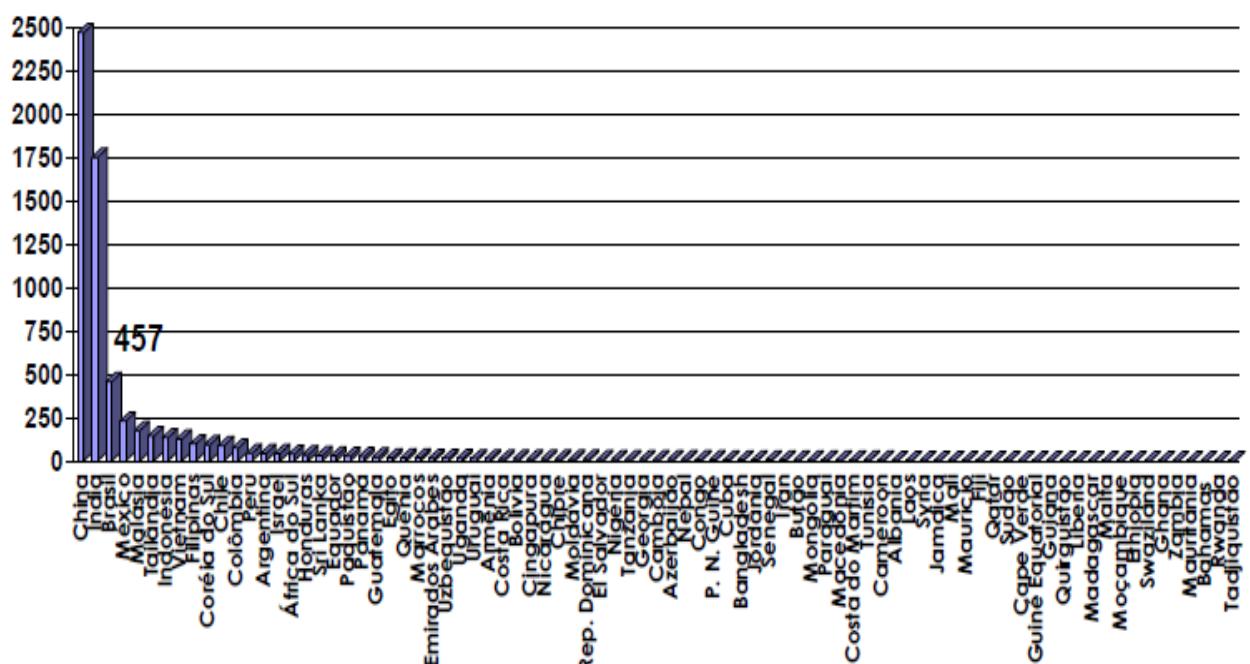


Figura 9 - Número de atividades de projeto no âmbito do MDL no mundo, em agosto de 2010

Fonte: MCTI (2010).

A Figura 10 apresenta a evolução do rateio de projetos MDL entre o México, Brasil, China e Índia entre 2004 a 2010.

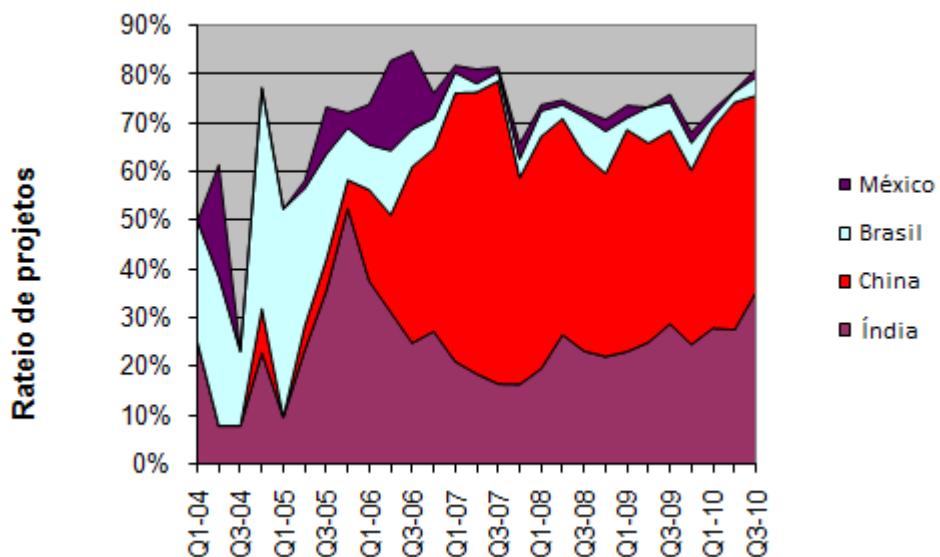


Figura 10 – Rateio de projetos MDL do México, Brasil, China e Índia em outubro de 2010

Fonte: CD4CDM (2010).

Na Figura 10, Q1 e Q3 representam o 1º e o 3º quadrimestre, respectivamente; os números após o “-“ se referem ao ano. Assim, é possível visualizar a significativa evolução da participação de projetos da China e da Índia. Ao contrário, a participação de projetos no Brasil vem diminuindo desde 2006 em relação a projetos de outros países.

Até o início do segundo semestre de 2010, 243 projetos haviam sido aprovados pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima – CIMGC⁷ (MCTI, 2010). É importante ressaltar que apesar de existirem 243 projetos aprovados, apenas 179 projetos foram registrados no âmbito do MDL (UNFCCC, 2010a). Ou seja, nem todo projeto aprovado pelo governo brasileiro é registrado junto a CQNUMC, visto que podem ser rejeitados pela CQNUMC por não serem elegíveis de acordo com a metodologia utilizada pelo projeto, por não conseguirem comprovar a adicionalidade, dentre outros motivos.

A Figura 11 apresenta o número de projetos MDL por escopo setorial, na qual pode ser observado que mais de 50% dos projetos MDL são de energia renovável.

⁷ Autoridade Nacional Designada (AND) criada pelo Decreto de 7 de julho de 1999 com a finalidade articular ações governamentais decorrentes da CQNUMC, sendo presidida por 10 ministérios.

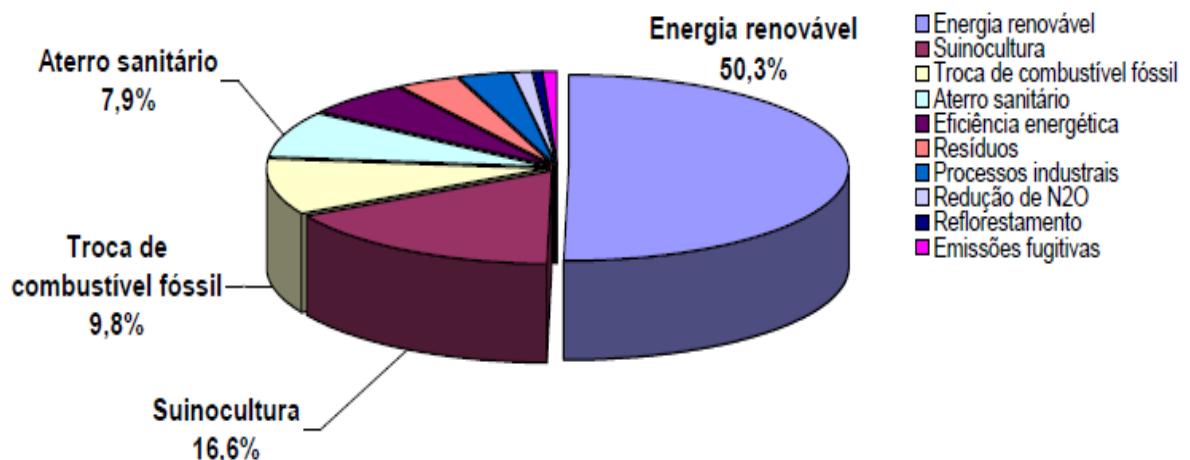


Figura 11 - Número de projetos por escopo setorial no Brasil em agosto de 2010

Fonte: MCTI (2010).

Considerando o exposto acima, o desenvolvimento e a comercialização de créditos de carbono oriundos de projetos desenvolvidos no Brasil podem ser vistos como uma oportunidade para iniciativas sustentáveis, ainda que pouco desenvolvida em relação a outros países subdesenvolvidos. As reduções de emissão de GEE através dos créditos de carbono podem ser convertidas como receitas para determinados tipos de projetos, e, dependendo do caso, viabilizar alguns projetos/medidas menos poluidoras do meio ambiente.

5. OS MODELOS ESTUDADOS E OS RESULTADOS OBTIDOS

Os dois modelos relevantes existentes de curvas MAC no contexto da economia brasileira são aqueles apresentados nos relatórios McKinsey&Co. (2009) “Caminhos para uma economia de baixa emissão de carbono no Brasil” e Banco Mundial (2010) “Estudo de baixo carbono para o Brasil”. Ambos os modelos utilizam abordagem híbrida (*top-down + bottom up*) e consideram projeções para o ano de 2030. Adicionalmente, Henriques Junior (2010) avalia o potencial de redução de emissões no contexto do setor industrial baseado nos dados do relatório do Banco Mundial em sua tese de doutorado denominada “Potencial redução de emissão de gases do efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro”.

5.1. RELATÓRIO MCKINSEY&CO (2009)

O relatório McKinsey&Co. (2009) apresenta estudos sobre o potencial econômico de mitigação de GEE de 21 países de 2005 para 2030, que incluíram o Brasil. A análise para o caso brasileiro foi realizada em 4 (quatro) fases descritas abaixo:

Fase I: Determinação de um cenário de referência

A determinação do cenário de referência se baseou no inventário de emissões de GEE publicado pelo governo brasileiro, o que delineou as emissões atuais e estimativas futuras. As previsões se baseiam nas políticas públicas em vigor a partir de 2006 e não inclui qualquer esforço adicional para o combate às mudanças climáticas.

O modelo foi delineado considerando as perspectivas de crescimento do Brasil. Assim, foi considerado o crescimento médio da população de 0,9% ao ano até 2030 e um crescimento médio do produto interno bruto (PIB) de 3,5% a.a. de 2010 a 2015 e 2,8% a.a. de 2015 a 2030. Além disso, foi considerada uma taxa de desconto de 4% a.a. e USD 60 o preço médio do barril de petróleo.

No setor industrial, o crescimento médio até 2030 adotado por subsetor foi de 4,2% a.a. para cimento, 4,6% a.a. aço, 6% a.a. para áreas de pastagem e 4,3% a.a. para áreas cultiváveis.

As emissões de GEE por setor em 2005 e sua projeção em 2030 são apresentados na Figura 12.

