

# IMPLICAÇÕES ECONÔMICAS E SOCIAIS DE CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL ATÉ 2030



# Cenários de Mitigação de GEE do Setor Industrial (Demanda de Energia e Processos Industriais) Relatório Técnico

Autores:

Shiguo Watanabe Jr, Roberto Kishinami e Ana Toni (CO<sub>2</sub> Consulting)

Citação:

WATANABE JR, S.; KISHINAMI, R.; e TONI, A. (2015). Cenários do Setor Industrial. In: LA ROVERE, E. L. et al., 2016 – Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

## **EQUIPE DO PROJETO IES-Brasil**

### **FORUM BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS – COORDENAÇÃO INSTITUCIONAL**

Luiz Pinguelli Rosa – Coordenador Geral  
Neilton Fidelis – Coordenador Executivo

### **CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ – COORDENAÇÃO TÉCNICA**

Emilio Lèbre La Rovere – Líder de Pesquisa e Modelagem  
William Wills – Coordenador de Pesquisa e Modelagem Macroeconômica  
Carolina Burle Schmidt Dubeux, Amaro Olímpio Pereira Junior e Sergio Henrique Ferreira da Cunha –  
Coordenadores de Estudos Setoriais  
Isabella da Fonseca Zicarelli – Assistente de Coordenação

### **ECOSYNERGY – EQUIPE DE FACILITAÇÃO**

Barbara C. P. Oliveira – Líder de Processo e Facilitação  
Sergio Marcondes  
Luisa Santos Sette Câmara Moreira

### **EQUIPE DE MODELAGEM MACROECONÔMICA**

William Wills, Carolina Grottera, Romulo Neves Ely – Centro Clima/COPPE/UFRJ  
Julien Lefevre – CIRED/CNRS (*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*)

### **EQUIPE DE ESTUDOS SETORIAIS**

**Setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU):** Marcelo Melo Ramalho Moreira, Leila Harfuch, Willian Kimura, Luciane Chiodi Bachion, Rodrigo Lima, Wilson Zambianco e André Nassar – Agroicone; Carolina B. S. Dubeux e Michele K.C. Walter – Centro Clima/COPPE/UFRJ

**Setor Energético:** Amaro Olímpio Pereira Junior, Sergio Henrique Ferreira da Cunha, Thauan Santos, Mariana Weiss, Larissa Albino da Silva Santos e Patricia Turano de Carvalho – Centro Clima/COPPE/UFRJ

**Setor Industrial:** Shiguelo Watanabe Jr, Roberto Kishinami e Ana Toni – CO<sub>2</sub> Consulting

**Setor de Resíduos:** Saulo Machado Loureiro e Carolina B.S. Dubeux – Centro Clima/COPPE/UFRJ e Victor Zveibil

**Setor de Transporte:** Amaro Olímpio Pereira Junior, Luan Santos e Luiza Di Beo Oliveira – Centro Clima/COPPE/UFRJ

### **EQUIPE DE COMUNICAÇÃO**

Roberta Nadalutti La Rovere

### **GERÊNCIA ADMINISTRATIVA**

Charlotte Heffer – Gerente de Projeto  
Mariana Portellada – Assistente Administrativa  
Yuri Ramos Alves – Estagiário

## Sumário

<b>Introdução .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Subsetor Cimento .....</b>	<b>11</b>
1.1. Introdução ao Subsetor Cimento .....	11
1.2. Cenário de Plano Governamental (CPG) .....	16
1.2.1. Premissas Utilizadas na Modelagem .....	17
1.2.2. Medidas de Mitigação já Incluídas no CPG .....	18
1.2.3. Resultados Finais .....	18
1.3. Cenário de Mitigação Adicional (MA) .....	19
1.3.1. Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) .....	20
1.3.2. Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) .....	22
1.4. Análise Comparativa dos Cenários CPG, MA1, MA1+T, MA2 e MA2+T .....	24
1.4.1. Potencial de Mitigação .....	24
1.4.2. Aspectos Socioeconômicos .....	25
<b>2. Subsetor Siderurgia .....</b>	<b>26</b>
2.1. Introdução ao Subsetor Siderurgia .....	26
2.2. Cenário de Plano Governamental (CPG) .....	30
2.2.1. Premissas Utilizadas na Modelagem .....	31
2.2.2. Medidas de Mitigação já Incluídas no CPG .....	32
2.2.3. Resultados Finais .....	32
2.3. Cenário de Mitigação Adicional (MA) .....	33
2.3.1. Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) .....	34
2.3.2. Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) .....	36
2.4. Análise Comparativa dos Cenários CPG, MA1, MA1+T, MA2 e MA2+T .....	38
2.4.1. Potencial de Mitigação .....	38
2.4.2. Aspectos Socioeconômicos .....	39
<b>3. Restante da Indústria .....</b>	<b>40</b>
3.1. Introdução .....	40
3.2. Cenário de Plano Governamental (CPG) .....	48
3.2.1. Medidas de Mitigação já Incluídas no CPG .....	48
3.2.2. Resultados Finais .....	48
<b>4. Potencial de Mitigação Total do Setor Industrial .....</b>	<b>52</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO METODOLÓGICO .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabelas Complementares .....</b>	<b>62</b>

## Figuras

<b>Figura 1.</b>	Evolução do PIB, PIB Indústria a preços de 2013 e porcentagem do PIB .....	8
<b>Figura 2.</b>	Produção nacional de cimento.....	12
<b>Figura 3.</b>	Consumo de cimento aparente total e per capita no Brasil .....	13
<b>Figura 4.</b>	Impactos ambientais de uma planta de cimento.....	16
<b>Figura 5.</b>	Projeção de crescimento da produção de cimento no CPG .....	17
<b>Figura 6.</b>	Emissões de cimento nos cinco cenários estudados .....	24
<b>Figura 7.</b>	Aço: capacidade instalada, produção, consumo aparente e ociosidade.....	26
<b>Figura 8.</b>	Consumo aparente de produtos siderúrgicos per capita da McKinsey (2013).....	27
<b>Figura 9.</b>	Consumo aparente de produtos siderúrgicos per capita da WSA (2014).....	28
<b>Figura 10.</b>	Projeção de crescimento da produção de aço no CPG .....	31
<b>Figura 11.</b>	Projeção da demanda de energia para produção de aço no CPG .....	31
<b>Figura 12.</b>	Emissões do setor siderúrgico nos cinco cenários estudados .....	38
<b>Figura 13.</b>	Produção de papel e celulose .....	40
<b>Figura 14.</b>	Energia no setor de papel e celulose .....	41
<b>Figura 15.</b>	Alumínio Primário: produção, capacidade instalada e consumo aparente (em mil toneladas).....	42
<b>Figura 16.</b>	Participação das importações no consumo aparente no setor químico .....	44
<b>Figura 17.</b>	Balança comercial do setor químico .....	45
<b>Figura 18.</b>	Produção mineral e participação no PIB.....	47
<b>Figura 19.</b>	Potencial de redução de emissões do Setor Industrial nos Cenários de Mitigação Adicional em Relação ao Cenário de Plano Governamental.....	53

## Tabelas

<b>Tabela 1.</b>	Participação dos setores no PIB nacional .....	9
<b>Tabela 2.</b>	Participação dos setores na oferta de emprego .....	9
<b>Tabela 3.</b>	Participação das seções da indústria no PIB industrial.....	9
<b>Tabela 4.</b>	Participação das seções da indústria na oferta de emprego .....	10
<b>Tabela 5.</b>	Emissões dos setores industriais .....	11
<b>Tabela 6.</b>	Cenário de Plano Governamental (CPG) – principais projeções.....	19
<b>Tabela 7.</b>	Medidas de Mitigação Adicionais aplicadas nos Cenários .....	20
<b>Tabela 8.</b>	Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) – principais projeções.....	22
<b>Tabela 9.</b>	Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) - principais projeções.....	23
<b>Tabela 10.</b>	Emissões nos cinco cenários estudados .....	24
<b>Tabela 11.</b>	Resultados econômicos das medidas de mitigação do setor de cimento .....	25
<b>Tabela 12.</b>	Cenário de Plano Governamental (CPG) – principais projeções.....	32
<b>Tabela 13.</b>	Medidas de mitigação adicionais aplicadas nos cenários.....	34
<b>Tabela 14.</b>	Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) – principais projeções .....	36
<b>Tabela 15.</b>	Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) – principais projeções.....	37
<b>Tabela 16.</b>	Emissões nos cinco cenários estudados .....	38
<b>Tabela 17.</b>	Resultados econômicos das medidas de mitigação do setor siderúrgico .....	39
<b>Tabela 18.</b>	Papel e Celulose: atividade e emissões nos 5 cenários .....	48
<b>Tabela 19.</b>	Papel e Celulose: emissões nos 5 cenários .....	49
<b>Tabela 20.</b>	Não ferrosos: atividade e emissões nos 5 cenários .....	49
<b>Tabela 21.</b>	Não ferrosos: emissões nos 5 cenários.....	49
<b>Tabela 22.</b>	Química: atividade e emissões nos 5 cenários .....	50
<b>Tabela 23.</b>	Química: emissões nos 5 cenários .....	50
<b>Tabela 24.</b>	Mineração: atividade e emissões nos 5 cenários .....	50
<b>Tabela 25.</b>	Mineração: emissões nos 5 cenários .....	50
<b>Tabela 26.</b>	Outras indústrias: atividade e emissões nos 5 cenários .....	51
<b>Tabela 27.</b>	Outras indústrias: emissões nos 5 cenários.....	51
<b>Tabela 28.</b>	Setor Industrial: emissões nos 5 cenários (energia e IPPU).....	52

## Introdução

O objetivo deste capítulo é estimar o potencial de mitigação de emissões de gases de efeito estufa no setor industrial para subsidiar a análise macroeconômica sobre os impactos que a adoção de tais medidas traria à atividade econômica em geral e em particular à atividade industrial, até 2030. Para cada medida adotada, foi calculado o custo marginal de abatimento onde se estimou um fluxo de caixa composto pelos investimentos necessários, pela taxa de penetração da medida e por variações no custo operacional. Assim, num cenário de expansão de atividade de um dado setor, o aumento da produção se daria através do aumento da capacidade do setor, empregando tecnologias que reduzissem a intensidade de GEEs por unidade de produto. O custo marginal junto com a expansão da produção alimenta o modelo IMACLIM que, por sua vez, gera novos níveis de atividade. Estes são realimentados nos cálculos de cada setor industrial para obter os volumes de emissões.

Foram construídos três cenários de emissão: o Cenário do Plano Governamental (CPG) e dois cenários com medidas de mitigação adicionais às contidas no CPG. Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) e Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) sendo este último o mais ousado. Associadas às medidas de mitigação foi ainda simulada a utilização de taxas sobre emissão de GEE no modelo de equilíbrio geral, que resultaram em níveis diferentes de atividade. Ao MA1 foi acrescida uma taxa de US\$20/tCO<sub>2</sub>e e ao MA2 uma taxa de US\$ 100/tCO<sub>2</sub>e, respectivamente MA1+T e MA2+T, perfazendo, portanto, um total de cinco cenários.

O Cenário de Plano Governamental (CPG), que embute as medidas previstas no Plano Nacional sobre Mudança do Clima para 2020, foi construído a partir dos seguintes documentos disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) referentes ao Plano Nacional de Energia 2050 (PNE, 2014) *Cenário Econômico 2050 - Nota Técnica DEA 12/14* (EPE 12/14, 2014) de onde foram extraídas as projeções dos níveis de atividade dos setores; e *Demanda de Energia 2050 - Nota Técnica 13/14* (EPE 13/14, 2014) de onde foram extraídas as projeções de consumo de energia e as participações das fontes.

Foram ainda considerados os seguintes documentos disponibilizados para consulta pública referentes ao Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa.

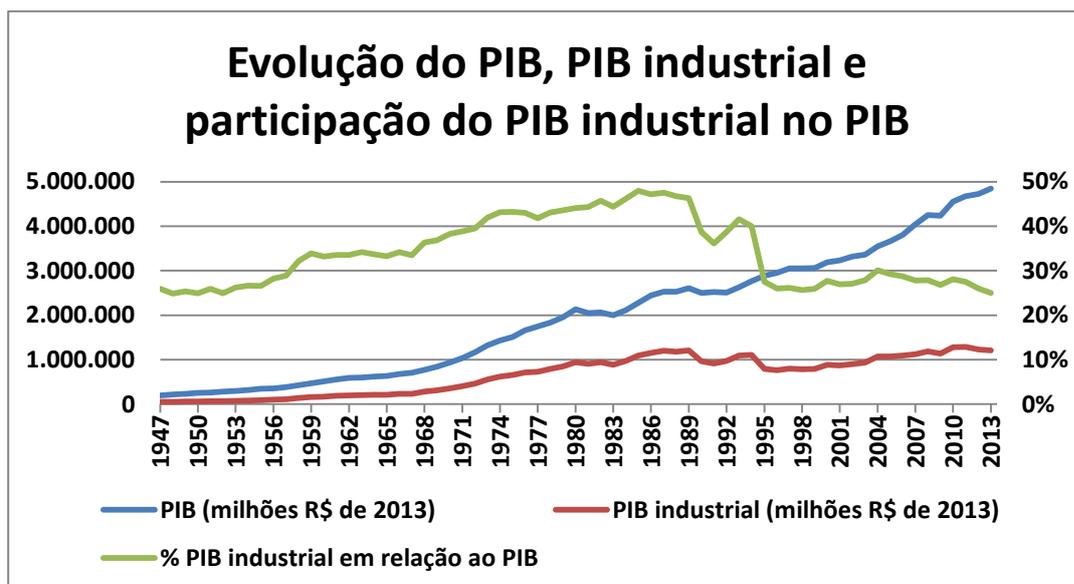
- Energia *Bottom-Up*,
- Processos Industriais:
  - × Produção de Metais;
  - × Produtos Minerais;
  - × Indústria Química; e
  - × Produção e Consumo de HFCs e SF<sub>6</sub>.

Para a elaboração dos cenários de mitigação adicional, foram identificadas e discutidas medidas de mitigação com o Comitê de Elaboração de Cenários (CEC) do projeto IES-Brasil, que envolvem aumento de eficiência energética e troca de combustíveis mais carbono intensivos por fontes de energia de menor emissão.

Assim, as simulações de aumento de eficiência energética reduzem o consumo de energéticos projetados no PNE 2050. As simulações de troca de combustíveis mudam a participação dos energéticos mantendo, entretanto, a energia total projetada para cada ano. A partir dos resultados dessas simulações é rodado o modelo de equilíbrio geral, IMACLIM, que simula novos níveis de atividade para o setor onde as projeções de produção estão recalculadas assim como os consumos de energéticos e as emissões de gases de efeito estufa.

### Apresentação do setor

O Brasil tem um setor industrial diverso, em boa parte integrado na economia mundial e em diferentes estágios de modernização. O peso da indústria no PIB é decrescente desde 1990 e constante quanto à oferta de emprego, como visto na figura e nas tabelas abaixo. A crise internacional iniciada em 2008 atingiu a indústria mais do que o restante da economia, principalmente por conta da redução do crescimento da China e de sua demanda por produtos nacionais.



Fonte: (Nakabashi & Scatolin, 2010) Estimado a partir de IPEA (2015)

Figura 1. Evolução do PIB, PIB Indústria a preços de 2013 e porcentagem do PIB

**Tabela 1.** Participação dos setores no PIB nacional

Setores Econômicos Participação no PIB	Serviços	Indústria	Agropecuária
2000	66,5%	27,5%	6,0%
2005	64,5%	29,5%	6,0%
2010	67,9%	26,6%	5,5%
2013	69,5%	24,4%	6,2%

Fonte: IBGE PIM

**Tabela 2.** Participação dos setores na oferta de emprego

Setores Econômicos Participação no Emprego	Serviços	Indústria	Agropecuária
2000	71,6%	24,3%	4,1%
2005	72,4%	23,7%	3,9%
2010	71,8%	25,0%	3,2%
2013	72,7%	24,3%	3,0%

Fonte: IBGE RAIS

As tabelas abaixo mostram o peso relativo das seções<sup>1</sup> da indústria no PIB industrial e na oferta de emprego. Elas mostram a queda do peso da indústria de transformação e o crescimento relativo do setor extrativo mineral, reforçando o papel de supridor de commodities para o mercado mundial.

**Tabela 3.** Participação das seções da indústria no PIB industrial

Seções Industriais Participação no PIB	Extrativa	Transformação	Construção	Eletricidade e Gás
2000	5,4%	61,1%	20,5%	13,0%
2005	7,1%	62,0%	16,7%	14,1%
2010	8,6%	58,8%	20,3%	12,3%
2013	15,5%	53,1%	21,3%	10,2%

Fonte: IBGE / PIM

<sup>1</sup> CNAE 2.0 classifica as indústrias em Seções, Divisões, Grupos e Classes

**Tabela 4.** Participação das seções da indústria na oferta de emprego

Seções Industriais Participação no Emprego	Extrativa	Transformação	Construção	Eletricidade e Gás
2000	1,7%	76,6%	17,2%	4,6%
2005	1,9%	78,0%	15,8%	4,3%
2010	1,9%	71,6%	22,8%	3,7%
2013	2,2%	69,7%	24,3%	3,7%

Fonte: IBGE / RAIS

Se ao longo das últimas décadas a indústria de transformação perde sua posição na economia nacional, suas emissões de gases causadores do efeito estufa ganham destaque por conta da redução do desmatamento: segundo relatório das estimativas de emissões nacionais, (MCTI, 2014), em 1994, ano referência da Comunicação Nacional Inicial, o setor industrial foi responsável por 6,8% das emissões (somando queima de combustíveis e processos industriais), enquanto que em 2012, passou a ser 16,3%.

As emissões do setor industrial vêm de dois grupos de fontes: energia (principalmente a geração de calor por combustíveis não renováveis) e as resultantes dos processos industriais. O IPCC adotou como padrão de relato, tratar as emissões de processos em um capítulo separado das de energia, que aparecem junto com o uso energético nas outras atividades da economia. O trabalho realizado no âmbito do IES-Brasil, para melhor comunicar com o grupo de indústrias participantes do Comitê de Elaboração de Cenários (CEC), adotou o relato conjunto das emissões de processos e as de energia na indústria.

A tabela abaixo contém as emissões de gases de efeito estufa dos principais subsetores industriais, discriminando entre as geradas pela queima de combustíveis fósseis e as originadas nos processos industriais. É interessante observar que a indústria alimentícia e de bebidas que lidera o ranking de uso de energia na indústria (26%) emite relativamente pouco (6%) por usar fontes renováveis<sup>2</sup>. O mesmo se dá na indústria de papel e celulose (12% da energia e 5% das emissões industriais).

<sup>2</sup> Segundo o BEN 2014, a indústria de alimentos consumiu 23,3 Mtep em 2013 dos quais 17,2 Mtep de bagaço de cana. No mesmo ano, o setor de ferro-gusa e aço consumiu 16,3 Mtep.

**Tabela 5.** Emissões dos setores industriais

Setor Industrial (MtCO <sub>2</sub> e)	total		energia		processos industriais	
	2005	2010	2005	2010	2005	2010
Subsetor Cimento	23,4	35,6	9,0	14,3	14,3	21,3
Subsetor Siderurgia	44,2	44,9	5,4	5,6	38,8	39,3
Restante da Indústria	75,4	80,1	47,6	50,8	27,8	29,3
Subsetor Papel e Celulose	3,9	3,6	3,9	3,6		
Subsetor Não Ferrosos	10,2	12,9	4,9	5,5	5,2	7,4
Subsetor Química	25,0	17,6	14,8	14,0	10,2	3,5
Subsetor Mineração	7,2	7,3	7,2	7,3		
Restante da Indústria	29,1	38,7	16,8	20,4	12,4	18,3
<b>TOTAL</b>	<b>142,9</b>	<b>160,7</b>	<b>62,0</b>	<b>70,8</b>	<b>81,0</b>	<b>89,9</b>

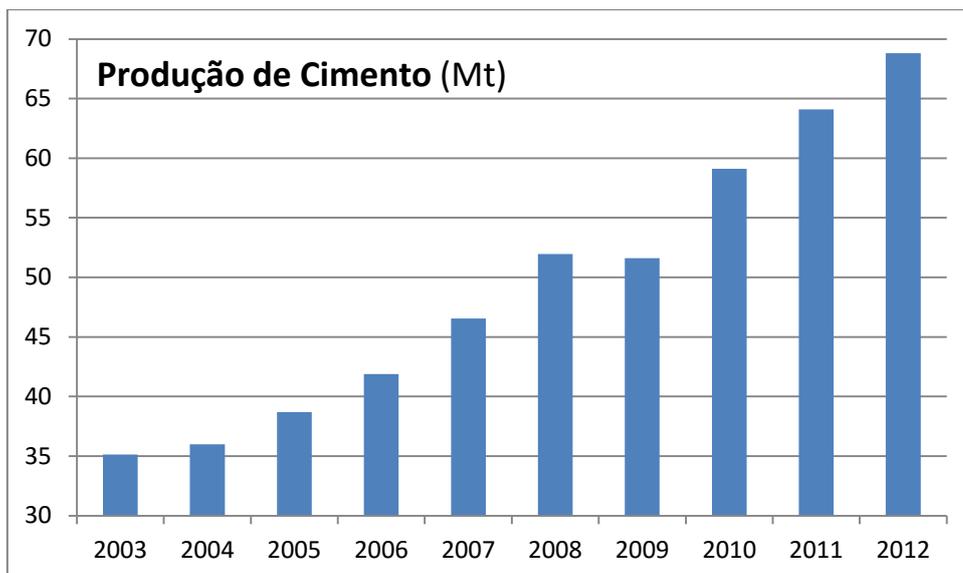
Fonte: (MCTI 3o, 2014)<sup>3</sup>

## 1. Subsetor Cimento

### 1.1. Introdução ao Subsetor Cimento

Em 2013, o setor de cimento gerou 0,43% do PIB nacional (21 bilhões de reais para um PIB de 4,8 trilhões de reais) ou 7,8% do setor industrial. Nestes últimos dez anos, a produção de cimento no país cresceu acima do PIB, acompanhando os Planos de Aceleração do Crescimento (PAC) com a expansão da infraestrutura nacional e dos programas habitacionais. A figura abaixo mostra o crescimento da produção nacional que praticamente dobrou em 10 anos:

<sup>3</sup> No final de 2014 foram publicados para efeitos de consulta pública, os Relatórios de Referência do Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Todos os valores de emissões para os anos de 2005 e 2010 foram extraídos destes Relatórios.



