



Centro Clima
CENTRO DE ESTUDOS INTEGRADOS SOBRE
MEIO AMBIENTE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental

CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ

Apoio:

Instituto Clima e Sociedade (ICS)

WWF – Brasil



PROJETO IES-Brasil – 2050

**Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e
Mudanças Climáticas
(Centro Clima/COPPE/UFRJ)**

Cenário de Emissão de GEE – 2050

Setor Industrial

(Demanda de energia, processos industriais e uso de produtos)

Relatório Técnico

Autores

Felipe C.B. Santos

Carolina B.S. Dubeux

Amaro Olímpio Pereira Jr.

Emissão de Gases de Efeito Estufa – 2050: Implicações Econômicas e Sociais do Cenário de Plano Governamental

CENTRO CLIMA/COPPE/UFRJ

COORDENAÇÃO GERAL

Emilio Lèbre La Rovere

COORDENAÇÃO EXECUTIVA

Carolina Burle Schmidt Dubeux

MODELAGEM MACROECONÔMICA

William Wills (coordenador)

Julien Lefèvre

Carolina Grottera

Setor de Agricultura, Floresta e Outros Usos da Terra (AFOLU)

Carolina B.S. Dubeux (coordenadora)

Michele Karina Cotta Walter

Ana Maria Rojas Méndez

Isabella da Fonseca Zicarelli

Setor Energético

Amaro Olímpio Pereira Junior

(coordenador)

Sergio Henrique Ferreira da Cunha

Gabriel Castro

Mariana Weiss de Abreu

Setor Industrial

Amaro Olímpio Pereira Junior

(coordenador)

Felipe C.B. Santos

Carolina B.S. Dubeux

Setor de Resíduos

Carolina B.S. Dubeux

Angéli Viviani Colling

Setor de Transporte

*(Laboratório de Transporte
de Carga – LTC/COPPE/UFRJ)*

Márcio de Almeida D'Agosto

(coordenador)

Daniel Neves Schmitz Gonçalves

Luiza Di Beo Oliveira

Integração dos Modelos Energéticos de Demanda

Claudio Gesteira

Colaboração

Daniel Oberling

Saulo Machado Loureiro

Assistente de Coordenação

Isabella da Fonseca Zicarelli

Apoio

Carmen Brandão Reis

Elza Ramos

Sumário

1. Introdução	1
2. Metodologia – Estrutura da Modelagem	2
2.1. Estimativa de Emissões do Uso da Energia.....	2
2.2. Estimativa de Emissões de Processos Industriais e de Uso de Produtos	4
3. Evolução do Setor Industrial – Principais setores.....	5
3.1. Indústria Extrativa Mineral	6
3.2. Cimento	7
3.3. Siderurgia	8
3.4. Papel e Celulose.....	9
4. Detalhamento dos Principais Setores Industriais Emissores de GEE	11
4.1. Indústria de Cimento.....	11
4.1.1. Processo de produção	11
4.1.2. Medidas de ganho de eficiência	12
4.1.3. Resultados da modelagem no CPG.....	13
4.1.4. Evolução dos indicadores do setor.....	15
4.2. Indústria Siderúrgica	15
4.2.1. Processo de produção	15
4.2.2. Medidas de ganho de eficiência	16
4.2.3. Resultados da modelagem no CPG.....	17
4.2.4. Evolução dos indicadores do setor.....	19
4.3. Indústria de Papel e Celulose	20
4.3.1. Processo de produção	20
4.3.2. Medidas de ganho de eficiência.....	23
4.3.3. Resultados da modelagem no CPG.....	25
4.3.4. Evolução dos indicadores do setor.....	26
5. Demais Setores industriais	28
5.1. Indústria de Alimentos e Bebidas.....	28
5.2. Indústria Cerâmica	30
5.3. Indústria Têxtil	31
5.4. Indústria de Ferroligas	32
5.5. Não ferrosos.....	33
5.6. Indústria Química	36
5.7. Mineração e Pelotização	38
5.8. Outras Indústrias e consumo de produtos	39
6. Conclusão	42
7. Prospecção tecnológica para cenários de mitigação.....	45
8. Referências	51
9. Apêndice	53
9.1. Emissões de gases não CO ₂ do consumo de combustíveis (energia).....	53
9.2. Emissões de Processos Industriais	54

Tabelas

Tabela 1.	Evolução da produção de cimento no CPG (Mt)	13
Tabela 2.	Evolução do consumo energético – setor de cimento (mil tep)	13
Tabela 3.	Evolução da participação dos combustíveis – setor de cimento (%)	14
Tabela 4.	Evolução do conteúdo de clínquer (% por tonelada de cimento)	14
Tabela 5.	Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor de cimento (GgCO ₂ e).....	14
Tabela 6.	Evolução dos indicadores - setor de cimento – 2010-2050	15
Tabela 7.	Evolução da produção de aço (Mt)	18
Tabela 8.	Evolução do consumo energético – setor siderúrgico (mil tep).....	18
Tabela 9.	Evolução da participação dos combustíveis – setor siderúrgico (%).....	18
Tabela 10.	Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor siderúrgico (GgCO ₂ e).....	19
Tabela 11.	Evolução dos indicadores no setor industrial siderúrgico – 2010-2050.....	19
Tabela 12.	Capacidade total de produção de celulose – 2014 (Mt)	22
Tabela 13.	Capacidade total de produção de papel – 2014 (Mt).....	23
Tabela 14.	Evolução da produção de papel e celulose (Mt)	25
Tabela 15.	Evolução do consumo energético – setor de papel e celulose (mil tep).....	25
Tabela 16.	Evolução da participação dos combustíveis – setor de papel e celulose (%).....	26
Tabela 17.	Evolução das emissões - setor de papel de celulose (GgCO ₂ e)	26
Tabela 18.	Evolução dos indicadores - setor de papel e celulose – 2010-2050.....	26
Tabela 19.	Intensidade Energética por tipo de indústria de papel e celulose - <i>benchmarks</i>	27
Tabela 20.	Consumo energético por processo industrial e tipo de combustível - <i>benchmarks</i>	27
Tabela 21.	Evolução do consumo energético – setor de alimentos e bebidas (mil tep)	28
Tabela 22.	Evolução do consumo energético – setor de alimentos e bebidas (%).....	28
Tabela 23.	Resultado das emissões – setor de alimentos e bebidas (GgCO ₂ e)	29
Tabela 24.	Evolução dos indicadores no setor de alimentos e bebidas – 2010-2050	29
Tabela 25.	Evolução do consumo energético – setor de cerâmica (mil tep)	30
Tabela 26.	Evolução do consumo energético – setor de cerâmica (%)	30
Tabela 27.	Resultado das emissões – setor de cerâmica (GgCO ₂ e)	30
Tabela 28.	Evolução dos indicadores no setor de cerâmica – 2010-2050	30
Tabela 29.	Evolução do consumo energético – setor têxtil (mil tep)	31
Tabela 30.	Evolução do consumo energético – setor têxtil (%).....	31
Tabela 31.	Resultado das emissões – setor têxtil (GgCO ₂ e).....	31
Tabela 32.	Evolução dos indicadores no setor industrial têxtil – 2010-2050	31
Tabela 33.	Evolução do consumo energético e de redutores – setor de ferroligas (mil tep).....	32
Tabela 34.	Evolução do consumo energético e de redutores – setor de ferroligas (%)	32
Tabela 35.	Resultado das emissões – setor de ferroligas (GgCO ₂ e).....	33
Tabela 36.	Evolução dos indicadores no setor industrial de ferroligas – 2010-2050	33
Tabela 37.	Evolução do consumo energético – setor de não ferrosos (mil tep)	33
Tabela 38.	Evolução do consumo energético – setor de não ferrosos (%).....	34
Tabela 39.	Resultado das emissões do consumo energético e do uso de redutores – setor de não ferrosos (GgCO ₂ e)	34
Tabela 40.	Emissões de dióxido de carbono por tecnologia – indústria de alumínio (GgCO ₂)	35
Tabela 41.	Emissões de CF ₄ por tecnologia – indústria de alumínio (GgCO ₂ e)	35
Tabela 42.	Emissões de C ₂ F ₆ por tecnologia – indústria de alumínio (GgCO ₂ e).....	36
Tabela 43.	Evolução dos indicadores no setor industrial de não-ferrosos – 2010-2050	36
Tabela 44.	Evolução do consumo energético – setor químico (mil tep).....	36
Tabela 45.	Evolução do consumo energético – setor químico (%)	37
Tabela 46.	Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor químico (GgCO ₂ e).....	37
Tabela 47.	Evolução dos indicadores no setor químico – 2010-2050.....	37
Tabela 48.	Evolução do consumo energético – setor de mineração e pelletização (mil tep)	38
Tabela 49.	Evolução da participação dos combustíveis – setor de mineração e pelletização (%)	38
Tabela 50.	Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor de mineração e pelletização (GgCO ₂ e)	39

Tabela 51.	Evolução dos indicadores no setor de mineração e pelletização – 2010-2050	39
Tabela 52.	Evolução do consumo energético – setor de outras indústrias (mil tep).....	39
Tabela 53.	Evolução do consumo energético – setor de outras indústrias (%)	40
Tabela 54.	Evolução das emissões de energia e processos industriais – outras indústrias e consumo de produtos (GgCO ₂ e)	40
Tabela 55.	Evolução dos indicadores de outras indústrias e consumo de produtos – 2010-2050	41
Tabela 56.	Evolução do consumo energético – 2010-2050 (mil tep).....	43
Tabela 57.	Evolução das emissões de GEE no período 2010-2050 (GgCO ₂ e)	44

Figuras

Figura 1.	Fluxograma da modelagem industrial.....	3
Figura 2.	Evolução da Indústria Extrativa Mineral (2010-2050).....	6
Figura 3.	Evolução da Produção de Cimento (2010-2050).....	7
Figura 4.	Evolução da produção de aço (2010-2050).....	8
Figura 5.	Produção de celulose e papel no CPG (2010-2015)	9
Figura 6.	Evolução da produção física industrial brasileira (2005-2050)	42
Figura 7.	Evolução da participação de fontes fósseis e renováveis (2010-2050).....	43

1. Introdução

Este relatório apresenta os resultados das estimativas de emissões de gases de efeito estufa do setor industrial brasileiro até 2050, abrangendo as emissões do uso da energia, de processos industriais e do uso de produtos. Partindo de hipóteses de crescimento do PIB e outras variáveis que influenciam o desenvolvimento da indústria brasileira e, ainda, considerando tecnologias, combustíveis e matérias primas consistentes com planos governamentais, o estudo estimou a evolução dos vários segmentos industriais, e conseqüentemente, suas emissões.

A estimativa da demanda por combustíveis (para fins energéticos, como matéria prima e como produtos) alimentou, juntamente com a demanda proveniente de outros setores da economia, a modelagem da oferta de energia, permitindo assim a consolidação das emissões do setor energético como um todo, às quais se somaram a outras emissões do setor industrial, da agricultura, floresta e outros usos da terra e dos resíduos, permitindo a totalização das emissões no horizonte de estudo.

Os resultados das análises setoriais sobre produção e consumo de energia, fluxos de caixa, investimentos, substituição de combustíveis, eficiência energética, entre outros, alimentaram o modelo de equilíbrio geral, IMACLIM-Br, que descreve o comportamento da economia brasileira no horizonte do estudo.

A diante será introduzida a metodologia da modelagem.

2. Metodologia – Estrutura da Modelagem

A modelagem considerou o ano de 2005 como base. A evolução da produção industrial (produção física¹), por setor industrial, acompanha as estimativas de crescimento do PIB dadas pelo modelo macroeconômico de equilíbrio geral – IMACLIM-BR, que estimou a evolução do nível de atividade dos setores industriais². As fontes energéticas têm por referência o consumo energético do Balanço Energético Nacional até o ano de 2015 também para cada setor industrial.

2.1. Estimativa de Emissões do Uso da Energia

O setor industrial brasileiro foi dividido em 10 indústrias destacadamente energo-intensivas, enquanto o restante está aglomerado no setor “outras indústrias”. São elas: alimentos e bebidas, cerâmica, cimento, ferro-gusa e aço, ferro-ligas, mineração e pelotização, não ferrosos, papel e celulose, química e indústria têxtil.

Os usos finais de energia do setor industrial estão divididos em 19 fontes, sendo sete delas de origem renovável: bagaço de cana, biodiesel, resíduo urbano, resíduo industrial, lenha, lixívia e eletricidade³, e dez de origem fóssil: óleo combustível, óleo diesel, outros energéticos de petróleo, querosene iluminante, alcatrão, coque de carvão mineral, gás de coqueria, gás natural, GLP e carvão mineral 5900, 3700 e 3100 (kcal/kg).

A dinâmica da modelagem é balizada pela estrutura do modelo IMACLIM-BR que realiza a chamada dupla contabilidade entre fluxos físicos e monetários oriundos das relações econômicas intrassetoriais.

A modelagem realizada por este estudo considera o nível de atividade da indústria e seus determinantes calculados pelo nível de atividade, intensidade energética por unidade produzida, uso final dos combustíveis e suas eficiências para cada tecnologia.

Energia consumida na indústria = nível de atividade x intensidade energética (Equação 1)

Quanto ao nível de atividade, identifica-se o nível de atividade como Q_k , onde:

$$Q_{k,j} = N_{k,j} \times P_{k,j} \times M_{k,j} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

¹ Sistema IBGE SIDRA, dados de associações setoriais, e dados de outros órgãos do governo.

² Ver detalhes do capítulo de macroeconomia.

³ Como a maior parte da geração brasileira ainda “é predominantemente hídrica, considerou-se como renovável;

$N_{k,j}$, representa o número de unidades industriais em determinado segmento industrial j ;

$P_{k,j}$, representa a penetração de equipamentos industriais para uso final i no segmento industrial j ;

$M_{k,j}$, representa a quantidade em toneladas de produto j requerendo serviço de energia final i .

Quanto à intensidade energética, suas intensidades são divididas em j usos por energia útil, ou seja, em cada processo produtivo dentro da indústria, a energia é transformada em energia útil (j) para alguma de suas formas, como calor de processo, força motriz, aquecimento direto, iluminação, refrigeração e eletroquímica. Seus usos são divididos em percentuais que são peculiares para cada indústria devido a seus distintos processos de produção. E por fim, são informados os tipos de combustíveis (i) que esta tecnologia pode consumir, onde cada combustível apresenta um nível de eficiência devido as suas propriedades específicas para aquele serviço prestado (calor de processo, força motriz, iluminação, etc).

$$\text{Coeficiente de Intensidade Energética} = \sum_i^n E \sum_j^n C \times Efic_Tec \quad (\text{Equação 3})$$

$$\sum_j^n E \sum_i^n C \times Efic_Tec = \%Energia_{\text{útil},j} \times \%C_{\text{combustível},i} \times Efic_Tecnologica_{\text{combustível},i} \quad (\text{Equação 3.1})$$

A seguir segue fluxograma que esquematiza este processo:

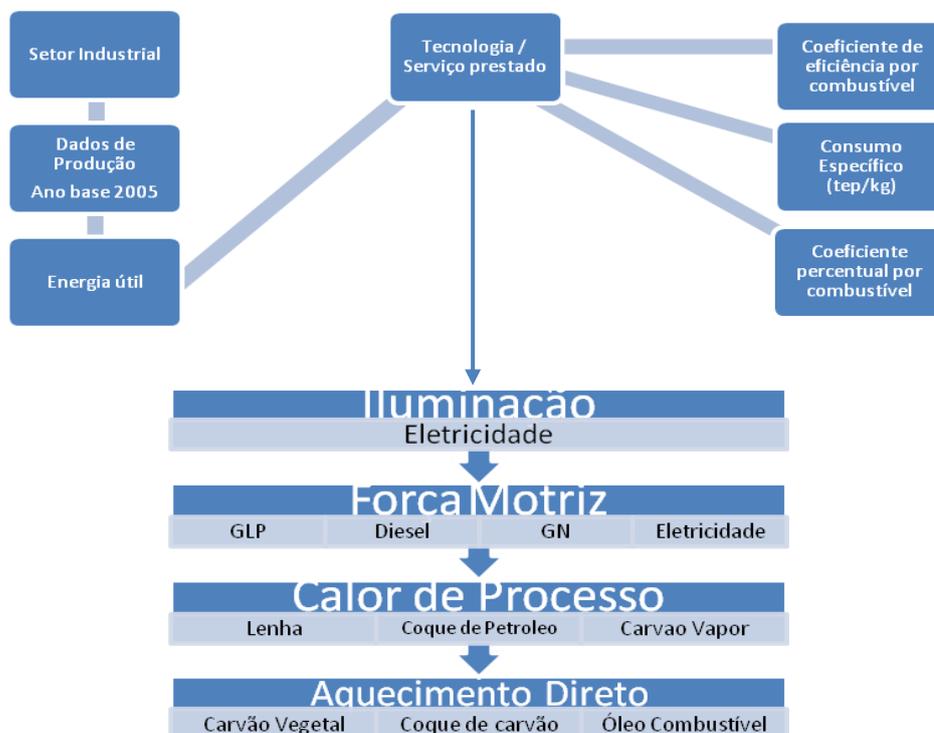


Figura 1. Fluxograma da modelagem industrial

Fonte: autores

Para se chegar a este nível de detalhamento técnico, utilizou-se os dados dos estudos do PROCEL INDÚSTRIA (2010)⁴, que possui detalhamento para vários setores industriais. Foram utilizadas também as informações do Balanço de Energia Útil 2005, principalmente para a extração da participação do uso de energia útil em cada setor industrial (BEU, 2005), como também a calibragem do ano base em relação às eficiências de cada processo.