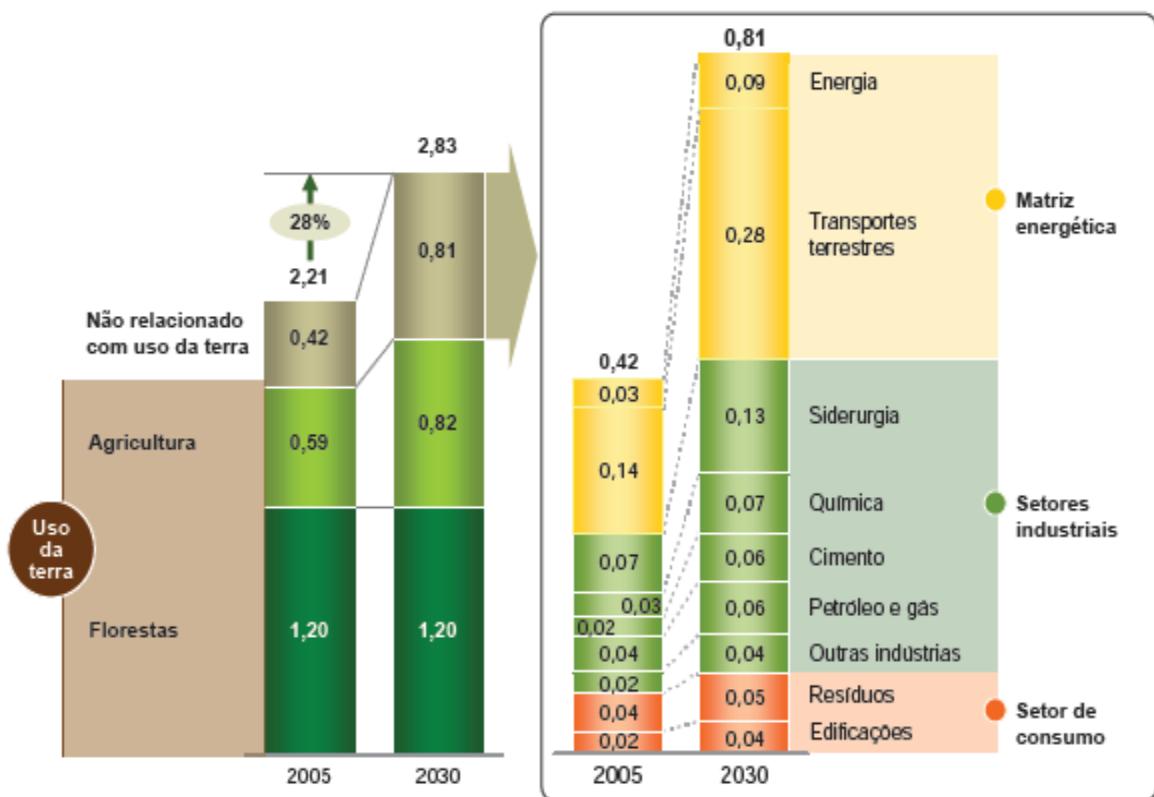


Figura 12 – Emissões de GEE por setor em 2005 e projeções para 2030 (em GtCO₂e)

Fonte: McKinsey&Co. (2009).

Como pode ser observado na Figura 12, a principal fonte de emissão de GEE (o setor florestal) se mantém constante em 2030. De acordo com o relatório McKinsey&Co. (2009), esta premissa está de acordo com a média apresentada no Plano Nacional de Mudança Climática.

No contexto brasileiro, as emissões per capita de 10 tCO₂e *per capita* em 2005 aumentariam para 14 tCO₂e *per capita* em 2030, considerando o crescimento da economia brasileira atual.

Fase II: Avaliação de oportunidades e custos para a redução de emissões de GEE

Na Fase II foram avaliadas 120 oportunidades de redução de emissões nos setores da economia brasileira, bem como seus custos. As principais medidas de

redução de emissões de GEE consideradas no relatório McKINSEY&CO. (2009) são apresentadas na Tabela 4:

**Tabela 4 – Medidas de redução de emissões de GEE analisadas no relatório
McKINSEY&Co. (2009)**

Setor	Medidas
Agricultura	Práticas de plantio direto e gestão de resíduos
	Gestão de nutrientes em plantações e pastos
	Gestão de pastos
	Arroz – inundação rasa
	Gestão de nutrientes em arroz
	Práticas agronômicas
	Pecuária – vacina antimetano
	Suplementos alimentares para gado
	Restauração de terras degradadas
	Restauração de solos orgânicos
Cimento	Uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (novos e <i>retrofit</i>)
	Substituição de clínquer por cinzas ou escória
	Uso de combustível alternativo (biomassa e resíduos)
Edificações	Pacote de eficiência para novos prédios comerciais
	Luz incandescente por LED
	Produtos eletrônicos
	Controle de iluminação em prédios novos e <i>retrofit</i>
	Linha branca
	Eletrônicos de escritório
	Ar condicionado
	Sistemas de refrigeração
	Aquecimento de água (troca de elétrico por solar)
	Aquecimento de água (troca de gás por solar)
	<i>Retrofit</i> (manutenção) de ar condicionado
	Troca de luz T12 por T8 / T5
Energia	Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)

	Redução de desmatamento (Amazônia e não-Amazônia)
Floresta	Florestamento de pastos e áreas agrícolas
	Gestão florestal
	Restauração de florestas degradadas
Pecuária	Gestão de pastos
	Suplementos alimentares para gado
	Gestão de nutrientes em pastos
	Gestão de pastos
	Vacina anti-metano
Petróleo e gás	Mudanças de comportamento e processos
	Melhorias na manutenção e controle de processo
	Planejamento
	Mudanças de comportamento e melhorias em manutenção, processos e controles - <i>upstream</i>
	Projetos de eficiência energética – <i>downstream</i>
	Projetos de eficiência energética com capex – <i>upstream</i>
	Manutenção de compressores
	Troca de vedações
	Manutenção por distribuição
	Redução do <i>flaring</i>
	Maior eficiência energética em novas construções – <i>upstream</i>
	Uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono
Química	Troca de combustível
	Sistemas de motor
	Calor e energia combinados (“CHP” do inglês <i>combined heat and power</i>)
	Craqueamento do etileno
	Intensificação de processo
	Otimização de catalisador

	Uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono
Resíduos	Reciclagem de lixo
	Geração de eletricidade de aterros
	Uso direto de gás de aterro
	Compostagem
Siderurgia	Aumento da eficiência energética (novo)
	Aumento do uso de energia renovável com a substituição do coque mineral pelo carvão vegetal (novo e <i>retrofit</i>)
	Aumento da eficiência de maquinaria e processos (<i>retrofit</i>)
	Uso de tecnologias e novas instalações mais eficientes
	Uso de tecnologias de captura e armazenamento de carbono (novos e <i>retrofit</i>)
Veículos Transporte	Veículos leves (melhorias)
	Leves híbridos com e sem plug-in
	Veículos pesados (melhorias)
	Veículos elétricos
	Veículos comerciais (melhorias)
	Uso de etanol de biomassa
	Uso de etanol de cana-de-açúcar

Fonte: McKINSEY&CO. (2009)

Segundo o relatório McKINSEY&CO. (2009), as medidas consideradas foram aquelas que exigem mobilização de tecnologias atuais, além de um pequeno número de tecnologias emergentes (em fase de amadurecimento). Desta forma, não foram consideradas tecnologias experimentais, incipientes ou que exijam mudanças significativas de hábito. Além disso, não foi considerado o tempo necessário para a adoção das novas medidas ou evolução de uma dada medida/tecnologia.

Apesar do *disclaimer* do relatório mencionado acima, este não define ou esclarece quais as tecnologias consideradas atuais, emergentes ou experimentais.

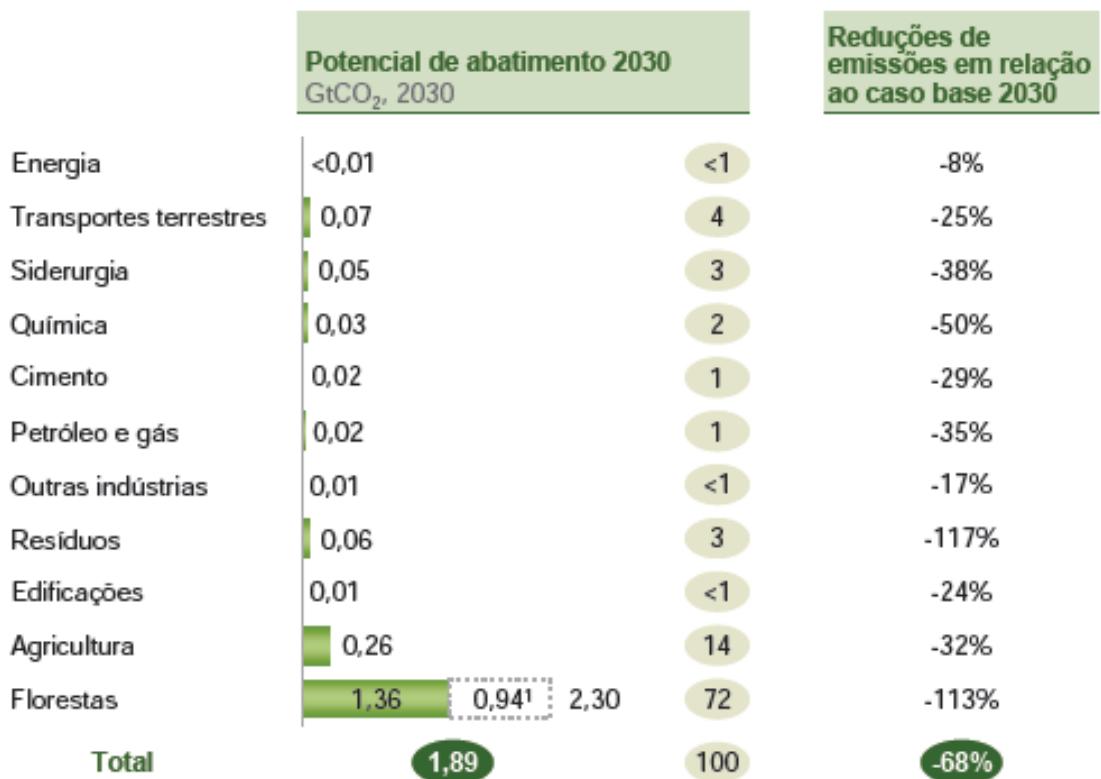
Adicionalmente, o relatório MCKINSEY&CO. (2009) informa que as premissas adotadas foram baseadas em documentos de domínio público e verificadas por cientistas, acadêmicos e especialistas do setor. Considerando que as premissas e metodologias consideradas não foram claramente detalhadas, não há como contracheclar os dados.