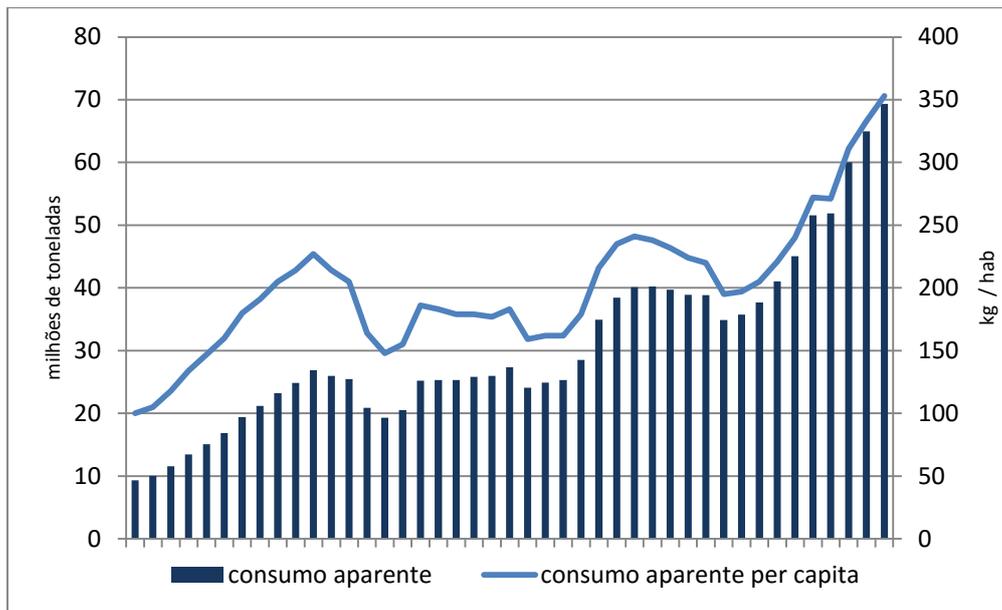
Fonte: (SNIC, 2013)

Figura 2. Produção nacional de cimento

Por ser um produto de baixo valor agregado, as transações internacionais de cimento são menos de 5% da produção mundial. No Brasil, a conjunção de jazidas de calcário e um mercado distribuído permitem que praticamente toda a produção seja consumida internamente. Entre 2010 e 2012, as importações representaram 1,4% do consumo aparente<sup>4</sup> enquanto as exportações não passaram de 1% da produção.

O gráfico abaixo mostra a evolução do consumo nacional em valores absolutos e per capita que, apesar do aumento recente, é da ordem de 350 kg/hab., bem abaixo da média mundial, de 550 kg/hab.. Em comparação, encontra-se em patamar compatível com países que já construíram toda sua infraestrutura e hoje atravessam uma queda no consumo, como Alemanha, França, EUA ou Japão. Na contramão, países em franco desenvolvimento experimentam valores acima dos 1.000 kg, tendo o seu principal expoente a China, que registra um consumo per capita de cerca de 1.650 kg/hab.. Analistas preveem que passará o pico de 2,0 t/hab. antes de voltar aos níveis dos países mais desenvolvidos que apresentam consumos médios entre 0,40-0,50 t/hab. (Wilson, 2014). A expectativa da indústria nacional é atingir valores próximos à média mundial nas próximas décadas.

<sup>4</sup> Consumo aparente de um bem é a soma de sua produção nacional com o saldo do balanço de importações e exportações.



Fonte: (SNIC, 2013)

**Figura 3.** Consumo de cimento aparente total e per capita no Brasil

O principal tipo de cimento fabricado é o Portland, subdividido em classes conforme o tipo de aditivo que o forma. As principais classes envolvem a adição de pozolanas, escória de alto forno, cinzas de termelétricas a carvão vapor e filer calcário.

A indústria de cimento é subdividida em vários mercados regionais, com 92 fábricas (2015) instaladas em 23 estados e no Distrito Federal. Estas fábricas procuram ser instaladas próximas das jazidas de calcário e dolomita e dos mercados consumidores, por conta do custo do transporte e por ser um produto perecível (validade variando de 60 a 90 dias). O raio de distribuição do produto situa-se entre 300 e 500 km nas regiões Sudeste e Sul, podendo chegar a mais de mil km no Norte e Nordeste do país com o custo de transporte representando entre 10-20% do preço final.

Considera-se que o setor tenha um parque industrial de última geração e alto grau de desenvolvimento, comparável aos principais produtores mundiais.

É um setor fortemente concentrado onde os três maiores grupos responderam, em 2012, por mais de 64% da produção nacional: Votorantim (35,4%), Interceмент (18,4%) e João Santos (10,4%)<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> [http://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset\\_cimento.pdf](http://www.economiaemdia.com.br/EconomiaEmDia/pdf/infset_cimento.pdf) dez/2014

Ao final de 2013, o setor tinha 28,7 mil postos de trabalho diretos o que correspondia a 0,1% dos existentes no país.

Mais de 90% das emissões da indústria do cimento vêm do processo de calcinação e da queima das diversas fontes de energia para gerar calor e movimento. O restante vem da emissão indireta do consumo elétrico e do transporte de materiais.

Da energia consumida numa planta de cimento no Brasil nos últimos cinco anos, a queima de combustíveis respondeu por 88%. Quase 90% da queima de combustível servem para gerar calor para as reações de calcinação da matéria prima. Os 10% restantes são usados em movimentação/transporte e outros aquecimentos. Desde 2000, o combustível mais utilizado é o coque de petróleo importado (85% da energia térmica) seguido de biomassa (carvão vegetal e resíduos de biomassa) e do grupo de coprocessamento, basicamente resíduos industriais e pneus usados.

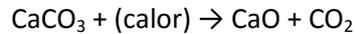
A energia elétrica corresponde a 12% do total da energia consumida na indústria. Destes, dois terços são consumidos nas moagens de clínquer e de matéria prima, um quarto na operação de fornos e sopradores e o restante nos demais motores elétricos.

Segundo o Cement Sustainability Initiative (CSI) / World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), a indústria brasileira está entre as mais eficientes do mundo, com um consumo térmico menor que a Europa, América do Norte e o resto da América do Sul. Por esta fonte, entre 2010 e 2012, a indústria consumiu em torno de 3,6 GJ por tonelada de clínquer (excluindo eletricidade) enquanto que as médias destes outros blocos de países foram, respectivamente, de 3,74 GJ/t clínquer, 3,91 GJ/t clínquer e 3,75 GJ/t clínquer, lembrando que o CSI representa o que há de mais moderno e eficiente no mundo. Do mesmo modo, a produção de cimento no Brasil consumiu, em média, 106 kWh/t cimento nesse período, abaixo dos 115 da Europa e 127 dos EUA.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Os dois principais indicadores adotados neste trabalho são energia térmica por tonelada de clínquer e as emissões de GEE por tonelada de cimento. Há divergências entre os valores destes indicadores reportados pelo CSI e os do Balanço Energético Nacional, usado nesse estudo. Há várias diferenças metodológicas que contribuem para essa divergência. Enquanto que, no CSI, a indústria brasileira é uma das mais eficientes em termos de energia e emissões, os valores calculados usando o BEN colocam o setor numa posição de menor destaque. O CSI aponta uma energia térmica variando entre 3,50 e 3,68 GJ/t clínquer entre 2010 e 2012. O universo do CSI envolve 75% das plantas existentes no país, provavelmente as mais globalizadas tanto tecnologicamente quanto com sua preocupação com os temas em torno da sustentabilidade. A eficiência maior no universo CSI resulta, portanto, de esforço continuado pelas últimas décadas na maior parte da produção nacional de cimento. Mas essa diferença nos universos não é suficiente para explicar as diferenças nos principais indicadores de desempenho. Um segundo motivo, mas igualmente relevante desta divergência seria que o BEN agrupa as fontes de coprocessamento e parte das de biomassa em duas colunas (Outras Primárias Não Renováveis e Outras Primárias Renováveis) atribuindo-lhes poderes caloríficos, não explicitados no corpo do BEN. A energia resultante divergiria, portanto, da reportada pelas mesmas empresas para o CSI. Uma terceira fonte desta divergência é que no BEN, constam fontes de energia que não são queimadas para geração de calor de processo (o diesel e o GLP usados em transporte interno seriam exemplos imediatos). Para efeito comparativo, expurgando-se estes combustíveis, reduz-se o indicador de energia térmica para um máximo de 3,96 GJ/t clínquer contra os

Do lado das emissões de processos, a principal reação de calcinação<sup>7</sup> que ocorre nos fornos de cimento é:



O produto do forno, clínquer, é o principal componente do cimento industrial. Conforme o IPCC<sup>8</sup>, as emissões de processo dependem dos teores dos diferentes carbonatos presentes no clínquer. O fator de emissão da calcinação por tonelada de clínquer reportados nas Comunicações Nacionais e nos recentes Relatórios de Estimativas Anuais de Emissões é praticamente constante e igual a 0,55 tCO<sub>2</sub>e/t clínquer.

No período 2010-2012, ainda segundo o CSI, a indústria brasileira de cimento emitiu, em média, 0,835 tCO<sub>2</sub>e/t clínquer, um pouco acima da média mundial no mesmo período, em torno de 0,823 tCO<sub>2</sub>e/t clínquer em que pesem as observações feitas na nota de rodapé 6.

Quanto aos demais impactos ambientais, cabe registrar que a indústria já foi uma das maiores fontes de poluição atmosférica, principalmente emitindo material particulado na saída dos fornos diretamente. Uma série de medidas legais acabou levando a melhorias de processo e a um aumento significativo na eficiência energética com a introdução de pré-calcinadores e filtros de pó com recuperadores de calor. A figura abaixo ilustra os principais impactos ambientais:

---

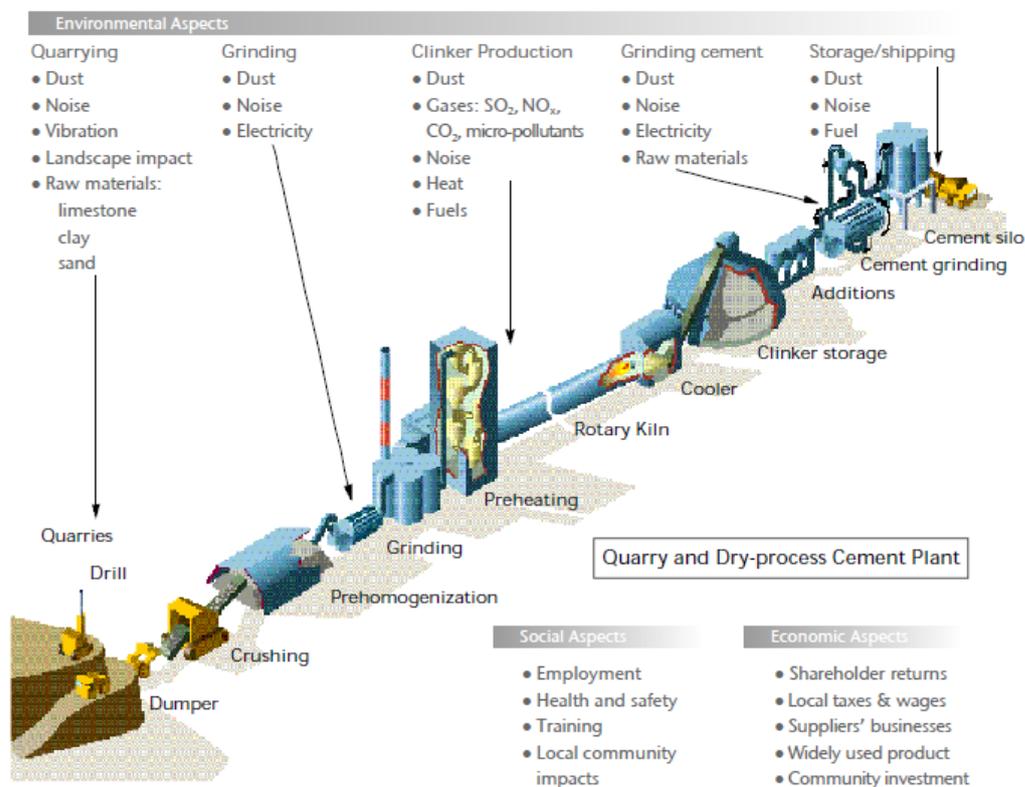
4,23 GJ/t clínquer obtido do BEN. Um estudo anterior (Monzoni & coordenadores, 2012) já havia identificado a mesma questão e, ali, optou-se por adotar os valores do Balanço Energético por “serem de fonte oficial, terem abrangência maior e estarem alinhados com o planejamento energético do País”. Nas discussões do CEC / IES-Brasil, este mesmo tema foi trazido e discutido com o setor. A adoção dos valores do BEN, em que pese os pontos acima, se deveu a necessidade de se manter um único referencial para todos os setores da economia nacional.

Internacionalmente, o indicador de emissões mais comum é calculado em função da produção de cimento para levar em conta os aditivos que compõe a família de cimentos. No caso brasileiro, retrata o esforço da indústria em buscar alternativas ambientalmente mais positivas para seus produtos. Neste trabalho, o foco ficou na produção do clínquer. Neste trabalho assumiu-se a premissa de que a relação clínquer/cimento permaneceria constante durante o período em função da dificuldade em se obterem dados consistentes que, dentre outros, estariam ligados a outros setores: indústria siderúrgica (geradora de escória), da geração termoelétrica a carvão mineral (geradora de cinzas) e de resíduos agrícolas e de biomassa, todos empregados como aditivos no cimento. Entendeu-se que esta premissa não compromete a análise realizada.

Tendo em vista as questões apontadas acima, foi constituído um grupo de trabalho composto por representantes do SNIC (Sindicato Nacional da Indústria de Cimento) e da EPE (Empresa de Pesquisa Energética) com o objetivo de aperfeiçoar a coleta de dados de consumo de energia na indústria de cimento para a elaboração do Balanço Energético Nacional, podendo vir a alterar os indicadores setoriais utilizados no presente estudo

<sup>7</sup> A reação envolvendo magnésio ao invés de cálcio, também presente no calcário e, principalmente, na dolomita, é semelhante gerando óxido de magnésio e dióxido de carbono.

<sup>8</sup> 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3: Industrial Processes and Product Use, Chapter 2 - Mineral Industry Emissions



Fonte: (Cement Sustainability Initiative, 2002)

Figura 4. Impactos ambientais de uma planta de cimento

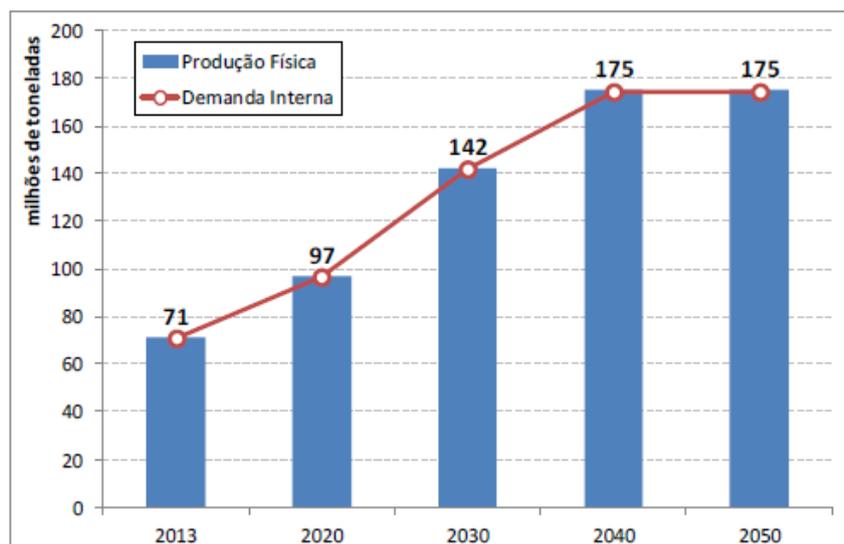
## 1.2. Cenário de Plano Governamental (CPG)

A EPE aponta que “A construção civil e infraestrutura é um dos setores com perspectivas mais favoráveis no cenário deste plano<sup>9</sup>. A construção civil compreende a edificação de complexos hoteleiros, shopping centers, unidades residenciais, dentre outras estruturas. (...) Dessa forma, tendo em vista as perspectivas macroeconômicas, espera-se um crescimento forte, sobretudo nos primeiros dez anos, compatível com o objetivo do país de apresentar uma infraestrutura madura, maior e mais eficiente, mais próxima dos países desenvolvidos”.

A indústria do cimento teria, então, um crescimento acima das demais indústrias de transformação. Reforçando esta expectativa, a EPE sublinha que “o cimento, por exemplo, possui um consumo per capita nacional próximo ao de outros países latino-americanos, como o México e a Venezuela. Ao longo

<sup>9</sup> Em 2014, a EPE publicou as duas primeiras partes do Plano Nacional de Energia 2050, que foi adotado como a base do Cenário de Plano Governamental.

do horizonte, contudo, o aumento esperado da renda per capita deve ser acompanhado por uma elevação do consumo per capita deste bem. (...) Ao final do horizonte de 2050, espera-se que a renda per capita brasileira alcance níveis próximos aos atuais de países desenvolvidos, com um consumo per capita de cimento semelhante ao atingido ao final da década anterior. (...) Visando atender a esta demanda, espera-se que a produção nacional de cimento cresça mais de 140% em relação ao nível atual (2013), atingindo seu ápice em torno de 2040, chegando a cerca de 175 milhões de toneladas anuais. A partir desse momento, tanto a demanda interna quanto a produção nacional mantêm-se relativamente estáveis em torno deste valor, por conta da saturação da infraestrutura nacional e do início de um período de crescimento econômico um pouco mais modesto”.



Fonte: (EPE 12/14, 2014)

Figura 5. Projeção de crescimento da produção de cimento no CPG

O gráfico acima mostra a curva de crescimento da produção de cimento no CPG.

### 1.2.1. Premissas Utilizadas na Modelagem

- No período estudado, assume-se que não há mudança tecnológica que altere as emissões advindas das reações de calcinação. Assim, as emissões de processo são projetadas em função da produção de clínquer.
- Assume-se que o teor de clínquer no cimento também não se altere ao longo do período.
- Adicionalmente, a EPE adotou as seguintes premissas para o setor:
- Crescimento da economia implicando no aumento da demanda de cimento;

- Correlação positiva com crescimento dos setores de infraestrutura e habitação;
- Não há exportação líquida, portanto a demanda interna é totalmente suprida pela produção nacional;
- Em termos de eficiência, há uma menor intensidade do uso de cimento no longo prazo (pré-moldados e avanço do uso de outros materiais, redução da importância do consumo formiga);

Especificamente em relação à demanda de energia, a EPE adotou as seguintes premissas:

- A participação do coque de petróleo na matriz energética do setor permanece constante, em torno de 70%, ao longo de todo o período;
- O coprocessamento, tratado no BEN como “outras fontes primárias de energia” também permanece constante (7%)<sup>10</sup> ao longo do período;
- Finalmente, estima que a eficiência energética nesta indústria permita reduzir a energia térmica em 17% (de 0,077 em 2013 para 0,064 tep/t de cimento até 2050).

### 1.2.2. Medidas de Mitigação já Incluídas no CPG

No Cenário de Plano Governamental, as projeções de crescimento de produção e de demanda de energia em princípio embutem reduções de emissão quando comparadas a um cenário inercial ou “business as usual”. Este cenário inercial não é explicitado nos documentos da EPE. A única referência direta seria o aumento da eficiência energética citado no último ponto acima o que implica numa redução da intensidade de emissões por tonelada de cimento.