Ademais, foram utilizados os estudos de eficiência energética das indústrias dos países membros da União Europeia, para referenciar o consumo energético médio dos setores industriais nesta região. O estudo foi realizado pelo JOINT RESEARCH CENTRE, *Institute for Prospective Technological Studies*⁵, que além de detalhar o consumo energético médio das indústrias do bloco Europeu, também apontam as melhores práticas “BATS – Best Available Techniques” e benchmark tecnológico dos setores industriais. Por fim consideraram-se informações sobre o benchmark industrial de setores como Cimento, Ferro-gusa e Aço e Papel e Celulose do *Institute for Industrial Productivity*⁶ que realizou um levantamento bibliográfico internacional apontando as melhores rotas tecnológicas e benchmark tecnológicos de alguns setores específicos energo-intensivos.

2.2. Estimativa de Emissões de Processos Industriais e de Uso de Produtos

Além das emissões provenientes do consumo de combustíveis, grande parte dos setores industriais emite gases de efeito estufa em razão de seus processos de produção ou mesmo pelo simples uso de produtos. As metodologias utilizadas nas estimativas dessas emissões são aquelas reportadas no Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Relatório de Referência – Emissões de Processos Industriais e Uso de Produtos (MCTI, 2015b) e consistem na utilização de fatores de emissão médios nacionais para distintos níveis de produção e/ou uso de produtos, de acordo com as tecnologias consideradas no horizonte de cenário.

⁴ Para consultar o estudo, acesse:

<http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMID5758021DEDA0411490D62106E1491EBEPTBRIE.htm>

⁵ Disponível em: <http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/>

⁶ Para visualizar os benchmarks das indústrias mais energo intensivas visite: <http://ietd.iipnetwork.org/>

3. Evolução do Setor Industrial – Principais setores

O cenário de plano governamental (CPG) adotado neste trabalho tem como referência o Plano Nacional de Energia 2050⁷, realizado pela EPE, e sua evolução de consumo energético no setor industrial seguem a lógica deste estudo. Portanto, ao longo das décadas o estudo busca ao máximo, trazer as principais características do PNE2050 à modelagem, realizando alguns ajustes incrementais em relação às melhorias das políticas climáticas.

Algumas adaptações foram feitas em relação ao ritmo do crescimento econômico até 2030, que foi alterado diante da retração observada de 2014 a 2016. A retomada do crescimento industrial deve ocorrer entre 2020-2025 e só depois que a taxa de ocupação da indústria recuperar os patamares pré-crise, com a ocupação variando entre 80 e 90 por cento, os investimentos no setor devem ser retomados.

A indústria extrativa deverá ter maior participação nesta retomada por perspectivas de um novo ciclo de alta de preços de commodities na próxima década. As indústrias extrativa e de papel e celulose devem ampliar seu mercado, principalmente levadas pela expansão da demanda asiática.

No que se referem a ganhos de eficiência, em termos gerais, as medidas que foram consideradas em todos os setores são:

- **Uso eficiente da energia** — aplicação de uso de equipamentos eficientes através de maior penetração de automação industrial;
- **Uso eficiente do calor** – minimização de perdas e maximização do reaproveitamento de gases para reduzir demanda por combustíveis;
- **Uso de resíduos na queima para prover calor** – ocorre a substituição de combustíveis fósseis por resíduos industriais e urbanos;
- **Cogeração** – ampliação da estruturação da produção de energia elétrica com o reaproveitamento do calor em sinergia com processos industriais;

O perfil de consumo energético no setor industrial se mantém, mas com aumento da participação de gás natural baseado no aumento da oferta de gás natural para atender a demanda industrial, que se dá através de pequenas melhorias na infraestrutura de gás de natural.

⁷ Pode ser acessado através do link:

< www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/default.aspx?CategoriaID=346 >

Quanto ao aproveitamento de materiais recicláveis, busca-se seu reuso ou queima direta de resíduos urbanos, por exemplo, a queima de resíduos industriais e urbanos para prover calor em processos industriais, menos sensíveis à variação de temperatura, por exemplo, geração de vapor.

Outro aspecto importante a se considerar no cenário de referência é a cogeração. Até o final do período em estudo, assume-se o aumento de cogeração na indústria de papel e celulose, na indústria química e na siderurgia.

3.1. Indústria Extrativa Mineral

A indústria extrativa mineral possui maior participação do mercado externo, com destaque para dois setores: minério de ferro e petróleo e gás natural. A demanda por minério de ferro ainda continua firme nos próximos anos devido ao crescimento asiático, e a exploração do pré-sal também possibilita a exportação do petróleo, mesmo com os preços no atual patamar.

A recuperação econômica na próxima década é maior devido aos contínuos esforços da China e da Índia de reduzir as diferenças de renda per capita em relação aos países desenvolvidos.

Após 2030, o crescimento da indústria extrativa perde fôlego devido à maior oferta e concorrência de produtos não energéticos no mundo e restrições ambientais do uso de energético fósseis após 2030 também remodelam a estrutura da demanda desses produtos.

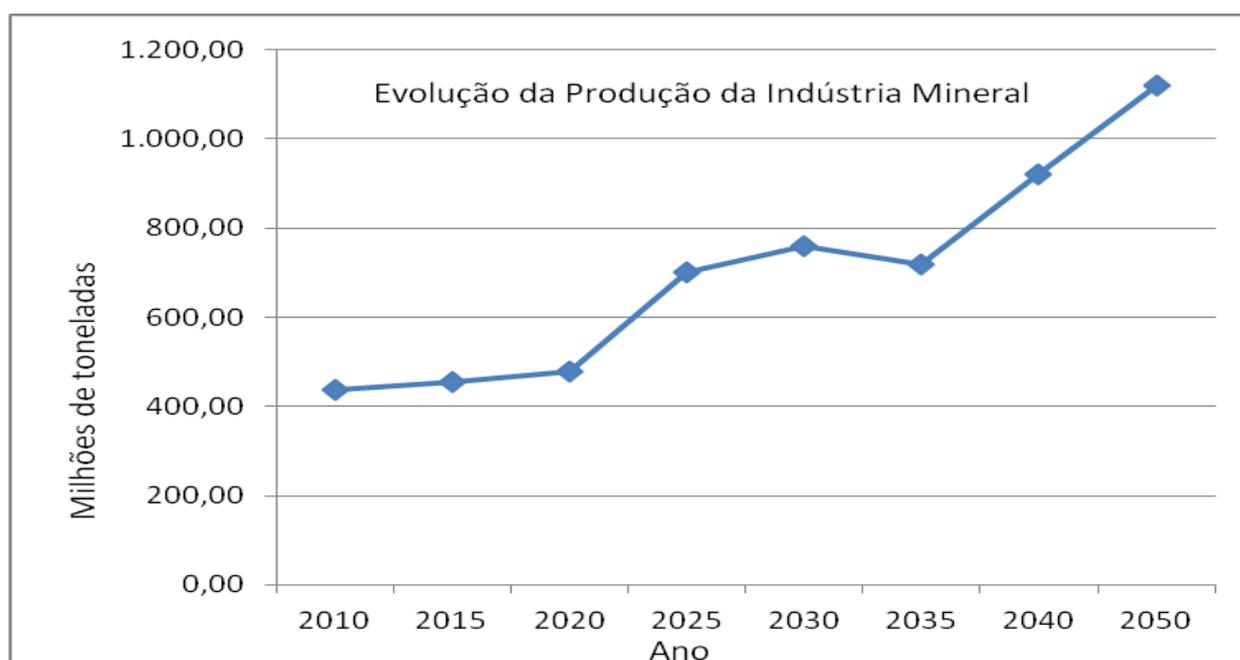


Figura 2. Evolução da Indústria Extrativa Mineral (2010-2050)

Fonte: autores

3.2. Cimento

A habitação e saneamento pressionam a demanda do setor de cimento, e apesar da estabilização da população, a necessidade de novas habitações para substituição de habitações precárias se intensificam a partir de 2030.

A produção de cimento não sofre concorrência externa devido ao alto custo de transporte, portanto:

- Projeta-se crescimento acima da média do setor devido à expansão da habitação e infraestrutura do país;
- A partir de 2035, plantas com tecnologia de via seca passam de 4 estágios para 6 estágios de ciclones e secadores;
- O consumo per capita de cimento atualmente em cerca de 250 kg por ano salta para próximo de 450 kg per capita por ano em 2050.
- As perspectivas para o setor de construção e infraestrutura são mais favoráveis no longo prazo, onde em 2050 ocorrem incrementos na sua produtividade, ainda baixa quando comparada com os países desenvolvidos.

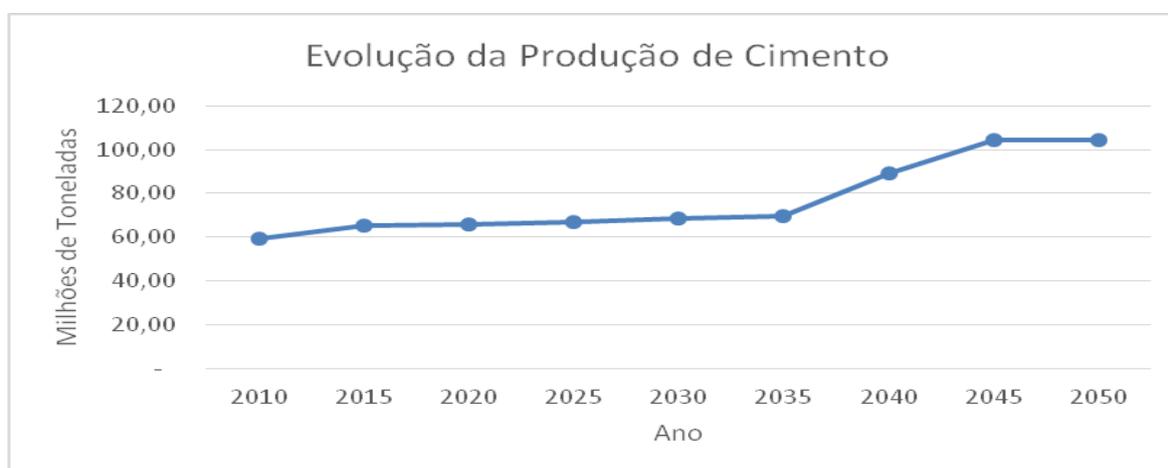


Figura 3. Evolução da Produção de Cimento (2010-2050)

Fonte: autores

A demanda por habitação e infraestrutura impulsiona além do setor de cimento, os setores de metalurgia, fabricação de fios e cabos elétricos e serviços como engenharia, arquitetura e terraplanagem (indústria de máquinas e equipamentos).

3.3. Siderurgia

Em relação ao setor siderúrgico, a Figura 4 ilustra o comportamento da produção de aço bruto em milhões de toneladas, mostrando sua evolução de 2010 a 2050.

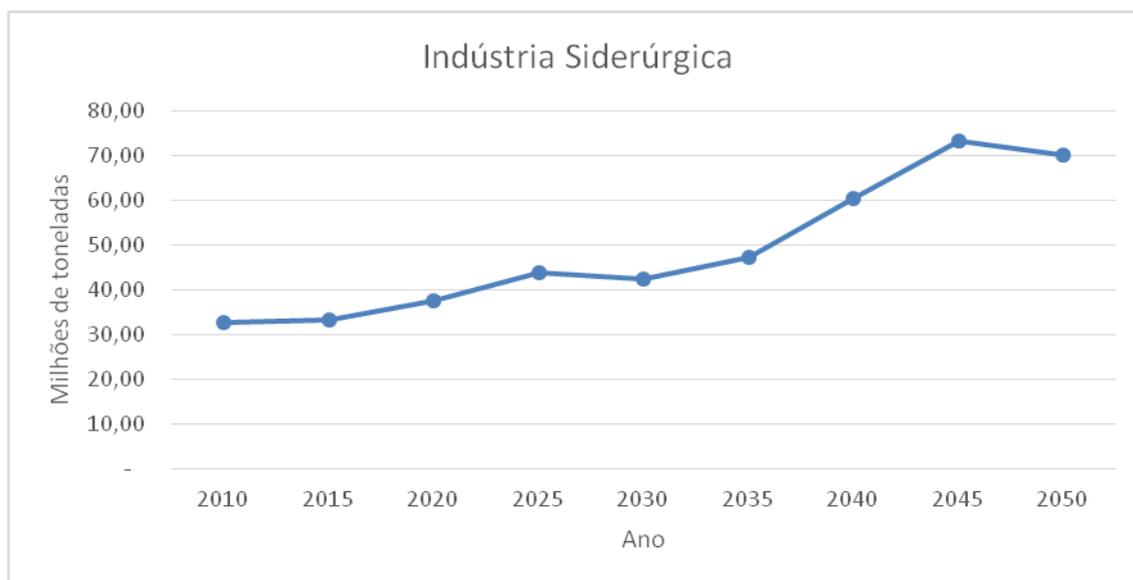


Figura 4. Evolução da produção de aço (2010-2050)

Fonte: autores

Admite-se no CPG que:

- Há um crescimento da competitividade da indústria nacional devido ao aumento de custos da produção do aço na China, principalmente pela maior incorporação das externalidades ambientais aos custos de produção, e ao minério de ferro brasileiro ter alto teor de pureza, fator estratégico para competitividade nacional;
- Há maior participação nas exportações observada a partir de 2030, mas limitada pela expansão da produção asiática para o sudeste da Ásia, que poderá abastecer boa parcela da demanda da região;
- A indústria brasileira utilizará as melhores práticas atuais a partir de 2030;
- Os fornos a arco elétrico que usam sucata como insumo ampliam sua capacidade e conquistam 30% (atualmente 23%) da produção nacional atingindo esse patamar a partir de 2030.

A matriz energética do setor se comporta tímida em relação à presença do gás natural em substituição ao GLP, e ao crescimento do carvão vegetal em detrimento do carvão mineral. Predominância do coque de carvão e penetração de carvão vegetal como energético em plantas industriais integradas.

3.4. Papel e Celulose

A perspectiva do aumento de produção de celulose é significativa, como também a da produção de papel. A produção de celulose mantém o ritmo de crescimento dos últimos anos, puxado pelo crescimento da demanda de papel no mundo, principalmente na Ásia. O consumo anual per capita de papel no Brasil é baixo (50kg/hab.) enquanto que em países desenvolvidos salta para 150kg por habitante. Portanto, há grande margem para aumento na demanda interna.

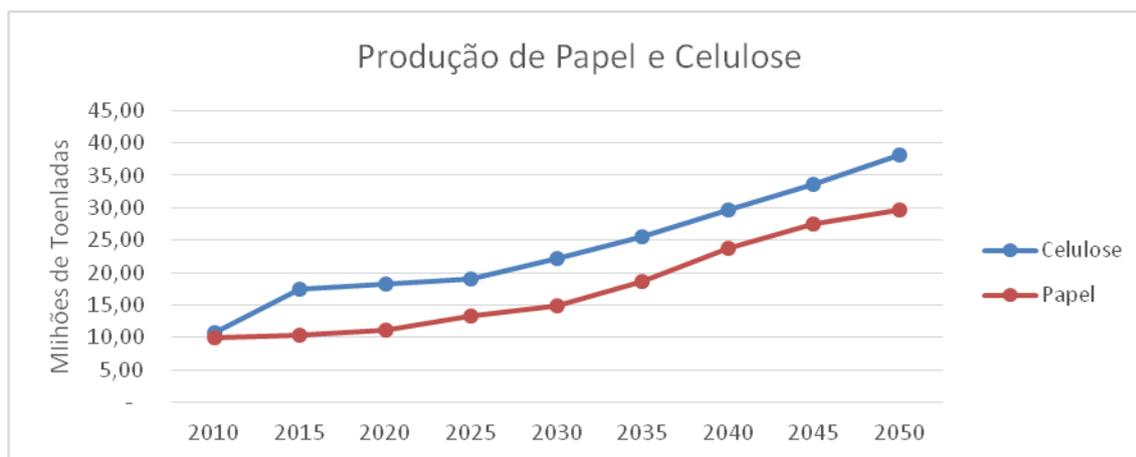


Figura 5. Produção de celulose e papel⁸ no CPG (2010-2015)

Fonte: autores

Admite-se no CPG que:

- O percentual das fibras recicladas aumenta na produção brasileira de papel, seguindo uma tendência mundial observada na última década, o que ameniza a tendência de crescimento de celulose *kraft* não branqueada;

⁸ Dados de 2010 e 2015 da Indústria Brasileira de Árvores – www.iba.org

- A *kraft* branqueada fibra curta continua seu crescimento tanto por força da demanda de papel sanitário, papel-cartão e especiais, quanto pela substituição da *kraft* branqueada fibra longa, em função do baixo custo e de melhorias nas propriedades das fibras;
- A simulação inclua somente a produção de celulose química de fibras curtas e longas. Ignora a pasta mecânica por considerá-la de magnitude desprezível para a projeção;
- O aumento no consumo per capita de papel em 2050 para 130 kg por habitante/ano, seja pouco inferior ao observado atualmente em países como França e Espanha.