Fase III: Consolidação de dados e construção da curva MAC para 2030

Os custos e as reduções de emissão das medidas foram agregados para a construção da curva MAC. Os custos da redução de emissões foram ordenados em ordem crescente de custo, ajustados para evitar dupla contagem.

Num contexto global, o relatório de MCKINSEY&CO. (2009) demonstra que podem ser reduzidos dos 70 GtCO₂e projetados em 2030 para 32 GtCO₂e com custo inferior a EUR 60 por GtCO₂e. Apesar da significativa redução de 38 GtCO₂e, seriam necessários mais 9 GtCO₂e para limitar o aumento de 2°C na temperatura média da Terra, o que acarretaria em um custo superior aos EUR 60 por GtCO₂e para a implementação de medidas mais dispendiosas, mudanças de comportamento significativas e programas de reflorestamento/sequestro de carbono. É importante mencionar que, segundo MCKINSEY&CO. (2009), o desmatamento responde por 55% das emissões de GEE no Brasil. Assim, se as emissões do setor florestal fossem desconsideradas, o Brasil seria responsável por apenas 2% das emissões totais globais, ao invés dos 5% atuais.

A Figura 13 apresenta oportunidades de abatimento de GEE no Brasil em 2030 apresentadas no relatório da McKinsey&Co.



¹ Potencial adicional de abatimento a partir de reflorestamento extensivo de áreas degradadas no País

● Peso relativo (%)

Figura 13 – Oportunidades de abatimento de GEE no Brasil em 2030

Fonte: McKINSEY&CO. (2009)

Como pode ser visto na Figura 13, o setor com maior potencial para redução de emissões de GEE é o setor de resíduos (117% de redução), seguido pelo setor de floresta (113% de redução). O potencial de redução nos outros setores não atinge 50% de redução.

O resultado da curva MAC do relatório McKinsey&Co. (2009) é apresentado na Figura 14 considerando uma taxa de desconto de 4% a.a. de 2005 a 2030.

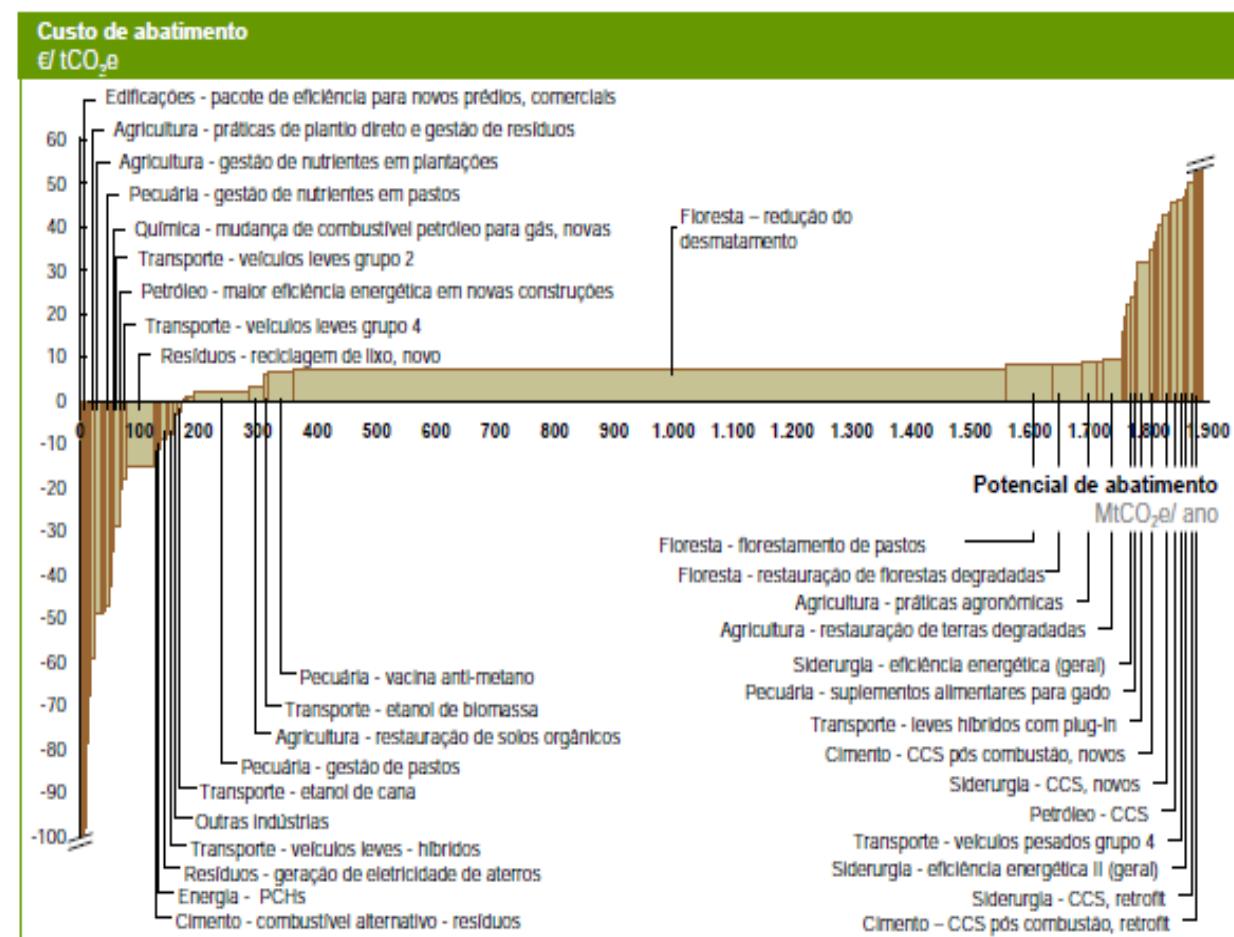


Figura 14 – Curva MAC para a economia brasileira baseado em uma taxa de desconto de 4% de 2005 a 2030 - custo médio de abatimento de € 9/tCO₂e

Fonte: McKinsey&Co. (2009)

Como pode ser observado na Figura 14, o setor de resíduos possui um potencial significativo de redução a custos negativos (EUR -15/tCO₂e), ou seja, as medidas de redução de emissões geram receitas. O setor florestal possui um potencial significativo mas considera um investimento associado em média de EUR 8/tCO₂e. O potencial de redução de emissões considerando todas as medidas/setores apresentadas na Figura 14 é de 2,8 GtCO₂e projetados em 2030 para 0,9 GtCO₂e com custo médio de redução de EUR 9 por tCO₂e.

No contexto industrial, o relatório McKinsey&Co. (2009) apresenta curvas para os setores siderúrgico, químico e cimento, no qual o potencial de redução do setor siderúrgico pode atingir 50 MtCO₂e anuais em 2030, o setor químico em 33 MtCO₂e anuais e o setor de cimentos 16 MtCO₂e anuais. Os resultados das curvas MAC desses setores são apresentados nas figuras 15, 16 e 17.

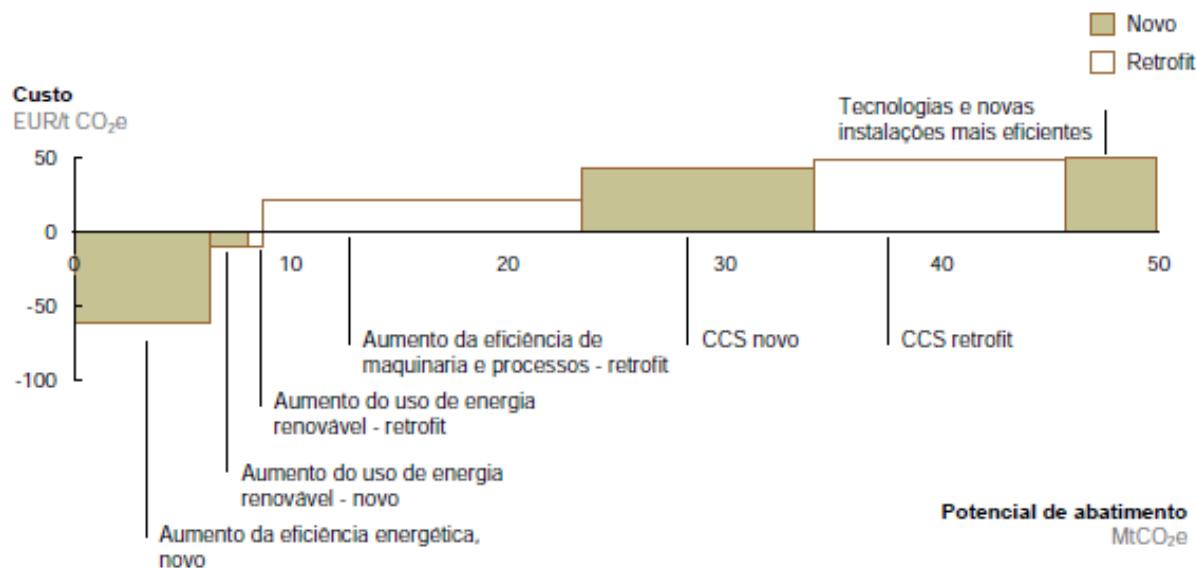


Figura 15 – Curva de custo de redução de GEE no setor de siderurgia para 2030 – custo médio de abatimento de EUR 4/tCO₂e

Fonte: McKINSEY&CO. (2009).

Como pode ser observado na Figura 16, a melhor opção para redução de emissões no setor siderúrgico é o aumento de eficiência energética em novas instalações industriais. Considerando todas as medidas de mitigação de emissões deste setor, o custo médio de abatimento de GEE é de EUR 4/tCO₂e. A medida mais custosa está associada à captura e estoque de carbono (EUR 46/tCO₂e) e

Considerando o setor químico, este possui o melhor custo médio de redução de emissões de GEE dentre os setores industriais avaliados no relatório McKinsey&Co (2009) – siderúrgico, químico e cimento, conforme Figura 16.