### 1.2.3. Resultados Finais

O cálculo das emissões de processo no Cenário de Plano Governamental consistiu em:

- Partir da curva de crescimento da produção de cimento estabelecida pela EPE (EPE 12/14, 2014);
- Assumir constante o teor de clínquer no cimento até 2030 e igual a 0,68 t clínquer / t cimento;
- Assumir constante a emissão unitária das reações de calcinação até 2030. O valor usado foi obtido a partir da média de 2005 a 2010, da razão entre as emissões de processo publicadas nas

---

<sup>10</sup> Eletricidade responde por 12% e os 11% restantes incluem carvão vegetal, carvão vapor e outros.

“Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil” (MCTI, 2013) e a produção de clínquer calculada a partir da produção de cimento publicada pelo setor (SNIC, 2013);

O cálculo das emissões da combustão de fontes de energia, tanto para a calcinação como para outros usos (transporte, secagem, etc.) foi feito tomando a projeção de demanda de fontes de energia da EPE (EPE 13/14, 2014), os poderes caloríficos definidos no Balanço Energético Nacional (EPE, 2013) e os fatores de emissão dos combustíveis publicados pelo (IPCC, 2006)<sup>11</sup>.

**Tabela 6.** Cenário de Plano Governamental (CPG) – principais projeções

Subsetor Cimento	CPG	
	2005	2030
Nível de atividade (Mt cimento)	38,7	142,0
Nível de atividade (número índice)	1	3,67
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	23,38	86,82
Emissões (número índice)	1	3,71
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t cimento)	0,60	0,61
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t clínquer)	0,86	0,90

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

### 1.3. Cenário de Mitigação Adicional (MA)

#### a) Medidas consideradas nos Cenários de Mitigação Adicional

Um conjunto de duas medidas de mitigação foi estudado nos dois cenários (MA1 e MA2) propostos:

- A. Aumento da Eficiência Térmica da Calcinação atingindo os melhores níveis propostos internacionalmente para o período até 2030. Foi considerada apenas a fração adicional ao Cenário 2050 da EPE;
- B. Aumento da participação do coprocessamento na matriz de fontes do setor. Foi considerada apenas a fração adicional ao Cenário 2050 da EPE;

<sup>11</sup> O material usado para coprocessamento é um *blend* de vários resíduos industriais e de biomassa. Adotou-se aqui a hipótese conservadora de considerar nula as emissões deste material posto que a alternativa seria sua decomposição em aterros e lixões onde, ao invés de emitir apenas CO<sub>2</sub>, haveria uma fração de emissões de metano.

**Tabela 7.** Medidas de Mitigação Adicionais aplicadas nos Cenários

Medida	CPG	MA1	MA2
Aumento de eficiência térmica	Reduzir o indicador global de 0,077 em 2013 para 0,064 tep/t de cimento até 2050	Reduzir energia térmica para calcinação de 3,8 para 3,56 GJ/t clínquer até 2030	Reduzir energia térmica para calcinação de 3,8 para 3,35 GJ/t clínquer até 2030
Aumento de coprocessamento	O coprocessamento permanece em 7% da demanda de energia do setor	Aumentar coprocessamento em 50% até 2030 ficando responsável por 10,5% da demanda de energia do setor	Aumentar coprocessamento em 100% até 2030 ficando responsável por 14% da demanda de energia do setor

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

b) Medidas sugeridas pelo CEC e não modeladas

Não houve medidas sugeridas e não modeladas.

### 1.3.1. Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1)

#### 1.3.1.1. Medidas de mitigação já previstas no CPG cujo alcance foi ampliado

- O aumento de eficiência energética no setor é explicitado no CPG quando, na projeção da demanda de energia, é dito que:

“Em termos da evolução de consumo específico total de energia na indústria de cimento, estima-se que a eficiência energética nesta indústria permita reduzir o indicador global deste segmento de 0,077 para 0,064 tep/t de cimento<sup>12</sup>. Para o consumo de eletricidade, este consumo específico é estimado reduzir-se de 112 para 93 kWh/t de cimento, ou seja, redução de aproximadamente 17% em relação ao ano base<sup>12</sup>. Basicamente, esses ganhos de eficiência serão devidos a sistemas de moagem de materiais e de queima de clínquer mais eficientes” (EPE 13/14, 2014)<sup>13</sup>. Este ganho de eficiência está incluído nos valores de demanda de energia projetados no Plano 2050.

Conforme discutido nas reuniões com o CEC, para o Cenário de Mitigação Adicional 1, usou-se o indicador específico de energia térmica por unidade de clínquer produzido e propõe-se reduzir em 6% (de 3,77 em 2013 para 3,56 GJ/t clínquer em 2030), mantendo-se o mesmo perfil de fontes. Este valor é a média entre o inicial e a meta do Cenário de Mitigação 2 (3,35 GJ/t clínquer). Ele corresponde à média do intervalo previsto no estudo que serviu de base

<sup>12</sup> Na Nota Técnica DEA 13/14 – Demanda de Energia 2050 / EPE, o ano base é 2013 e os valores finais referem-se ao final do período, ou seja, 2050.

<sup>13</sup> Tomando o valor default para o período de 68% t clínquer/t cimento, estes valores equivalem a 4,74 e 3,94 GJ/t clínquer. Lembrar que o valor desta intensidade publicado pela CSI para 2012 é 3,52 GJ/t clínquer e, usando diretamente os valores do BEN para 2012 resulta num valor de 4,21 GJ/t clínquer.

para a elaboração do Roadmap proposto pelo CSI em 2009<sup>14</sup> (Cement Sustainability Initiative, 2009) (Cement Sustainability Initiative / European Cement Research Academy, 2009).

- O aumento relativo de 50% do coprocessamento na matriz energética do setor foi projetado adicionalmente ao aumento previsto no PNE 2050 e adicionalmente à medida de eficiência energética descrita acima<sup>15</sup>.
- O investimento necessário para estas duas medidas foi extraído do capítulo “*Estimated Cumulative Additional Investment Needs in the BLUE Scenarios*” do Roadmap 2009 do CSI (Cement Sustainability Initiative, 2009) e trazido para dólares americanos de 2005. O valor usado foi de 24,26 US\$/t cimento acrescentado à capacidade atual. Adotou-se um valor de 5% do investimento a título de O&M. Os aumentos de capacidade foram agrupados em blocos de cinco anos durante os quais só os custos operacionais adicionais são contabilizados.
- As medidas voltadas para a eficiência na geração de calor para as reações de calcinação dependem principalmente do crescimento do mercado e do ambiente de investimento. Na medida em que os maiores grupos são globalizados, não há obstáculos importantes para sua transferência.
- Quanto ao aumento da participação do coprocessamento, foi apontada a não uniformidade por parte das agências estaduais de meio ambiente no que toca à regulamentação de seu aproveitamento e à extensão de materiais passíveis de serem utilizados. Um segundo aspecto refere-se à logística associada aos resíduos potencialmente usados no coprocessamento.
- Não houve outras medidas de mitigação com respeito ao CPG.

#### 1.3.1.2. Resultados do MA1

O cálculo das emissões de processo no Cenário de Mitigação Adicional 1 consistiu em:

- Partir da curva de crescimento da demanda de energia do CPG e da curva de crescimento da produção já utilizada;
- Assumir que a intensidade de energia térmica atinja 3,56 GJ/t clínquer em 2030;

---

<sup>14</sup> Como parte do programa do CSI, em 2014, o SNIC iniciou o desenvolvimento de um *roadmap* análogo para o setor nacional, compilando estatísticas e definindo com seus associados, seu entendimento da trajetória a ser buscada.

<sup>15</sup> A primeira medida foi simulada partir da projeção das fontes de energia, extraída do PNE2050 e com incrementos lineares das fontes, de modo a atingir a meta de intensidade térmica em 2030. Num segundo passo, acrescenta-se 50% de coprocessamento substituindo, em energia, o coque de petróleo.

- Assumir uma variação linear desta intensidade para os anos 2015, 2020 e 2025;
- Aumentar em 50% a energia do coprocessamento e reduzir o coque de petróleo;
- Aplicar as mudanças de nível de atividade calculadas pelo IMACLIM para o setor de cimento. O IMACLIM foi rodado aplicando-se as medidas e uma segunda vez aplicando-se uma taxa de 20 US\$/tCO<sub>2</sub>e para o conjunto de emissões de GEE;
- Calcular as emissões da energia térmica, como feito no caso do CPG;
- Calcular as emissões de processo partindo dos valores do CPG e aplicando as alterações no nível de atividade;

**Tabela 8.** Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) – principais projeções

Subsetor Cimento	2005	CPG	MA1	MA1+T
		2030		
Nível de atividade (Mt cimento)	38,7	142,0	140,9	140,3
Nível de atividade (número índice)	1	3,67	3,64	3,62
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	23,38	86,82	82,66	82,28
Emissões (número índice)	1	3,71	3,54	3,52
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t cimento)	0,60	0,61	0,59	0,59
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t clínquer)	0,86	0,90	0,86	0,86

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

### 1.3.2. Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2)

#### 1.3.2.1. Medidas de mitigação já previstas no MA1 cujo alcance foi ampliado.

- Para o Cenário de Mitigação Adicional 2, usou-se o indicador específico de energia térmica por unidade de clínquer produzido e propõe-se reduzir em 18% (de 3,77 em 2012 para 3,35 GJ/t clínquer em 2030), mantendo-se o mesmo perfil de fontes. Ele corresponde á média do intervalo previsto no estudo que serviu de base para a elaboração do Roadmap proposto pelo CSI em 2009<sup>14</sup>.
- O aumento relativo de 100% do coprocessamento na matriz energética do setor foi projetado adicionalmente ao pequeno aumento previsto no PNE 2050 e adicionalmente à medida de eficiência energética descrita acima<sup>15</sup>.

- O investimento necessário para estas duas medidas foi extraído do capítulo “*Estimated Cumulative Additional Investment Needs in the BLUE Scenarios*” do Roadmap 2009 do CSI (Cement Sustainability Initiative, 2009) e trazido para dólares americanos de 2005. O valor usado foi de 131,19 US\$/t cimento acrescentada à capacidade atual. Adotou-se um valor de 5% do investimento a título de O&M. Os aumentos de capacidade foram agrupados em blocos de cinco anos durante os quais só os custos operacionais adicionais são contabilizados.
- Não houve outras medidas de mitigação com respeito ao CPG.

### 1.3.2.2. Resultados do MA2

- O cálculo das emissões de processo no Cenário de Mitigação Adicional 2 seguiu os mesmos passos do MA1. O IMACLIM foi rodado aplicando-se as medidas e uma segunda vez aplicando uma taxa de 100 US\$/tCO<sub>2</sub>e para o conjunto de emissões de GEE:

**Tabela 9.** Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) - principais projeções

Subsetor Cimento	2005	CPG	MA2	MA2+T
		2030		
Nível de atividade (Mt cimento)	38,7	142,0	140,76	138,12
Nível de atividade (número índice)	1	3,67	3,64	3,57
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	23,38	86,82	79,45	77,96
Emissões (número índice)	1	3,71	3,40	3,33
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t cimento)	0,60	0,61	0,56	0,56
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t clínquer)	0,86	0,90	0,83	0,83

**Fonte:** Elaborada pelo IES-Brasil

## 1.4. Análise Comparativa dos Cenários CPG, MA1, MA1+T, MA2 e MA2+T

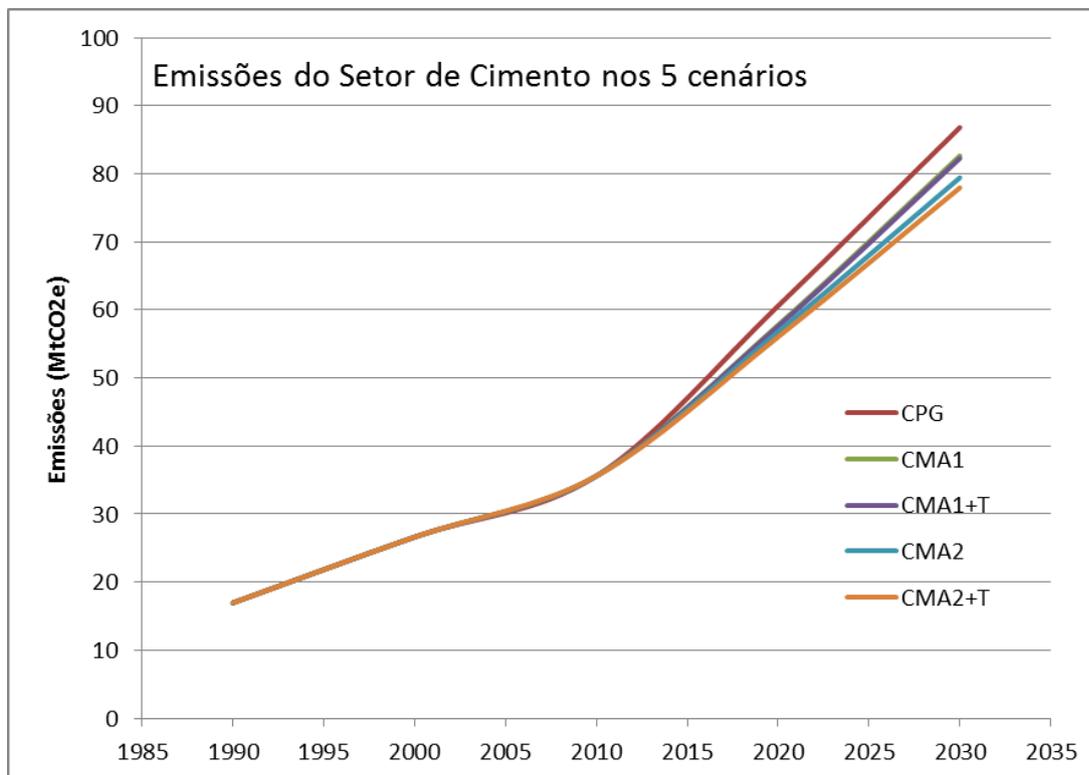
### 1.4.1. Potencial de Mitigação

A tabela e gráfico abaixo apresentam as emissões do setor cimento em intervalos decenais:

**Tabela 10.** Emissões nos cinco cenários estudados

Subsetor Cimento	1990	2000	2010	2020	2030
	MtCO <sub>2</sub> e				
CPG	16,95	26,64	35,95	60,60	86,82
MA1	16,95	26,64	35,95	57,79	82,66
MA1+T	16,95	26,64	35,95	57,60	82,28
MA2	16,95	26,64	35,95	56,80	79,45
MA2+T	16,95	26,64	35,95	56,05	77,96

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil



Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Figura 6.** Emissões de cimento nos cinco cenários estudados

- Análise comparativa do subsetor

O Setor de Cimento e suas emissões crescem constantemente e o comportamento nos cenários é condizente com as premissas onde as emissões no cenário de Plano Governamental são sempre as mais altas; as emissões nos cenários de mitigação adicional 1 são intermediárias e os dos cenários de mitigação adicional 2 são as mais baixas. As emissões nos cenários de taxas de carbono são ligeiramente menores do que nos cenários normativos pela redução de atividade que a taxa provoca na economia. Ao final do período, a diferença entre o CPG para o MA1 é de 4,8% e para o MA1+T de 5,2%. A diferença entre o CPG para o MA2 é de 8,5% e para o MA2+T é de 10,2%.

### 1.4.2. Aspectos Socioeconômicos

As medidas de mitigação estudadas reduzem as emissões quando comparadas com o cenário de Plano Governamental de forma relativamente modesta. Por ser o cimento um insumo básico e de baixo valor agregado, o impacto que as ações de mitigações têm no preço do produto final poderiam ser importantes. Estimou-se este impacto trazendo a valor presente os custos com a implantação das medidas nos dois cenários adicionais.

A tabela abaixo resume indicadores dos cenários<sup>16</sup>:

**Tabela 11.** Resultados econômicos das medidas de mitigação do setor de cimento

	MA1	MA2
VPL (milhão US\$ <sub>2005</sub> )	489	2.642
Redução de emissões (MtCO <sub>2e</sub> ) no período 2015-2030	31,24	56,31
US\$/tCO <sub>2e</sub>	15,64	46,93
US\$/t cimento	0,32	1,72

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

Considerando um preço de referência em 2005 da tonelada de cimento de 55 US\$/t cimento (SNIC, 2005), quando aplicadas as medidas no cenário de mitigação adicional 1, o impacto neste preço é de menos de 1% e das medidas no cenário de mitigação adicional 2 é de 3,1%. Em um contexto diferente, a modelagem do IMACLIM indicou que para que as medidas de mitigação implicassem em reduções mais expressivas, o impacto no custo de produção e, portanto, no preço do produto seria alto. Em um caso extremo, o cimento possivelmente importado passaria a ser competitivo em certas regiões ou, como aponta o Plano 2050: “Entretanto, há uma progressiva redução da intensidade de uso do material,

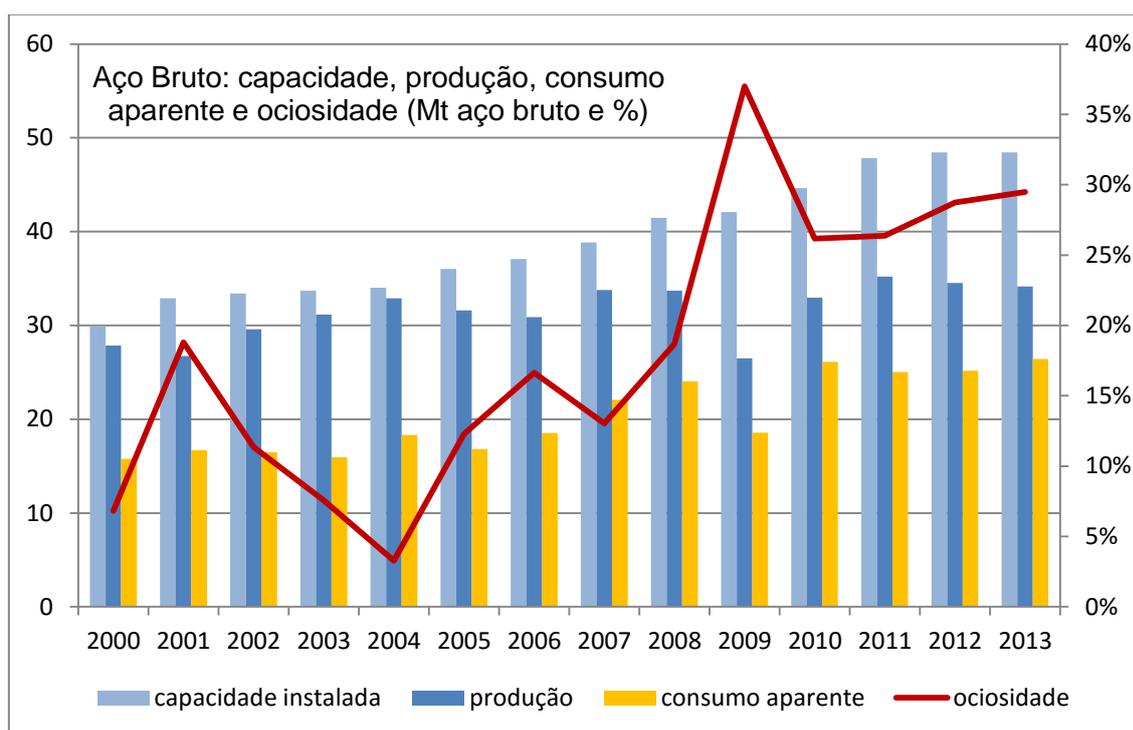
<sup>16</sup> As diferenças nos valores do VPL e dos custos de mitigação entre o cenário normativo e o de aplicação de uma taxa de carbono são menores do que 3%.

principalmente devido à disseminação de construções mais eficientes, com maior intensidade de aço, conforme se observa em diversos países com infraestrutura mais desenvolvida”.

## 2. Subsetor Siderurgia

### 2.1. Introdução ao Subsetor Siderurgia

Em 2013, o setor siderúrgico gerou 0,65% do valor adicionado nacional o que corresponde a 2,7% do setor industrial. Nestes últimos dez anos, a produção de aço praticamente não cresceu. A figura abaixo mostra a produção nacional, a capacidade instalada, o consumo aparente de produtos siderúrgicos e a ociosidade do setor:



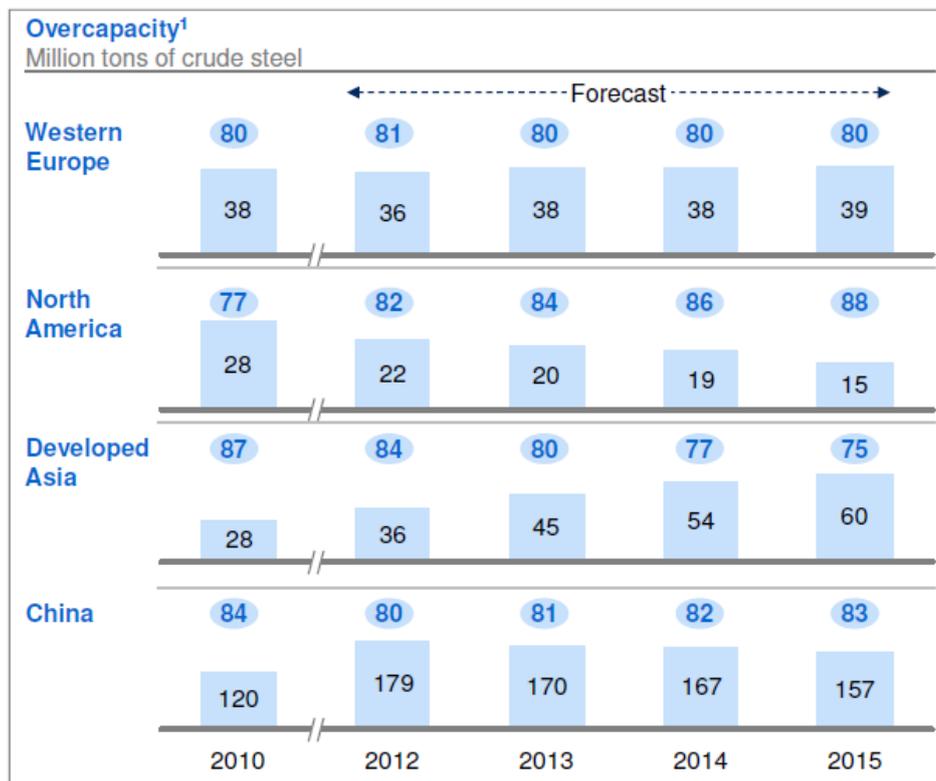
Fonte: (Bradesco Aço, 2014)

Figura 7. Aço: capacidade instalada, produção, consumo aparente e ociosidade<sup>17</sup>

A produção de aço bruto retomou um lento crescimento após a crise de 2008, mas passa por nova queda desde 2011. Segundo o Sumário Mineral do MDIC, “A principal preocupação da indústria

<sup>17</sup> Capacidade e produção de aço bruto; consumo aparente de produtos siderúrgicos.