4. Detalhamento dos Principais Setores Industriais Emissores de GEE

4.1. Indústria de Cimento

A indústria de cimento brasileira é composta por 93 plantas industriais distribuídas nas cinco regiões geográficas do Brasil. Devido à característica do produto, seu mercado é regionalizado. É característico do setor que as indústrias se localizem próximas ao mercado consumidor uma vez que é um produto perecível, em função dos custos, seu valor e peso, impedem o seu transporte a longas distâncias (PROCEL, 2010).

O parque industrial brasileiro é moderno, tendo praticamente toda a sua capacidade instalada utilizando a rota seca como via de produção, menos energo-intensiva que a tradicional via úmida (SNIC, 2010). Ademais, o setor produz os cimentos tipo Portland, que são subdivididos em cinco classes, e os aditivos aos quais são empregados o classificam, sendo as principais delas as escórias de alto forno, cinzas de termelétricas a carvão, filer de cálcario e pozolana.

Grande parcela das emissões do setor de cimento vem do processo de calcinação e da queima de variadas fontes de energia para gerar calor. Seu consumo energético vem na maior parte na queima de coque de petróleo, biomassa (carvão vegetal e resíduos de biomassa) e, também, da queima de resíduos urbanos, industriais e pneus usados, todos para prover calor.

4.1.1. Processo de produção

Para se produzir o cimento, é necessária a produção do clínquer. Sua principal matéria prima é o calcário, que é constituído principalmente de carbonato de cálcio (CaCO_3), e quando aquecido com outras matérias primas, produz cal (CaO) e CO_2 como subproduto. A equação 1 demonstra este processo, chamado de calcinação.



O CaO , ao reagir com sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) forma o clínquer. Outros carbonatos também fazem parte, em menor proporção, do clínquer, sendo eles o calcário de magnésiano [MgCO_3] e dolomíticos [$\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$]. Ao serem submetidos a elevadas temperaturas, liberam o CO_2 contido na mistura.



4.1.2. Medidas de ganho de eficiência

O setor industrial deve focar no aumento das eficiências energéticas e na adoção de tecnologias mais limpas em busca de uma infraestrutura de baixo carbono, conforme indicado pela INDC brasileira.

1. **Uso eficiente da energia** — usar equipamentos eficientes com maior penetração de automação industrial;
2. **Uso eficiente do calor** – minimizar perdas e maximizar reaproveitamento de gases para reduzir demanda por combustíveis;
3. **Uso de resíduos na queima para prover calor** – substituir combustíveis fósseis por resíduos industriais e urbanos;
4. **Cogeração** – ampliar a estruturação da produção de energia elétrica com o reaproveitamento do calor em sinergia com processos industriais.
5. **Eficiência elétrica** – obter ganhos de 1% de eficiência a cada período de cinco anos;
6. **Eficiência térmica** – obter ganhos de eficiência térmica de 1,2% a cada período de cinco anos.

No Cenário CPG, considerou-se um aumento da substituição dos combustíveis convencionais por combustíveis alternativos⁹ (resíduos industriais, resíduos urbanos e biomassa) e do co-processamento. A penetração de outras primárias não renováveis e renováveis (carvão vegetal e lenha) segue substituindo outros energéticos de petróleo ao longo dos anos, que é o principal insumo do setor (coque de petróleo).

Assume-se no cenário de CPG, que a maior parte das plantas industriais possuam pré-calcinadores e pré-aquecedores de 6 estágios (até 2030), como também se mantém a estratégia de introdução de materiais para redução de clínquer na mistura do cimento: escórias siderúrgicas, cinzas volantes, pozolanas artificiais e filer calcário. As diferentes composições do clínquer revelam níveis de emissões distintos, de acordo com os teores de carbono na sua composição. O fator de emissão implícito reportado no Terceiro Inventário Brasileiro (MCTI, 2015b) é de 0,544 em 2010 tendo a participação de clínquer na mistura do cimento sido reduzida de 68% para 66% entre 2005 e 2010.

⁹ Outras primárias não renováveis e outras primárias de biomassa e resíduos vegetais

A partir de 2035, plantas com tecnologia de via seca passam de 4 estágios para 6 estágios de ciclones e secadores, o que promove uma queda na intensidade energética de 2015 de 0,072 tep (3,05GJ) por tonelada, para algo em torno de 0,067 tep (2,83GJ) por tonelada em 2050. O *benchmark* atual é cerca de 2,8 GJ por tonelada de cimento produzido (Schorcht et al, 2013).

A participação das renováveis chega no final do período a 10,6% (lenha, carvão vegetal e outras primárias de biomassa resíduos vegetais) e se considerarmos a eletricidade chega a 23,0% enquanto que as outras primárias não renováveis atingem 12,0%, sendo constituídas principalmente de resíduos industriais e urbanos.

No que se refere à utilização de clínquer, considerando uma emissão de 0,544 tCO₂/t clínquer, no final do período de cenário, haveria uma redução de 5,3% no processo de produção.

4.1.3. Resultados da modelagem no CPG

Após os ajustes na modelagem bottom-up, foi rodado o modelo top-down macroeconômico IMACLIM-Br e gerados novos níveis de atividade de cada setor produtivo que foram informados aos modelos setoriais, agora ajustados para a nova realidade macroeconômica, com alinhamento dos níveis de oferta e de demanda (alinhamento em volumes físicos entre os diversos modelos setoriais, o modelo de oferta de energia MATRIZ, e o modelo de equilíbrio geral IMACLIM-BR) com os seguintes resultados para o setor de cimento.

Tabela 1. Evolução da produção de cimento no CPG (Mt)

Evolução da produção de cimento – 2010 a 2050 (milhões de toneladas)									
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Produção	59,12	65,28	65,80	66,96	68,51	69,67	89,02	104,50	104,60

Fonte: autores

Tabela 2. Evolução do consumo energético – setor de cimento (mil tep)

Consumo energético em mil tep Setor Cimento	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Carvão Vapor	52	70	92	93	149	150	195	222
Carvão Vegetal	63	109	132	133	183	184	337	413
Coque de Carvão Mineral	47	70	40	40	41	41	52	59
Diesel Único	45	60	39	39	44	45	566	72
Eletricidade	553	618	575	582	590	597	756	880
Gás Natural Úmido e Seco	23	12	13	11	8	8	37	42
GLP	5	17	18	18	18	18	23	27
Lenha queima direta	-	70	41	41	61	57	73	83

Consumo energético em mil tep Setor Cimento	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Óleo Combustível	8	9	11	11	14	14	18	20
Outras Prim. de Bio. Res. Veg.	179	129	134	146	158	172	219	258
Outras Prim. Não Renov.	119	202	206	220	494	594	676	846
Outros Energ. de Petróleo	3.161	3.386	3.312	3.334	3.038	3.012	3.731	4.140
Total	4.255	4.750	4.611	4.668	4.799	4.893	6.683	7.053

Tabela 3. Evolução da participação dos combustíveis – setor de cimento (%)

Evolução dos usos finais - setor cimento (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Carvão Vapor	1,23	1,48	1,99	1,98	3,11	3,07	2,92	3,15
Carvão Vegetal	1,48	2,30	2,86	2,84	3,82	3,77	5,04	5,86
Coque de Carvão Mineral	1,11	1,46	0,87	0,86	0,85	0,84	0,78	0,84
Diesel Único	1,06	1,26	0,85	0,84	0,92	0,91	8,47	1,03
Eletricidade	13,01	13,00	12,47	12,47	12,30	12,21	11,32	12,48
Gás Natural Úmido e Seco	0,53	0,25	0,28	0,23	0,17	0,17	0,55	0,59
GLP	0,11	0,35	0,39	0,39	0,38	0,38	0,35	0,38
Lenha queima direta	0,00	1,46	0,88	0,88	1,27	1,17	1,09	1,17
Óleo Combustível	0,19	0,19	0,23	0,23	0,29	0,29	0,27	0,29
Outras Prim. de Bio. Res. Veg.	4,21	2,71	2,90	3,13	3,29	3,51	3,28	3,52
Outras Prim. Não Renov.	2,80	4,24	4,46	4,71	10,29	12,13	10,11	11,99
Outros Energ. de Petróleo	74,28	71,29	71,82	71,43	63,30	61,56	55,83	58,70
Total	100,00							

Tabela 4. Evolução do conteúdo de clínquer (% por tonelada de cimento)

Indústria de Cimento – Processos industriais	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
C clínquer por tonelada de cimento (%)	0,644	0,644	0,644	0,644	0,642	0,641	0,630	0,610

No que diz respeito às emissões do setor de cimento, há um aumento de 64% no período em face do aumento da produção, como pode ser observado na tabela a seguir:

Tabela 5. Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor de cimento (GgCO₂e)

Gg	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	14.262	15.899	15.522	15.700	16.376	16.874	22.040	23.550
Não CO ₂	60	86	91	91	108	108	164	195
Sub-total	14.322	15.985	15.614	15.791	16.483	16.982	22.204	23.746
Processos industriais								
CO ₂	21.288	22.860	23.040	23.447	23.926	24.294	30.509	34.709
Total energia e processos industriais	35.610	38.845	38.654	39.238	40.410	41.276	52.714	58.455

4.1.4. Evolução dos indicadores do setor

A seguir seguem as evoluções da intensidade energética e de emissões e o consumo per capita de cimento.

Tabela 6. Evolução dos indicadores - setor de cimento – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	59.117	65.283	65.799	66.960	68.508	69.669	89.022	104.596
Intensidade energética (tep/t de produto)	0,072	0,073	0,070	0,070	0,070	0,070	0,075	0,067
Intensidade de emissões - energia (tCO ₂ e/t de produto)	0,242	0,245	0,237	0,236	0,241	0,244	0,249	0,227
Intensidade de emissões – processos ind. (tCO ₂ e/t de produto)	0,360	0,350	0,350	0,350	0,349	0,349	0,343	0,332
Intensidade Total Energia e processos ind. (tCO ₂ e/t de produto)	0,602	0,595	0,587	0,586	0,590	0,592	0,592	0,559
Consumo per cap (t de produto/habitante)	0,302	0,248	0,256	0,271	0,287	0,308	0,390	0,444

4.2. Indústria Siderúrgica

O setor de aço no Brasil possui 29 plantas industriais distribuídas entre 11 grupos empresariais. A capacidade instalada totaliza 48,9 milhões de t/ano de aço bruto¹⁰. O consumo per capita atualmente está em torno de 126 quilos de produto siderúrgico por habitante¹¹, excluindo exportações, enquanto que o valor estimado pelo estudo em 2015 foi de 163 quilos de aço bruto por habitante, ignorando a produção exportada.

Em 2015, a produção de aço brasileira atingiu 33,25 milhões de toneladas. O parque industrial siderúrgico brasileiro é bastante heterogêneo, com plantas novas, como é o caso da Companhia Siderúrgica do Atlântico, e plantas bem antigas, como é o caso da Companhia Siderúrgica Nacional.

4.2.1. Processo de produção

O aço é produzido através do minério de ferro em conjunto com calcário, outras matérias primas e o agente redutor, que é o principal aliado na produção do aço. O agente redutor, amplamente empregado, é o coque metalúrgico, utilizado na maior parte das indústrias integradas.

¹⁰ Segundo o Instituto Aço Brasil. Mais informações: www.açobrasil.org.br

¹¹ Idem

O uso do coque metalúrgico é empregado não apenas para a produção de aço, mas também para produção de energia elétrica integrada à coqueria. De acordo com o terceiro inventário brasileiro de emissões, até 75% das emissões oriundas da produção de aço ocorrem durante a redução do minério de ferro (MCTI, 2010). A totalidade das emissões decorre de:

1. Produção de coque e geração de energia elétrica e calor;
2. Produção de sinter;
3. Redução do minério de ferro
4. Refino e produção do aço
5. Laminação e conformação mecânica.

As tecnologias de produção de aço são usinas integradas (alto forno mais aciaria), redução direta (redução direta e forno a arco elétrico), semi-integrada e forno a arco elétrico (EAF).

4.2.2. Medidas de ganho de eficiência

O setor industrial deve focar no aumento das eficiências energéticas e adoção de tecnologias mais limpas em busca de uma infraestrutura de baixo carbono, conforme indicado pela iNDC brasileira.

1. **Uso eficiente da energia** — aplicar eficientemente o uso de equipamentos;
2. **Uso eficiente do calor** – buscar minimizar perdas e maximizar reaproveitamento de gases para reduzir demanda por combustíveis;
3. **Uso de resíduos na queima para prover calor** – reduzir o uso de combustíveis fósseis;
4. **Cogeração** – estimular a estruturação da produção de energia elétrica com o reaproveitamento do calor em sinergia com as aciarias, alto fornos e coquerias;
5. **Eficiência Elétrica** – obter 0,5% de eficiência por período, devido às leis de eficiência energética aplicadas aos seus limites;
6. **Eficiência térmica** – obter ganhos de eficiência térmica de 0,33% por período para a indústria siderúrgica.

O setor mantém os métodos tradicionais de produção, com maior parte da produção ocorrendo através de usinas integradas, onde o coque metalúrgico continua sendo o principal energético e redutor do setor. Fornos a arco elétrico que usam sucata como insumo têm sua capacidade ampliada e conquistam 30% da produção nacional (atualmente o percentual é de 23%) atingindo

esse patamar a partir de 2030. A tendência é que a indústria brasileira caminhe para as melhores práticas atuais até 2030 aprimorando as eficiências na captura de gás de aciaria, autoforno e de coqueria.

Há predominância do coque de carvão e penetração marginal de carvão vegetal e maior recuperação de gases de aciaria, coqueria e alto-forno para cogeração, como energético em plantas industriais integradas. Matriz energética com presença tímida de gás natural em substituição ao GLP e óleo combustível. O gás natural entra timidamente em substituição ao GLP e óleo combustível.

A intensidade energética cai a cada período a partir de 2015 até 2050. O *benchmark* do setor é atualmente 0,394 tep/t de aço bruto (16,5GJ/t) em usinas integradas (Remus, et al, 2013) (0,344 tep/t de aço bruto (14,4GJ/t) para redução direta e forno a arco elétrico, e 0,103 tep/t de aço bruto (4,3 GJ/t) para forno a arco elétrico com uso de sucata (Remus et al, 2013). As guseiras integradas tem um consumo médio que varia de 14 a 17 GJ/t (De Paula, 2014), podendo-se considerar 0,334 tep/t de aço bruto (14 GJ/t) o benchmark desse segmento.

O setor se mantém abaixo da média mundial com suas emissões por tonelada de aço evoluindo de 1,547 toneladas de CO₂e por tonelada de aço bruto em 2015, para 1,457 em 2050 . Isso ocorre devido à introdução de carvão vegetal na produção do aço em usinas integradas e o melhor aproveitamento de gases de processos, diminuindo marginalmente o uso de coque metalúrgico. A penetração também de novos fornos a arco elétrico auxilia na diminuição intensidade de emissões.

4.2.3. Resultados da modelagem no CPG

Após os ajustes na modelagem *bottom-up*, foi rodado o modelo *top-down* macroeconômico IMACLIM-Br e gerados novos níveis de atividade de cada setor produtivo que foram informados aos modelos setoriais, agora ajustados para a nova realidade macroeconômica, com alinhamento dos níveis de oferta e de demanda (alinhamento em volumes físicos entre os diversos modelos setoriais, o modelo de oferta de energia MATRIZ, e o modelo de equilíbrio geral IMACLIM-BR) com os seguintes resultados para o setor de siderurgia:

Tabela 7. Evolução da produção de aço (Mt)

Evolução da produção de aço bruto – 2010 a 2050 (milhões de toneladas)									
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Produção	32,82	33,25	37,40	43,86	42,27	47,26	60,52	73,10	70,23

Tabela 8. Evolução do consumo energético – setor siderúrgico (mil tep)

Evolução do consumo energético	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
Alcatrão	95	95	102	102	114	127	222	267
Diesel Único	15	29	67	76	69	77	95	102
Eletricidade	1.613	1.609	1.825	2.138	1.896	2.115	2.649	3.054
Gás de Coqueria	1.250	1.148	1.411	1.735	1.751	2.141	2.969	3.457
Gás Natural Úmido e Seco	897	1.223	1.566	1.606	1.542	1.718	2.334	2.674
GLP	71	25	21	23	22	25	32	36
Óleo Combustível	168	1	-	-	-	-	-	-
Redutores								
Carvão mineral	1.772	2.124	2.227	2.430	2.372	2.650	3.340	3.768
Carvão Vegetal	3.372	2.788	3.056	4.301	4.249	4.808	6.392	7.658
Coque de Carvão Mineral	7.153	7.441	8.390	9.380	8.800	9.534	11.441	12.281
Outros Energéticos de Petróleo	45	40	46	54	52	58	72	82
Total	16.406	16.524	18.713	21.847	20.868	23.252	29.547	33.378

Tabela 9. Evolução da participação dos combustíveis – setor siderúrgico (%)

Evolução da participação dos combustíveis (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
Alcatrão	0,58	0,57	0,55	0,47	0,55	0,55	0,75	0,80
Diesel Único	0,09	0,18	0,36	0,35	0,33	0,33	0,32	0,31
Eletricidade	9,83	9,74	9,75	9,79	9,09	9,09	8,97	9,15
Gás de Coqueria	7,62	6,95	7,54	7,94	8,39	9,21	10,05	10,36
Gás Natural Úmido e Seco	5,47	7,40	8,37	7,35	7,39	7,39	7,90	8,01
GLP	0,43	0,15	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Óleo Combustível	1,03	0,00	-	-	-	-	-	-
Redutores								
Carvão mineral5900	10,80	12,86	11,90	11,12	11,37	11,40	11,30	11,29
Carvão Vegetal	20,55	16,87	16,33	19,69	20,36	20,68	21,63	22,94
Coque de Carvão Mineral	43,60	45,03	44,84	42,94	42,17	41,00	38,72	36,79
Outros Energéticos de Petróleo	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24

Ao se somarem as emissões do uso de calcário, observa-se um aumento das emissões de 109% no período, conforme a tabela a seguir:

Tabela 10. Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor siderúrgico (GgCO₂e)

GgCO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Energia								
CO ₂	5.528	5.480	6.892	7.616	7.514	8.724	12.092	13.976
não CO ₂	8	8	11	12	12	14	20	24
Total Energia CO ₂ e	5.536	5.488	6.903	7.628	7.526	8.738	12.113	14.000
Processos industriais								
CO ₂ (redutores)	38.360	40.996	45.706	52.820	53.074	58.306	70.997	77.708
não CO ₂ (redutores)	1.086	951	1.046	1.394	1.365	1.533	2.002	2.356
Calcário na siderurgia (uso) - CO ₂	2.851	2.888	3.249	3.810	3.672	4.105	5.257	6.101
Total processos industriais -CO ₂ e	42.297	44.836	50.001	58.024	58.111	63.945	78.256	86.165
Total Energia e Processos	47.833	50.324	56.903	65.653	65.638	72.683	90.369	100.165

4.2.4. Evolução dos indicadores do setor

A seguir seguem as evoluções da intensidade energética e de emissões e o consumo per capita de aço no Brasil.