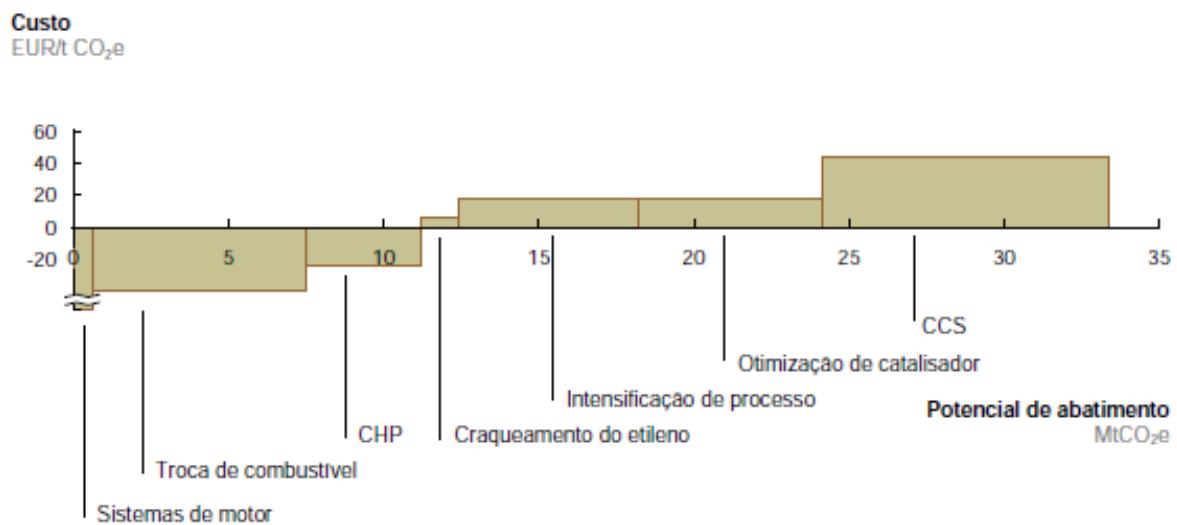


Figura 16 – Curva de custo de redução de GEE no setor químico para 2030 - custo médio de abatimento de EUR -18/tCO₂e

Fonte: MCKINSEY&CO. (2009).

As melhores opções mitigadoras de emissões de GEE no setor químico estão associadas à troca de combustível mais carbono intensivo por outro menos carbono intensivo. O custo médio de todas as medidas de redução para este setor é de EUR -18/tCO₂e. Da mesma forma que o setor siderúrgico, as medidas de captura e estoque de carbono são as mais custosas, resultando em um custo médio de EUR 43/tCO₂e.

No caso do setor de cimento, as melhores medidas de redução de emissões de GEE que resultam em custo negativo estão associadas à substituição de clínquer por cinzas, escória ou outros componentes industriais e uso de combustível alternativo, com custo médio EUR -13/tCO₂e. O resultado da curva MAC para este setor é apresentado na Figura 17.

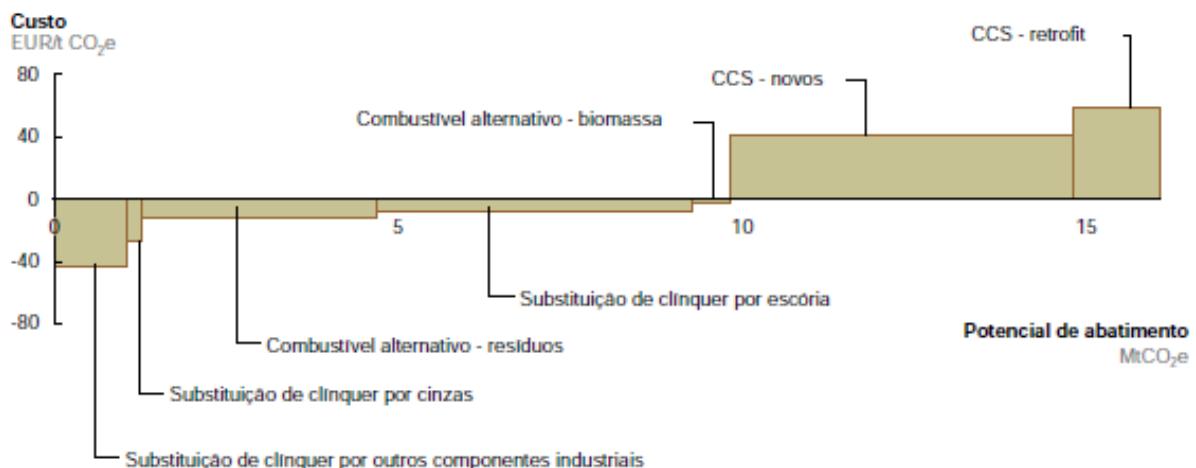


Figura 17 – Curva de custo de redução de GEE no setor de cimento para 2030 - custo médio de abatimento de EUR -13/tCO₂e

Fonte: McKINSEY&CO. (2009).

O custo médio de abatimento de GEE é de EUR -13/tCO₂e para o setor de cimento. A opção de captura e estoque de carbono para o setor siderúrgico, químico e cimento está associada a um custo relativamente alto com um custo médio de EUR 42/tCO₂e.

Apesar da expressiva participação do consumo energético das indústrias mencionadas acima – cimento 6%, siderurgia 20,6% e químico 8,4% do total do setor industrial –, deve-se ressaltar a importância de outros setores industriais que não foram considerados no estudo, tais como o setor de alimentos e bebidas, que respondem por 27% do consumo energético do setor industrial e papel e celulose que são responsáveis por 11,3% do consumo energético total industrial (EPE, 2013).

Devido ao fato de ter sido desenvolvido por uma empresa privada⁸, o relatório McKinsey&Co. não apresenta descrição detalhada sobre as premissas adotadas e as metodologias de cálculo consideradas. Da mesma forma, os resultados não são apresentados por tipo de medida mitigadora, mas por setor, o que dificulta a análise do potencial de redução de cada medida mitigadora. Adicionalmente, o memorial de cálculo da curva MAC não é publicamente disponível, o que impossibilitou a avaliação correta dos resultados e variação das premissas para fins de análise de sensibilidade dos parâmetros.

⁸ McKinsey&Company é uma empresa de consultoria empresarial americana.

Fase IV: Análise de regulamentação e tecnologia sobre os cenários

Com base nos resultados obtidos na Fase III, foram analisados modelos considerando as metas de redução propostos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (“IPCC” do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*), além do custo por família e do custo total bruto para o Brasil atingir as metas do painel.

5.2. RELATÓRIO BANCO MUNDIAL (2010)

O relatório do Banco Mundial (2010) apresenta estudos sobre o potencial econômico de mitigação de GEE de 2010 a 2030. Ao contrário do relatório McKinsey&Co (2009), o relatório do Banco Mundial (2010) apresenta detalhadamente todas as premissas consideradas e metodologias de cálculo para cada setor, o que proporciona melhor entendimento dos resultados.

Para tanto, foram consideradas as opções de mitigação de emissões dos efeitos do uso da terra e da mudança do uso da terra (desmatamento, produção agrícola, pecuária e silvicultura), do setor energético, do setor de transportes e resíduos sólidos e efluentes.

Para a determinação do cenário de referência para o desmatamento, o estudo desenvolveu 2 (dois) modelos: Modelo Brasileiro de Uso da Terra e o SIM Brasil. O primeiro projetou o uso e mudança de uso da terra até 2030 e o segundo alocou o uso e mudança de uso de terra em locais e anos específicos considerando variáveis como aptidão para agricultura, expansão agrícola, distância de centros consumidores, estimativa de carbono resultantes entre outros. O total de emissões esperadas do desmatamento de 2010 a 2030 foi de 9,9 GtCO₂e, ou 474 MtCO₂e por ano em média.

No caso do setor de energia, o cenário de referência se baseou no Plano Nacional de Energia (PNE) 2030 publicado pelo governo brasileiro. A estrutura para a determinação de demanda futura considerada no PNE 2030 é apresentado na Figura 18.

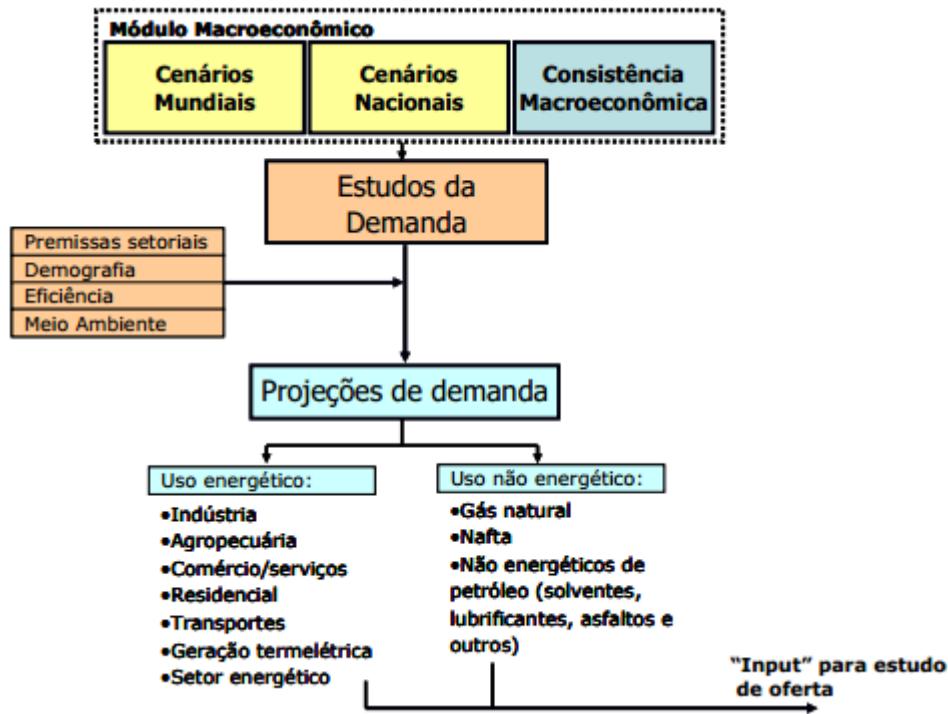


Figura 18 – Estrutura utilizada nas projeções de demanda de energia

Fonte: MME/EPE (2012).

Para a elaboração do PNE 2030, diversos modelos são utilizados para a determinação das curvas de oferta e demanda de energia no país conforme apresentados abaixo:

- Consumo de energia: Modelo Integrado de Planejamento Energético (MIPE);
- Consumo do setor residencial: Modelo de Projeção de Demanda de Energia Residencial;
- Expansão de refinarias de petróleo: Modelo de Estudo de Refino (M-Ref);
- Expansão da oferta de energia: Modelo de Expansão de Longo Prazo (MELP);
- Integração de dados de oferta e demanda de energia: Modelo MESSAGE.

Para a definição do cenário de referência do setor de transporte, foram considerados Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) e o Plano Nacional de Logística de Transporte (PNLT). Uma vez que existem muitas incertezas com relação a operacionalização de alguns dos projetos contidos no PNLT, alguns dos projetos foram considerados no cenário de referência e, sim no cenário de baixo carbono.

Com relação a modelação de transporte, o relatório considerou os seguintes grupos de transporte: (i) transporte regional de fretes, (ii) transporte regional de passageiros, (iii) transporte urbano de fretes e (iv) transporte urbano de passageiros. Além disso, foram consideradas as variáveis de geração e distribuição de viagens, escolha da modalidade do transporte e atribuição de rotas.

Os modelos considerados são aqueles utilizados no planejamento de transporte desenvolvidos para os contextos urbano e regional no que diz respeito a avaliação das várias alternativas e cenários, através de múltiplas interações e calibrações: TransCAD, EMME e MANTRA.