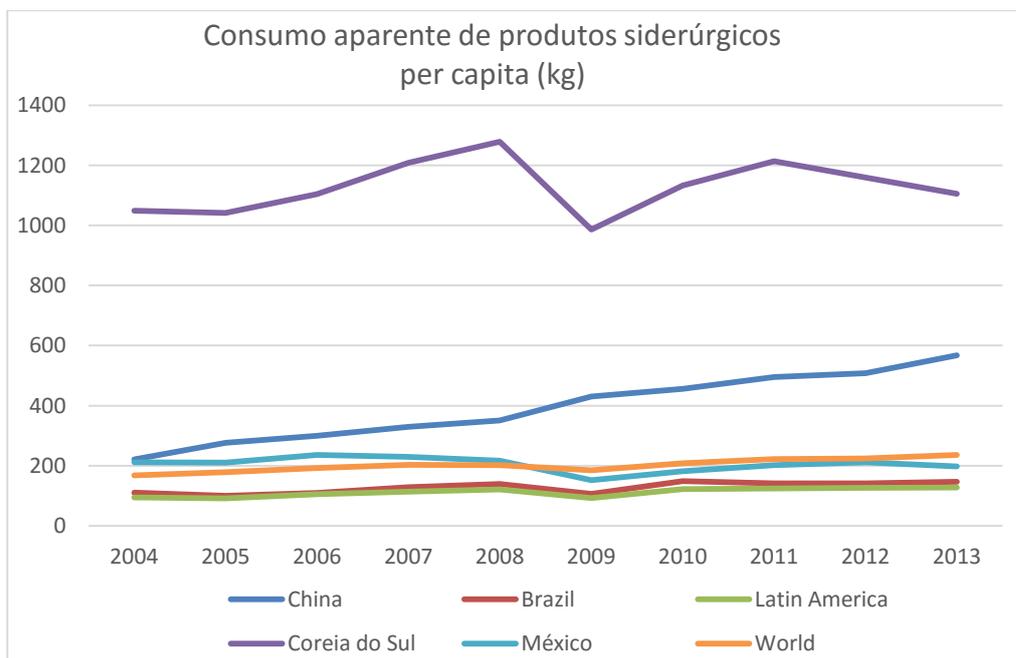
siderúrgica mundial é o excesso de capacidade instalada de produção, estimado em 580 milhões de toneladas de aço. Para que a indústria volte a ter uma situação mais equilibrada seria necessário reduzir a capacidade instalada mundial em pelo menos 300 milhões de toneladas. (...) No Brasil não haveria necessidade de desativação de usinas, pois nos últimos anos houve um grande investimento na modernização do parque siderúrgico” (DNPM, 2014). A figura abaixo mostra uma estimativa da capacidade da siderurgia mundial (McKinsey, 2013). Notar que uma sobrecapacidade de 20% corresponderia a uma produção de 330 milhões de toneladas, quase dez vezes a produção nacional de 2013. A consequência deste excedente é perda de competitividade do produto nacional frente à indústria chinesa, principalmente, perda esta que se exacerba quando custos adicionais são considerados.



Fonte: (McKinsey, 2013)

**Figura 8.** Consumo aparente de produtos siderúrgicos per capita da McKinsey (2013)

O gráfico abaixo mostra o consumo aparente de produtos siderúrgicos per capita no Brasil, China e a média mundial nos últimos sete anos, incluindo a crise de 2008-09. Notar que o consumo per capita brasileiro permanece da ordem de 60% da média mundial.



Fonte: (WSA, 2014)

Figura 9. Consumo aparente de produtos siderúrgicos per capita da WSA (2014)

Um trabalho realizado pelo Instituto do Aço Brasil em 2013<sup>18</sup> apresenta o cenário do momento, seus entraves e os caminhos para o desenvolvimento do setor. Destacam-se:

- De 2008 a 2013, enquanto os preços medidos pelo IGP e IPCA aumentam em torno de 25%, o preço de produtos siderúrgicos cai entre 5 – 15%.
- Em 2004, o custo médio de produção mundial era 39% superior ao custo brasileiro. Em 2013, a diferença cai significativamente, denotando a perda de competitividade do produto nacional;
- Razões para a perda de competitividade:
  - Tributação de 50 – 100% maior do que a média internacional;
  - Política cambial até 2013 favorecendo importação;
  - “Ao longo dos últimos anos vem ocorrendo uma brutal transferência de margens para as matérias primas”, em contrapartida à fabricação;
- Preço da eletricidade 50% acima da média mundial (2012) sendo que os preços praticados nos últimos 24 meses foram ainda maiores;
- A conclusão do trabalho é que o crescimento do setor dependerá fortemente do crescimento do mercado interno.

<sup>18</sup>A indústria do aço no Brasil e no mundo, IABr, (Vieira, 2013)

Em 2013, a indústria tinha 100.924 colaboradores, entre efetivos e terceirizados que, ao longo da cadeia, estimulou cerca de 2,4 milhões de empregos indiretos e induzidos.

No que se refere a impactos ambientais, talvez um dos maiores seja o uso de carvão vegetal de origem ilegal. No Brasil, o carvão vegetal é produzido pelas indústrias de aço, por produtores independentes de gusa e de carvão. Estima-se que mais de 60% do carvão vegetal em 2010 foram produzidos a partir de florestas não plantadas (WWF-Brasil, Instituto Ethos de Empresas e Responsabilidade Social, Rede Nossa São Paulo, Fundação Avina, 2012). Em 2013 todos os produtores de aço do país assinaram o Protocolo de Sustentabilidade do Carvão Vegetal<sup>19</sup> que, dentre outras, propôs a meta de “Concluir, em até quatro anos (2016), o pleno atendimento de estoques florestais às respectivas demandas de produção por meio de plantio próprio ou plantio de terceiros, desde que em consonância com os requisitos legais”.

É importante destacar que a siderurgia brasileira, sobretudo as usinas integradas, vem realizando esforços importantes no sentido da redução de emissões. Exemplo disto são os projetos MDL de aproveitamento de gases de alto-forno para a geração de energia elétrica além de melhorias constantes de processos. No entanto a atual situação de ociosidade e perda de competitividade acaba desestimulando maiores avanços.

No tocante às emissões, foram seguidas as diretrizes do IPCC para elaboração de Inventários Nacionais e, em especial, as adotadas na elaboração do 3º Inventário de Emissões (documentos de consulta pública). As emissões da coqueificação e da produção de carvão vegetal são lançadas como parte do setor energético (e não industrial) e as emissões de cal são declaradas separadas das da siderurgia.

O Anexo Metodológico do Relatório de Referência: Emissões de Gases de Efeito Estufa por Queima de Combustíveis: Abordagem *Bottom-Up* (MCTI, 2014) cita os combustíveis que não foram considerados no inventário de energia: “Os combustíveis utilizados como redutores na indústria de ferro gusa e aço, ferroligas e não ferrosos estão contabilizados em Processos Industriais, capítulo 4, *Metal Industry Emissions*, de IPCC (2006). Ressalte-se que foram considerados redutores os valores de coque de petróleo, outros carvões betuminosos<sup>20</sup> e carvões coqueificáveis<sup>21</sup> cujo uso final, de acordo com o Balanço de Energia Útil (BEU, 2005) se deu em Aquecimento Direto”. O Anexo também traz o fator de emissão utilizado para o gás de coqueria. Para os demais gases existentes em plantas siderúrgicas, a aplicação de equações de Tier 1 estão incluídas nas emissões do redutor, posto que se assume que todo seu carbono é convertido em CO<sub>2</sub> ou incorporado ao aço.

---

<sup>19</sup> Ver <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/sustentabilidade-carvao-vegetal.asp>

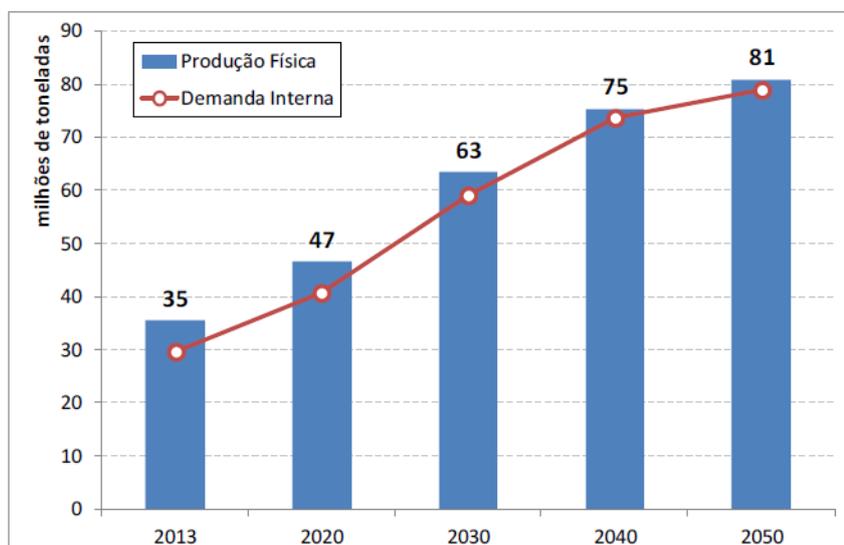
<sup>20</sup> Carvão vapor 5900 kcal/kg e somente no ano de 1994.

<sup>21</sup> Carvão metalúrgico e carvão 6000kcal/kg.

## 2.2. Cenário de Plano Governamental (CPG)

A EPE, no Plano Nacional de Energia 2050, aponta que “O desempenho esperado para a construção civil e infraestrutura e o aumento com dispêndios em bens de capital compatíveis com o crescimento econômico nos patamares deste cenário são fatores que induzem a uma expectativa de crescimento da produção deste setor. Quanto à oferta, o setor tem boas condições de competir no mercado internacional, favorecido pelo acesso ao minério de ferro e o complexo logístico privado e maduro. Quanto ao minério, o Brasil se beneficia da grande disponibilidade da hematita, que possui alto grau de pureza. Em relação à logística, as principais siderúrgicas estão interligadas aos portos e às minas num complexo razoavelmente eficiente. Além disso, a tecnologia dessas plantas está próxima à fronteira de competitividade. (...) O setor também é bastante influenciado pelo preço das commodities nas bolsas internacionais. No cenário adotado, supõe-se que os preços permanecem em patamares competitivos, em resposta ao desempenho macroeconômico mundial favorável. Com os condicionantes de oferta e demanda acima relacionados e considerando um ambiente de negócios prospectivo favorável, projeta-se um crescimento da indústria doméstica com ganho de participação no consumo aparente ao longo do horizonte do plano. Esse crescimento se dará com mais intensidade numa primeira fase com uma desaceleração à medida que o consumo per capita dos setores demandantes atinjam padrões do mundo desenvolvido” (EPE 12/14, 2014).

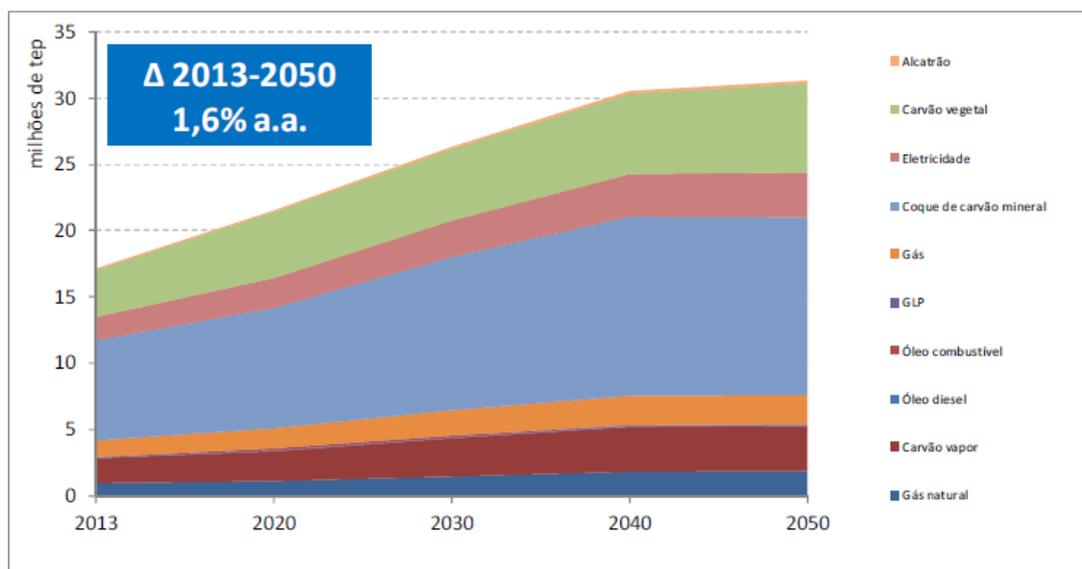
O gráfico abaixo mostra a curva de crescimento da produção de aço no CPG.



Fonte: (EPE 12/14, 2014)

**Figura 10.** Projeção de crescimento da produção de aço no CPG

Para acompanhar este aumento de produção, a EPE assume que a demanda por fontes de energia seguirá a curva abaixo<sup>22</sup>:



Fonte: (EPE 13/14, 2014)

**Figura 11.** Projeção da demanda de energia para produção de aço no CPG

### 2.2.1. Premissas Utilizadas na Modelagem

A EPE (EPE 13/14, 2014) adotou as seguintes premissas:

- Não há quase variação na participação relativa das fontes. Mesmo a troca entre carvão vegetal e mineral, prevista na Política Nacional de Mudanças Climáticas (MDIC - CTPIN, 2011), não é refletida no PNE 2050;
- O Plano prevê ainda, ganhos de eficiência que “permitem reduzir o consumo específico de energia, que evolui de 0,48 para 0,39 tep por tonelada de aço bruto entre 2013 e 2050”.

Adicionalmente foi adotada a premissa abaixo:

<sup>22</sup> A EPE lista medidas que levam à redução da intensidade energética do aço nacional e dá um destaque especial à energia elétrica. Depreende-se do texto que não haverá mudança significativa de rota tecnológica até 2050. O IES-Brasil, ao adotar o PNE 2050 como cenário de planejamento governamental, seguiu esta mesma premissa.

- Na medida em que parte do cálculo das emissões é feita em função da produção de sinter nas usinas integradas, adotou-se a relação entre sinter e aço bruto permaneça constante e igual a 90,1% (média entre 2000 e 2006).

### 2.2.2. Medidas de Mitigação já Incluídas no CPG

- No Cenário de Plano Governamental, as projeções de crescimento de produção e de demanda de energia em princípio embutem reduções de emissão quando comparado a um cenário inercial ou “business as usual”. Este cenário inercial não é explicitado nos documentos da EPE. A única referência direta seria o aumento da eficiência energética citado acima que implica numa redução da intensidade de emissões por tonelada de aço bruto.

### 2.2.3. Resultados Finais

O cálculo das emissões de processo no Cenário de Plano Governamental consistiu em:

- Partir da curva de crescimento da produção de aço bruto estabelecida pela EPE (EPE 12/14, 2014);
- Assumir constante a relação de produção de sinter e aço bruto até 2030 e igual a 90,1%<sup>23</sup>;

O cálculo das emissões da queima do coque de carvão mineral é feito separadamente, sob a rubrica de emissões de processo, como indicado no *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006).

Este e o cálculo das emissões da combustão das demais fontes de energia foram feitos tomando a projeção da EPE (EPE 13/14, 2014), os poderes caloríficos definidos no Balanço Energético Nacional (EPE, 2013) e os fatores de emissão dos combustíveis publicados pelo (IPCC, 2006).<sup>24</sup>

**Tabela 12.** Cenário de Plano Governamental (CPG) – principais projeções

Subsetor Siderurgia	2005	CPG
		2030

<sup>23</sup> Como a qualidade da matéria prima vem se deteriorando, poderá ser necessária a utilização de mais sinter para produção de aço, gerando, conseqüentemente, mais emissões.

<sup>24</sup> O 3º Inventário Brasileiro de Emissões trouxe uma modificação metodológica em relação às publicações oficiais (1º e 2º Inventários e as duas versões das Estimativas de Emissões, todos coordenados pelo MCTI). As emissões associadas às reações de redução advindas da queima dos vários carvões minerais e vegetais, bem como de coque de carvão e de petróleo passaram a ser reportados unicamente no capítulo de Processos Industriais. É importante chamar a atenção para este ponto ao fazer comparações com documentos anteriores.

Nível de atividade (Mt aço bruto)	31,65	63,00
Nível de atividade (número índice)	1	1,99
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	44,15	71,34
Emissões (número índice)	1	1,62
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t aço bruto)	1,39	1,13

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

## 2.3. Cenário de Mitigação Adicional (MA)

### a) Medidas consideradas nos Cenários de Mitigação Adicional

A. Aumento de eficiência energética geral na indústria de 2%<sup>25</sup>. Foi considerada apenas a fração adicional ao Cenário 2050 da EPE. Este valor foi considerado a partir dos estudos “*IEA World Energy Investment Outlook 2014: Energy Efficiency Investment Assumption Tables*” (IEA, 2014), “*A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050*” (EuroFer, 2013) e “*Global Perspectives and Best Practice in the Steel Industry*” (WSA, 2013) e incluem, potencialmente:

- Aumento da reciclagem de sucata: a intensidade de emissões na rota semi-integrada é menor do que na integrada por conta do processo e do uso maior de carvão vegetal;
- Recuperação de calor de escória;
- Aumento na utilização de resíduos combustíveis;
- Queimadores Recuperativos;
- Controle melhorado da combustão na fornalha do alto forno;

Este ganho, aparentemente baixo, é limitado por conta de:

- Todas as novas tecnologias aumentam os custos (capital e operacional) que, conforme a World Steel Association (WSA, 2013) não tem espaço econômico na conjuntura atual de sobra de capacidade produtiva mundial de 550 milhões de toneladas anuais;

<sup>25</sup> Esta medida foi considerada muito otimista por alguns membros do CEC.

- A indústria nacional, construída em boa parte entre os anos de 1940-80, foi fortemente atingida pela crise de 2008/09 e pela baixa competitividade com o aço chinês, apresentando hoje uma sobra de capacidade estimada em mais de 30% (maio/2015). Isto funciona como barreira para construção de plantas mais modernas e mesmo para a troca por equipamentos mais eficientes;
- O desenvolvimento de novas tecnologias como redução direta com gás natural, fusão direta com oxigênio, redução com hidrogênio e outras estão todas, hoje, paradas e a maior parte em estágio de demonstração piloto ou anterior;
- As boas práticas mundiais apontam para uma intensidade de GEE acima da média brasileira; entre 1,6 a 1,7 tCO<sub>2</sub>e/t aço bruto em função do uso de carvão vegetal proveniente de florestas plantadas.

B. No MA2, foram incorporados 1,8 milhões de hectares para plantação de eucalipto destinado ao carvão vegetal<sup>26</sup>. Supôs-se uma produtividade de 150 m<sup>3</sup> de carvão vegetal/ha em cortes de sete anos. Em termos energéticos, isto mais que dobra o consumo de carvão vegetal quando comparado ao cenário de Plano Governamental (de 5,4 Mtep em 2030 para 12,4 Mtep, no MA2+T). Adotou-se que o incremento da área plantada seria linear até 2030;

**Tabela 13.** Medidas de mitigação adicionais aplicadas nos cenários

Medida	CPG	MA1	MA2
Aumento de eficiência energética	Redução do indicador global deste segmento de 0,48 para 0,414 em 2030 e 0,39 tep/t aço bruto até 2050	Redução adicional de 2% até 2030: de 0,414 para 0,406 tep/t aço bruto em 2030	Igual a MA1
Substituir carvão mineral por carvão vegetal			1,8 Mha de eucalipto para produção de carvão vegetal

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

b) Medidas sugeridas pelo CEC e não modeladas

Não houve medidas sugeridas e não modeladas.