Tabela 11. Evolução dos indicadores no setor industrial siderúrgico – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	32.820.000	33.245.200	37.400.000	43.860.000	42.272.452	47.260.000	60.520.000	70.227.581
Intensidade energética (tep/t de produto)	0,500	0,497	0,500	0,498	0,494	0,492	0,488	0,475
Intensidade de emissões – ENERGIA (tCO ₂ e/t de produto)	0,169	0,165	0,185	0,174	0,178	0,185	0,200	0,199
Intensidade de emissões - PROC. IND. (tCO ₂ e/t produto)	1,289	1,349	1,337	1,323	1,375	1,353	1,293	1,227
Intensidade Total (tCO ₂ e/t de produto)	1,457	1,514	1,521	1,497	1,553	1,538	1,493	1,426
Consumo per capita (t de produto/habitante)	0,168	0,163	0,176	0,201	0,189	0,209	0,265	1,265

4.3. Indústria de Papel e Celulose

Este setor possui grande vantagem competitiva e tem mais da metade da produção voltada para exportação. A indústria brasileira possui relevante competitividade na produção de celulose branqueada de fibra curta, justificada pela alta produtividade do eucalipto.

As perspectivas são de continuidade na estratégia de fibra curta com foco na produção de celulose para a exportação por conta das vantagens comparativas inerentes ao clima tropical brasileiro, onde as plantas de celulose ficam próximas às áreas florestais de alta produtividade e o papel próximo ao mercado consumidor.

No Brasil a produção de celulose, em especial a fibra curta, é 2,5 vezes mais eficiente que a fabricada na África do Sul e Chile, e 6,3 vezes mais eficiente que a fabricada em Portugal. Já no caso da celulose de fibra longa, sustentada na madeira *Pinus ssp.*, consegue ser 2,9 vezes mais eficiente que a similar produzida no Chile e na Nova Zelândia, até 6,4 vezes mais eficiente que a produzida nos Estados Unidos, que cultiva a espécie *Pinus elliotti*, e até 11,2 vezes mais eficiente que a produzida no Canadá, que cultiva o *Pinus oregon* (Coelho e Coelho, 2013).

Desde 2010, os volumes das exportações brasileiras para Ásia saltaram de 18% para 32% em 2015. Devido ao câmbio desvalorizado, o setor segue ampliando sua vantagem competitiva e penetrando no mercado externo ano a ano. No ano de 2015, o Brasil produziu 17,4 milhões de toneladas de celulose, exportando 11,5 milhões dessa produção. A produção de papel atingiu 10,4 milhões de toneladas e a exportação atingiu 2,1 milhões de toneladas.

4.3.1. Processo de produção

Os processos de extração da celulose são chamados de polpeamento e podem ser ordenados em três categorias: processos de alto rendimento, processos semiquímicos e processos químicos. Esses processos levam a diferentes tipos de celulose que são adequados a usos específicos. A maior parte da celulose produzida tem como destino o processo de produção de papel. Outros são destinados à produção de fibras ou produtos derivados de celulose dissolvida. Há uma grande diversidade de produtos na indústria de papel, podendo ser classificados como papéis imprensa, embalagens, papéis de impressão, higiênicos, papéis especiais etc. Cada uma dessas categorias demanda uma matéria-prima específica, cuja rota de produção varia substancialmente. Por exemplo, o papel imprensa necessita de grandes volumes regulares, com moderada resistência, opacidade, capacidade de impressão e pequena vida útil. Dessa forma, um processo produtivo de celulose que

permita atingir grandes produtividades, em detrimento de uma característica de grande resistência, branqueamento e textura, contribuirá para uma melhor racionalização do uso da matéria-prima, minimizando os custos. Por outro lado, papéis para embalagens precisam de grande resistência mecânica, o que levará a processos de produção de celulose que diminuam a produtividade em detrimento de uma pasta com grande resistência mecânica.

Os processos de alto rendimento estão classificados em quatro tipos principais: processos mecânicos, termomecânicos, químico-mecânico e químico-termomecânico. Os processos de alto rendimento apresentam, em geral, rendimentos superiores a 60% na transformação da madeira em pasta. Essas pastas têm constituintes não celulósicos da madeira (com teores variáveis) e são aplicadas na produção de determinados papéis, cartões ou papelões, cuja resistência às condições ambientais e demais propriedades físicas e mecânicas não sejam muito exigentes, comparativamente aos produtos feitos com pastas químicas. Isto guarda uma relação custo/benefício bastante favorável, uma vez que as pastas de alto rendimento têm um custo produtivo bem inferior às pastas químicas. Um exemplo de uso é para papéis absorventes ou higiênicos (Tissues), que necessitam de baixa resistência e, geralmente, não são recicláveis.

Nos processos químicos para a extração da celulose, diversos componentes químicos são utilizados para dissolver a lignina e liberar as fibras de celulose. A lignina e os outros componentes orgânicos dissolvidos estão concentrados em soluções em que os compostos e seu conteúdo energético podem ser recuperados. O percentual dessa recuperação depende do tipo de processo e de sua configuração.

Nos processos semiquímicos, a extração da celulose é realizada com um pré-tratamento químico seguido por tratamento mecânico. Dessa maneira, os processos semi-químicos são classificados em quimomecânicos e quimotermomecânicos. Geralmente, para árvores coníferas, como o pinus, impregna-se sulfito de sódio antes da desfibragem, enquanto que para árvores folhosas, no caso do eucalipto, utiliza-se álcali na etapa de pré-tratamento químico. Uma vez realizada a impregnação química, efetua-se um pré-aquecimento que resulta no enfraquecimento das ligações da lignina, ocasionando a liberação das fibras. Os processos semiquímicos podem elevar o consumo energético e aumentar a emissão de poluentes, entretanto, tem como vantagem um elevado rendimento e a produção de uma pasta de celulose que pode ser utilizada na produção de diversos tipos de papel, inclusive na forma não branqueada (IPPC, 2001).

Em um documento fornecido pela Finlândia para o EIPPCB (European IPPC Bureau) [J. Pöyry, 1998 apud IPPC, 2001], foi feita uma proposta para a classificação das indústrias de papel e celulose

operando na União Européia (UE) baseada na diferenciação de propriedades técnicas das instalações e na gama de produtos fabricados nas unidades industriais. Seguindo essa proposta, as variadas instalações na UE foram agrupadas em nove classes principais (*speciality paper mills, tissue mills, integrated wood containing paper and paperboard mills, non-integrated fine paper mills, integrated sulphite paper and paperboard mills, integrated unbleached kraft pulp and paper mills*).

No Brasil, como a matéria-prima principal para a produção de celulose é a madeira, não havendo muita mistura de materiais fibrosos como observado em outros países, principalmente na Europa, a classificação das unidades industriais do setor de papel e celulose segundo o produto final é razoavelmente adequada para a caracterização das unidades industriais.

Em 2014, a capacidade total brasileira de produção de celulose era de 18,5 milhões de toneladas. O principal processo de polpeamento utilizado nas unidades industriais do setor de papel e celulose brasileiro é o processo químico com matéria-prima não-conífera, isto é, folhosas, com o eucalipto como principal fonte, com 15,1 milhões de toneladas. Dentre os processos químicos, o principal utilizado nas unidades industriais brasileiras é o processo Kraft com branqueamento, conforme dito anteriormente. A capacidade de produção de papel, no Brasil, em 2014 era de 13,2 milhões de toneladas. Pouco mais da metade da capacidade produtiva de papel era para papéis de embalagem (FAO, 2015).

Tabela 12. Capacidade total de produção de celulose – 2014 (Mt)

Processos	Capacidade Total
	Milhões de toneladas
Celulose de Madeira para Papel e Papelão	18.515
Pasta Mecânica	215
Celulose Mecânica Folhosa	0
Celulose Mecânica Conífera	215
Pasta Termomecânica	550
Celulose Termomecânica Folhosa	0
Celulose Mecânica Conífera	550
Pasta Semi-química	50
Celulose Semiquímica Folhosa	50
Celulose Semiquímica Conífera	0
Pasta Química Total	17.700
Celulose Sulfito com Branqueamento	35
Celulose Sulfito com Branqueamento Folhosa	0
Celulose Sulfito com Branqueamento Conífera	35
Celulose Sulfato sem Branqueamento	2.470
Celulose Sulfato sem Branqueamento Folhosa	670
Celulose Sulfato sem Branqueamento Conífera	1.800
Celulose Kraft com Branqueamento	15.195
Celulose Kraft com Branqueamento Folhosa	15.100
Celulose Kraft com Branqueamento Conífera	95
Celulose com outros tipos de fibra para papel e celulose	110
Celulose de Palha	0

Processos	Capacidade Total
Celulose de Bagaço	50
Celulose de Bambu	45
Celulose de outras fibras	15
Celulose Dissolvida, madeira e outras matérias-primas	500
Celulose Dissolvida Folhosa	500
Celulose Dissolvida Conífera	0

Fonte: FAO (2015)

Tabela 13. Capacidade total de produção de papel – 2014 (Mt)

Processos	Capacidade Total
	Milhões de toneladas
Papel e Papelão	13.247
Papel de Jornal	146
Outros Papéis para Impressão e para Escrever	3.045
Papéis revestidos para Impressão e para Escrever	565
Papéis sem revestimento para Impressão e para Escrever	2.480
Outros tipos de papel e papelão	10.056
Papéis para fins sanitários	1.830
Papel de Embalagem	7.584
Outros	642

Fonte: FAO (2015)

O processo de fabricação de papel e celulose possui diversas fases. Além do material fibroso, diferentes produtos químicos e uma grande quantidade de água e energia na forma de vapor, óleo combustível ou energia elétrica são requeridos no processo produtivo. Dessa maneira, não existe uma única proposta de classificação para as unidades industriais do setor de papel e celulose, e sim classificações orientadas por determinada característica da indústria, de acordo com a análise a ser realizada.

4.3.2. Medidas de ganho de eficiência

O setor industrial deve focar no aumento das eficiências energéticas e adoção de tecnologias mais limpas em busca de uma infraestrutura de baixo carbono, conforme indicado pela INDC brasileira.

1. **O uso eficiente da energia** — aplicar eficientemente o uso de equipamentos;
2. **Uso eficiente do calor** – buscar minimizar perdas e maximizar reaproveitamento de gases para dirimir demanda por combustíveis;
3. **Uso de resíduos na queima para prover calor** – evitar o uso de combustíveis fósseis e reduzir as emissões de CO₂;
4. **Cogeração** – estimular a estruturação da produção de energia elétrica com o reaproveitamento do calor em sinergia com processos industriais, no caso do setor de papel

e celulose melhorias no aproveitamento de resíduos e maior integração e aproveitamento do calor de processo para geração elétrica.

5. **Eficiência Elétrica** – obter ganhos de 0,2% de eficiência por período, devido as leis de eficiência energética aplicado aos seus limites inferiores;
6. **Eficiência térmica** – obter ganhos de eficiência térmica de 0,15% por período.

Os ganhos de eficiência tanto elétricos quanto térmicos neste setor são bem pequenos devido à modernidade das plantas e competitividade do setor em relação à indústria internacional.

Quando se trata de melhorias para a competitividade existem algumas tecnologias que podem contribuir para o desempenho da indústria:

1. Melhoria na genética da muda do eucalipto – possível introdução de novas técnicas de melhoramento genético com menor demanda por nutrientes que favoreça a produtividade e seu crescimento e encurtamento do ciclo de colheita.
2. Reaproveitamento de rejeitos da indústria – geração de eletricidade, produção de etanol. Possíveis rotas de produção: i) compostagem e geração de biogás de dejetos ou queima direta da biomassa (eletricidade/calor de processo); ii) produção de etanol de segunda geração por gaseificação, pirólise, torrefação e carbonização – produção de energéticos (gases, líquidos e sólidos);
3. Outras tecnologias podem melhorar a remuneração pela introdução de novos produtos, além do papel e celulose. Por exemplo, existem estudos e projetos em andamento que investigam o desenvolvimento da bioquímica através da produção de celulose. Sua presença pode competir pela produção de celulose, dependendo do foco, pois o foco pode ser:
 - a) Produção de energéticos (etanol de 2ª geração), entretanto, compromete a independência energética do setor pois os insumos para se produzir etanol são justamente os resíduos utilizados como combustível para os processos industriais (resíduos florestais, casca da madeira e licor negro).
 - b) Produção de não energéticos – existe um gama de produtos químicos (química verde), que pode substituir a rota tradicional fóssil. Em um cenário de baixa demanda por celulose no exterior seria positivo para o setor devido à diversificação de portfólio de produtos. Já, em um cenário de elevada demanda por celulose no exterior, a oferta de insumos para produção de químicos fica limitada pela demanda por celulose.

4.3.3. Resultados da modelagem no CPG

Após os ajustes na modelagem *bottom-up*, foi rodado o modelo *top-down* macroeconômico IMACLIM-Br e gerados novos níveis de atividade de cada setor produtivo que foram informados aos modelos setoriais, agora ajustados para a nova realidade macroeconômica, com alinhamento dos níveis de oferta e de demanda (alinhamento em volumes físicos entre os diversos modelos setoriais, o modelo de oferta de energia MATRIZ, e o modelo de equilíbrio geral IMACLIM-BR) com os seguintes resultados para o setor de papel e celulose.

Tabela 14. Evolução da produção de papel e celulose (Mt)

Evolução da produção de papel e celulose – 2010 a 2050									
(Milhões de toneladas)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Produção de Celulose	10,69	17,43	18,28	18,98	22,13	25,63	29,68	33,67	38,17
Produção de Papel	10,01	10,34	11,14	13,37	14,87	18,57	23,77	27,49	29,71

Na Tabela 15 abaixo, encontra-se detalhada a evolução dos usos finais de energia no setor de papel e celulose.

Tabela 15. Evolução do consumo energético – setor de papel e celulose (mil tep)

Evolução do consumo energético – setor de papel e celulose (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Bagaço de Cana	41	27	30	36	40	50	64	79
Carvão mineral– s/esp. e 3100 a 3700	112	86	141	169	187	233	298	370
Diesel Único	76	173	6	5	6	7	9	15
Eletricidade	1.636	1.864	2.103	2.523	2.785	3.478	4.410	5.482
Gás Natural Úmido e Seco	676	805	885	956	1.058	1.390	1.775	2.436
GLP	31	72	47	55	59	74	96	139
Lenha queima direta e carvoejamento	1.513	1.833	1.709	2.051	2.275	2.747	3.405	3.700
Lixívia	4.711	5.837	5.233	6.417	6.992	8.649	11.096	13.489
Óleo Combustível	466	341	387	453	489	580	703	620
Outras Primárias de Biomassa Resíduos Vegetais	870	691	778	934	1.142	1.491	1.992	3.112
Total	10.131	11.729	11.319	13.599	15.035	18.699	23.849	29.441

Na tabela a seguir está detalhada a distribuição percentual da evolução dos usos finais de energia no setor de papel e celulose.