Tabela 5 – Medidas de redução de emissões de GEE analisadas no relatório Banco Mundial (2010)

Uso da terra	Emprego do plantio direto
	Substituição da gasolina no mercado doméstico
	Substituição da gasolina no exterior pelo etanol
	Captura e estoque de carbono (florestas de produção, restauração de florestas nativas e redução do desmatamento)
Pecuária	Programas de melhoramento genético da forragem, para reduzir a metanogênese
	Programas de incentivo para o emprego de touros geneticamente superiores: os animais melhorados têm um ciclo de vida mais curto e emitem quantidade menor de CH ₄ até o abate
	Melhoria da produtividade: <ul style="list-style-type: none"> (i) promoção da recuperação de pastagem degradada; (ii) estímulo à adoção de sistemas produtivos que empreguem confinamento na engorda; (iii) estímulo à adoção de sistemas lavoura-pecuária; (iv) desenvolvimento de programas de melhoramento genético para forragem adaptada ao Brasil, de qualidade superior e geradora de menos emissões; (v) desenvolvimento de programas de incentivo para o uso de touros geneticamente superiores).
	Captura e estoque de carbono (florestas de produção e

	restauração de florestas nativas)
Energia	Eficiência energética (demanda): iluminação, refrigeradores de alimentos, ar condicionado, aquecedores de água para banheiros e motores elétricos
	Troca de combustível para outro, de teor inferior de carbono (demanda)
	Consumo de energia renovável (demanda)
	Reciclagem e redução do uso de materiais (demanda)
	Formas renováveis para a geração de energia (plantas eólicas e cogeração de biomassa) – oferta
	Esquemas otimizados de refinarias (oferta): integração energética e recuperação de calor, controle de incrustações e sistemas de controle avançado de processos
	Conversão de gás natural em combustíveis líquidos (GTL) – oferta
Transporte	Investimento no sistema ferroviário e hidroviário – transporte regional
	Trem-bala (São Paulo – Rio de Janeiro) – transporte regional
	Investimento em trânsito de ônibus rápido (BRT) – transporte urbano
	Investimento em metrô e BRT – transporte urbano
	Otimização do tráfego – transporte urbano
	Investimento em ciclovias – transporte urbano
Resíduos e efluentes	Aterros com ventilação
	Aterros com captura e incineração
	Redução em 20% de resíduos sólidos urbanos (RSU)
	Aterros com captura e cogeração
	Aterros com queima de metano
	Tratamento de efluentes e queima de metano (industrial, comercial e residencial)

Fonte: BANCO MUNDIAL (2010).

Tabela 6 – Medidas no setor energético

Indústria	Otimização da combustão
	Sistema de recuperação de calor e vapor
	Novos processos industriais
	Outras medidas de eficiência energética
	Energia térmica solar
	Reciclagem
	Gás natural e biomassa em substituição a outros combustíveis
	Motores elétricos
	Illuminação industrial
	Reflorestamento
Residencial	Aquecedor solar
	Ar condicionado
	Illuminação
	Geladeira
Comercial	Illuminação
Refinaria	Novas refinarias e captura/estoque de carbono
	Integração energética, controle de incrustação e controles avançados em refinarias existentes
GLT	Gás-para-líquido
Energia renovável	Cogeração de cana-de-açúcar
	Energia eólica
	Linha de transmissão (Brasil – Venezuela)

Fonte: BANCO MUNDIAL (2010).

O trabalho baseou-se em um crescimento médio do PIB de 3,7% a.a., preço médio de barril de petróleo de USD 40 e taxa de desconto de 8% a.a.

Como resultado da análise, o relatório do Banco Mundial (2010) apresenta a projeção das emissões de GEE no cenário de referência levando em conta as premissas de crescimento para cada setor e, o no cenário de baixo carbono considerando o potencial de redução dos setores a partir das medidas apresentadas nas tabelas 5 e 6.

Tabela 7 – Projeção das emissões no cenário de referência e cenário de baixo carbono em 2030 (em MtCO₂e)

Setor	Cenário de referência 2030	Cenário de baixo carbono 2030	Potencial de redução
Energia	458	297	35,2%
Transporte	245	174	29,0%
Resíduos	99	18	81,8%
Desmatamento	533	196	63,2%
Pecuária	272	249	8,5%
Agricultura	111	89	19,8%
Total	1.718	1.023	40,5%

Fonte: BANCO MUNDIAL (2010).

Da mesma forma que o relatório McKinsey&Co. (2009), as melhores opções mitigadoras de GEE estão associadas a resíduos e floresta (desmatamento).

Segundo o BANCO MUNDIAL (2010), o potencial de redução de emissões do setor de energia é de 1.830 MtCO₂e conforme a Tabela 8.

Tabela 8 – Potencial de redução de emissões no setor energético brasileiro de 2010 para 2030

Opções de mitigação	Reduções de Emissões 2010-30	
	(MtCO ₂)	%
de baixo carbono		
Lado da Demanda	1.407	77
Eletricidade	28	2
Aquecimento solar	3	0
Ar-condicionado (MPES)	3	0
Ar-condicionado ("Selo Procel")	0	0
Refrigeradores (MPES)	10	1
Refrigeradores (população de baixa renda)	6	0
Motores	2	0
Illuminação residencial	3	0
Illuminação industrial	1	0
Illuminação comercial	2	0
Combustíveis fósseis	1.378	75
Otimização da combustão de combustíveis	105	6
Sistemas de recuperação de calor	19	1
Recuperação de vapor	37	2
Recuperação do calor de fornos	283	15
Novos processos	135	7
Outras medidas de uso eficiente de energia (UEE)	18	1
Energia térmica solar	26	1
Reciclagem	75	4
Substituição por gás natural (incluindo dutos)	44	2
Substituição por biomassa	69	4
Substituição de biomassa não renovável por carvão vegetal de plantações de árvores*	567	31
Lado da Oferta	423	23
Geração de Energia	177	10
Energia eólica	19	1
Cogeração com biomassa	158	9
Óleo e Gás	246	13
GTL	128	7
Refino		
Melhoria do uso de energia em refinarias existentes (integração de calor)	52	3
Melhoria do uso de energia em refinarias existentes (mitigação de depósitos)	7	0
Melhoria do uso de energia em refinarias existentes (controle avançado)	7	0
Desenho otimizado de novas refinarias	52	3
Total	1.830	100

Fonte: BANCO MUNDIAL (2010).

Como pode ser visto na Tabela 8, o melhor opção mitigadora no setor energético brasileiro está associado ao consumo eficiente de eletricidade, que resulta em 75% do total de potencial de redução de emissões (ou seja, 1.378 MtCO₂e).

Considerando todas as medidas de mitigação de GEE analisadas no estudo, as melhores opções de mitigação estão associadas à iluminação residencial e cogeração de cana de açúcar como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 – Potencial de mitigação de GEE e custo de abatimento considerando cenários com 4%, 8% e 12% de taxa de desconto

<i>Mitigation option</i>	<i>% emissions reduction (2010-30)</i>	<i>Emissions reduction (Mt CO₂) (2010-30)</i>	<i>Abatement cost</i>		
			<i>(US\$/tCO₂)</i>	<i>8%</i>	<i>4%</i>
Iluminação residencial	0	3	(120)	(164)	(92)
Cogeração de cana de açúcar	1	158	(105)	(219)	(43)
Sistemas de recuperação de vapor	0	37	(97)	(157)	(62)
Sistema de recuperação de calor	0	19	(92)	(147)	(60)
Iluminação industrial	0	1	(65)	(122)	(36)
Energia térmica solar	0	26	(55)	(89)	(35)
Iluminação comercial	0	1	(52)	(104)	(27)
Motores elétricos	0	2	(50)	(154)	(6)
Otimização da combustão	1	105	(44)	(71)	(28)
Refrigeradores (MEPS)	0	10	(41)	(151)	5
Reciclagem	1	75	(35)	(53)	(24)
Linha de transmissão Brasil-Venezuela	0	28	(31)	(32)	(29)
Sistema de recuperação de calor de fornalha	3	283	(26)	(49)	(13)
Gás natural substituindo outros combustíveis	0	44	(20)	(53)	(4)
Outras medidas de eficiência energética	0	18	(14)	(24)	(8)
Etanol substituindo gasolina no mercado doméstico	2	176	(8)	(15)	(2)
Energia eólica	0	19	(8)	(162)	64
Otimização do trânsito	0	45	(2)	(4)	0
Gás para Líquido (GTL)	1	128	(2)	(7)	1
Redução do desmatamento + pecuária	53	6.041	(0)	(4)	1
Plantio direto aumentado	3	355	(0)	(1)	(0)
Investimento em ciclovias	0	17	1	(2)	3
Exportação de etanol substitui a gasolina no exterior	6	667	2	(15)	9
Novos processos industriais	1	135	2	(53)	26
Destrução de metano em aterro	9	963	3	4	2
Aquecimento solar (residencial)	0	3	4	(186)	84
Refinarias existentes (integração energética)	0	52	7	(5)	11
Tratamento de águas servidas + destriuição de metano (res. e com.)	1	116	10	14	8
Novas refinarias	0	52	19	21	16
Carvão renovável substituindo carvão não renovável	5	567	21	14	32
Investimento em ferrovias e hidrovias versus rodovias	1	63	29	21	15
Reflorestamento	10	1.085	39	39	39
Total (MAC < US\$50)	100	11.294			

Fonte: BANCO MUNDIAL (2010).

Como pode ser observado na Tabela 9, a taxa de desconto impacta significativamente nos resultados de custo das medidas mitigadoras de emissões de GEE. Medidas consideradas atrativas para uma determinada taxa de desconto passam a não ser considerando outras taxas, como é o caso do aquecimento solar residencial, por exemplo. Neste caso, o uso de aquecedores solares residencial é considerado atrativo baseado em uma taxa de desconto de 4% a.a., resultando em USD -186/tCO₂e. Considerando taxas de 8% a.a. e 12% a.a., o custo médio é de USD 4 tCO₂e e USD 84/tCO₂e, respectivamente. Assim, os resultados da Tabela 9 indicam a sensibilidade dos resultados às taxas de juros aplicadas na análise.

A Figura 19 e a Figura 20 apresentam, respectivamente, a curva MAC baseada em uma taxa de desconto de 8% a.a. – taxa inicialmente adotada na análise do relatório Banco Mundial (2010) – no período de 2010 a 2030 com custos de abatimento abaixo e acima de USD 50/tCO₂e.