### 2.3.1. Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1)

<sup>26</sup> Vide capítulo deste trabalho sobre AFOLU.

### 2.3.1.1. Medidas de mitigação já previstas no CPG cujo alcance foi ampliado

- Como única medida no Cenário de Mitigação Adicional 1, adotou-se que em 2030 será atingida uma redução de 2% na intensidade energética por tonelada de aço bruto adicional ao previsto no CPG, com uma penetração linear até 2030.
- O investimento necessário para aumentar a eficiência energética foi extraído do “*IEA World Energy Investment Outlook 2014: Energy Efficiency Investment Assumption Tables*” (IEA, 2014), onde adotou-se um fluxo de caixa até 2031 para as medidas listadas, taxa de desconto de 8%, custo de O&M de 5% do investimento, com uma penetração acompanhando o crescimento da produção prevista no CPG. O valor adotado corresponde a 10,00 US\$/t aço bruto.
- Como citado acima, os obstáculos à realização deste cenário são:
  - Capacidade ociosa da indústria nacional inibindo investimentos;
  - Sobre capacidade da indústria mundial limitando a competitividade do produto nacional;
  - Tecnologias avançadas ainda em desenvolvimento internacionalmente (e.g. redução direta com gás natural);
- Não houve outras medidas de mitigação no cenário MA1 com respeito ao CPG.

### 2.3.1.2. Resultados do MA1

O cálculo das emissões de processo no Cenário de Mitigação Adicional 1 consistiu em:

- Partir da curva de crescimento da demanda de energia do CPG e da curva de crescimento da produção já utilizada;
- Assumir que a intensidade de energia atinja 0,406 tep / t aço bruto em 2030;
- Assumir um crescimento linear desta intensidade para os anos 2015, 2020 e 2025;
- Aplicar as mudanças de nível de atividade calculadas pelo IMACLIM para o setor siderúrgico. O IMACLIM foi rodado aplicando-se as medidas e uma segunda vez aplicando uma taxa de 20 US\$/tCO<sub>2</sub>e para o conjunto de emissões de GEEs;
- Calcular as emissões do coque de carvão mineral como emissões de processo;
- Calcular as emissões das demais fontes como emissões de energia / queima de combustíveis

- Para o carvão vegetal, contabilizar apenas as emissões metano e óxido nitroso;

**Tabela 14.** Cenário de Mitigação Adicional 1 (MA1) – principais projeções

Subsetor Siderurgia	2005	CPG	MA1	MA1+T
		2030		
Nível de atividade (Mt aço bruto)	31,65	63,00	61,48	65,51
Nível de atividade (número índice)	1	1,99	1,94	2,07
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	44,15	71,34	68,22	72,69
Emissões (número índice)	1	1,62	1,55	1,65
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t aço bruto)	1,39	1,13	1,11	1,11

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

## 2.3.2. Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2)

### 2.3.2.1. Medidas de mitigação já previstas no MA1 cujo alcance foi ampliado.

- Como única medida no Cenário de Mitigação Adicional 2, adotou-se que até 2030 o uso de carvão vegetal cresce 99,7% comparado com o CPG e passa a representar 44,5% da matriz energética da indústria siderúrgica. Este cenário foi desenhado em conjunto com a equipe de AFOLU alocando um total de 1,8 milhões de hectares para florestas plantadas de eucalipto, vindas principalmente da recuperação de pastos. O acréscimo de produção é linear no período estudado.
- A energia obtida do carvão vegetal foi calculada assumindo:
  - Produtividade de 150 m<sup>3</sup> estéreo de carvão vegetal / ha cortados a cada sete anos (21,4 m<sup>3</sup> st/ha/ano) (BNDES Setorial, 2009), (Coelho, 2008);
  - Densidade de eucalipto de 0,25 t/m<sup>3</sup> st e poder calorífico inferior do carvão vegetal de 0,646 tep/t (EPE, 2013);
  - Tomou-se como base um investimento de 1.060,00 US\$/t carvão vegetal e uma diferença de preço de 25,39 US\$/t carvão vegetal. Estes valores foram extraídos e/ou calculados a partir de:
    - Tabela 7.9 do Balanço Energético Nacional 2014 (EPE, 2014);

- Publicações e sites com histórico de preços de carvão mineral metalúrgico<sup>27</sup>;
- Estudos sobre o carvão vegetal na siderurgia (BNDES Setorial, 2009), (Coelho, 2008) e (IABr, 2013);
- Não houve outras medidas de mitigação com respeito ao CPG.

### 2.3.2.2. Resultados do MA2

O cálculo das emissões de processo no Cenário de Mitigação Adicional 2 consistiu em:

- Partir da curva de crescimento da demanda de energia do MA1 e da curva de crescimento da produção já utilizada;
- Assumir a produção de carvão vegetal advinda da plantação de 1,8 Mha de eucalipto;
- Assumir um crescimento linear desta área para os anos 2015, 2020 e 2025;

O IMACLIM foi rodado aplicando-se as medidas e uma segunda vez aplicando uma taxa de 100 US\$/tCO<sub>2</sub>e para o conjunto de emissões de GEE;

**Tabela 15.** Cenário de Mitigação Adicional 2 (MA2) – principais projeções

Subsetor Siderurgia	2005	CPG	MA2	MA2+T
		2030		
Nível de atividade (Mt aço bruto)	31,65	63,00	59,50	68,86
Nível de atividade (número índice)	1	1,99	1,88	2,18
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	44,15	71,34	41,99	48,59
Emissões (número índice)	1	1,62	0,95	1,10
Intensidade de emissões (tCO <sub>2</sub> e/t aço bruto)	1,39	1,13	0,71	0,71

**Fonte:** Elaborada pelo IES-Brasil

<sup>27</sup> Ver: <http://www.platts.com/news-feature/2013/metals/china-met-coal/index> e <http://www.mining.com/how-depressing-is-australias-official-2013-iron-ore-and-coking-coal-chart-49444/> (consultados em 17/dez/2014).

## 2.4. Análise Comparativa dos Cenários CPG, MA1, MA1+T, MA2 e MA2+T

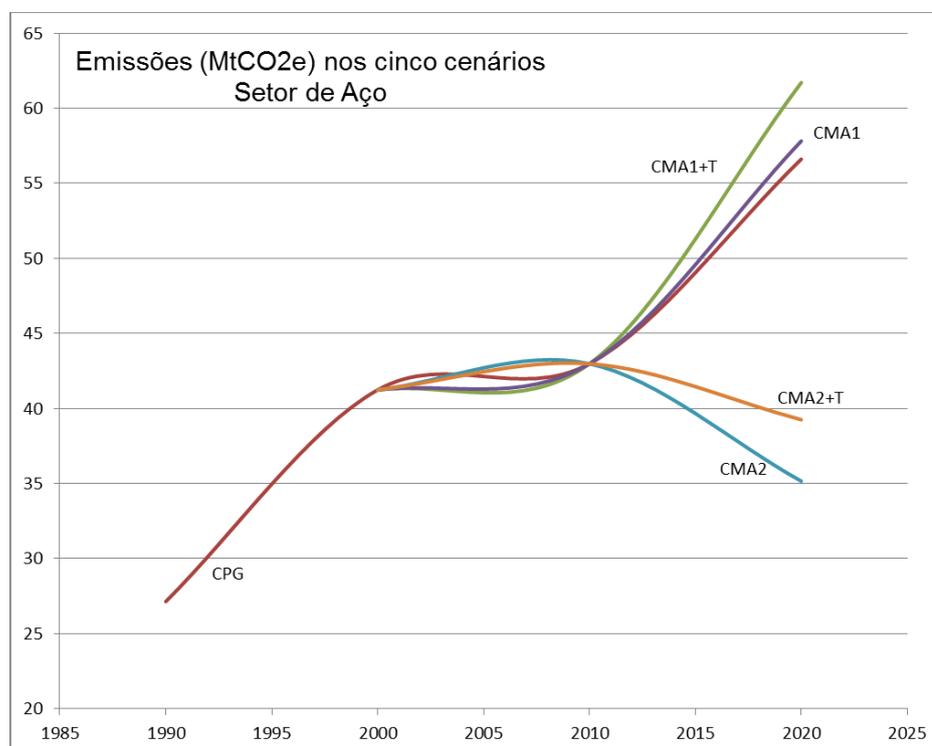
### 2.4.1. Potencial de Mitigação

A tabela e gráfico abaixo apresentam as emissões do setor siderúrgico em intervalos decenais:

**Tabela 16.** Emissões nos cinco cenários estudados

Subsetor Siderurgia	1990	2000	2010	2020	2030
	MtCO <sub>2</sub> e				
CPG	27,14	41,24	44,85	56,61	71,34
MA1	27,14	41,24	44,85	55,12	68,22
MA1+T	27,14	41,24	44,85	57,82	72,69
MA2	27,14	41,24	44,85	35,16	41,99
MA2+T	27,14	41,24	44,85	39,25	48,59

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil



Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Figura 12.** Emissões do setor siderúrgico nos cinco cenários estudados

- Análise comparativa do subsetor

O setor siderúrgico tem um comportamento que vale destacar. Os cenários adicionais 1 e 2 estão bem separados em função da natureza distinta das ações (MA1 = eficiência energética e MA2 = eficiência energética + carvão vegetal deslocando mineral). Estimando o acumulado até 2030, o MA1 não altera significativamente o CPG, enquanto o MA2 acumula uma redução significativa das emissões em relação ao CPG. A introdução de uma taxa de carbono torna o aço nacional mais competitivo no mercado internacional e, portanto, o setor cresce relativamente mais do que nos cenários de Plano Governamental e nos dois cenários normativos. Assim, as emissões no cenário de mitigação adicional 1 com taxa de carbono são 1,9% maiores do que no próprio governamental, enquanto que as emissões no normativo 1 caem 4,4%.

No MA2 também, o cenário com taxa de carbono torna o aço nacional ainda mais competitivo no mercado internacional e, portanto, emite mais do que no cenário normativo. As emissões caem comparadas às do CPG por conta da duplicação do peso do carvão vegetal na matriz: - 41,1% no cenário normativo e -31,9% no cenário de taxa de 100 US\$/tCO<sub>2</sub>e. Notar que a queda inicial das emissões MA2, com a substituição do carvão vegetal, reflete e amplifica o esforço determinado pela Política Nacional sobre Mudança do Clima até 2020.

#### 2.4.2. Aspectos Socioeconômicos

As simulações realizadas no âmbito do Projeto IES-Brasil mostraram que os impactos de uma taxa de carbono mundial favorecem o produto nacional no mercado internacional alterando a rota de crescimento projetada no Cenário de Plano Governamental: o setor cresce 4,0% no MA1 e 9,3% no MA2 quando comparado ao CPG. Estimou-se este impacto trazendo a valor presente os custos com a implantação das medidas nos dois cenários adicionais.

A tabela abaixo resume indicadores dos cenários<sup>28</sup>:

**Tabela 17.** Resultados econômicos das medidas de mitigação do setor siderúrgico

	MA1	MA2
VPL (MUS\$ <sub>2005</sub> )	213	13.356
Redução de emissões (MtCO <sub>2</sub> e) no período 2015-2030	7,43	283,15
US\$/tCO <sub>2</sub> e	28,69	47,17
US\$/t aço	0,24	15,07

**Fonte:** Elaborada pelo IES-Brasil

<sup>28</sup> As diferenças nos valores do VPL e dos custos de mitigação entre o cenário normativo e o de aplicação de uma taxa de carbono são menores do que 8%.

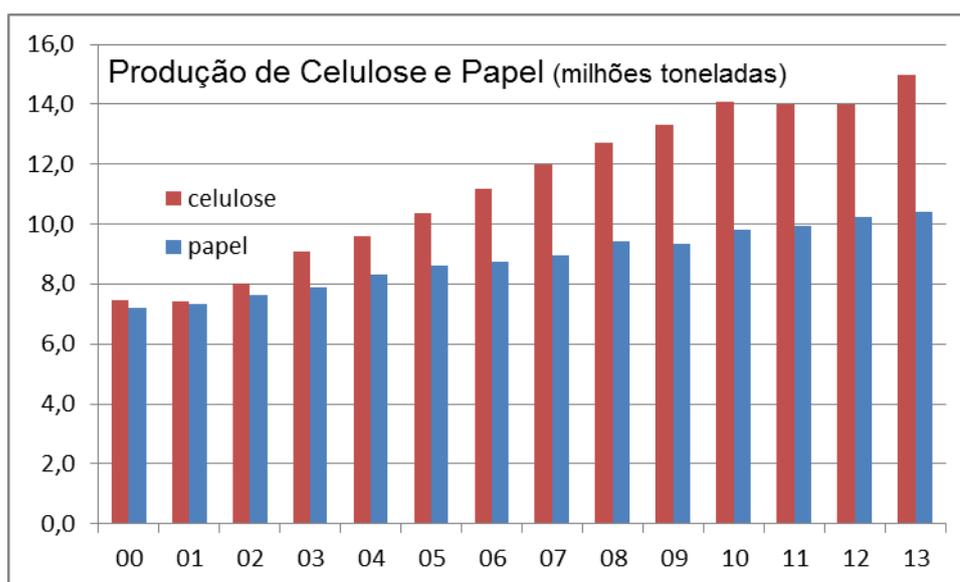
### 3. Restante da Indústria

#### 3.1. Introdução

Para os demais setores da indústria não foram criados cenários de mitigação e optou-se, no IMACLIM, por simular apenas uma seleção destes setores.

##### Papel e Celulose

Em 2013, o setor de produtos florestais foi responsável por 5,5% do PIB industrial e empregando 4,5 milhões de pessoas das quais, mais de 100 mil são empregos diretos. O país foi o quarto produtor mundial de celulose e nono de papel (IBA, 2014). A figura abaixo mostra a evolução da produção de celulose e papel nos últimos anos:



Fonte: (Bradesco P&C, 2015)

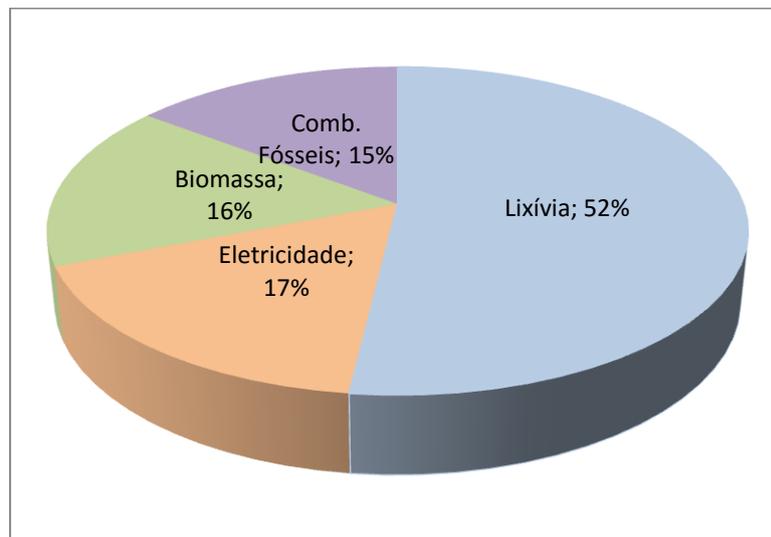
Figura 13. Produção de papel e celulose

Do total de área de florestas plantadas, quase metade é destinada à fabricação de papel e celulose<sup>29</sup>. Em 2010, o país reciclou cerca de 4,6 milhões de toneladas de papel, quase metade de seu consumo aparente.

<sup>29</sup> A outra metade vai para a indústria de produtos de madeira e para produzir carvão vegetal para a siderurgia.

A produtividade por área plantada é a maior do mundo, fruto do desenvolvimento nacional na genética, biotecnologia e engenharia agrícola. Produz-se 10 t celulose/ha madeira, comparado com 1,4 nos países escandinavos e 3,3 na Espanha. Ainda assim, a produção de madeira para celulose, papel e outros fins está abaixo do potencial de participação brasileira em mercados internacionais, posto que, apesar disto, a participação de diversos países escandinavos no mercado de produtos de base florestal ainda é maior que a do Brasil, mesmo levando em conta as grandes diferenças territoriais e edafoclimáticas.

O setor gera cerca de dois terços do total de energia e metade da eletricidade consumida na produção de celulose vem da queima do licor negro e outros resíduos de biomassa, consideradas fontes renováveis de energia. A figura abaixo mostra a distribuição média de energéticos para 2011-13.



Fonte: (EPE, 2014)

**Figura 14.** Energia no setor de papel e celulose

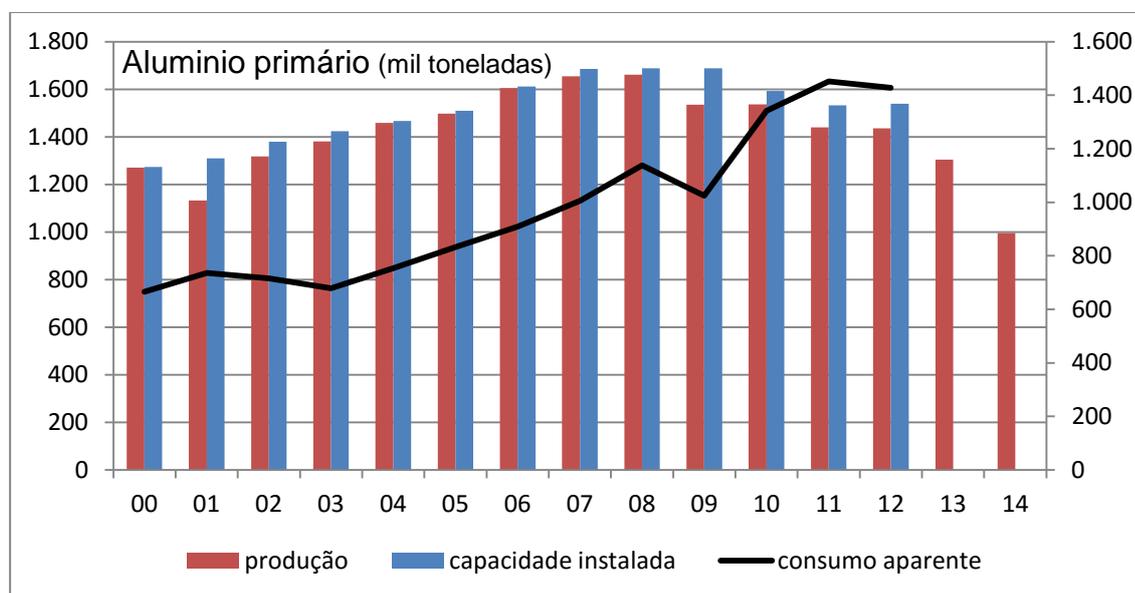
As emissões da indústria de papel e celulose vêm principalmente da queima de combustíveis. O processo Kraft, o mais comum no país, emite CO, NO<sub>x</sub> e NMVOCs<sup>30</sup>, gases que não foram abordados neste trabalho. As remoções de gases de efeito estufa da atmosfera foram contabilizadas no capítulo de uso da terra e florestas.

<sup>30</sup> NMVOC (non-methane volatile organic compounds) – Segundo o IPCC, não contribuem diretamente para o efeito estufa, mas aumentando a formação de ozônio troposférico, contribuem indiretamente para o forçamento radiativo. ([http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-9-3.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-9-3.html)).

## Não Ferrosos

O setor de não-ferrosos engloba a indústria do alumínio, ouro, níquel, zinco, bronze, latão entre outras. Sob a ótica das emissões de gases causadores do efeito estufa, a mais relevante é a indústria do alumínio pelo duplo aspecto de ser uma das mais eletrointensivas e, portanto, objeto de análise separada no planejamento energético e pelas emissões de dióxido de carbono e dos compostos perfluormetano (CF<sub>4</sub>) e perfluoretano (C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>).

O setor de alumínio atravessa uma crise, talvez mais aguda do que os demais setores da indústria. Enquanto a produção mundial anual de alumínio primário, entre 2008 e 2013, cresceu 23% (de 39 para 48 milhões de toneladas), a nacional saiu de 1,6 em 2008 caindo para 1,4 em 2013 e fechou o ano de 2014 com 0,96 milhões de toneladas<sup>31</sup> (queda de 40%). O preço internacional, que antes da crise de 2008, chegou a 3 mil US\$/t, começou o ano de 2014 a 2 mil US\$/t tornando o produto nacional ainda menos competitivo. A figura abaixo mostra a evolução da capacidade instalada, produção e consumo aparente de alumínio primário:



Fontes: de 2000-12 (MDIC, 2012) e 2013-2014 <http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/aluminio-primario/producao-mensal/> consultado em fevereiro/2015

**Figura 15.** Alumínio Primário: produção, capacidade instalada e consumo aparente (em mil toneladas)

<sup>31</sup> <http://www.abal.org.br/estatisticas/nacionais/aluminio-primario/producao-mensal/> consulta feita em fevereiro/2015 com os dados anuais de 2014.