Tabela 16. Evolução da participação dos combustíveis – setor de papel e celulose (%)

Evolução da participação dos combustíveis - papel e celulose (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Bagaço de Cana	0,40	0,23	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Carvão mineral- s/esp. e 3100 a 3700	1,10	0,73	1,24	1,24	1,25	1,25	1,25	1,26
Diesel Único	0,75	1,48	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
Eletricidade	16,15	15,89	18,58	18,55	18,52	18,60	18,49	18,62
Gás Natural Úmido e Seco	6,68	6,86	7,82	7,03	7,04	7,43	7,44	8,28
GLP	0,30	0,61	0,41	0,40	0,39	0,39	0,40	0,47
Lenha queima direta e carvoejamento	14,94	15,62	15,10	15,08	15,13	14,69	14,28	12,57
Lixívia	46,50	49,77	46,23	47,19	46,51	46,25	46,53	45,82
Óleo Combustível	4,60	2,91	3,42	3,33	3,25	3,10	2,95	2,11
Outras Primárias de Biomassa e Resíduos Vegetais	8,59	5,89	6,87	6,87	7,60	7,98	8,35	10,57

As emissões oriundas do setor de papel e celulose encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 17. Evolução das emissões - setor de papel de celulose (GgCO₂e)

GgCO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
	Energia							
CO ₂	3.854	4.033	4.038	4.552	4.997	6.297	7.926	9.625
Não CO ₂	344	389	370	446	500	619	789	977
Total	4.198	4.423	4.408	4.998	5.497	6.916	8.715	10.603

4.3.4. Evolução dos indicadores do setor

A seguir seguem as evoluções da intensidade energética e de emissões e consumo per capita de papel.

Tabela 18. Evolução dos indicadores - setor de papel e celulose – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	24.567	26.066	28.086	33.703	37.482	46.810	59.917	74.877
Intensidade energética (tep/t de produto)	0,412	0,450	0,403	0,403	0,401	0,399	0,398	0,393
Intensidade de emissões – ENERGIA (Gg tCO ₂ e/t de produto)	0,171	0,170	0,157	0,148	0,147	0,148	0,145	0,142
Consumo per capita (t de produto /habitante)	0,051	0,051	0,053	0,061	0,067	0,082	0,104	0,131

As intensidades energéticas do setor de papel e celulose em 2010 e 2015 são referentes aos dados do Balanço Energético Nacional, enquanto que os demais anos foram modelados. A intensidade cai a partir de 2015, de 0,450 tep (18,84GJ) por tonelada para 0,393 tep (16,44GJ) por tonelada. O Benchmark¹² do setor segue nas Tabelas 19 e 20 a seguir.

Tabela 19. Intensidade Energética por tipo de indústria de papel e celulose - *benchmarks*

Tipo de Usina	Produto	Não Integrado bark-fired pulp mill		Integrado bark-fired pulp and paper mill	
Geração de calor					
		GJ/t	kWh/t	GJ/t	kWh/t
Licor negro	Celulose	18		18	
Resíduos da madeira	Celulose	4,2		4,2	
Total:		22,2		22,2	
Consumo de calor					
Produção de celulose	Celulose	11		8,5	
Produção de Papel	Papel			6	
Eletricidade por vapor recuperado	Celulose	3		4	
Eletricidade por condensado	Celulose	8,2		3,7	
Total:		22,2		22,2	
Geração elétrica					
Eletricidade por vapor recuperado	Celulose	2,952	820	4,14	1150
Eletricidade por condensado	Celulose	2,88	800	1,224	340
Total:		5,832	1620	5,364	1490
Consumo elétrico					
Produção de celulose	Celulose	2,52	700	1,98	550
Produção de Papel	Papel	0	0	2,34	650
Total:		2,52		4,32	
Geração para rede	Celulose	3,312	920	1,044	290
Total:					

Fonte: Industrial Efficiency Technology Database – Pulp and Paper

Tabela 20. Consumo energético por processo industrial e tipo de combustível - *benchmarks*

Matéria Prima	Produto	Processo	Combustível usado para Vapor	Vapor Exportado	Uso de Eletricidade	Eletricidade Produzida	Total
			(GJ/ADt)	(GJ/ADt)	(kWh/ADt)	(kWh/ADt)	(GJ/ADt)
					Final	Final	Final
Não-madeira	Celulose de Mercado	Polpeamento	10,5	-4,2	400		7,7
Madeira	Celulose de Mercado	Kraft	11,2		640	-655	11,1
		Sulfite	16		700		18,5
		Termo-mecânico		-1,3	2190		6,6
Papel	Celulose Recuperada		0,3		330		1,5

Fonte: Industrial Efficiency Technology Database – Pulp and Paper

¹² Industrial Efficiency Technology Database – Pulp and Paper – <http://ietd.iipnetwork.org>

5. Demais Setores industriais

A evolução da demanda por energéticos e as respectivas emissões de GEE para a totalidade dos setores estão apresentados nas próximas sessões, à exceção dos setores de cimento, siderurgia e papel e celulose, pois estão detalhados nas seções anteriores. Já as emissões dos processos industriais (exclusive provenientes de redução de minério por constarem dos itens acima) estão apresentadas para os setores de não ferrosos, extração mineral, química e gases químicos.

5.1. Indústria de Alimentos e Bebidas

A Tabela 22 apresenta o consumo energético do setor de alimentos e bebidas de 2010 a 2050.

Tabela 21. Evolução do consumo energético – setor de alimentos e bebidas (mil tep)

Evolução do consumo energético – alimentos e bebidas (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Bagaço de Cana	17.248	15.485	15.411	17.971	20.522	22.653	24.709	30.972
Carvão Mineral	71	65	69	81	101	122	173	238
Diesel Único	148	239	226	280	328	479	553	723
Eletricidade	2.319	2.242	2.237	2.600	3.003	3.792	4.904	6.265
Gás Natural Úmido e Seco	662	834	839	924	1.171	1.621	2.241	3.017
GLP	106	228	159	200	232	314	404	517
Lenha queima direta e carvoejamento	2.267	2.171	1.813	2.155	2.686	3.341	3.857	4.921
Óleo Combustível	325	119	228	302	371	453	698	1.157
Outras Primárias de Biomassa Resíduos Vegetais	11	10	1	1	1	2	2	2
Outros Energéticos de Petróleo	86	82	81	95	115	138	188	260
Querosene Iluminante	0	0	-	-	-	-	-	-
Total	23.244	21.475	21.065	24.607	28.530	32.914	37.729	48.072

Tabela 22. Evolução do consumo energético – setor de alimentos e bebidas (%)

Evolução do consumo energético – alimentos e bebidas (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Bagaço de Cana	74,21	72,11	73,16	73,03	71,93	68,82	65,49	64,43
Carvão Mineral	0,31	0,30	0,33	0,33	0,35	0,37	0,46	0,49
Diesel Único	0,64	1,11	1,07	1,14	1,15	1,45	1,47	1,50
Eletricidade	9,98	10,44	10,62	10,57	10,53	11,52	13,00	13,03
Gás Natural Úmido e Seco	2,85	3,88	3,98	3,75	4,10	4,92	5,94	6,28
GLP	0,45	1,06	0,76	0,81	0,81	0,95	1,07	1,08
Lenha - queima direta e carvoejamento	9,75	10,11	8,60	8,76	9,42	10,15	10,22	10,24

Evolução do consumo energético – alimentos e bebidas (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Óleo Combustível	1,40	0,56	1,08	1,23	1,30	1,37	1,85	2,41
Outras Primárias de Biomassa Resíduos Vegetais	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Outros Energéticos de Petróleo	0,37	0,38	0,39	0,39	0,40	0,42	0,50	0,54
Querosene Iluminante	0,00	0,00	-	-	-	-	-	-

Tabela 23. Resultado das emissões – setor de alimentos e bebidas (GgCO₂e)

Gg CO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Energia								
CO ₂	3.963	4.234	4.377	5.173	6.352	8.490	11.565	16.147
Não CO ₂	1.583	1.435	1.397	1.633	1.887	2.121	2.340	2.946
Total	5.546	5.669	5.774	6.806	8.238	10.611	13.905	19.094

Tabela 24. Evolução dos indicadores no setor de alimentos e bebidas – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	238.794	229.143	229.883	268.056	312.563	361.984	419.204	538.977
Intensidade energética (tep/t de produto)	0,097	0,094	0,092	0,092	0,091	0,091	0,090	0,089
Intensidade de emissões – energia (Gg tCO ₂ e/t produto)	0,023	0,025	0,025	0,025	0,026	0,029	0,033	0,035

5.2. Indústria Cerâmica

A Tabela 26 apresenta a evolução do consumo energético, de 2010 a 2050, do setor de cerâmica.

Tabela 25. Evolução do consumo energético – setor de cerâmica (mil tep)

Consumo energético- cerâmica (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Bagaço de Cana	0	0	8	10	11	13	15	18
Carvão mineral esp e 3100 a 3700	30	62	30	35	38	43	50	64
Diesel Único	6	24	20	23	27	31	39	49
Elettricidade	319	339	339	394	454	524	612	799
Gás Natural Úmido e Seco	1.141	1.324	1.134	1.226	1.202	1.404	1.733	2.294
GLP	165	173	156	196	227	262	302	384
Lenha queima direta e carvoejamento	2.275	2.312	1.832	2.112	2.655	2.982	3.122	3.512
Óleo Combustível	295	59	68	80	92	107	123	156
Outras Primárias de Biomassa Resíduos Vegetais	58	59	46	53	53	61	69	87
Outros Energéticos de Petróleo	195	262	319	456	569	694	913	1.393
Total	4.485	4.614	3.953	4.585	5.328	6.121	6.977	8.756

Tabela 26. Evolução do consumo energético – setor de cerâmica (%)

Evolução do consumo energético –cerâmica (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Bagaço de Cana	-	-	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Carvão Vapor	0,66	1,35	0,77	0,77	0,70	0,71	0,71	0,73
Diesel Único	0,13	0,52	0,51	0,51	0,51	0,51	0,55	0,56
Elettricidade	7,12	7,34	8,58	8,59	8,52	8,56	8,77	9,12
Gás Natural	25,44	28,70	28,70	26,74	22,56	22,94	24,83	26,20
GLP	3,68	3,75	3,94	4,27	4,26	4,28	4,33	4,39
Lenha	50,73	50,10	46,34	46,06	49,84	48,72	44,75	40,11
Óleo Combustível	6,59	1,27	1,73	1,74	1,73	1,74	1,76	1,78
Outras Prim.Biom.Res. Veg.	1,29	1,29	1,16	1,15	0,99	0,99	0,99	0,99
Outros Energ. de Pet.	4,36	5,69	8,06	9,95	10,68	11,34	13,09	15,91

Tabela 27. Resultado das emissões – setor de cerâmica (GgCO₂e)

Gg CO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	5.007	5.147	4.776	5.725	6.269	7.430	9.299	12.982
Não CO ₂	196	200	160	186	231	260	276	317
Total	5.203	5.347	4.936	5.910	6.500	7.690	9.576	13.299

Tabela 28. Evolução dos indicadores no setor de cerâmica – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	60.445	67.211	58.633	68.369	79.721	92.326	106.920	137.469
Intensidade energética (tep/t)	0,074	0,069	0,067	0,067	0,067	0,066	0,065	0,064
Intensidade de emissões – (tCO ₂ e/t)	0,086	0,080	0,084	0,086	0,082	0,083	0,090	0,097

5.3. Indústria Têxtil

A Tabela 29 apresenta a evolução do consumo energético, de 2010 a 2050, no setor têxtil.

Tabela 29. Evolução do consumo energético – setor têxtil (mil tep)

Evolução do consumo energético – têxtil (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Diesel Único	3	2	6	6	7	8	8	9
Eletricidade	715	560	692	740	851	845	805	1.003
Gás Natural	329	215	272	292	381	411	443	643
GLP	10	37	60	65	75	74	71	80
Lenha	92	62	140	151	121	99	68	90
Óleo Combustível	64	19	61	66	64	50	20	-
Querosene Iluminante	0	0	-	-	-	-	-	-
Total	1212	895	1230	1320	1500	1487	1415	1826

Tabela 30. Evolução do consumo energético – setor têxtil (%)

Evolução do consumo energético – têxtil (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Diesel Único	0,23	0,26	0,47	0,47	0,48	0,53	0,53	0,47
Eletricidade	58,94	62,59	56,21	56,05	56,75	56,83	56,91	54,95
Gás Natural	27,11	24,02	22,07	22,15	25,43	27,63	31,33	35,23
GLP	0,84	4,08	4,89	4,91	4,98	4,99	5,01	4,39
Lenha	7,58	6,91	11,39	11,44	8,08	6,63	4,79	4,95
Óleo Combustível	5,30	2,15	4,97	4,99	4,28	3,39	1,42	0,00
Querosene Iluminante	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 31. Resultado das emissões – setor têxtil (GgCO₂e)

GgCO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	1.015	670	1.011	1.088	1.321	1.346	1.314	1.746
Não CO ₂	11	7	15	16	14	13	10	13
Total	1.026	677	1.026	1.104	1.335	1.359	1.324	1.758

Tabela 32. Evolução dos indicadores no setor industrial têxtil – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	1.764	1.433	1.940	2.088	2.435	2.417	2.333	2.999
Intensidade energética (tep/t)	0,687	0,624	0,634	0,632	0,616	0,615	0,607	0,609
Intensidade de emissões – (tCO ₂ e/t)	0,581	0,472	0,529	0,529	0,548	0,562	0,568	0,586

5.4. Indústria de Ferroligas

A Tabela 34 apresenta a evolução do consumo energético, de 2010 a 2050 do setor de ferroligas. Devido à utilização de redutores (contabilizados como emissões de processos industriais no IPCC) a tabela apresenta os valores separadamente.

Tabela 33. Evolução do consumo energético e de redutores – setor de ferroligas (mil tep)

Consumo energético - ferroligas (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
Diesel Único	-	6	7	5	6	7	23	28
Eletricidade	728	524	504	459	543	674	789	992
Gás Natural Úmido e Seco	2	6	61	46	57	101	98	100
GLP	-	22	13	11	8	9	10	13
Lenha queima direta e carvoejamento	92	63	65	54	60	62	62	55
Óleo Combustível	29	8	3	2	1	1	2	2
Querosene Iluminante	1	0	0	0	0	0	0	0
Redutores								
Carvão Vegetal	568	392	411	309	342	364	413	584
Coque de Carvão Mineral	107	70	63	52	61	70	75	85
Outros Energéticos de Petróleo	168	114	152	127	148	124	136	166
Total	1.695	1.206	1.278	1.066	1.226	1.412	1.608	2.026

Tabela 34. Evolução do consumo energético e de redutores – setor de ferroligas (%)

Evolução dos usos finais – ferroligas (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
Diesel Único	-	0,48	0,51	0,51	0,51	0,51	1,40	1,40
Eletricidade	42,93	43,42	39,46	43,07	44,31	47,74	49,09	48,95
Gás Natural Úmido e Seco	0,12	0,48	4,78	4,28	4,66	7,12	6,07	4,96
GLP	-	1,85	1,03	1,03	0,63	0,61	0,62	0,63
Lenha - queima direta e carvoejamento	5,43	5,23	5,07	5,09	4,92	4,41	3,85	2,74
Óleo Combustível	1,71	0,70	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,11
Querosene Iluminante	0,06	0,00	-	-	-	-	-	-
Redutores								
Carvão Vegetal	33,53	32,54	32,12	28,95	27,87	25,78	25,71	28,81
Coque de Carvão Mineral	6,34	5,82	4,90	4,92	4,96	4,96	4,68	4,21
Outros Energéticos de Petróleo	9,89	9,48	11,92	11,95	12,04	8,76	8,47	8,21

Tabela 35. Resultado das emissões – setor de ferroligas (GgCO₂e)

Gg CO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	102	117	205	159	176	284	322	352
Não CO ₂ e	7	5	5	5	5	5	5	5
Sub-Total	109	122	210	163	181	289	328	357
Redutores								
CO ₂	1.195	797	923	772	895	838	913	1.085
Não CO ₂ e	162	112	117	88	98	104	118	166
Sub-Total	1.357	909	1.041	860	993	942	1.032	1.251
Total	1.466	1.031	1.251	1.023	1.174	1.231	1.360	1.608

Tabela 36. Evolução dos indicadores no setor industrial de ferroligas – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Intensidades	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	1.120	831	883	738	861	997	1.154	1.484
Intensidade energética (tep/t)	1,513	1,451	1,447	1,444	1,425	1,416	1,393	1,365
Intensidade de emissões – ENERGIA (Gg tCO ₂ e/t)	0,097	0,147	0,238	0,221	0,210	0,290	0,284	0,240
Intensidade de emissões – PROC. IND. (tCO ₂ e/t)	1,212	1,094	1,178	1,165	1,154	0,945	0,894	0,843
Intensidade Total (tCO ₂ e/t)	1,309	1,241	1,417	1,386	1,364	1,235	1,178	1,084

5.5. Não ferrosos

A Tabela 37 apresenta a evolução do consumo energético, de 2010 a 2050 do setor de não ferrosos. Devido à utilização de redutores (contabilizados como emissões de processos industriais) a tabela apresenta os valores separadamente.