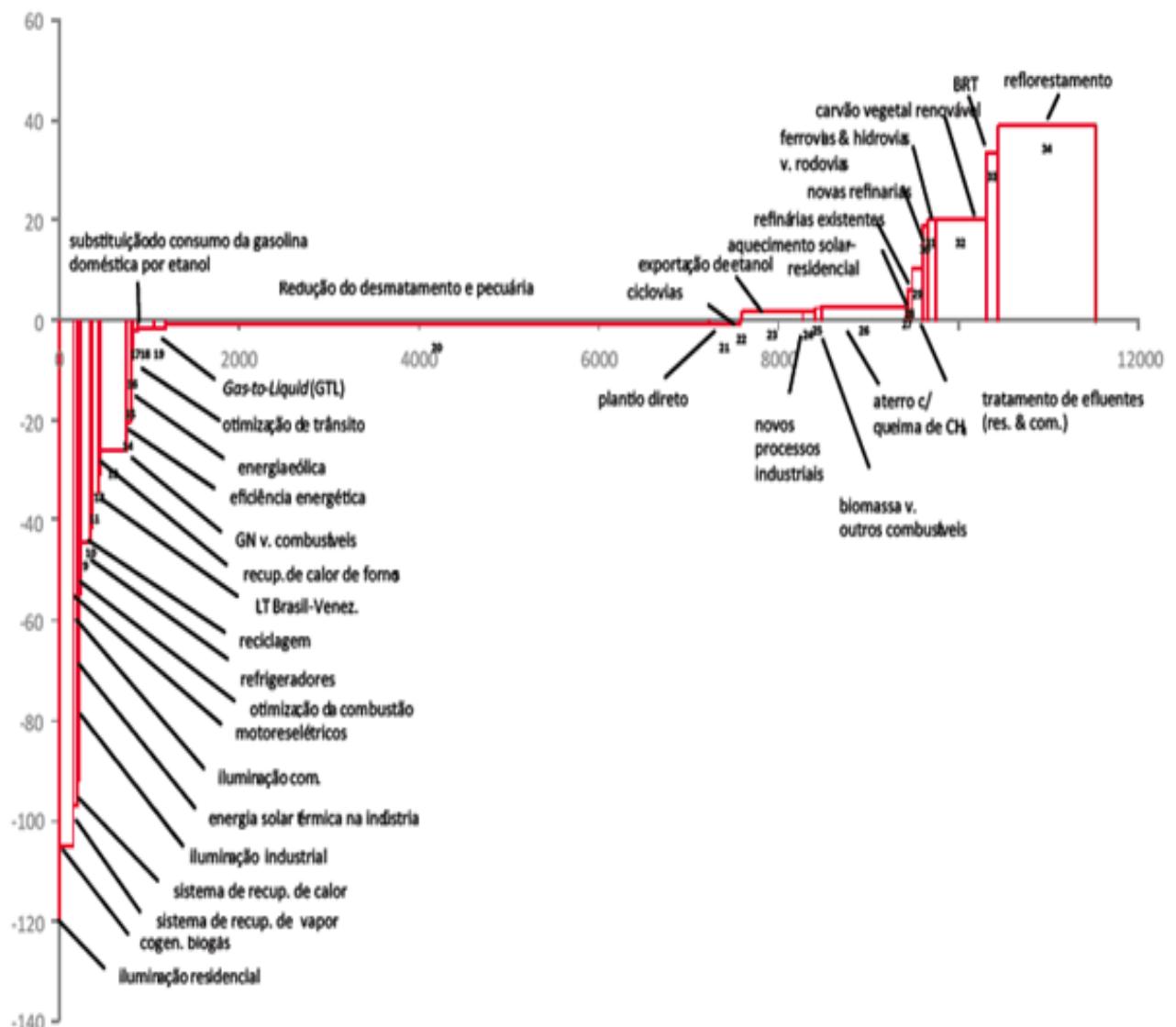


Figura 19 – Curva MAC baseada em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030 – custo de abatimento abaixo de USD 50 por tCO₂e

Fonte: BANCO MUNDIAL (2010).

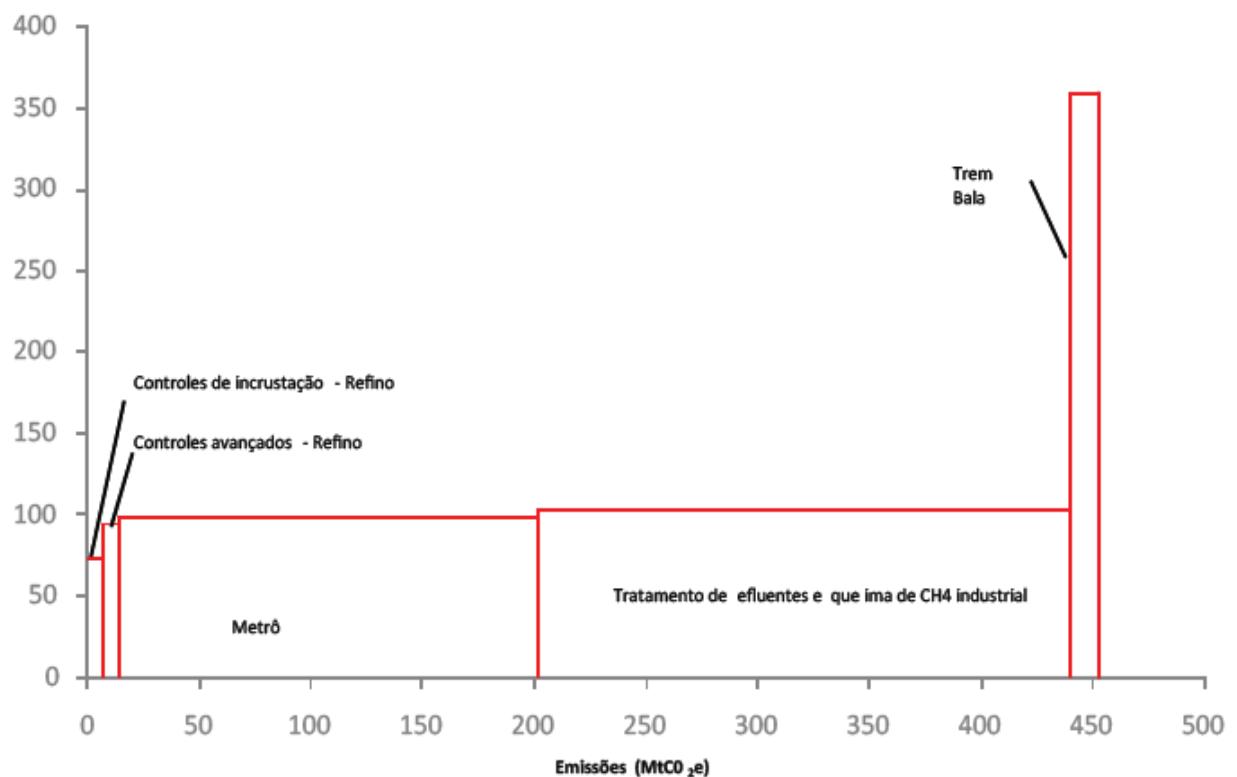


Figura 20 – Curva MAC baseada em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030 – custo de abatimento acima de USD 50 por tCO₂e

Fonte: BANCO MUNDIAL (2010).

Como pode ser observado na Figura 20, poucas medidas mitigadoras de GEE estão associadas a um custo superior a USD 50/tCO₂e: controles de incrustação e avançados (refino), investimento na expansão do metrô, tratamento de efluentes e queima de CH₄ industrial e investimento em trem bala.

5.3. TESE DE DOUTORADO HENRIQUES JUNIOR (2010)

Henriques Junior (2010) apresenta o potencial de redução de emissão de GEE pelo uso de energia específico do setor industrial brasileiro. A análise do autor Henriques Junior (2010) apresenta opções tecnológicas de mitigação de emissões de CO₂ considerando um horizonte de 20 anos (2010-2030) e 40 anos (2010-2050), contudo, o período de 2010 a 2050 não foi incluído neste trabalho uma vez que o próprio autor indica se tratar de um cenário “bastante especulativo”.

As indústrias analisadas por Henriques Junior foram ferro e aço, cimento, ferroligas, mineração e pelotização, química (petroquímica, fertilizantes, cloro-alcáis, entre outros), não-ferrosos e outros metálicos (alumínio), têxtil, alimento e bebidas (açúcar), papel e celulose, cerâmico, refino de petróleo e outros setores da indústria (vidro, cal e gesso).

As opções tecnológicas consideradas por Henriques Junior (2010) são: eficiência energética (melhoria da combustão, recuperação de calor em processos, adoção de processos mais modernos e eficientes, entre outras medidas de eficiência energética), reciclagem e economia de materiais, substituição de inter-energéticos, uso de energia renovável (biomassa e energia solar térmica) e eliminação de biomassas não-renováveis, ou seja, biomassa proveniente de desmatamentos e cogeração (Figura 21).

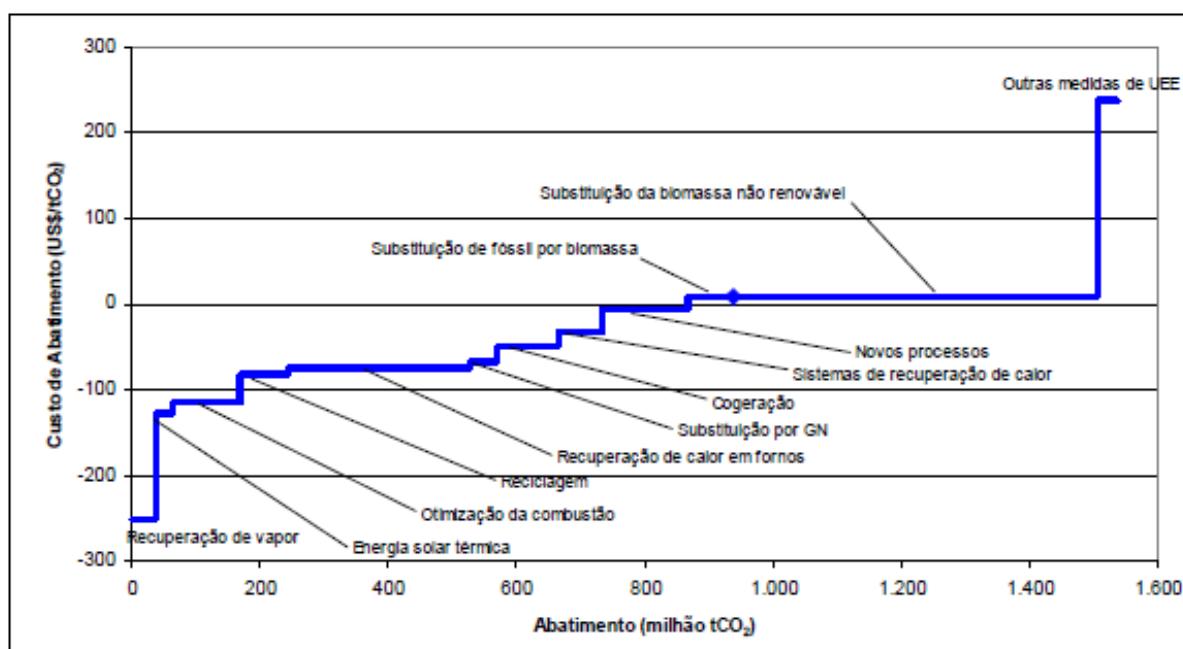


Figura 21 – Custo de abatimento por tipo de medida de mitigação de CO₂
baseado em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030

Fonte: HENRIQUES JUNIOR (2010).