Segundo a ABAL, “No Brasil, o setor é responsável por mais de 500 mil empregos diretos e indiretos e obteve, em 2013, um faturamento de R\$ 48,8 bilhões em uma cadeia produtiva que compreende as produções de bauxita, alumina, alumínio primário e produtos semimanufaturados e acabados do metal. Completando o ciclo da cadeia, um eficiente e autossustentável processo de reciclagem reduz desperdícios e impactos ao meio ambiente, gerando emprego e renda (...)

Devido à perda de competitividade da indústria nacional, a oferta de alumínio primário deverá ser complementada com importações nos próximos anos, para sustentar o aumento do consumo de produtos de alumínio. Contudo, se as importações ocorrerem diretamente na forma de produtos semimanufaturados e transformados, uma tendência forte verificada nos últimos anos, a redução da produção nas etapas iniciais da cadeia do alumínio irá se propagar adiante, levando à desestruturação da cadeia e à desindustrialização da produção de bens de maior valor adicionado”. (ABAL, 2014).

Assim, conforme discutido nas reuniões do CEC, diante deste quadro de perda de competitividade e queda de produção física, não haveria consistência em atribuir medidas de mitigação de emissões.

Como para o alumínio, quase metade da energia consumida nas demais indústrias do setor é eletricidade e suas emissões vêm da queima de combustíveis e contribuem menos para total do setor.

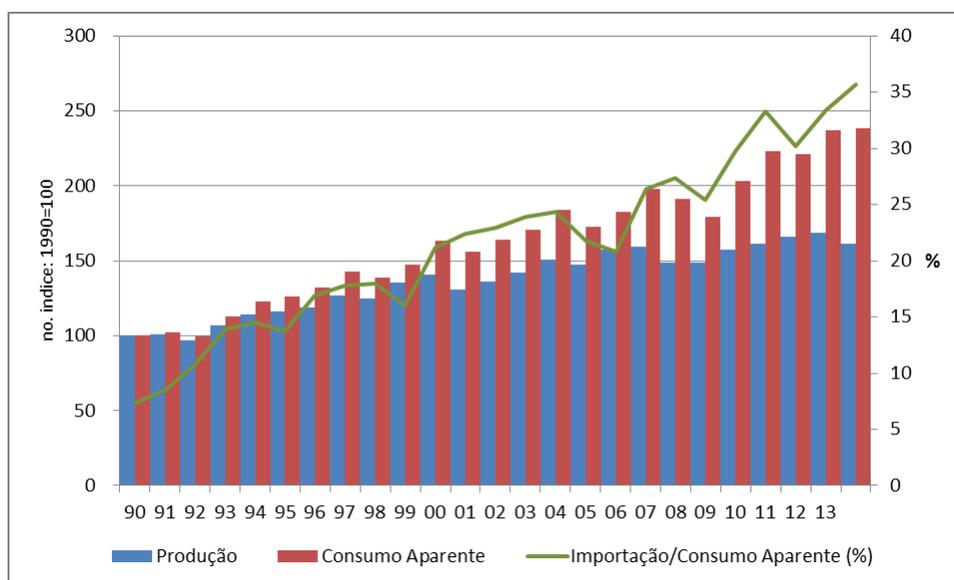
## Química

A indústria química abrange uma grande quantidade de produtos, processos e, portanto, indústrias. Elas são geralmente agrupadas em dois grandes blocos:

- Produtos químicos de uso industrial (PQI): orgânicos, inorgânicos, resinas, elastômeros e outros;
- Produtos químicos para uso final: farmacêuticos, higiene e uso pessoal, adubos e fertilizantes, defensivos agrícolas, produtos de limpeza, tintas e esmaltes e outros.

O faturamento líquido da indústria química brasileira, considerando todos os segmentos que a compõe, chegou a R\$ 335,9 bilhões em 2013, valor 13,6% acima do que foi registrado em 2012. Convertido em dólares, o faturamento líquido alcançou US\$ 156,2 bilhões, 2,9% acima do observado no ano anterior. O Brasil ocupa a sexta posição no ranking mundial de países fabricantes de produtos químicos e tem um peso de 2,7% no produto interno bruto brasileiro e de 9,67% no industrial, o que confere à química a quarta posição entre os setores industriais de maior relevância. A indústria química brasileira emprega em sua totalidade cerca de 400 mil trabalhadores diretos e mais de dois milhões de forma indireta.

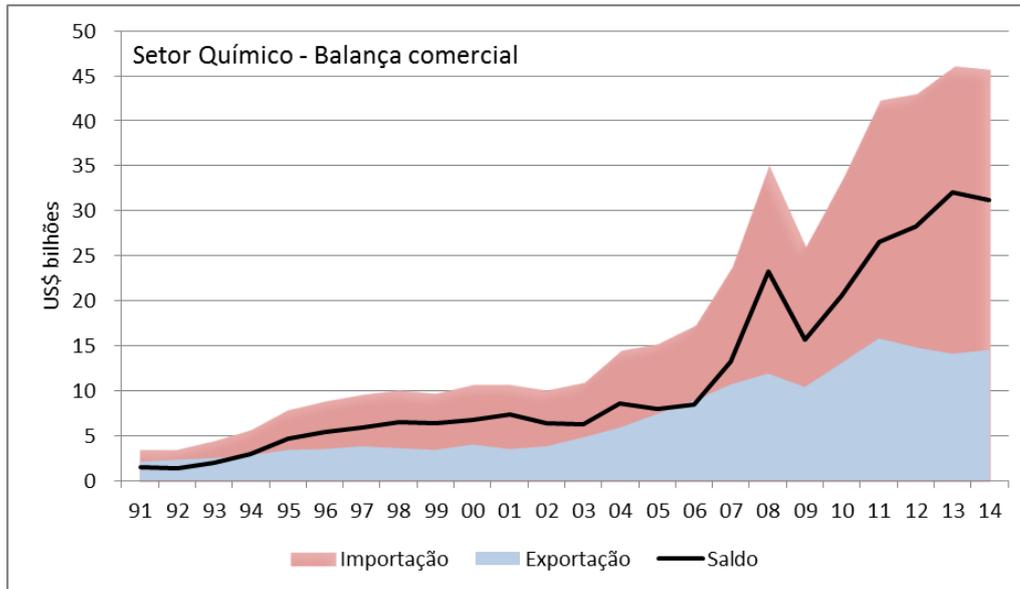
Os produtos químicos estão na base de praticamente todas as cadeias industriais, no entanto, a Química Brasileira tem perdido, de forma crescente, participação no atendimento à demanda interna através de produção local, mesmo com o crescimento do consumo de produtos químicos no Brasil nos últimos anos. Atualmente, mais de um terço de toda a demanda nacional por produtos químicos vem sendo suprida por importações. No início da década de 90, essa participação girava em torno de 5%. Essa situação tem gerado não só déficit comercial elevado, que em 2013 chegou a US\$ 32,0 bilhões, como também conduziu as fábricas das empresas químicas a operar com ociosidade média superior a 20%. As figuras abaixo ilustram esta situação: a primeira mostra a evolução do consumo aparente e da produção (base 1990=100). Plotou-se, também, a participação da importação no consumo aparente (%).



Fonte: ABIQUIM

Figura 16. Participação das importações no consumo aparente no setor químico

A segunda figura mostra a balança comercial do setor.



Fonte: ABIQUIM

Figura 17. Balança comercial do setor químico

O panorama futuro da indústria passa pela exploração do pré-sal, principalmente do gás natural, que permitiria uma gradativa redução da dependência da nafta importada. A tendência de crescimento das importações poderia ser revertida dependendo de políticas públicas que fortalecessem o setor.

No que se refere ao fornecimento das principais matérias-primas básicas do setor, o cenário atual mostra a forte dependência do setor químico em relação ao consumo de nafta petroquímica. No país, 74% da produção de petroquímicos básicos é proveniente da nafta, enquanto a média mundial é de 47%.

Em relação ao total de emissões da indústria, o setor químico responde por cerca de 11%<sup>32</sup>. Das emissões vindas da queima de combustíveis, o setor responde por 20%, por 4,4% das vindas de processos industriais. Vale destacar que em 2006, a produção de ácido adípico e de ácido nítrico emitiam quase 8 milhões de tCO<sub>2</sub>e ao ano (equivalente a 28% do total do setor) e que projetos de crédito de carbono eliminaram a emissão de óxido nítrico.

Cabe destacar os esforços que a indústria química nacional tem feito para reduzir seu consumo específico de energia e, em especial, de eletricidade. Nos últimos anos houve ganhos expressivos em processos eletrointensivos como o da soda-cloro, que buscam uma redução de custos e aumento de

<sup>32</sup> Valores calculados a partir dos dados dos documentos para consulta pública do 3º Inventário (MCTI 3o, 2014)

segurança. Como um todo, nos últimos sete anos, o setor reduziu em 19% a energia consumida por tonelada de produto.

Muito importante salientar que, na atual conjuntura, de operação abaixo de 80% da capacidade, é ainda mais difícil reduzir o consumo de energia elétrica, pois os processos não estão no seu nível de maximização de eficiência (85-90%). Outro aspecto importante diz respeito à segurança no fornecimento de energia, que tem sido fator adicional de preocupação, pois em um segmento que opera em regime de processo contínuo (praticamente 24 horas por dia e todos os dias da semana), reduções de energia e/ou de tensão, de forma abrupta, podem significar prejuízos e demora na retomada da produção, além de maior consumo de energéticos.

Durante as reuniões do CEC, o setor manifestou o interesse em elaborar cenários que incorporassem as novas linhas de produção de plásticos a partir de etanol vindo de cana de açúcar e de outras biomassas<sup>33</sup>. Existe um panorama promissor de uma indústria química baseada no etanol e em óleo vegetal que deslocariam a nafta como matéria prima básica. Os estudos de ciclo de vida de produtos desta cadeia indicam um potencial interessante de redução de emissão de GEE.

### Mineração

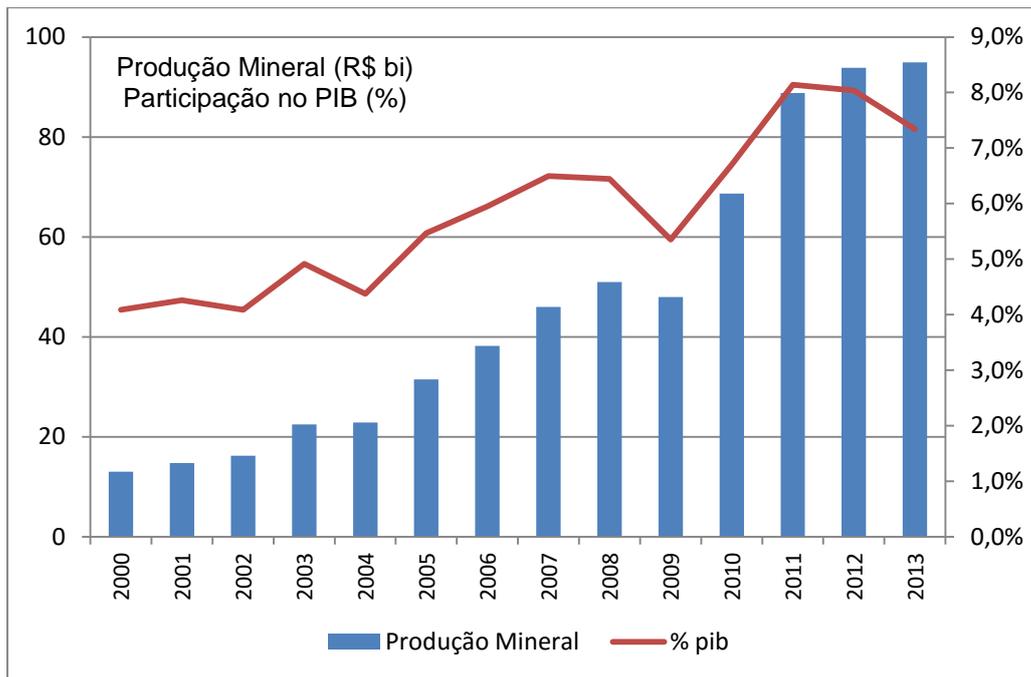
A produção mineral brasileira abarca 72 substâncias minerais, das quais 23 são metálicas, 45 não-metálicas e 4 energéticas, explorando mais de 3.300 minas. O setor mineral emprega diretamente mais de 150.000 trabalhadores.

O setor de mineração<sup>34</sup> passa por acelerada expansão de receita. As exportações de produtos minerais, indicador de desempenho do setor, cresceu a taxas superiores a 20% a.a. desde 2004. O gráfico abaixo mostra o crescimento do valor da produção nacional, que cresceu em média 16% a.a., em que pesem as variações de câmbio e, principalmente, os preços das commodities no período. Notar que o peso do setor no PIB nacional cresce a partir da crise de 2008 (IBRAM Info, 2009-12), (DNPM Info, 2000-14).

---

<sup>33</sup> As reduções de emissões devidas a produtos da alcoolquímica e oleoquímica são reais e deverão aparecer nas contas nacionais. No entanto, por razões metodológicas de contabilização de emissões, esta redução não poderá ser alocada diretamente à indústria química.

<sup>34</sup> É de se notar a agregação de atividades diferentes conforme a origem da informação. Assim, o IBRAM inclui a mineração e parte da transformação e em suas estatísticas mais antigas, pré-2002, incluem petróleo e gás nos balanços comerciais. O BEN inclui o processo de pelotização do minério de ferro dentro da mesma linha.



Fonte: (DNPM Info, 2000-14), (IBRAM Sum, 2009-13)

**Figura 18.** Produção mineral e participação no PIB

O setor usa energia para explorar as minas e pré-processar o minério. A eletricidade é a principal fonte de energia consumida pelo setor (30%) enquanto os processos de secagem e pelotização consomem combustíveis fósseis (principalmente carvão mineral, gás natural e óleo combustível) (EPE, 2014). Nos últimos 10 anos, observou-se uma troca do óleo combustível por gás natural e coque de petróleo. As emissões do setor não incluem as emissões fugitivas de petróleo e das minas de carvão (vide nota de rodapé 34 acima).

#### Resto da Indústria

Os setores acima foram destacados por terem sido objeto dos cenários de mitigação (cimento e siderurgia) e de terem sido simulados no IMACLIM. No entanto, o restante industrial é responsável por cerca de 30% das emissões vindas de queima de combustíveis e 20% das emissões reportadas nos processos industriais. Este grupo compreende:

- Ferroligas
- Alimentos, bebidas e fumo;
- Vidro e cerâmica;

- Cal<sup>35</sup>;
- Têxtil;
- Máquinas, equipamentos, veículos
- Eletroeletrônicos;
- Móveis; e
- Produtos diversos.

## 3.2. Cenário de Plano Governamental (CPG)

### 3.2.1. Medidas de Mitigação já Incluídas no CPG

O Plano Nacional de Energia basicamente prevê medidas de eficiência energética em todos os setores deste grupo. Não há variação significativa na composição das matrizes energéticas em cada subsetor e, portanto, pode-se assumir que as medidas de mitigação incluídas no CPG são de redução de intensidade de uso de combustíveis.

### 3.2.2. Resultados Finais

O IMACLIM simulou as atividades dos setores industriais para o conjunto dos cenários de mitigação. As tabelas abaixo mostram as emissões para o restante da indústria:

**Tabela 18.** Papel e Celulose: atividade e emissões nos 5 cenários

Subsetor Papel e Celulose	2005	CPG	MA1	MA1+T	MA2	MA2+T
		2030				
Nível de atividade	1	2,71	2,68	2,75	2,66	2,83
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	3,85	7,85	7,74	7,95	7,69	8,18
Emissões (número índice)	1	2,04	2,01	2,06	1,99	2,12

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

<sup>35</sup> Segundo o IPCC, as emissões de processos industriais envolvendo a cal são contabilizadas nos processos de produção, no uso de calcário e dolomita pela siderurgia e pela indústria do vidro. Quanto à geração de calor, a estrutura do BEN o inclui junto com Outras Indústrias.

**Tabela 19.** Papel e Celulose: emissões nos 5 cenários

Subsetor Papel e Celulose	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	2,48	4,33	3,65	5,53	7,85
MA1	2,48	4,33	3,65	5,47	7,74
MA1+T	2,48	4,33	3,65	5,59	7,95
MA2	2,48	4,33	3,65	5,44	7,69
MA2+T	2,48	4,33	3,65	5,72	8,18

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Tabela 20.** Não ferrosos: atividade e emissões nos 5 cenários

Subsetor Não Ferrosos	2005	CPG	MA1	MA1+T	MA2	MA2+T
		2030				
Nível de atividade	1	1,48				
Emissões totais (MtCO <sub>2e</sub> )	10,17	15,87	15,20	17,48	14,51	19,50
Emissões (número índice)	1	1,56	1,50	1,72	1,43	1,92

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Tabela 21.** Não ferrosos: emissões nos 5 cenários

Subsetor Não Ferrosos	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	5,1	6,9	8,6	15,2	15,9
MA1	5,1	6,9	8,6	14,8	15,2
MA1+T	5,1	6,9	8,6	16,3	17,5
MA2	5,1	6,9	8,6	14,3	14,5
MA2+T	5,1	6,9	8,6	17,6	19,5

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Tabela 22.** Química: atividade e emissões nos 5 cenários<sup>36</sup>

Subsetor Química	2005	CPG	MA1	MA1+T	MA2	MA2+T
		2030				
Nível de atividade	1	2,57				
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	25,00	28,30	27,70	27,87	27,17	28,04
Emissões (número índice)	1	1,13	1,11	1,11	1,09	1,12

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Tabela 23.** Química: emissões nos 5 cenários

Subsetor Química	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	14,5	23,1	17,6	20,7	28,3
MA1	14,5	23,1	17,6	20,4	27,7
MA1+T	14,5	23,1	17,6	20,5	27,9
MA2	14,5	23,1	17,6	20,1	27,2
MA2+T	14,5	23,1	17,6	20,6	28,0

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Tabela 24.** Mineração: atividade e emissões nos 5 cenários

Subsetor Mineração e Pelotização	2005	CPG	MA1	MA1+T	MA2	MA2+T
		2030				
Nível de atividade	1	1,99				
Emissões totais (MtCO <sub>2</sub> e)	7,24	13,81	13,37	13,66	13,01	13,92
Emissões (número índice)	1	1,91	1,85	1,89	1,80	1,92

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Tabela 25.** Mineração: emissões nos 5 cenários

Subsetor Mineração	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	2,4	5,7	7,3	9,8	13,8
MA1	2,4	5,7	7,3	9,5	13,4
MA1+T	2,4	5,7	7,3	9,7	13,7
MA2	2,4	5,7	7,3	9,4	13,0
MA2+T	2,4	5,7	7,3	9,8	13,9

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

<sup>36</sup> No CPG, o crescimento das emissões aparentemente não acompanha a expansão do setor. Cabe recordar que, em 2005, existiam plantas de produção de ácido adípico e de ácido nítrico que emitiam uma quantidade expressiva de N<sub>2</sub>O. Estas emissões foram mitigadas em projetos registrados junto ao MDL/CQNUMC. As emissões em 2010 foram de 18 MtCO<sub>2</sub>e de onde a expansão até 2030 representaria um aumento de 60%, consistente com o aumento de 70% da energia.

**Tabela 26.** Outras indústrias: atividade e emissões nos 5 cenários

Restante da Indústria	2005	CPG	MA1	MA1+T	MA2	MA2+T
		2030				
Nível de atividade	1	na	na	na		
Emissões totais (MtCO <sub>2e</sub> )	29,15	72,66	71,54	71,79	70,14	71,78
Emissões (número índice)	1	2,49	2,45	2,46	2,41	2,46

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

**Tabela 27.** Outras indústrias: emissões nos 5 cenários

Restante da Indústria	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	19,2	26,8	38,7	52,7	72,7
MA1	19,2	26,8	38,7	52,0	71,5
MA1+T	19,2	26,8	38,7	52,2	71,8
MA2	19,2	26,8	38,7	51,2	70,1
MA2+T	19,2	26,8	38,7	52,2	71,8

Fonte: Elaborada pelo IES-Brasil

## 4. Potencial de Mitigação Total do Setor Industrial

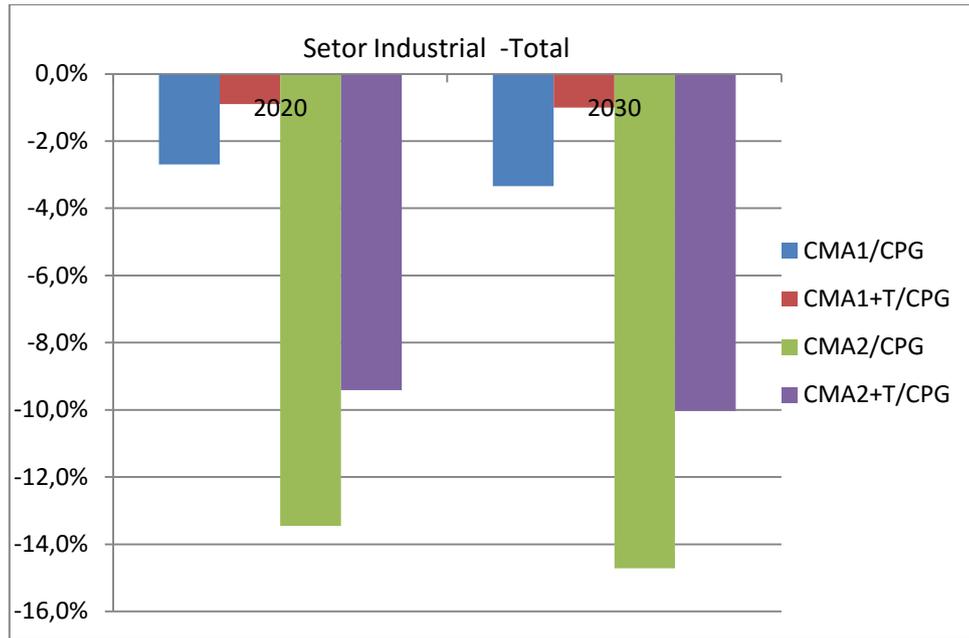
Seguem, abaixo, as tabelas de emissões do setor industrial como um todo, para os cenários estudados: total, emissões de queima de combustíveis e de processos industriais (IPPU – *Industrial Processes and Product Use*).