Tabela 37. Evolução do consumo energético – setor de não ferrosos (mil tep)

Evolução do consumo energético – não ferrosos (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
Diesel Único	-	10	8	8	7	7	8	9
Eletricidade	3.198	2.315	2.784	3.342	2.998	3.220	3.953	4.308
Gás Natural Úmido e Seco	727	593	824	886	901	1.363	1.686	1.868

Evolução do consumo energético – não ferrosos (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
GLP	79	35	35	34	29	30	37	41
Óleo Combustível	1.098	1.238	868	841	804	835	1.040	1.147
Redutores								
Carvão Mineral	616	689	878	953	974	1.102	1.360	1.552
Carvão Vegetal	9	11	10	10	8	9	11	11
Coque de Carvão Mineral	152	245	286	286	290	308	372	396
Outros Energéticos de Petróleo	612	510	550	744	748	825	1019	1130
Total	6492	5646	6243	7105	6757	7698	9486	10461

Tabela 38. Evolução do consumo energético – setor de não ferrosos (%)

Evolução do consumo energético– não ferrosos (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
Diesel Único	-	0,17	0,13	0,11	0,10	0,08	0,09	0,08
Eletricidade	49,27	41,00	44,59	47,04	44,36	41,83	41,67	41,18
Gás Natural Úmido e Seco	11,19	10,50	13,20	12,48	13,34	17,71	17,77	17,85
GLP	1,22	0,62	0,56	0,48	0,42	0,39	0,39	0,39
Óleo Combustível	16,92	21,92	13,90	11,84	11,89	10,85	10,96	10,97
Redutores								
Carvão Mineral	9,49	12,21	14,06	13,41	14,41	14,32	14,34	14,84
Carvão Vegetal	0,14	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,11	0,10
Coque de Carvão Mineral	2,34	4,35	4,59	4,02	4,29	4,01	3,92	3,78
Outros Energéticos de Petróleo	9,43	9,04	8,81	10,48	11,07	10,71	10,75	10,80

Tabela 39. Resultado das emissões do consumo energético e do uso de redutores – setor de não ferrosos (GgCO₂e)

GgCO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	5.476	5.523	4.863	4.921	4.815	6.005	7.449	8.235
Não CO ₂	12	12	9	9	8	11	13	15
Sub-total Energia	5.489	5.535	4.872	4.930	4.823	6.016	7.463	8.250
Processos industriais								
CO ₂ (redutores)	4.332	4.308	5.181	6.077	6.172	6.918	8.544	9.647
Não CO ₂ (redutores)	20	23	27	30	30	34	42	47
Sub-total (redutores)	4.352	4.331	5.209	6.107	6.202	6.952	8.586	9.694
Gases gerados na redução	-	-	-	-	-	-	-	-

GgCO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
eletrolítica								
CF ₄	507	246	437	500	479	548	683	763
C ₂ F ₆	65	32	56	65	62	71	88	99
Produção de Alumínio (CO ₂ do consumo de anodos)	2.543	1.277	2.270	2.601	2.490	2.848	3.550	3.966
Produção de Magnésio (CO ₂ da calcinação da dolomita)	95	79	89	102	98	112	140	156
Total de processos industriais	7.563	5.964	8.061	9.375	9.331	10.530	13.046	14.677
Total	13.052	11.500	12.934	14.305	14.155	16.546	20.509	22.927

Devido à importância da indústria de alumínio e suas peculiaridades, as tabelas 03, 01 e 01 detalham as emissões da tabela acima, referentes ao consumo e preparo dos anodos e por efeitos anódicos, por tipo de tecnologia.

Tabela 40. Emissões de dióxido de carbono por tecnologia – indústria de alumínio (GgCO₂)

Ano	Tecnologia					Total
	Gg CO ₂					
	Pre-baked		Soderberg			
2010	715,47	687,06	155,46	156,71	830,75	2.545,45
2015	370,64	368,22	87,62	26,82	424,71	1.278,01
2020	658,97	654,67	155,79	47,69	755,11	2.272,23
2025	754,82	749,89	178,45	54,63	864,94	2.602,73
2030	722,83	718,11	170,89	52,31	828,28	2.492,43
2035	826,70	821,31	195,45	59,83	947,32	2.850,61
2040	1.030,39	1.023,67	243,60	74,57	1.180,71	3.552,94
2050	1.151,15	1.143,65	272,15	83,31	1.319,10	3.969,36

Tabela 41. Emissões de CF₄ por tecnologia – indústria de alumínio (GgCO₂e)

Ano	Tecnologia					Total (tCF ₄)	Total (GgCO ₂ e)
	Tonelada de CF ₄						
	Pre-baked		Soderberg				
2010	8,57	8,23	8,13	8,19	43,43	76,55	508
2015	4,44	4,41	4,58	1,40	22,20	37,03	246
2020	7,89	7,84	8,14	2,49	39,47	65,85	437
2025	9,04	8,98	9,33	2,86	45,21	75,42	500
2030	8,66	8,60	8,93	2,73	43,30	72,23	479
2035	9,90	9,84	10,22	3,13	49,52	82,61	548
2040	12,34	12,26	12,73	3,90	61,72	102,96	683
2050	13,79	13,70	14,23	4,35	68,95	115,03	763

Tabela 42. Emissões de C₂F₆ por tecnologia – indústria de alumínio (GgCO₂e)

Ano	Tecnologia					Total (tC ₂ F ₆)	Total GgCO ₂ e)
	Tonelada de C ₂ F ₆						
	Pre-baked		Soderberg				
2010	0,90	0,87	0,56	0,56	2,97	5,86	65
2015	0,47	0,46	0,31	0,10	1,52	2,86	32
2020	0,83	0,83	0,56	0,17	2,70	5,09	56
2025	0,95	0,95	0,64	0,20	3,10	5,83	65
2030	0,91	0,91	0,61	0,19	2,96	5,58	62
2035	1,04	1,04	0,70	0,21	3,39	6,38	71
2040	1,30	1,29	0,87	0,27	4,23	7,96	88
2050	1,45	1,44	0,97	0,30	4,72	8,89	99

Tabela 43. Evolução dos indicadores no setor industrial de não-ferrosos – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	5.804	4.841	5.445	6.237	5.973	6.831	8.514	9.512
Intensidade energética (tep/t)	1,119	1,166	1,146	1,139	1,131	1,127	1,114	1,100
Intensidade de emissões - Energia (tCO ₂ e/t)	0,946	1,144	0,895	0,790	0,808	0,881	0,877	0,867
Intensidade de emissões - Processos industriais (tCO ₂ e/t)	1,303	1,232	1,480	1,503	1,562	1,541	1,532	1,543
Intensidade de emissões - Total (tCO ₂ e/t)	2,249	2,375	2,375	2,293	2,369	2,422	2,408	2,410

5.6. Indústria Química

Na modelagem do setor químico, os seguintes produtos foram considerados: etileno e derivados, propileno e derivados, BTX e derivados, fertilizantes e derivados, e cloro e derivados. Já para o cálculo de emissões, foram considerados: Amônia, Metanol, Eteno, Cloreto de Vinila, Óxido de Eteno, Acrilonitrila, Negro-de-fumo e Ácido Fosfórico.

A Tabela 44 apresenta a evolução do consumo energético, de 2010 a 2050 do setor químico.

Tabela 44. Evolução do consumo energético – setor químico (mil tep)

Evolução do consumo energético – químico (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Biomassa	93	-	71	86	93	103	137	168
Carvão Vapor	125	172	185	196	125	167	190	209
Carvão Vegetal	20	18	21	23	20	25	34	37
Diesel Único	27	18	39	49	27	53	67	72
Eletricidade	2.055	1.940	1.861	2.073	2.055	2.450	3.150	3.538
Gás Natural	2.289	2.222	2.093	2.535	2.289	3.425	4.332	5.062
GLP	64	80	345	379	64	448	585	660
Lenha	49	48	50	54	49	61	83	90
Óleo Combustível	233	174	464	472	233	379	389	206
Outras prim. não renov.	-	85	55	60	-	62	74	82
Outros Energ. de Pet.	2.259	1.949	2.673	2.974	2.259	2.021	2.265	2.541
Total	7.215	6.706	7.857	8.901	7.215	9.194	11.306	12.664

Tabela 45. Evolução do consumo energético – setor químico (%)

Evolução do consumo energético – químico (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Biomassa	1,29	-	0,91	0,96	1,29	1,12	1,21	1,33
Carvão Vapor	1,73	2,56	2,35	2,20	1,73	1,82	1,68	1,65
Carvão Vegetal	0,28	0,27	0,27	0,26	0,28	0,28	0,30	0,29
Diesel Único	0,37	0,27	0,50	0,55	0,37	0,58	0,59	0,57
Eletricidade	28,49	28,92	23,68	23,29	28,49	26,65	27,86	27,93
Gás Natural	31,73	33,14	26,64	28,48	31,73	37,25	38,31	39,97
GLP	0,88	1,20	4,39	4,26	0,88	4,88	5,18	5,21
Lenha	0,68	0,71	0,63	0,61	0,68	0,66	0,73	0,71
Óleo Combustível	3,23	2,60	5,91	5,30	3,23	4,12	3,44	1,63
Outras prim. não renov.	-	1,26	0,70	0,68	-	0,67	0,66	0,64
Outros Energ. de Pet.	31,31	29,07	34,02	33,41	31,31	21,98	20,03	20,06

Tabela 46. Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor químico (GgCO₂e)

GgCO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	13.846	13.231	16.723	18.900	17.630	17.851	21.326	23.621
Não CO ₂	107	90	179	200	187	201	246	272
Sub-Total	13.953	13.321	16.902	19.100	17.818	18.052	21.572	23.910
Processos industriais								
CO ₂	2.983	2.837	3.234	3.528	3.442	3.675	4.557	4.503
Não CO ₂	580	535	610	666	649	693	860	904
Sub-Total	679	698	649	673	744	790	832	831
Total	4.243	4.070	4.493	4.867	4.835	5.159	6.249	6.238

Tabela 47. Evolução dos indicadores no setor químico – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	36.648	34.870	39.754	43.368	42.313	45.175	56.017	65.052
Intensidade energética (tep/t)	0,197	0,192	0,198	0,205	0,171	0,204	0,202	0,195
Intensidade de emissões de energia – (tCO ₂ e/t)	0,381	0,382	0,425	0,440	0,421	0,400	0,385	0,368
Intensidade de emissões de processos industrial (tCO ₂ e/t)	0,116	0,117	0,113	0,112	0,114	0,114	0,112	0,096
Intensidade de emissões Total – (tCO ₂ e/t)	0,496	0,499	0,538	0,553	0,535	0,514	0,497	0,463

5.7. Mineração e Pelotização

A tabela a seguir apresenta o consumo energético do setor de mineração e pelotização de 2010 a 2050.

Tabela 48. Evolução do consumo energético – setor de mineração e pelotização (mil tep)

Evolução do consumo energético – mineração e pelotização (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Carvão Vapor	368	417	673	830	596	174	239	306
Coque Metalúrgico	56	60	53	78	85	76	97	118
Diesel Único	248	369	258	368	395	373	464	542
Eletricidade	972	1.095	1.017	1.530	1.582	1.487	1.882	2.259
Gás Natural	628	657	757	1.456	1.825	2.121	2.875	3.849
GLP	19	22	52	74	79	72	90	106
Óleo Combustível	371	166	242	283	318	301	304	257
Outros Energ. de Petróleo	581	613	369	438	534	504	507	221
Querosene Iluminante	1	1	1	1	1	1	1	2
Total	3.183	3.346	3.448	5.097	5.461	5.152	6.524	7.749

Tabela 49. Evolução da participação dos combustíveis – setor de mineração e pelotização (%)

Evolução do consumo energético em percentuais – Mineração e Pelotização	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Carvão Vapor	11,55	12,48	19,52	16,29	10,91	3,38	3,67	3,94
Coque Metalúrgico	1,77	1,80	1,55	1,53	1,55	1,47	1,49	1,52
Diesel Único	7,78	11,02	7,48	7,22	7,23	7,24	7,11	7,00
Eletricidade	30,53	32,74	29,48	30,02	28,97	28,86	28,85	29,15
Gás Natural	19,74	19,64	21,94	28,56	33,42	41,18	44,06	49,67
GLP	0,60	0,66	1,51	1,46	1,45	1,39	1,39	1,37
Óleo Combustível	11,65	4,95	7,03	5,56	5,83	5,84	4,66	3,31
Outros Energéticos de Petróleo	18,25	18,31	10,70	8,60	9,78	9,79	7,76	2,85
Querosene Iluminante	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabela 50. Evolução das emissões de energia e processos industriais - setor de mineração e pelotização (GgCO₂e)

GgCO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	7.301	7.409	7.955	11.158	11.713	10.406	12.884	14.500
Não CO ₂	26	28	32	41	37	25	30	34
Sub-total CO ₂ e	7.328	7.437	7.987	11.199	11.750	10.431	12.914	14.534
Emissão de processo								
Produção de cal CO ₂	5.950	5.966	6.702	7.766	7.509	8.325	10.637	12.364
Total	13.278	13.403	14.689	18.965	19.259	18.755	23.551	26.897

Tabela 51. Evolução dos indicadores no setor de mineração e pelotização – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	438.554	454.214	479.050	700.150	760.694	718.575	921.250	1.119.425
Intensidade energética (tep/t)	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Intensidade de emissões energia – (tCO ₂ e/t)	0,017	16,374	16,672	15,995	15,447	14,516	14,018	12,983
Intensidade de emissões de processos industrial (tCO ₂ e/t)	0,014	0,013	0,014	0,011	0,010	0,012	0,012	0,011
Intensidade de emissões Total – (tCO ₂ e/t)	0,030	0,030	0,031	0,027	0,025	0,026	0,026	0,024

5.8. Outras Indústrias e consumo de produtos

A tabela 26 apresenta a evolução do consumo energético de 2010 a 2050, no setor de outras indústrias.

Tabela 52. Evolução do consumo energético – setor de outras indústrias (mil tep)

Evolução do consumo energético – outras indústrias (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Carvão Mineral	87	168	160	166	165	160	194	216
Carvão Vegetal	12	12	12	11	11	10	13	17
Diesel Único	144	162	166	172	173	168	286	441
Eletricidade	3.380	3.797	3.687	3.824	3.841	3.805	5.164	6.832
Gás Natural	1.901	2.057	1.671	1.477	1.551	1.776	2.365	3.231
GLP	153	188	165	211	235	228	288	404
Lenha	874	871	887	1.237	1.063	548	518	463
Óleo Combustível	177	71	184	184	185	179	251	274
Outros Energ. Pet.	478	427	465	483	471	455	462	640
Querosene Ilum.	1	0	0	0	0	0	1	1
Total	7208	7754	7399	7765	7697	7329	9543	12519

Tabela 53. Evolução do consumo energético – setor de outras indústrias (%)

Evolução do consumo energético – Outras Indústrias (%)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Carvão Mapor	1,21	2,17	2,17	2,14	2,15	2,18	2,03	1,73
Carvão Vegetal	0,17	0,16	0,16	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
Diesel Único	2,00	2,09	2,24	2,22	2,25	2,29	3,00	3,53
Eletricidade	46,90	48,97	49,84	49,24	49,91	51,92	54,11	54,57
Gás Natural	26,37	26,52	22,59	19,02	20,16	24,22	24,78	25,80
GLP	2,12	2,42	2,23	2,72	3,06	3,11	3,02	3,23
Lenha	12,13	11,23	11,99	15,92	13,81	7,48	5,43	3,70
Óleo Combustível	2,45	0,92	2,49	2,37	2,40	2,44	2,64	2,19
Outros Energ. Pet.	6,64	5,51	6,29	6,22	6,11	6,21	4,84	5,12
Querosene Ilum.	0,02	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

O setor de outras indústrias além de englobar as emissões do consumo energético dos demais setores industriais, nesse relatório também inclui as emissões de lubrificantes, gases químicos, como HFCs (oriundos majoritariamente de sistemas de refrigeração) e SF₆ usado em equipamentos elétricos. Nesses casos, as emissões não acompanham o nível de atividade do setor “outras indústrias”, mas da atividade econômica e do estoque de equipamentos que está presente na economia brasileira.

Tabela 54. Evolução das emissões de energia e processos industriais – outras indústrias e consumo de produtos (GgCO₂e)

Gg CO ₂ e	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Energia								
CO ₂	8.172	8.450	7.971	7.748	7.935	8.322	10.578	14.204
Não CO ₂	102	104	103	131	117	76	81	89
Sub- total energia	8.274	8.554	8.073	7.879	8.052	8.398	10.659	14.293
Processos industriais								
Produção de vidro (uso de calcário e dolomita)	114	122	125	130	134	130	176	241
Consumo de barrilha	396	377	430	469	457	488	605	684
HFC-125	1.589	1.541	1.721	2.458	3.196	3.910	4.625	6.008
HFC-32	72	69	78	119	166	220	283	435
HFC-143a	2.242	2.222	2.502	3.649	4.796	5.908	7.020	9.173
HFC-134a	3.536	3.581	3.923	5.323	6.723	8.080	9.437	12.065
SF ₆	182	192	200	234	268	301	335	399
Sub- total processos	8.130	8.104	8.979	12.382	15.741	19.038	22.481	29.005
Total	16.405	16.658	17.053	20.261	23.793	27.436	33.140	43.298

Tabela 55. Evolução dos indicadores de outras indústrias e consumo de produtos – 2010-2050

Indicadores	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Produção (mil t)	15.601	16.639	17.145	17.780	18.377	17.780	24.130	32.933
Intensidade energética (tep/t)	0,462	0,466	0,432	0,437	0,419	0,412	0,395	0,380
Intensidade de emissões de energia – (tCO ₂ e/t)	0,530	0,514	0,471	0,443	0,438	0,472	0,442	0,434
Intensidade de emissões de proces. ind. (tCO ₂ e/t)	0,521	0,487	0,524	0,696	0,857	1,071	0,932	0,881
Intensidade de emissões total (tCO ₂ e/t)	1,052	1,001	0,995	1,140	1,295	1,543	1,373	1,315

6. Conclusão

O potencial de crescimento da produção física do setor industrial brasileiro no período 2005-2050 seria de 284%, conforme as saídas do modelo de equilíbrio geral (IMACLIM-BR)¹³. A consolidação da evolução da produção estimada até 2050 pode ser observada na figura xxxx a seguir, por segmento industrial, onde se destacam papel e celulose, mineração e pelotização e cerâmico ao final do período.