Considerando a Figura 21, as medidas de mitigação de emissões de GEE viáveis de implementação estão associadas à recuperação de vapor, uso de energia solar térmica, otimização da combustão, reciclagem, recuperação de calor em fornos, uso de gás natural cogeração, uso de sistemas de recuperação de calor e

novos processos. Por outro lado, as medidas associadas à substituição de combustível fóssil por biomassa, substituição de biomassa não-renovável e outras medidas de eficiência energética possuem um custo atrelado à mitigação.

A Figura 22 apresenta a curva MAC da Figura 21 agregando-se as medidas de eficiência energética.

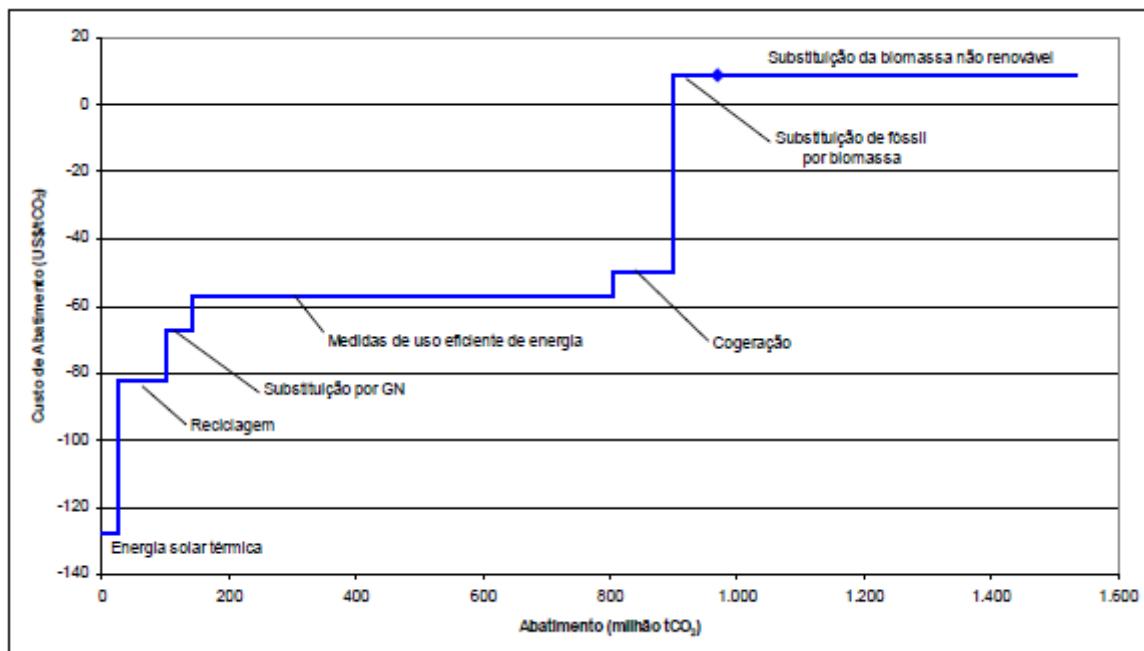


Figura 22 – Custo de abatimento por tipo de medida de mitigação de CO₂ baseado em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030 (medidas de eficiência energética agregada)

Fonte: HENRIQUES JUNIOR (2010).

A Figura 23 apresenta a curva MAC para o setor industrial de 2010 a 2030 considerando uma taxa de desconto de 8% a.a.

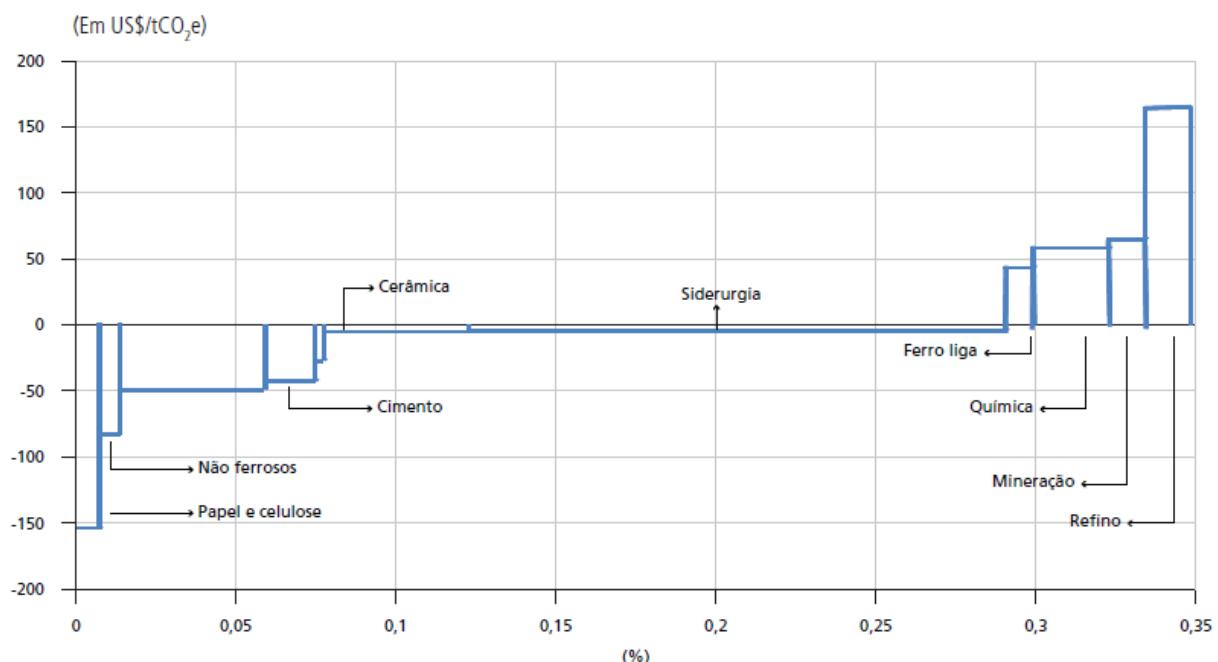


Figura 23 – Curva MAC industrial baseado em uma taxa de desconto social de 8% a.a. de 2010 a 2030

Fonte: MOTTA (2009) a partir de HENRIQUES JUNIOR (2010).

Considerando o resultado da Figura 23, o setor com maior potencial de redução de emissões de GEE é o de papel e celulose, não-ferrosos, cimento, cerâmica e siderurgia.

Henriques Junior (2010) conclui que no horizonte de 20 anos, a maior parte das medidas de mitigação considerando uma taxa de desconto 8,0% a.a. apresenta boa atratividade econômica (custos negativos); como aplicação de medidas de eficiência energética (otimização da combustão, sistemas de recuperação de calor, recuperação de vapor, recuperação de calor em fornos e novos processos), reciclagem de materiais, uso de gás natural em empresas distribuidoras, energia solar e cogeração (setor sucroalcooleiro, papel e celulose e siderurgia). As medidas que apresentaram valores positivos são: uso de gás natural em empresas consumidoras, biomassa renovável substituindo fósseis e eliminação da biomassa não renovável.

A Tabela 10 apresenta o preço do carbono para a atratividade econômica empresarial (*breakeven carbon price*) elaborada por Henriques Junior (2010).

Tabela 10–Preço do carbono para atratividade econômica empresarial (*break-even carbon price*)⁹

Medidas de Mitigação	Custo de Abatimento (US\$/tCO ₂) (taxa 8,0% a.a.)	Break-even carbon price (US\$/ tCO ₂) (TIR setorial de 15%)
Otimização da combustão	-113,8	-
Sistemas recuperação calor	-33,0	12,0
Recuperação de vapor	-251,3	-
Recuperação calor em fomos	-74,3	-
Novos processos	-5,4	182,8
Outras medidas de eficiência	237,7	309,8
TOTAL - Eficiência Energética	-57,2	1,5
Reciclagem	-82,6	-
Uso de gás natural (GN1) (empresas consumidoras)	594,76	596,65
Uso de gás natural (GN2) (empresas distribuidoras)	-67,2	-
Energia solar	-128,0	-
Biomassa renovável substituindo fósseis	8,9	34,7
Eliminação de biomassa não-renovável	9,0	19,5
Cogeração / Sucroalcooleiro	-289,09	-
Cogeração / Papel e celulose	-0,44	384,05
Cogeração / Siderurgia	-2,70	415,52
Cogeração total	-49,9	185,4

Fonte: HENRIQUES JUNIOR (2010).

O *break-even carbon price* apresentado para cada medida da Tabela 10 acima é o preço do carbono necessário para a viabilização das medidas. Assim, caso o *break-even carbon price* seja negativo, a aplicação da medida é economicamente atraente. Caso contrário, não há incentivos para aplicação da medida.

Considerando o horizonte de 50 anos (2010 – 2050), apesar das incertezas associadas, todas as medidas apresentaram boa viabilidade econômica, com exceção da substituição de combustíveis fósseis por biomassa e eliminação de biomassa não-renovável.

⁹ Para o cálculo do custo de abatimento foi considerado o potencial de redução ajustado, ou seja, inclui interação entre as medidas, ao contrário do potencial bruto, no qual o autor considera as medidas de maneira independente.

5.4. POTENCIALIDADES E FRAGILIDADES

Conforme apresentado nas seções 5.1, 5.2 e 5.3, a curva MAC fornece um a visão das melhores oportunidades de redução de emissão. Assim, a curva MAC auxilia na tomada de decisão para qual o objetivo é reduzir opções através da análise de alternativas economicamente viáveis ou que apresentem menos perdas econômicas significativas. Além disso, surge como uma ferramenta estratégica no sentido que aponta para oportunidades de novos negócios e proporciona um direcionamento para a criação e implantação de políticas.

Contudo, a curva MAC apresenta algumas fragilidades considerando a omissão de algumas barreiras e falhas de mercado, o que podem superestimar os resultados da adoção de algumas medidas.