**Tabela 28.** Setor Industrial: emissões nos 5 cenários (energia e IPPU)

Setor Industrial (MtCO <sub>2</sub> e)	1990	2000	2010	2020	2030
<b>Total</b>					
CPG	89	136	160	221	297
MA1				215	286
MA1+T				220	294
MA2				192	254
MA2+T				201	268
<b>Energia</b>					
CPG	37	60	70	105	143
MA1				101	137
MA1+T				103	140
MA2				99	131
MA2+T				104	139
<b>IPPU</b>					
CPG	52	76	90	116	153
MA1				114	149
MA1+T				116	154
MA2				93	123
MA2+T				98	129

**Fonte:** Elaborada pelo IES-Brasil

Analisando-se o setor industrial como um todo, observa-se que o conjunto de medidas de mitigação do cenário MA2 é aquele de maior potencial de mitigação. Com este cenário, obtém-se 14,7% de redução de emissões comparativamente ao CPG, em 2030. A figura 19 apresenta o potencial de mitigação de todos os cenários analisados.



**Figura 19.** Potencial de redução de emissões do Setor Industrial nos Cenários de Mitigação Adicional em Relação ao Cenário de Plano Governamental

## Referências Bibliográficas

- ABAL. (2014). *Proposta de uma política industrial para o setor de alumínio*. Associação Brasileira do Alumínio(ABAL).
- ABIQUIM. (2014). *A Indústria Química Brasileira*. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Química.
- Avina. (2012). *Combate à devastação ambiental e ao trabalho escravo na produção do ferro e do aço*. Avina, Rede Nossa São Paulo, Instituto Ethos e WWF.
- BNDES Setorial. (2009). *Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil*. Siderurgia - BNDES Setorial 30.
- Bradesco Aço. (2014). *Siderurgia*. São Paulo: DEPEC - Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos.
- Bradesco Cimento. (2015). *Cimento*. São Paulo: DEPEC - Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos.
- Bradesco P&C. (2015). *Papel e Celulose*. São Paulo: DEPEC - Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos.
- Bradesco Química. (2015). *Química e Petroquímica*. São Paulo: DEPEC - Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos.
- Cement Sustainability Initiative / European Cement Research Academy. (2009). *Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead*. Dusseldorf, Geneva: CSI/ECRA Technology Papers.
- Cement Sustainability Initiative. (2002). *Agenda for Action*.
- Cement Sustainability Initiative. (2009). *Cement Technology Roadmap - Carbon emissions reductions up to 2050*. OECD/IEA and The World Business Council for Sustainable Development.
- Coelho, S. T. (2008). *Carvão Vegetal Aspectos Técnicos, Sociais, Ambientais e Econômicos - Nota Técnica X*. IEE-USP / CENBIO.
- DNPM. (2014). *Sumário Mineral - Aço*. Carlos Antônio Gonçalves de Jesus: Departamento Nacional de Produção Mineral - MME.
- DNPM Anuario. (2010). *Anuário Mineral Brasileiro*. Brasília: DIPLAM-DNPM Diretoria de Planejamento e de Desenvolvimento da Mineração - Departamento Nacional de Produção Mineral / MME.
- DNPM Info. (2000-14). *Informe Mineral*. Brasília: DIPLAM-DNPM Diretoria de Planejamento e de Desenvolvimento da Mineração - Departamento Nacional de Produção Mineral / MME.
- Doushanov, D. (2010). *Control of Pollution in the Iron and Steel Industry*. Encyclopedia of Life Support Systems, Pollution Control Technologies, vol.III.
- EPE 12/14. (2014). *Cenário Econômico 2050 - Nota Técnica DEA 12/14*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE 13/14. (2014). *Demanda de Energia 2050 - Nota Técnica 13/14*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE. (2013). *Balanco Energético Nacional*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética.
- EPE. (2014). *Balanco Energético Nacional*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética.
- EuroFer. (2013). *A Steel Roadmap for a Low Carbon Europe 2050*. European Steel Association.
- IABr. (2013). *Relatório de Sustentabilidade*. Instituto Aço Brasil.
- IBA. (2014). *Indústria Brasileira de Árvores - o Setor em Números*. Indústria Brasileira de Árvores.

- IBRAM Amb. (2012). *O Ambiente da Mineração no Brasil*. Mining Day PwC.
- IBRAM Info. (2009-12). *Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.
- IBRAM RA. (2013). *Relatório Anual*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.
- IBRAM Sum. (2009-13). *Sumário Mineral*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.
- IEA. (2014). *World Energy Investment Outlook*. International Energy Agency.
- IPCC. (2001). *3rd Assessment Report, WG1 - The Scientific Basis, chap.6 - Radiative Forcing*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama, Kanagawa, Japão: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- McKinsey. (2013). *Overcapacities in the steel industry*. Paris: McKinsey & Company.
- MCTI 1o. (2004). *Comunicação Nacional Inicial do Brasil à CQNUMC*. Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima - MCTI.
- MCTI. (2013). *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. Brasília: Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima - MCTI / SEPED / CGMC.
- MCTI. (2014). *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil*. Brasília: Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima - MCTI / SEPED / CGMC.
- MCTI 2o. (2010). *2a Comunicação Nacional do Brasil CQNUMC*. Brasília: Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima - MCTI.
- MCTI 3o. (2014). *3o Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência - Consulta Pública*. Brasília: Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima - MCTI.
- MCTI E&E. (2010). *Relatório de Referência: Emissões de GEEs por Queima de Combustíveis: Abordagem Bottom-up / 2o Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa*. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia / Economia e Energia.
- MDIC - CTPIN. (2011). *Plano Setorial de Redução de Emissões da Siderurgia*. Brasília: CGACDS/DECOI/SDP/MDIC.
- MDIC. (2012). *Dados Consolidados da Indústria de Alumínio em 2012*. Fonte: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior: [www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl\\_1380825028.pdf](http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1380825028.pdf)
- Monzoni, M. e., & coordenadores. (2012). *Nota Técnica Plano Indústria*.
- Pinheiro, J. (2011). *A Importância Econômica da Mineração no Brasil*. Brasília: DIPLAM-DNPM Diretoria de Planejamento e de Desenvolvimento da Mineração - Departamento Nacional de Produção Mineral / MME.
- SNIC. (2005). *Relatório Anual*. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.
- SNIC. (2013). *Relatório Anual*. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento.
- Vieira, A. C. (2013). *A indústria do aço no Brasil e no mundo*. Rio de Janeiro: IABr - Instituto Aço Brasil.

Wilson, R. (05 de 03 de 2014). *Building China: The Role Of Cement In China's Rapid Development*. Fonte: The Energy Collective:  
<http://theenergycollective.com/robertwilson190/347591/building-china-role-cement-chinas-rapid-development>

WSA. (2013). *Global Perspectives and Best Practice in the Steel Industry*. World Steel Association.

WSA. (2014). *World Steel in Figures*. Bruxelas: World Steel Association.

## ANEXO METODOLÓGICO

### Emissões de Queima de Combustíveis

As emissões de gases de efeito estufa originadas de queima de combustíveis são calculadas por expressões do tipo:

$$E_{s,y} = \sum_f Q_{f,s,y} \cdot FE_f \quad (1)$$

Onde:

- $E_{s,y}$ : emissão total no setor industrial  $s$  por queima de combustíveis no ano  $y$  (em  $tCO_2e$ );
- $Q_{f,s,y}$ : consumo aparente da fonte de combustível  $f$  no setor industrial  $s$  no ano  $y$ <sup>37</sup> (em  $TJ$ );
- $FE_{f,y}$ : fator de emissão equivalente da fonte de combustível  $f$  (em  $tCO_2e/TJ$ ).

Na equação acima, o fator de emissão equivalente é obtido a partir dos fatores de emissão dos três gases formados no processo de combustão. O IPCC recomenda levar-se em conta o carbono não oxidado (IPCC, 2006). Este trabalho adotou os potenciais de aquecimento global para os gases de efeito estufa (GWP – Global Warming Potential) definidos no 2º Relatório de Avaliação (IPCC, 1995):

$$FE_f = \sum_g FE_{g,f} \cdot Oxi_{g,f} \cdot GWP_g \quad (2)$$

Onde:

- $FE_f$ : fator de emissão equivalente da fonte de combustível  $f$  (em  $tCO_2e/TJ$ );
- $FE_{g,f}$ : fator emissão do gás  $g$  pela combustão da fonte de combustível  $f$  (em toneladas do gás  $g$ );
- $Oxi_{g,f}$ : fator de oxidação resultante da combustão da fonte de combustível  $f$  (adimensional)<sup>38</sup>;

<sup>37</sup> Exclui a quantidade utilizada para fins outros que a geração de energia como nos processos onde o carbono é agente de redução e onde o carbono é fixado na composição final do produto.

<sup>38</sup> O fator de oxidação só assume valores menores do que 1 (um) para o dióxido de carbono.

$GWP_g$ : potencial de aquecimento global (adimensional).

Todos os dados de consumo de combustíveis foram extraídos do Balanço Energético Nacional 2014, matriz 49 x 47. A conversão das unidades próprias de energia para toneladas equivalentes de petróleo e, quando necessário, para TJ também vieram do BEN 2014. (EPE, 2014).

Os dados de demanda de energéticos do Cenário de Plano Governamental vieram do Plano Nacional de Energia 2050 (EPE 13/14, 2014).

Os fatores de emissão dos combustíveis e os fatores de oxidação vieram dos Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006) exceto o fator de emissão de metano vindo da queima de carvão vegetal que veio da tabela A-14 do Relatório de Referência sobre as Emissões por Queima de Combustíveis: Abordagem Bottom-up, parte do 2º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCTI E&E, 2010). Todos os fatores de oxidação também vieram do 2º Inventário.

Os valores referentes aos anos de 2005 e 2010 foram extraídos do Relatório de Referência do Setor Energia, Emissões de GEE por Queima de Combustíveis, Abordagem Bottom-up do 3º Inventário Brasileiro de Emissões de GEE (MCTI 3o, 2014).

### Subsetor Cimento

As emissões das reações de calcinação dependem, basicamente, do teor de carbonato de cálcio (ou manganês) no minério. Este teor varia nas várias jazidas nacionais e os Inventários Nacionais adotaram um valor médio de referência (MCTI 1o, 2004) e (MCTI 2o, 2010) e assumiu-se que este valor permaneceria constante durante o período. Também se assumiu que o teor de clínquer no cimento permaneceria constante durante o período. Esta premissa é discutível e pode variar para baixo, indicando a que a disponibilidade de aditivos como a escória siderúrgica e as cinzas da queima de carvão vapor podem não acompanhar a demanda futura de cimento. Por outro lado, o desenvolvimento de outros aditivos pode compensar esta eventual falta e até mesmo reduzir o teor de clínquer no futuro. A equação abaixo foi adaptada dos Guidelines 2006 do IPCC (IPCC, 2006):

$$E_y = M_y \cdot \bar{C}_{clq,y} \cdot \bar{FE}_{clq,y} \quad (3)$$

Onde:

$E_y$ : emissão no setor de cimento das reações de calcinação no ano  $y$  (em  $tCO_2e$ );

$M_y$ : massa de todos os tipos de cimento produzido no ano  $y$  (em  $t$ );

$\bar{C}_{clq,y}$ : teor médio de clínquer no cimento no ano  $y$  (adimensional)<sup>39</sup>;

$\overline{FE}_{clq,y}$ : fator de emissão médio do clínquer<sup>40</sup> no ano  $y$  (em  $tCO_2e/t$  clínquer);

As medidas estudadas nos cenários de mitigação não alteram as emissões da calcinação.

A produção de cimento e clínquer até 2012 vieram dos relatórios do Bradesco (Bradesco Cimento, 2015) e do SNIC (SNIC, 2013) ou interpolados a partir deles. Os dados a partir de 2013, inclusive, foram extraídos do Plano Nacional de Energia 2050 (EPE 13/14, 2014).

A primeira medida de mitigação nos dois cenários refere-se à redução da intensidade de energia térmica para o processo de calcinação. O valor alvo no MA-2 veio do trabalho do Cement Sustainability Initiative (Cement Sustainability Initiative, 2009) e o valor alvo do MA-1 é o valor intermediário entre 2012 e o do MA-2. Assumiu-se que a intensidade crescerá linearmente entre 2015-30 e que a matriz energética manterá constante a distribuição de fontes.

A segunda medida de mitigação, aplicada também nos dois cenários, refere-se ao aumento do coprocessamento (principalmente de resíduos sólidos) deslocando o coque de petróleo. Nas reuniões do CEC, assumiu-se que no MA-1 haveria aumento de 50% até 2030, base CPG e que, no MA-2, este aumento seria de 100%. A penetração seria linear ao longo do período e as demais fontes de energia não seriam afetadas.

Os valores referentes aos anos de 2005 e 2010 foram extraídos do Relatório de Referência para Emissões por Processos Industriais- Produtos Minerais (MCTI 3o, 2014).

### Subsetor Siderúrgico

Por convenção do IPCC, as emissões do setor siderúrgico a serem reportadas como sendo de processo (IPPU) são as provenientes dos processos de sinterização, redução (alto-forno) e da aciaria. Os GEEs provenientes do balanço de massa de carbono são tratados como emissões de processo, porque carbono é agente de redução na produção de aço além do calor que é gerado. Ainda de acordo com o IPCC, as emissões de GEE do processo de coqueificação devem ser alocadas no setor de energia. Assim, no Cenário de Mitigação Adicional 2, as emissões do carvão vegetal são reportadas como emissões do processo. Assim, do Relatório de Referência do 3º Inventário para consulta pública (MCTI 3o, 2014) a

<sup>39</sup> O conteúdo de clínquer no cimento varia com o tipo de cimento e é complementado por aditivos como, no caso da indústria brasileira, cinzas de carvão vapor, escória de alto forno, pozolanas várias, etc.

<sup>40</sup> O fator de emissão na produção de clínquer depende, basicamente, do teor de cálcio e manganês no minério. Estes teores variam conforme entre as jazidas, em segunda instância, numa própria jazida.

equação que rege as emissões de processos da indústria siderúrgica é a da queima do combustível (eq. 1) descontado o carbono fixado no produto (aço ou gusa).

$$E_{CO_2,y} = \sum_f Q_{f,y} \cdot FE_f \cdot F_{ox} - C_{prod,y} \cdot \frac{44}{12} \quad (4)$$

Onde:

$E_{CO_2,y}$ : emissão total de dióxido de carbono do setor de siderurgia por queima de combustíveis no ano  $y$  (em  $tCO_2e$ );

$Q_{f,y}$ : consumo aparente da fonte de combustível  $f$  no setor siderúrgico no ano  $y$ <sup>41</sup> (em  $TJ$ );

$FE_{f,y}$ : fator de emissão equivalente da fonte de combustível  $f$  (em  $tCO_2e/TJ$ );

$F_{ox}$ : fator de oxidação;

$C_{prod,y}$ : carbono contido no produto (t) ou percentual médio de carbono no aço/gusa multiplicado pela produção no ano  $y$ .

A produção de aço e gusa até 2012 vieram do Relatório de Referência do 3º Inventário para consulta pública (MCTI 3o, 2014). Os dados a partir de 2013, inclusive, vieram do Plano Nacional de Energia 2050 (EPE 13/14, 2014).

No cenário de mitigação adicional 1, aumentou-se a eficiência energética da indústria em 2%, mantendo constantes a matriz energética do setor e um aumento linear até 2030.

No cenário de mitigação adicional 2, carvão vegetal vindo de um adicional de florestas plantadas desloca o coque de carvão mineral. Os indicadores de produtividade de eucalipto, rendimento de carvoejamento foram convencionados junto com a equipe de AFOLU extraídos de (BNDES Setorial, 2009) e (Coelho, 2008). A troca cresce linearmente até 2030 e as proporções do restante da matriz permanecem constantes.

Os valores referentes aos anos de 2005 e 2010 foram extraídos do Relatório de Referência para Emissões por Processos Industriais- Produtos de Metais (MCTI 3o, 2014).

## Emissões de Processos Industriais do Restante da Indústria

Assumiu-se que todas as emissões de processo do restante da indústria permaneceriam proporcionais ao nível de atividade de cada setor.

<sup>41</sup> Exclui a quantidade utilizada para fins outros que a geração de energia como nos processos onde o carbono é agente de redução e onde o carbono é fixado na composição final do produto.

Os valores referentes aos anos de 2005 e 2010 foram extraídos dos Relatórios de Referência para Emissões por Processos Industriais- (MCTI 3o, 2014).

## Nota sobre comentários dos membros do CEC

Os membros do CEC que participaram das discussões sobre o setor industrial manifestaram seu desacordo e preocupação com a adoção dos documentos lançados pela EPE em 2014 como parte do Plano Nacional de Energia 2050.

As projeções de crescimento de atividade e de consumo de energia dos vários setores industriais foram consideradas muito pouco plausíveis, dada a situação da indústria nacional. Vários membros manifestaram a opinião de que as premissas adotadas não refletiam a visão que o setor tinha do futuro. O IES-Brasil ressaltou, desde a primeira reunião do CEC, que os cenários elaborados:

- Não seriam previsões (objetivo não é cenário mais provável)
- Não seriam normativos (não há cenário mais desejado)

O segundo ponto diz respeito às intensidades de energia nos diversos subsetores industriais. Pela própria metodologia dos Planos Nacionais, as estimativas de aumento de eficiência nos processos produtivos não explicitam as medidas e rotas adotadas. Como consequência, as medidas que mitigam emissões de gases de efeito estufa que já estariam incluídas no bojo do PNE não puderam ser analisadas separadamente.

O terceiro ponto refere-se ao fato do PNE 2050 ainda estar em revisão, sem data para a liberação dos documentos definitivos e, portanto, este estudo deverá ser revisado quando da publicação da versão definitiva do Plano.

Além destes pontos, foi levantada a questão de como as medidas constantes dos cenários de mitigação seriam implantadas. Os participantes manifestaram sua preocupação com os impactos na competitividade da indústria nacional, fortemente dependente das políticas e incentivos passíveis de serem criados para viabilizar os cenários estudados.

## Tabelas Complementares

### Nível de Atividade do Setor de Cimento

Produção Física (mil t)	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	25.848	39.901	59.117	97.000	142.000
MA1				96.482	140.919
MA1+T				96.176	140.281
MA2				96.404	140.757
MA2+T				95.142	138.124

### Nível de Atividade do Setor Siderúrgico

Produção Física (mil t)	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	20.814	28.658	32.948	47.000	63.000
MA1				46.146	61.476
MA1+T				48.406	65.509
MA2				45.039	59.499
MA2+T				50.283	68.860

### Penetração da Medida de Mitigação e outras medidas que compõem o cenário do Setor de Cimento

Intensidade Energética (GJ/t clínquer)	1990	2000	2010	2020	2030
CPG			3,96	4,03	3,80
MA1				3,66	3,56
MA1+T				3,65	3,52
MA2				3,56	3,35
MA2+T				3,52	3,26

Nota: na outra medida de mitigação, o aumento da participação do coprocessamento não altera a intensidade de energia térmica.

## Penetração da Medida de Mitigação e outras medidas que compõem o cenário do Setor Siderúrgico

Intensidade Energética (tep/t aço bruto)	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	0,587	0,534	0,499	0,457	0,414
MA1				0,453474	0,4062
MA1+T				0,453477	0,4061
MA2				0,453451	0,4061
MA2+T				0,453473	0,4062

Nota: na outra medida de mitigação, a troca de carvão mineral por carvão vegetal não altera a intensidade de energia térmica.