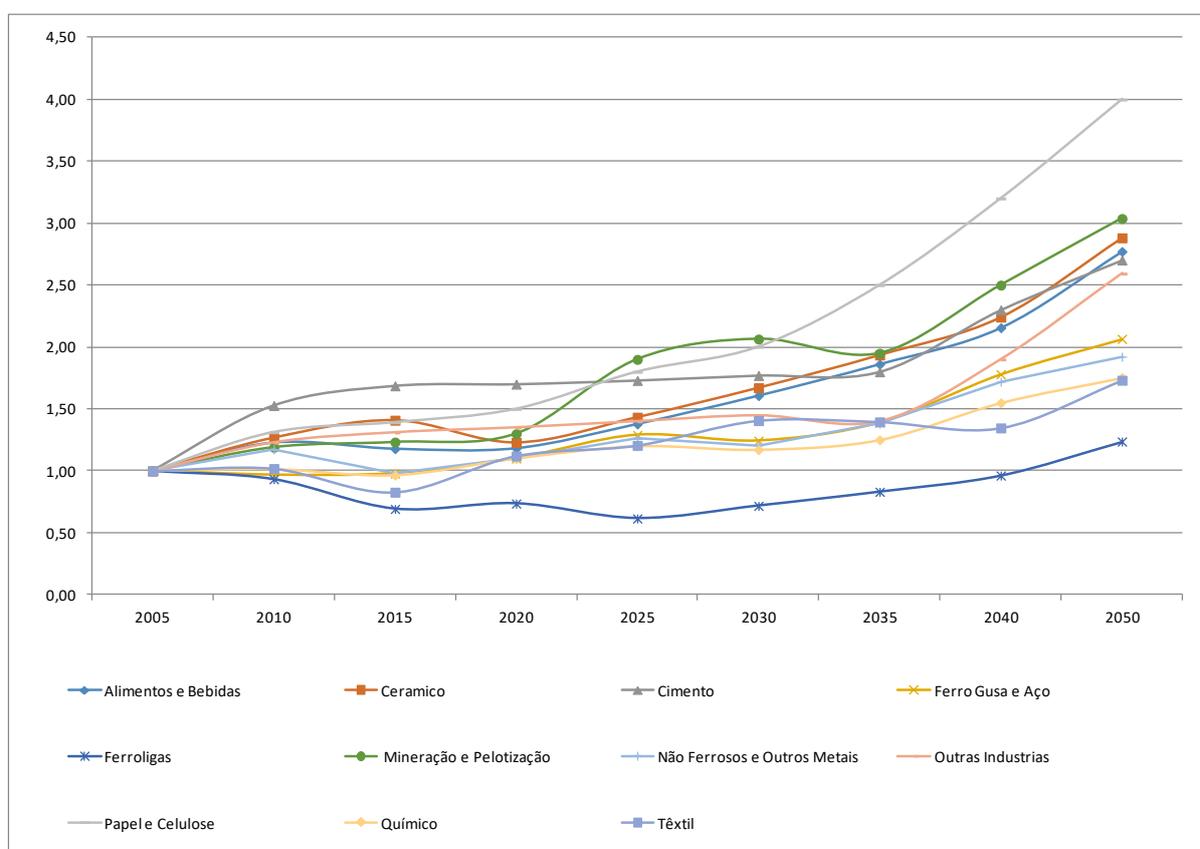


Figura 6. Evolução da produção física industrial brasileira (2005-2050)

O consumo energético apresenta um crescimento de 103% no período 2010-2050, mantendo-se praticamente constante a participação de fontes renováveis, como pode ser observado na figura xxx

¹³ Ver detalhes sobre a evolução econômica no relatório respectivo.

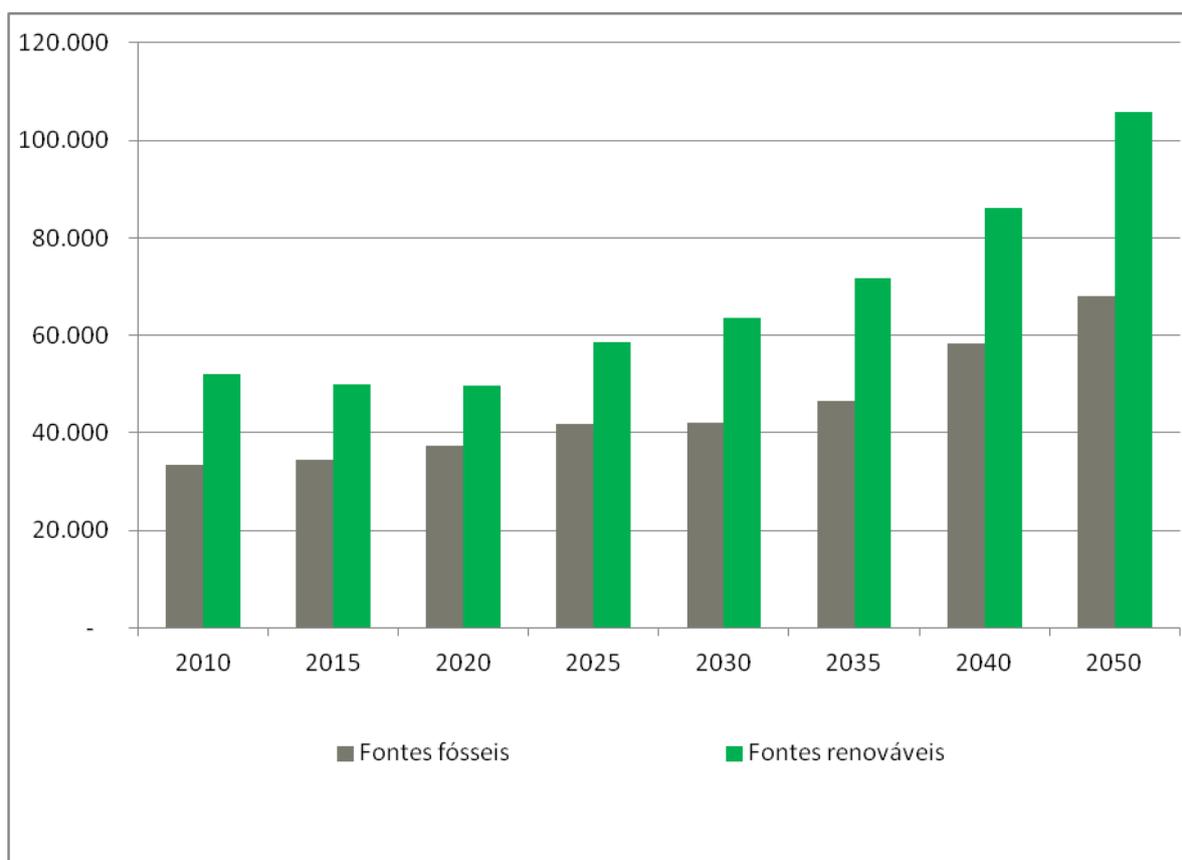


Figura 7. Evolução da participação de fontes fósseis e renováveis (2010-2050)

A tabela 56, a seguir, apresenta os valores estimados para as fontes energéticas, no período de estudo.

Tabela 56. Evolução do consumo energético – 2010-2050 (mil tep)

Fonte energética (mil tep)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050	Variação 2050/2010
Gás Natural	9.274	9.947	10.116	11.415	12.216	15.337	19.918	25.217	2,7
Coque de Carv. Min.	7.516	7.886	8.833	9.837	9.276	10.028	12.037	12.938	1,7
Outras Sec. de Petr.	7.505	7.305	7.968	8.707	8.314	7.831	9.294	10.574	1,4
Carvão Mineral	3.232	3.855	4.456	4.953	4.761	4.801	6.040	6.944	2,1
Óleo Combustível	3.236	2.205	2.516	2.693	2.752	2.900	3.548	3.839	1,2
Gás de Cid/Coqueria	1.250	1.148	1.411	1.735	1.751	2.141	2.969	3.457	2,8
GLP	702	898	1.071	1.266	1.389	1.553	1.939	2.407	3,4
Diesel Mineral	690	1.044	787	969	1.035	1.163	1.915	1.847	2,7
Outras fontes primárias	119	286	261	280	552	655	750	927	7,8
Querosene	3	1	1	2	2	2	2	3	0,9
Subtotal (fósseis)	33.527	34.576	37.419	41.857	42.049	46.411	58.411	68.153	

Fonte energética (mil tem)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050	Variação 2050/2010
Eletricidade	17.488	16.902	17.624	20.206	20.674	22.987	29.074	35.411	2,0
Produtos da Cana	17.289	15.512	15.450	18.016	20.573	22.716	24.788	31.070	1,8
Outras fontes primárias	5.925	6.727	6.263	7.637	8.440	10.477	13.516	17.106	2,9
Lenha	7.164	7.428	6.536	7.855	8.977	9.898	11.187	12.914	1,8
Carvão Vegetal	4.045	3.331	3.641	4.787	4.815	5.401	7.201	8.720	2,2
Biodiesel	35	73	82	101	119	134	267	304	8,7
Alcatrão	95	95	102	102	114	127	222	267	2,8
Subtotal (renováveis)	52.040	50.069	49.697	58.703	63.714	71.740	86.254	105.793	
Total geral	85.568	84.645	87.116	100.560	105.762	118.151	144.666	173.946	

Fonte: 2010 e 2015 BEN (EPE, 2016); demais anos, estimativas próprias.

No que diz respeito às emissões, observa-se um aumento de 203% no período 2010-2050, com o maior crescimento ocorrendo no setor de alimentos e bebidas. A tabela 57 apresenta a evolução no período.

Tabela 57. Evolução das emissões de GEE no período 2010-2050 (GgCO₂e)

Setor Industrial	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050	Variação 2050/2010
GgCO₂e									
Cimento	35.610	38.845	38.654	39.238	40.410	41.276	52.714	58.455	1,6
Ferro gusa e aço	47.833	50.324	56.903	65.653	65.638	72.683	90.369	100.165	2,1
Ferroligas	1.466	1.031	1.251	1.023	1.174	1.231	1.360	1.608	1,1
Mineral	13.278	13.403	14.689	18.965	19.259	18.755	23.551	26.897	2,0
Não ferroso e outras de metalurgia	13.052	11.500	12.934	14.305	14.155	16.546	20.509	22.927	1,8
Química	18.196	17.390	21.395	23.967	22.653	23.211	27.821	30.148	1,7
Alimentos e Bebidas	5.546	5.669	5.774	6.806	8.238	10.611	13.905	19.094	3,4
Têxtil	1.026	677	1.026	1.104	1.335	1.359	1.324	1.758	1,7
Papel e Celulose	4.198	4.423	4.408	4.998	5.497	6.916	8.715	10.603	2,5
Cerâmica	5.203	5.347	4.936	5.910	6.500	7.690	9.576	13.299	2,6
Outros	16.405	16.658	17.053	20.261	23.793	27.436	33.140	43.298	2,6
Total	161.812	165.268	179.022	202.230	208.652	227.713	282.983	328.253	

Nota: "outros" compreende outras indústrias e consumo de produtos (gases refrigerantes, SF₆, lubrificantes, etc).

7. Prospecção tecnológica para cenários de mitigação

SETOR	INDÚSTRIA			
Subsetor	CIMENTO			
Unidade Principal	Energia			
Nova Tecnologia				
Nome	Captura de CO ₂ pós combustão para produção de coprodutos e sua comercialização			
Descrição Geral	Produção de bicarbonato, carbonato de sódio e cloro a partir da captura de CO ₂ . Testes já ocorrem em planta piloto e é possível que uma planta comercial esteja disponível a partir de 2020. Uma planta foi comissionada no Texas para capturar e transformar 75 mil toneladas de CO ₂ por ano em bicarbonato de sódio, cloro e ácido clorídrico que podem ser comercializados (Energy Technology Perspectives, 2015 apud GHG IA, Global CCS Institute and ECRA, 2013; Skyonic, 2014).			
Método de Projeção	A partir de 2030 a penetração fica dependente de seu sucesso em outros países.			
Região	Brasil			
Nível de utilização da tecnologia		Cen. Ref.	Nível mínimo	Nível Máximo
	2020			
	2025	0		
	2030	0		
	2040	0		
Investimento (US\$/unidade) Data do câmbio:2008	Investimento 964,37 R\$/tCO ₂ capturado Intensidade Energética 237kWh/tCO ₂ e 2 GJ/tCO ₂ Taxa de captura 90%			
Elementos de custo	1) Investimento inicial pela capacidade do equipamento 2) Custo operacional elevado / Pegada energética 3) Produção de coprodutos e remuneração por sua comercialização			
Interrelação com outros setores	Indústria Química			
Dificuldade de penetração <i>Avaliação: 1= Baixa, 2= Média baixa, 3= Média alta, 4= Alta</i>		Grau de Dific.	Barreiras	Instrumentos para superar barreiras
	Técnicas:	2	2	
	Econômicas:	1	1	
	Financeiras:	2	2	Requer linha de crédito
	Político-institucionais:	2	2	Uma regulação favorável pode melhorar a adoção e penetração da tecnologia
Outras:				
Externalidades (em relação à baseline)	A vantagem de sua implementação é a possibilidade de remuneração do setor por outros produtos, além do cimento. Sua desvantagem é que a intensidade energética em todo o processo aumenta, porém, o nível de emissão de todo o processo de produção de cimento é reduzido em 15%.			

Referências bibliográficas:	"Energy Technology Perspective apud GHG IA (2008), "CO ₂ capture in the cement industry", Technology Study, Report No. 2008/3, GHG IA, Cheltenham, www.globalccsinstitute.com/sites/www.globalccsinstitute.com/files/publications/95751/CO2-capture-cement-industry.pdf ; GHG IA, Global CCS Institute and ECRA (European Cement Research Academy) (2013), Deployment of CCS in the Cement Industry, http://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-19.pdf ."			
Nova Tecnologia				
Nome	Técnica de fabricação de Cimento por Leito Fluidizado			
Descrição Geral	A produção de cimento por tecnologia de leito fluidizado tem sido estudada no Japão desde os anos 1990 (EU 2013). Hoje a tecnologia já opera em escala comercial e produz 200 toneladas de clínquer por dia. Opera com Leito Fluidizado com pre-aquecedores de 4 estágios. Qualidade do clínquer é superior ou igual à tecnologia convencional. Área ocupada 30% inferior à tecnologia convencional.			
Método de Projeção	A penetração desta tecnologia depende da mudança na estrutura de custos da indústria, se o preço do coque de carvão de petróleo sofrer elevação, é possível que a indústria mude sua tecnologia de produção rapidamente para esta tecnologia.			
Região	Brasil			
Nível de utilização da tecnologia		Cen. Ref.	Nível mínimo	Nível Máximo
	2020			
	2025			
	2030	2%	1%	3%
	2040	3%	2%	4%
2050	5%	3%	7%	
Investimento (US\$/unidade) Data do câmbio:2008	Custos de construção 30% menores Área ocupada 30% inferior à tecnologia convencional			
Elementos de custo	1) Tratamento de resíduos 2) Produção de clínquer 3) Moagem da mistura			
Interrelação com outros setores	Setor geração elétrica			
Dificuldade de penetração <i>Avaliação: 1= Baixa, 2= Média baixa, 3= Média alta, 4= Alta</i>		Grau de Dific.	Barreiras	Instrumentos para superar barreiras
	Técnicas:	2	2	
	Econômicas:	1	1	Implementação de mercado de carbono
	Financeiras:	2	2	Requer linha de crédito
	Político-institucionais:	2	2	Uma regulação favorável pode melhorar a adoção e penetração da tecnologia
Outras:				

Externalidades (em relação à baseline)	Ambientais: Redução da demanda por calor de 10-12% e redução das emissões de CO ₂ de 10-12%. A redução na demanda por calor provoca uma redução por combustíveis, que também, favorece a redução nos custos de produção. Econômicos: Área ocupada 30% inferior à tecnologia convencional e redução na demanda por calor (menores gastos com energia)
Referências bibliográficas:	Best Available Technologies - Cement, Lime and Magnesium oxide (EU 2013)