MOTTA (2009) apresenta as seguintes barreiras e falhas de mercado que podem impactar as curvas MAC, pois resultam em custos negativos sumarizados na Tabela 11 abaixo:

Tabela 11 – Barreiras e falhas de mercado que impactam na curva MAC

Barreiras/Falhas	Descrição
Barreiras técnicas	Difícil estimativa e captura de todos os custos técnicos e de processos.
Dependência da trajetória	Interferência das dinâmicas intertemporais na trajetória das emissões, uma vez que os custos de redução estão associados a medidas anteriores e posteriores de tempo.
Heterogeneidade	Mesmo que uma dada tecnologia seja em média custo-eficiente, ela provavelmente não será para algumas firmas e indivíduos.
Efeito ricochete	A adoção de algumas medidas de redução de emissões de GEE pode impactar na demanda e, consequentemente, custo por outros serviços
Barreiras de mercado	As ações de mitigação podem ser atrasadas ou reduzidas devido à:

Incerteza	Preços futuros de energia e economia reais geradas Uso de taxa de desconto maior que aquelas normalmente utilizadas em projetos convencionais
Inércia	Não adoção dos custos associados às externalidades ao conhecimento e desenvolvimento de tecnologias no cenário de referência Não adoção dos custos para a implantação de tecnologias novas, cultura, estrutura interna e estratégias
Falhas de mercado	Informação incompleta, assimétrica e fatores comportamentais podem apresentar falhas de mercado.
Informação incompleta	Carência de informação principalmente associadas ao custo de novas tecnologias ofertadas por poucos fornecedores
Barreiras de financiamento	Inibição do risco associado à obtenção de financiamento, que impactam significativamente em firmas pequenas.
Custo de agências	Má distribuição de incentivos devido a não internalização de benefícios decorrentes quando o indivíduo que adota uma tecnologia não é o mesmo que faz uso dela.
Comportamento	Impacto do comportamento e racionalidade de indivíduos na adoção de novas práticas/medidas.

Fonte: MOTTA (2006)

As barreiras de implementação e incertezas são difíceis de quantificar. Uma alternativa seria a aplicação de sensibilidade para as medidas/setores.

6. CONCLUSÃO

No Acordo de Copenhague e na Conferência das Partes (COP 16) em Cancun, o Brasil confirmou metas de redução de emissões de GEE voluntárias entre 36,1% e 38,9% projetadas até 2020. Tais metas foram estabelecidas na Política Nacional de Meio Ambiente através da Lei nº 12.187/2009.

O Decreto nº 7.390/2010 que regulamenta a Lei nº 12.187/2009 define as seguintes projeções de emissões de GEE para 2020:

- I. Mudança de Uso da Terra: 1.404 milhões de tCO₂e;
- II. Energia: 868 milhões de tCO₂e;
- III. Agropecuária: 730 milhões de tCO₂e; e
- IV. Processos Industriais e Tratamento de Resíduos: 234 milhões de tCO₂e.

Nesse contexto, as curvas MAC apresentam as potencialidades e oportunidades de mitigação de emissões de GEE que podem ser utilizadas como ferramenta tomada de decisão setorial e delinear ação de políticas públicas.

As curvas MAC disponíveis atualmente no contexto brasileiro são aquelas apresentadas nos relatórios McKinsey&Co. (2009) e Banco Mundial (2010), além da tese de doutorado de Henriques Junior (2010).

Segundo o relatório McKinsey&Co. (2009), o Brasil passaria de 2,21 GtCO₂e em 2005 para 2,83 GtCO₂e em 2030. No cenário de baixo carbono, as emissões de GEE passariam de 2,83 GtCO₂e para 0,9 GtCO₂e em 2030, onde haveria uma redução de 68% a um custo médio associado de abatimento de EUR 9/tCO₂e.

Por outro lado, o relatório do Banco Mundial (2010) indica que o Brasil passaria de 1,28 GtCO₂e em 2010 para 1,72 GtCO₂e em 2030. No cenário de baixo carbono, as emissões de GEE passariam de 1,72 GtCO₂e para 1,02 GtCO₂e em 2030, resultando em um potencial de redução de 40,5% e um custo médio associado de abatimento abaixo de USD 50/tCO₂e.

Ambos os relatórios apresentam emissões de GEE estimadas em torno de 1 GtCO₂e em 2030 no Brasil no cenário de baixo carbono e indicam a diminuição do desmatamento como melhor medida mitigadora de emissões de GEE que resultam em custos baixos ou negativos. Contudo, tais relatórios apresentam divergências significativas em relação às emissões projetadas para 2030 no cenário de referência e ao potencial de redução emissões.

Com relação ao setor industrial brasileiro, o relatório McKinsey&Co. (2009) indica que as indústrias química, siderúrgica, cimento, petróleo e gás e outras indústrias, passariam de 0,18 GtCO₂e em 2005 para 0,36 GtCO₂e. Já no contexto do baixo carbono, as emissões de GEE projetadas para 2030 seria de 0,22 GtCO₂e o que acarretaria em uma redução de 38,8% em relação ao cenário de referência a um custo médio de - 20,25 EUR/tCO₂e para todas as medidas de mitigação com exceção da captura e estoque de carbono. Considerando o alto custo da captura e estoque de carbono, consideramos esse estudo separadamente; o custo médio associado a esta medida é de 43,5 EUR/tCO₂e.

Por sua vez, o relatório do Banco Mundial (2010) analisa o setor industrial no âmbito do setor energético. Desta forma, o setor energético passaria de 0,23 GtCO₂e em 2010 para 0,45 GtCO₂e em 2030. No cenário de baixo carbono, tal estudo indica que seriam emitidas 0,3 GtCO₂e em 2010, resultando em uma redução de 34% das emissões projetadas no cenário de referência a custo médio abaixo de 50 USD/tCO₂e para quase todas as medidas, com exceção das medidas de controle de incrustação/avançados no refino de petróleo.

Henriques Junior (2010) apresenta em sua tese de doutorado que as emissões de GEE passariam de 0,159 GtCO₂e em 2010 para 0,3 GtCO₂e em 2030. No cenário de baixo carbono, há uma redução de 39,9% das emissões projetadas no cenário de referência que resulta em 0,197 GtCO₂e em 2030 a um custo médio de -57,2 USD/tCO₂e.

Como pode ser observado nos resultados acima, há divergências significativas com relação ao potencial de redução de emissões no Brasil (incluindo o setor industrial brasileiro) e os custos associados às medidas mitigadoras de GEE. As divergências de resultado estão associadas às premissas adotadas por cada estudo como período analisado, crescimento médio do PIB, preço médio de combustíveis, taxa de desconto, estimativas de crescimento médio de cada setor industrial, escolha de medidas/tecnologias mitigadoras de emissões de GEE, custo associados às tecnologias de abatimento, entre outros.

Infelizmente, as metodologias e premissas não puderam ser avaliadas detalhadamente no presente trabalho devido a falta de transparência com relação aos métodos e dados considerados. De qualquer forma, pôde-se observar significativa sensibilidade das curvas MAC quanto às premissas adotadas e seu impacto nos resultados. Assim, devem ser observadas as fontes dos custos e as

barreiras de implementação que podem superestimar o resultado da curva MAC e, consequentemente, apresentar custos negativos para medidas/setores que não são atrativos necessariamente.

A partir da adoção de premissas conservadoras e criteriosa análise de sensibilidade de parâmetros, a proposta da curva MAC pode servir como instrumento para a migração para uma economia de baixo carbono, que vise menos perdas econômicas significativas ou, até mesmo, demonstre que o mercado de baixo carbono pode ser atrativo em contraponto ao *trade-off* que se aplica entre preservação e desenvolvimento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** ANEEL: Brasília, 2008. 3^a Ed.
Disponível em:
[<http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_fatoresdeconversao_indice.pdf>](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_fatoresdeconversao_indice.pdf)
- BAIRD, C. **Química ambiental.** Porto Alegre: Bookman, 2002. 2^a Ed.
- BANCO MUNDIAL. **Estudo de baixo carbono para o Brasil.** Departamento de Desenvolvimento Sustentável Região da América Latina e Caribe do Banco Mundial, 2010.
- BRASIL. Decreto nº 7.390 de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 10 dez 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7390.htm>. Acesso em 02 dez 2013.
- BRASIL. Lei nº 12.187 de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 30 dez 2009. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>. Acesso em 02 dez 2013.
- BUTCHER, A., et al. **Efeito estufa e mercado de trocas de emissão de CO₂.** Apresentação para alunos do ensino fundamental. Pontifícia Universidade Católica (PUC) de Minas Gerais, 2007. Disponível em: <<http://www.ich.pucminas.br/pged/db/wq/cb/2007-2/1-7/introduz.htm>>. Acesso em 12 nov 2009.
- CANELAS, P., et al. **Curva de custo marginal de abatimento.** Apresentação realizada pela Empresas pelo Clima (EPC). 29 mai 2012.
- EPE. **Balanço Energético Nacional (BEN) 2013: Ano base 2012.** Empresa de Pesquisa Energética/Ministério de Minas e Energia (MME). Rio de Janeiro: EPE, 2013.
- ESPARTA, A.R.J. **Redução de emissões de gases de efeito estufa no setor elétrico brasileiro: a experiência do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto e uma visão futura.** Tese de Doutorado EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

HENRIQUES JUNIOR, M.F. **Potencial redução de emissão de gases do efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro.** Tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético. UFRJ-COPPE, Rio de Janeiro, mai 2010.

IEA. **CO₂ emissions from fuel combustion – highlights.** International Energy Agency – IEA/OECD: Paris, França, 2012. Disponível em: <<http://www.iea.org/co2highlights/CO2highlights.pdf>>. Acesso em 28 jan 2014.

IPCC. **Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change.** Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

LOPES, I. V. (Cord.) **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL: guia de orientação.** Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 2002.

MARENKO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade – caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI.** Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Brasília: MMA, 2006.

MARGULIS, S.;DUBEUX, C. B. S. **Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades.** IBEP Gráfica: São Paulo, 2010.

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

MCTI. **Segunda comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.** Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. MCTI: Brasília, 2010.

MOTTA, R.S, et al. **Curvas de custo marginais de abatimento de gases do efeito estufa no Brasil: resenha e oportunidade de mitigação.** In Radar: Tecnologia, Produção e Comércio Exterior. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). n. 1, 73 – 83p. Ipea: Brasília, 2009.

MME. **Plano Nacional de Energia 2030.** Ministério de Minas e Energia. Colaboração da Empresa de Pesquisa Energética. MME: Brasília, 2007.

MME/EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2021.** Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. MME / EPE: Brasília, 2012.

UNEP. Observed concentrations of CO₂ cross 400 parts per million threshold at several global atmosphere watch stations. United Nations Environment Programme.

Disponível

em:

<<http://www.unep.org/newscentre/default.aspx?DocumentID=2716&ArticleID=9503#sthash.NFemZYHr.dpuf>>. Acesso em 04 fev 2014.

UNFCCC. Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its first session. Montreal, 28 November to 10 December 2005. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/index.html>>.