## Matriz Energética do Setor de Cimento<sup>42</sup> (ktep)

Cenário	1990	2000	2010	2020	2030
<b>CPG</b>					
carvão vapor	583	184	52	143	202
carvão vegetal	350	233	63	258	364
coque petróleo	3	1.845	3.161	5.038	7.108
eletricidade	253	383	456	880	1.244
outras primárias	44	112	350	494	708
outros	1.034	605	76	420	379
<b>MA1</b>					
carvão vapor	583	184	52	130	188
carvão vegetal	350	233	63	234	339
coque petróleo	3	1.845	3.161	4.481	6.285
eletricidade	253	383	456	875	1.234
outras primárias	44	112	350	541	988
outros	1.034	605	76	381	353
<b>MA1+T</b>					
carvão vapor	583	184	52	130	187
carvão vegetal	350	233	63	233	337
coque petróleo	3	1.845	3.161	4.467	6.257
eletricidade	253	383	456	873	1.229
outras primárias	44	112	350	539	983
outros	1.034	605	76	380	351
<b>MA2</b>					

<sup>42</sup> Nas tabelas a seguir, os valores até 2010 foram extraídas das séries históricas do Balanço Energético Nacional 2013, ano-base 2012, e após, do PNE2050 no CPG e da modelagem macroeconômica nos Cenários de Mitigação

carvão vapor	583	184	52	126	177
carvão vegetal	350	233	63	228	318
coque petróleo	3	1.845	3.161	4.273	5.595
eletricidade	253	383	456	875	1.233
outras primárias	44	112	350	616	1.237
outros	1.034	605	76	371	331
<b>MA2+T</b>					
carvão vapor	583	184	52	125	173
carvão vegetal	350	233	63	225	312
coque petróleo	3	1.845	3.161	4.217	5.490
eletricidade	253	383	456	863	1.210
outras primárias	44	112	350	608	1.214
outros	1.034	605	76	366	325

## Matriz Energética do Setor Siderúrgico (ktep)

Cenário	1990	2000	2010	2020	2030
<b>CPG</b>					
carvão vapor	20	1.651	1.772	2.256	2.846
carvão vegetal	4.365	3.660	3.372	4.986	5.379
coque carvão mineral	4.936	6.413	7.153	9.069	11.462
eletricidade	1.098	1.265	1.613	2.256	2.715
gás de coqueria	890	932	1.250	1.504	1.880
gás natural	333	779	897	1.096	1.436
outros	582	585	389	322	392
<b>MA1</b>					
carvão vapor	20	1.651	1.772	2.197	2.722
carvão vegetal	4.365	3.660	3.372	4.855	5.144
coque carvão mineral	4.936	6.413	7.153	8.831	10.961
eletricidade	1.098	1.265	1.613	2.197	2.597
gás de coqueria	890	932	1.250	1.465	1.798
gás natural	333	779	897	1.067	1.373
outros	582	585	389	314	375
<b>MA1+T</b>					
carvão vapor	20	1.651	1.772	2.305	2.900
carvão vegetal	4.365	3.660	3.372	5.093	5.481
coque carvão mineral	4.936	6.413	7.153	9.263	11.680
eletricidade	1.098	1.265	1.613	2.305	2.767
gás de coqueria	890	932	1.250	1.537	1.916
gás natural	333	779	897	1.119	1.463
outros	582	585	389	329	399

<b>MA2</b>					
carvão vapor	20	1.651	1.772	2.144	2.634
carvão vegetal	4.365	3.660	3.372	9.208	10.744
coque carvão mineral	4.936	6.413	7.153	4.149	4.843
eletricidade	1.098	1.265	1.613	2.144	2.513
gás de coqueria	890	932	1.250	1.430	1.740
gás natural	333	779	897	1.042	1.329
outros	582	585	389	306	362
<b>MA2+T</b>					
carvão vapor	20	1.651	1.772	2.394	3.049
carvão vegetal	4.365	3.660	3.372	10.281	12.434
coque carvão mineral	4.936	6.413	7.153	4.632	5.605
eletricidade	1.098	1.265	1.613	2.394	2.909
gás de coqueria	890	932	1.250	1.596	2.014
gás natural	333	779	897	1.163	1.538
outros	582	585	389	342	420

## Matriz Energética do Setor de Papel e Celulose (ktep)

Cenário	1990	2000	2010	2020	2030
<b>CPG</b>					
carvão vapor	133	83	112	360	542
eletricidade	661	1.044	1.636	2.643	3.852
gás natural	55	273	676	899	1.224
lenha	752	1.048	1.513	2.172	3.029
lixívia	1.087	2.291	4.711	7.265	10.713
óleo combustível	540	983	466	470	702
outros	384	486	942	28	0
<b>MA1</b>					
carvão vapor	133	83	112	356	534
eletricidade	661	1.044	1.636	2.613	3.798
gás natural	55	273	676	889	1.207
lenha	752	1.048	1.513	2.148	2.987
lixívia	1.087	2.291	4.711	7.184	10.565
óleo combustível	540	983	466	465	692
outros	384	486	942	27	0
<b>MA1+T</b>					
carvão vapor	133	83	112	363	549
eletricidade	661	1.044	1.636	2.670	3.901
gás natural	55	273	676	909	1.239
lenha	752	1.048	1.513	2.224	3.068

lixívia	1.087	2.291	4.711	7.338	10.848
óleo combustível	540	983	466	475	711
outros	384	486	942	28	0
<b>MA2</b>					
carvão vapor	133	83	112	354	530
eletricidade	661	1.044	1.636	2.599	3.772
gás natural	55	273	676	884	1.228
lenha	752	1.048	1.513	2.136	2.967
lixívia	1.087	2.291	4.711	7.144	10.491
óleo combustível	540	983	466	460	688
outros	384	486	942	27	0
<b>MA2+T</b>					
carvão vapor	133	83	112	372	565
eletricidade	661	1.044	1.636	2.733	4.015
gás natural	55	273	676	930	1.276
lenha	752	1.048	1.513	2.246	3.158
lixívia	1.087	2.291	4.711	7.512	11.167
óleo combustível	540	983	466	486	732
outros	384	486	942	29	0

## Matriz Energética do Setor de Metais Não-Ferrosos (ktep)

Cenário	1990	2000	2010	2020	2030
<b>CPG</b>					
carvão vapor	0	158	616	778	832
coque carvão mineral	72	87	152	281	292
coque petróleo	350	424	612	735	742
eletricidade	2.196	2.490	3.198	3.358	3.432
gás natural	27	148	727	966	1.019
óleo combustível	392	976	1.098	1.038	1.117
outros	308	81	89	70	71
<b>MA1</b>					
carvão vapor	0	158	616	756	797
coque carvão mineral	72	87	152	273	280
coque petróleo	350	424	612	714	711
eletricidade	2.196	2.490	3.198	3.261	3.288
gás natural	27	148	727	938	976
óleo combustível	392	976	1.098	1.008	1.070
outros	308	81	89	68	68
<b>MA1+T</b>					
carvão vapor	0	158	616	833	916

coque carvão mineral	72	87	152	301	322
coque petróleo	350	424	612	786	817
eletricidade	2.196	2.490	3.198	3.593	3.780
gás natural	27	148	727	1.033	1.123
óleo combustível	392	976	1.098	1.110	1.230
outros	308	81	89	74	78
<b>MA2</b>					
carvão vapor	0	158	616	732	760
coque carvão mineral	72	87	152	264	267
coque petróleo	350	424	612	692	678
eletricidade	2.196	2.490	3.198	3.159	3.137
gás natural	27	148	727	908	932
óleo combustível	392	976	1.098	976	1.021
outros	308	81	89	65	65
<b>MA2+T</b>					
carvão vapor	0	158	616	901	1.022
coque carvão mineral	72	87	152	325	359
coque petróleo	350	424	612	851	911
eletricidade	2.196	2.490	3.198	3.887	4.217
gás natural	27	148	727	1.118	1.252
óleo combustível	392	976	1.098	1.201	1.372
outros	308	81	89	81	87

## Matriz Energética do Setor de Química (ktep)

Cenário	1990	2000	2010	2020	2030
<b>CPG</b>					
coque petróleo	758	2.143	2.259	1.811	2.462
eletricidade	1.145	1.483	2.055	2.450	3.466
gás natural	324	1.252	2.289	3.459	4.865
outros	2.007	1.543	611	906	1.159
<b>MA1</b>					
coque petróleo	758	2.143	2.259	1.781	2.410
eletricidade	1.145	1.483	2.055	2.408	3.393
gás natural	324	1.252	2.289	3.400	4.761
outros	2.007	1.543	611	890	1.135
<b>MA1+T</b>					
coque petróleo	758	2.143	2.259	1.789	2.425
eletricidade	1.145	1.483	2.055	2.423	3.414
gás natural	324	1.252	2.289	3.417	4.791
outros	2.007	1.543	611	895	1.142
<b>MA2</b>					
coque petróleo	758	2.143	2.259	1.754	2.364
eletricidade	1.145	1.483	2.055	2.372	3.328
gás natural	324	1.252	2.289	3.349	4.671
outros	2.007	1.543	611	877	1.113
<b>MA2+T</b>					
coque petróleo	758	2.143	2.259	1.798	2.440
eletricidade	1.145	1.483	2.055	2.432	3.435
gás natural	324	1.252	2.289	3.434	4.821
outros	2.007	1.543	611	899	1.149

## Matriz Energética do Setor de Mineração (ktep)

CPG					
carvão vapor	99	400	366	475	804
coque petróleo	0	138	508	479	705
diesel	78	158	260	527	749
eletricidade	512	639	972	1.320	1.881
gás natural	87	142	628	1.259	1.646
óleo combustível	473	812	371	179	229
outros	40	23	77	239	248
<b>MA1</b>					
carvão vapor	99	400	366	464	779
coque petróleo	0	138	508	468	683
diesel	78	158	260	515	725
eletricidade	512	639	972	1.289	1.820
gás natural	87	142	628	1.229	1.593
óleo combustível	473	812	371	174	222
outros	40	23	77	233	240
<b>MA1+T</b>					
carvão vapor	99	400	366	471	796
coque petróleo	0	138	508	475	698
diesel	78	158	260	523	741
eletricidade	512	639	972	1.310	1.861
gás natural	87	142	628	1.249	1.598
óleo combustível	473	812	371	177	226
outros	40	23	77	237	245
<b>MA2</b>					
carvão vapor	99	400	366	454	758
coque petróleo	0	138	508	458	664
diesel	78	158	260	504	705
eletricidade	512	639	972	1.260	1.771
gás natural	87	142	628	1.204	1.550
óleo combustível	473	812	371	171	216
outros	40	23	77	228	233
<b>MA2+T</b>					
carvão vapor	99	400	366	478	811
coque petróleo	0	138	508	482	711
diesel	78	158	260	530	755
eletricidade	512	639	972	1.328	1.896
gás natural	87	142	628	1.267	1.659
óleo combustível	473	812	371	180	231

outros	40	23	77	240	250
--------	----	----	----	-----	-----

## Matriz Energética dos Outros Setores Industriais<sup>43</sup> (ktep)

Cenário	1990	2000	2010	2020	2030
<b>CPG</b>					
carvão vegetal	394	438	581	775	959
coque carvão mineral	26	6	107	144	159
coque petróleo	2	530	924	1.411	2.078
eletricidade	3.795	5.312	7.558	9.859	13.105
gás natural	510	1.226	4.034	5.813	8.905
glp	106	623	434	815	1.130
lenha	4.379	4.201	5.601	6.454	8.113
óleo combustível	2.379	2.549	889	823	1.158
outros	458	537	564	977	1.360
produtos cana	4.472	7.838	17.251	23.112	25.926
<b>MA1</b>					
carvão vegetal	394	438	581	765	944
coque carvão mineral	26	6	107	142	157
coque petróleo	2	530	924	1.393	2.046
eletricidade	3.795	5.312	7.558	9.735	12.904
gás natural	510	1.226	4.034	5.740	8.768
glp	106	623	434	804	1.113
lenha	4.379	4.201	5.601	6.373	7.988
óleo combustível	2.379	2.549	889	812	1.140
outros	458	537	564	964	1.339
produtos cana	4.472	7.838	17.251	22.821	25.527
<b>MA1+T</b>					
carvão vegetal	394	438	581	767	948
coque carvão mineral	26	6	107	142	157
coque petróleo	2	530	924	1.397	2.053
eletricidade	3.795	5.312	7.558	9.760	12.948
gás natural	510	1.226	4.034	5.756	8.798
glp	106	623	434	807	1.117
lenha	4.379	4.201	5.601	6.391	8.016
óleo combustível	2.379	2.549	889	815	1.144
outros	458	537	564	967	1.344
produtos cana	4.472	7.838	17.251	22.885	25.615

<sup>43</sup> Ferroligas, Alimentos e Bebidas, Têxtil, Cerâmica e Outros

Cenário	1990	2000	2010	2020	2030
<b>MA2</b>					
carvão vegetal	394	438	581	753	926
coque carvão mineral	26	6	107	140	154
coque petróleo	2	530	924	1.371	2.006
eletricidade	3.795	5.312	7.558	9.580	12.651
gás natural	510	1.226	4.034	5.648	8.596
glp	106	623	434	792	1.091
lenha	4.379	4.201	5.601	5.971	7.832
óleo combustível	2.379	2.549	889	799	1.118
outros	458	537	564	949	1.313
produtos cana	4.472	7.838	17.251	22.457	25.028
<b>MA2+T</b>					
carvão vegetal	394	438	581	767	947
coque carvão mineral	26	6	107	142	157
coque petróleo	2	530	924	1.397	2.053
eletricidade	3.795	5.312	7.558	9.761	12.946
gás natural	510	1.226	4.034	5.755	8.797
glp	106	623	434	807	1.116
lenha	4.379	4.201	5.601	6.390	8.014
óleo combustível	2.379	2.549	889	815	1.144
outros	458	537	564	967	1.343
produtos cana	4.472	7.838	17.251	22.882	25.611

## Custos por tecnologia MA1 em relação ao CPG e MA2 em relação ao CPG para o Setor de Cimento

Medida	Custo unitário de mitigação	Potencial de mitigação em 2030	Potencial de mitigação no período (2010-2030)	Custo total de mitigação no período (2010-2030)
	US\$ 1,0/tCO <sub>2</sub> e	tCO <sub>2</sub> e milhões	tCO <sub>2</sub> e milhões	US\$ milhão
Redução de intensidade de para 3,56 GJ/t clínquer e aumentar 50% o coprocessamento base 2010 (MA1)	15,64	4,76	31,24	489
Redução de intensidade de para 3,35 GJ/t clínquer e aumentar 100% o coprocessamento base 2010 (MA2)	46,93	7,37	56,31	2.642

## Custos por tecnologia MA1 em relação ao CPG e MA2 em relação ao CPG para o Setor Siderúrgico

Medida	Custo unitário de mitigação	Potencial de mitigação em 2030	Potencial de mitigação no período (2010-2030)	Custo total de mitigação no período (2010-2030)
	US\$ 1,0/tCO <sub>2</sub> e	tCO <sub>2</sub> e milhões	tCO <sub>2</sub> e milhões	US\$ milhão
Redução de intensidade de 2% base 2010 (MA1 e MA2)	28,69	3,12	7,43	213
Incorporar 1,8 Mha de eucalipto para carvão vegetal (MA2)	47,67	29,35	275,72	13.143

## Emissões de Energia e de Processo do Setor de Cimento

	MtCO <sub>2</sub> e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	energia	5,89	10,60	13,89	24,01	33,27
	processos	11,06	16,05	22,06	36,59	53,56
	total	16,95	26,64	35,95	60,60	86,82
MA1	energia	5,89	10,60	13,89	21,39	29,51
	processos	11,06	16,05	22,06	36,39	53,15
	total	16,95	26,64	35,95	57,79	82,66
MA1+T	energia	5,89	10,60	13,89	21,33	29,37
	processos	11,06	16,05	22,06	36,27	52,91
	total	16,95	26,64	35,95	57,60	82,28
MA2	energia	5,89	10,60	13,89	20,43	26,36
	processos	11,06	16,05	22,06	36,36	53,09
	total	16,95	26,64	35,95	56,80	79,45
MA2+T	energia	5,89	10,60	13,89	20,17	25,86
	processos	11,06	16,05	22,06	35,88	52,10
	total	16,95	26,64	35,95	56,05	77,96

## Emissões de Energia e de Processo do Setor Siderúrgico

	MtCO <sub>2</sub> e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	energia	4,45	4,70	5,55	6,28	7,97
	processos	22,69	36,54	39,30	50,32	63,37
	total	27,14	41,24	44,85	56,61	71,34
MA1	energia	4,45	4,70	5,55	6,12	7,62
	processos	22,69	36,54	39,30	49,00	60,60
	total	27,14	41,24	44,85	55,12	68,22
MA1+T	energia	4,45	4,70	5,55	6,42	8,12
	processos	22,69	36,54	39,30	51,40	64,57
	total	27,14	41,24	44,85	57,82	72,69
MA2	energia	4,45	4,70	5,55	5,97	7,38
	processos	22,69	36,54	39,30	29,19	34,61
	total	27,14	41,24	44,85	35,16	41,99
MA2+T	energia	4,45	4,70	5,55	6,66	8,54
	processos	22,69	36,54	39,30	32,59	40,06
	total	27,14	41,24	44,85	39,25	48,59

## Emissões de Energia e de Processo do Setor de Papel e Celulose

	MtCO <sub>2</sub> e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	energia	2,48	4,33	3,65	5,53	7,85
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,48	4,33	3,65	5,53	7,85
MA1	energia	2,48	4,33	3,65	5,47	7,74
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,48	4,33	3,65	5,47	7,74
MA1+T	energia	2,48	4,33	3,65	5,59	7,95
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,48	4,33	3,65	5,59	7,95
MA2	energia	2,48	4,33	3,65	5,44	7,69
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,48	4,33	3,65	5,44	7,69
MA2+T	energia	2,48	4,33	3,65	5,72	8,18
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,48	4,33	3,65	5,72	8,18

## Emissões de Energia e de Processo do Setor de Metais Não-Ferrosos

	MtCO <sub>2</sub> e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	energia	1,37	3,72	5,49	11,89	12,52
	processos	3,78	3,18	3,10	3,35	3,35
	total	5,15	6,89	8,59	15,24	15,87
MA1	energia	1,37	3,72	5,49	11,54	11,99
	processos	3,78	3,18	3,10	3,26	3,21
	total	5,15	6,89	8,59	14,80	15,20
MA1+T	energia	1,37	3,72	5,49	12,72	13,79
	processos	3,78	3,18	3,10	3,59	3,69
	total	5,15	6,89	8,59	16,31	17,48
MA2	energia	1,37	3,72	5,49	11,18	11,44
	processos	3,78	3,18	3,10	3,15	3,07
	total	5,15	6,89	8,59	14,34	14,51
MA2+T	energia	1,37	3,72	5,49	13,76	15,38
	processos	3,78	3,18	3,10	3,88	4,12
	total	5,15	6,89	8,59	17,64	19,50

## Emissões de Energia e de Processo do Setor de Química

	MtCO <sub>2</sub> e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	energia	8,74	14,08	14,04	18,34	25,09
	processos	5,80	8,99	3,52	2,37	3,21
	total	14,54	23,07	17,56	20,71	28,30
MA1	energia	8,74	14,08	14,04	18,03	24,55
	processos	5,80	8,99	3,52	2,33	3,14
	total	14,54	23,07	17,56	20,36	27,70
MA1+T	energia	8,74	14,08	14,04	18,12	24,71
	processos	5,80	8,99	3,52	2,34	3,16
	total	14,54	23,07	17,56	20,46	27,87
MA2	energia	8,74	14,08	14,04	17,76	24,09
	processos	5,80	8,99	3,52	2,30	3,08
	total	14,54	23,07	17,56	20,06	27,17
MA2+T	energia	8,74	14,08	14,04	18,21	24,86
	processos	5,80	8,99	3,52	2,35	3,18
	total	14,54	23,07	17,56	20,57	28,04

## Emissões de Energia e de Processo do Setor de Mineração

	MtCO <sub>2</sub> e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	energia	2,42	5,67	7,30	9,78	13,81
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,42	5,67	7,30	9,78	13,81
MA1	energia	2,42	5,67	7,30	9,55	13,37
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,42	5,67	7,30	9,55	13,37
MA1+T	energia	2,42	5,67	7,30	9,70	13,66
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,42	5,67	7,30	9,70	13,66
MA2	energia	2,42	5,67	7,30	9,35	13,01
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,42	5,67	7,30	9,35	13,01
MA2+T	energia	2,42	5,67	7,30	9,84	13,92
	processos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	total	2,42	5,67	7,30	9,84	13,92

## Emissões de Energia e de Processo dos Outros Setores Industriais<sup>44</sup>

	MtCO <sub>2</sub> e	1990	2000	2010	2020	2030
CPG	energia	11,32	17,36	20,36	29,56	42,91
	processos	7,91	9,46	18,34	23,13	29,75
	total	19,23	26,82	38,70	52,68	72,66
MA1	energia	11,32	17,36	20,36	29,19	42,25
	processos	7,91	9,46	18,34	22,83	29,29
	total	19,23	26,82	38,70	52,02	71,54
MA1+T	energia	11,32	17,36	20,36	29,27	42,40
	processos	7,91	9,46	18,34	22,90	29,39
	total	19,23	26,82	38,70	52,17	71,79
MA2	energia	11,32	17,36	20,36	28,72	41,43
	processos	7,91	9,46	18,34	22,47	28,72
	total	19,23	26,82	38,70	51,19	70,14
MA2+T	energia	11,32	17,36	20,36	29,27	42,39
	processos	7,91	9,46	18,34	22,90	29,39
	total	19,23	26,82	38,70	52,16	71,78

<sup>44</sup> Ferroligas, Alimentos e Bebidas, Têxtil, Cerâmica e Outros