SETOR	Indústria		
Subsetor	Ferro-gusa e Aço		
Unidade Principal	Tonelada de aço		
Nova Tecnologia			
Nome	Tratamento de Gás do Alto Forno, Reuso e Co-geração		
Descrição Geral	A captação do gás e seu uso como fonte de calor têm sido adotados no Brasil mais recentemente e esta tecnologia deve passar por incrementos de eficiência até 2030. Esta tecnologia é adequada para alto-forno de maior porte, que usa coque de carvão mineral como combustível.		
Método de Projeção	Projeta-se que as indústrias siderúrgicas com idade de suas plantas mais elevadas terão de aprimorar a eficiência desta tecnologia por questões de competitividade. A partir de 2030, espera-se que todas as indústrias utilizem esta tecnologia com elevado nível de eficiência.		
Região	Brasil		
Nível de utilização da tecnologia	Esta tecnologia já está presente na maior parte das plantas siderúrgicas brasileiras e usam da captura e reaproveitamento dos gases de alto forno como fonte de receita do mecanismo de desenvolvimento limpo. Entretanto, sua eficiência é questionável, e há enorme espaço para melhoria de ganhos de eficiência. Desta forma, espera-se que até 2030, todas as indústrias apliquem as melhores práticas tecnológicas na recuperação dos gases de alto forno. Por exemplo, as plantas da Usiminas e CSN são muito antigas, e até 2030, novos trens de produção por questão de competitividade serão substituídos e a partir dessa substituição, uma nova tecnologia mais eficiente de captura dos gases de alto forno será adotada.		
Investimento (US\$/unidade) Data do câmbio:2010	Os investimentos requeridos para adoção desta tecnologia estão divididos na instalação do equipamento para recuperação do gás de alto forno, os custos de CAPEX E OPEX da planta de cogeração de eletricidade. Os custos da implementação desta tecnologia variam entre R\$72,41 a R\$123,11 por tonelada de aço, seu payback é em média 12 anos, dependendo do preço recebido pela eletricidade gerada e receitas provenientes de recursos de comércio de carbono.		
Elementos de custo	1) Equipamento para Recuperação do Gás 2) CAPEX e OPEX da planta de cogeração: 3) Economia na eletricidade por propriedade/ano:		
Interrelação com outros setores	Setor geração elétrica		
Dificuldade		Grau de Dific.	Barreiras Instrumentos para

de penetração <i>Avaliação: 1= Baixa, 2= Média baixa, 3= Média alta, 4= Alta</i>	Técnicas:	1	1	superar barreiras
	Econômicas:	2	3	crédito disponível e de menor custo em face de elevado payback (mais de 12 anos)
	Financeiras:	2	3	
	Político-institucionais:			
	Outras:			
Externalidades (em relação à baseline)	Ambientais: Melhoria na qualidade do ar, aumento da eficiência e queda nas emissões.			
	Sociais: Melhoria da qualidade de vida da população nas áreas vizinhas, pela diminuição dos odores e particulados.			
	Econômicos: A cogeração depende do tamanho da planta e capacidade de oferta de gás de processos para alimentar a termoeletrica. Estima-se que sua implementação reduz a intensidade energética do aço e suas emissões de CO ₂ entre 10-20% dependendo da mistura de combustível usado.			
Referências bibliográficas:	Arcelor Mittal, 2013; Reference document for BATS in Iron and Steel Industry (2012)			
Nova Tecnologia				
Nome	Uso de Biomassa			
Descrição Geral	Substituição do uso de coque por carvão vegetal na razão de 1:2 (50%) na produção de sinter. Substituição do carvão pulverizado por carvão vegetal pulverizado no BOF (Basic Oxygen Furnace). A razão seria de 100kg de carvão vegetal pulverizado para 150kg de carvão mineral pulverizado por tonelada de metal líquido quente. Aplicado apenas para produção de aço em altos fornos de grande porte.			
Método de Projeção	Produção média de 35 toneladas por hectare de eucalipto, razão de conversão de Eucalipto para carvão vegetal de 33%. Produção de sinter: Carvão vegetal pulverizado (50%) e Finos de Coque (50%) BOF: 100kg de carvão vegetal para cada 150kg de carvão mineral. Demanda por 142 kg de carvão vegetal por tonelada de aço.			
Região	Brasil (Estima-se 460 mil hectares de áreas adicionais para toda a Indústria)			
Nível de utilização da tecnologia		Cen. Ref.	Nível mínimo	Nível Máximo
	2020	5 mil ha	1 mil ha	15 mil ha
	2025	10 mil ha	5 mil ha	30 mil ha
	2030	30 mil ha	20 mil ha	45 mil ha
	2040	100 mil há	70 mil há	150 mil ha
2050	200 mil	150 mil	300 mil ha	
Investimento (R\$/unidade) Data do câmbio: 2013	Sistema 1 – Produção de carvão vegetal com fornos cilíndricos parabólicos e toras de 2 metros; Sistema 2 – Produção de carvão vegetal com fornos RAC e toras de 6 metros. Sistema 1 - custo de produção de 141,88 R\$/ton. Sistema 2 – custo de produção de 80,76 R\$/ton. Sem transporte para a indústria e beneficiamento (preparo, tritura para granulometria adequada para queima).			

Elementos de custo	Processo	Custo Sistema I	Custo Sistema II	
	Implantação	48,74	48,74	
	Manutenção	41,97	41,97	
	Colheita	84,08	33,50	
	Transporte	49,93	49,93	
	Carbonização	146,40	80,76	
	Expedição e Frete	101,75	101,75	
	Impostos	52,50	32,43	
	Outros	47,60	35,97	
	Total:	568,46	425,06	
Interrelação com outros setores	Agropecuário e AFOLU			
Dificuldade de penetração <i>Avaliação: 1= Baixa, 2= Média baixa, 3= Média alta, 4= Alta</i>		Grau de Dific.	Barreiras	Instrumentos para superar barreiras
	Técnicas:	2	2	Dificuldade operacional
	Econômicas:	2	3	Inexistência de mercado de carbono não motiva sua adoção.
	Financeiras:	1	1	
	Político-institucionais:	1	1	Pode haver interesse por favorecer o desenvolvimento do agronegócio.
Outras:				
Externalidades (em relação à baseline)	Ambientais: reduções de emissões da ordem de 10% para todo o processo de produção de aço. Redução no consumo de coque.			
	Sociais: distribuição de renda por contratos e parceria com produtores rurais, negociação e comercialização de eucalipto com produtores rurais, instalação de fornos para produção de carvão vegetal.			
Referências bibliográficas:	MOTA, C.M., Fabrícia (2013) ANÁLISE DA CADEIA PRODUTIVA DO CARVÃO VEGETAL ORIUNDO DE Eucalyptus sp. NO BRASIL.			
	ABREU, G. C., CARVALHO JR, J. A., SILVA, B. E. C., PEDRINI, R. H..Operational and environmental assessment on the use of charcoal in iron ore sinter production. Journal of Cleaner Production 101 (2015) 387-394. Elsevier, 2015. Visualized in 15/12/2015, at the web address: < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615003583 >			
Nova Tecnologia				
Nome	Hlsarna			

Descrição Geral	Um processo SR desenvolvido pela ULCOS (Ultra-low CO2 Steel making), é a produção de ferro-gusa em dois estágios, o que dispensa o uso de sínter ou coque. O carvão mineral e o minério de ferro são utilizados juntos no primeiro estágio, eles passam por um forno ciclone conversor que fica posicionado acima do vaso de redutor de fundição, segundo estágio. O processo opera com oxigênio puro, os gases de exausto tem um teor de CO2 quase puro o suficiente para ser armazenado (BIRAT, 2010 e ESEC, 2014).			
Método de Projeção	A sua penetração no Brasil dependerá do sucesso da adoção de sua tecnologia no exterior.			
Região	Brasil			
Nível de utilização da tecnologia		Cen. Ref.	Nível mínimo	Nível Máximo
	2040	1 planta	2 milhões de toneladas de capacidade instalada	5 milhões de toneladas de capacidade instalada
Investimento (US\$/unidade) Data do câmbio:2015	CAPEX - Os custos da instalação da planta industrial ficam em torno de R\$466,33 por tonelada de capacidade instalada.			
Elementos de custo	Menor intensidade energética na produção de Aço. Consumo energético de 12.2 GJ/tonelada			
Interrelação com outros setores	Indústria química			
Dificuldade de penetração <i>Avaliação: 1= Baixa, 2= Média baixa, 3= Média alta, 4= Alta</i>		Grau de Dific.	Barreiras	Instrumentos para superar barreiras
	Técnicas:	3	3	Operação de planta comercial no futuro
	Econômicas:	2	3	Inexistência de mercado de carbono não motiva sua adoção.
	Financeiras:	1	1	
	Político-institucionais:	1	1	
	Outras:			
Externalidades (em relação à baseline)	<p>Ambientais: Intensidade energética menor 12.2 GJ por tonelada, ocorre uma vantagem ambiental, pois, seus gases de exausto tem teor baixo de contaminantes, o que favorece sua captura e armazenamento. Por outro lado, sem captura de carbono, as emissões são reduzidas em 20%, já com a captura do carbono as emissões são reduzidas em 80% em relação ao método tradicional integrado com uso de coque e sínter no processo.</p> <p>Econômicos: A melhor eficiência energética deve reduzir os custos de produção favorecendo sua adoção, entretanto os gastos por oxigênio puro podem dirimir os ganhos decorrente da menor pegada energética.</p>			
Referências bibliográficas:	Energy Technology Perspective 2015. IEA Ultra Low CO2 Steel making – ULCOS <www.ulcos.org>			

8. Referências

- De Paula, Germano Mendes. Produção Independente de Ferro-gusa (“Guseiros”). Núcleo de estudo de economia de baixo carbono – Instituto de Economia, UFU, 2014.
- Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados. Celulose e Papel. Série documentos técnicos setembro 2013 – nº 20. CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2013.
- Energy Technology Perspectives 2015 – Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action. International Energy Agency, 2015. Disponível em: www.iea.org
- EPE, Balanço Energético Nacional, 2010, 2015, 2016. Empresa de Pesquisa Energética. Disponível em: www.epe.gov.br
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Fulp and Paper Capacities: survey 2014-2019. Roma, 2015. Disponível em: www.fao.org
- Fuentes Coelho, Maritzel R. e Coelho, Márcio H.. PANORAMA DA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL NO BRASIL: 2001 a 2011. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 43, n. 3, p. 463 – 474, jul. / set. 2013.
- Hasanbeigi, Ali and Price, Lynn. Emerging Energy-efficiency and Carbon Dioxide Emissions-reduction Technologies for the Iron and Steel Industry. China Energy Group. Energy Analysis and Environmental Impacts Department, Environmental Energy Technologies Division – Lawrence Berkeley National Laboratory, January 2013.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE – SIDRA – Sistema IBGE de recuperação automática. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br>
- Industrial Efficiency technology database. Institute for industrial productivity. Disponível em: <http://ietd.iipnetwork.org/>
- IPPC – Integrated Pollution Prevention and Control, 2001. Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry. Dezembro, 2001.
- La Rovere, Emilio L. e Wills, Williams. ESTUDO 61: INDÚSTRIA DE CIMENTO. Perspectivas dos investimentos sociais no Brasil, 2010.
- Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor Alimentos e Bebidas. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.
- Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor Cerâmico. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.
- Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor Cimenteiro. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.
- Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor Extrativo Mineral. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.
- Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor Não Energo Intensivas. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.

Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor ferro-ligas. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.

Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Não Ferrosos. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.

Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor Papel e Celulose. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.

Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria. Relatório Setorial – Setor Químico. Confederação Nacional da Indústria – Brasília, 2010.

Worrel E., Blinde, P., Neelis, M., Blomen, E., Masanet, E.. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Environmental Energy Technologies Division, October 2010.

Remus, R., Monsonet, A. M. A., Roudier, S., Sancho, L. D.. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Joint Research Center, 2013.

Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B. M, Roudier, S., Sancho, L. D.. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide. Emission reduction directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control) Joint Research Centre of the European Commission (2013)

SNIC, 2010. Press Kit 2009. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. Rio de Janeiro, RJ.

Subsídios para elaboração de uma estratégia industrial brasileira para uma economia de baixo carbono. Caderno 2 – Nota técnica Papel e Celulose. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2012.

Suhr, M. Klein, G. Kourti, I., Gonzalo, M. R., Santonja, G. G., Roudier, S., Sancho, L. D.. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Joint Research Institute, 2015.

Terceiro inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2014.

Worrell, E., Kermeli, K., Galitsky, C.. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers – August 2013. EPA Document Number 430-R-13-009.

9. Apêndice

9.1. Emissões de gases não CO₂ do consumo de combustíveis (energia)

Emissões do consumo de combustíveis	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Gg CH ₄								
Cimento	1,07	1,65	1,82	1,83	2,28	2,28	3,75	4,51
Ferro-gusa e aço	0,13	0,14	0,18	0,20	0,20	0,23	0,34	0,39
Ferro Ligas	0,12	0,08	0,09	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08
Mineração	0,34	0,36	0,44	0,57	0,51	0,33	0,41	0,45
Não ferrosos	0,17	0,18	0,15	0,15	0,14	0,16	0,20	0,23
Química	2,05	1,53	4,41	4,83	4,41	4,65	5,60	6,05
Alimentos e Bebidas	23,24	20,96	20,73	24,19	27,75	30,86	33,85	42,52
Textil	0,13	0,09	0,15	0,16	0,12	0,11	0,09	0,14
Papel e Celulose	2,53	2,56	2,55	3,07	3,53	4,43	5,72	7,61
Cerâmica	3,06	3,11	2,49	2,88	3,58	4,03	4,27	4,88
Outras indústrias	1,05	1,08	1,07	1,49	1,27	0,63	0,63	0,73
Total	33,90	31,75	34,07	39,44	43,86	47,81	54,94	67,60
Gg N ₂ O								
Cimento	0,12	0,15	0,15	0,15	0,17	0,17	0,22	0,26
Ferro-gusa e aço	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05
Ferro Ligas	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Mineração	0,06	0,07	0,07	0,09	0,09	0,06	0,07	0,08
Não ferrosos	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Química	0,19	0,18	0,21	0,24	0,24	0,27	0,34	0,39

Emissões do consumo de combustíveis	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Alimentos e Bebidas	3,52	3,20	3,08	3,61	4,19	4,74	5,25	6,62
Textil	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
Papel e Celulose	1,03	1,20	1,13	1,36	1,51	1,87	2,37	2,88
Cerâmica	0,42	0,43	0,34	0,40	0,49	0,56	0,59	0,68
Outras indústrias	0,27	0,28	0,27	0,34	0,31	0,22	0,24	0,26
Total	5,69	5,57	5,35	6,28	7,09	7,98	9,20	11,30

Nota: valores de eletricidade estão computados na geração (capítulo de oferta de energia)

9.2. Emissões de Processos Industriais

Processos Industriais (GgCO ₂ , GgCH ₄ e GgN ₂ O)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
GgCO ₂								
Indústria Mineral	30.694	32.292	33.635	35.724	35.796	37.454	47.324	54.254
Cimento	21.288	22.860	23.040	23.447	23.926	24.294	30.509	34.709
Cal(produção)	5.950	5.966	6.702	7.766	7.509	8.325	10.637	12.364
Calcário na siderurgia (uso)	2.851	2.888	3.249	3.810	3.672	4.105	5.257	6.101
Dolomita e cal em vidro (uso)	114	122	125	130	134	130	176	241
Dolomita no magnésio	95	79	89	102	98	112	140	156
Consumo de Barrila	396	377	430	469	457	488	605	684
Redutores								
Ferro Gusa e Aço	38.360	40.996	45.706	52.820	53.074	58.306	70.997	77.708
Carvão Vapor 5900	6.952	8.333	8.738	9.535	9.306	10.396	13.104	14.783
Coque de Carvão Mineral	31.245	32.503	36.783	43.068	43.562	47.680	57.605	62.601

Processos Industriais (GgCO ₂ , GgCH ₄ e GgN ₂ O)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
Outros Energéticos de Petróleo	163	161	185	217	206	231	287	325
Ferroligas	1.195	797	923	772	895	838	913	1.085
Coque de Carvão Mineral	493	321	287	240	278	321	345	391
Outros Energéticos de Petróleo	702	476	636	532	617	517	569	694
Não ferrosos	4.332	4.308	5.181	6.077	6.172	6.918	8.544	9.647
Carvão coqueificável	2.448	2.738	3.488	3.785	3.868	4.379	5.405	6.169
Outros Energéticos de Petróleo	1.884	1.570	1.693	2.292	2.303	2.539	3.139	3.478
Alumínio	2.543	1.277	2.270	2.601	2.490	2.848	3.550	3.966
Indústria Química	2.983	2.837	3.234	3.528	3.442	3.675	4.557	4.503
Produtos de Uso Não Energético	679	698	649	673	744	790	832	831
Total	80.787	83.205	91.600	102.195	102.614	110.829	136.718	151.996
Gg CH ₄								
Ferro-gusa e aço	28,60	24,36	26,74	36,59	35,99	40,56	53,43	63,42
Ferro Ligas	4,80	3,31	3,46	2,61	2,89	3,07	3,49	4,91
Não ferrosos	0,10	0,11	0,13	0,15	0,14	0,16	0,20	0,22
Indústria Química	11,91	10,73	12,23	13,34	13,02	13,90	17,23	17,03
Total	45,40	38,51	42,57	52,68	52,04	57,69	74,35	85,59
Gg N ₂ O								
Ferro-gusa e aço	1,08	1,02	1,12	1,39	1,35	1,50	1,91	2,19
Ferro Ligas	0,11	0,07	0,08	0,06	0,06	0,07	0,08	0,11
Não ferrosos	0,07	0,07	0,09	0,10	0,10	0,11	0,14	0,15
Indústria Química	0,93	0,89	1,01	1,10	1,08	1,15	1,42	1,61
Total	2,18	2,05	2,30	2,65	2,59	2,83	3,55	4,06

Processos Industriais (Gg outros gases)	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2050
CF4	0,08	0,04	0,07	0,08	0,07	0,08	0,10	0,12
C2F6	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
HFC-125	0,50	0,49	0,54	0,78	1,01	1,23	1,46	1,90
HFC-32	0,11	0,10	0,12	0,18	0,25	0,33	0,42	0,64
HFC-143a	0,47	0,46	0,52	0,76	1,00	1,23	1,46	1,91
HFC-134a	2,72	2,75	3,02	4,09	5,17	6,22	7,26	9,28
SF6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02