

# Sumários Executivos do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria no Estado de São Paulo 2030

## Síntese, Cal, Cimento, Química e Siderurgia



Governo do Estado de São Paulo  
Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente  
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento  
São Paulo, 2019



# Sumários Executivos do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria no Estado de São Paulo 2030

## Síntese, Cal, Cimento, Química e Siderurgia

1ª edição atualizada



Governo do Estado de São Paulo  
Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente  
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento  
São Paulo, 2019

## **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CETESB – Biblioteca, SP, Brasil)**

---

C418e CETESB (São Paulo)

Sumários executivos do estudo de baixo carbono para a indústria no estado de São Paulo de 2014 a 2030 [recurso eletrônico] : síntese, cal, cimento, química e siderurgia / CETESB ; Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) ; Autores Sérgio Almeida Pacca ... [et al.] ; Coordenação executiva Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer ; Coordenação técnica Sérgio Almeida Paccca ; Colaborador Maria Fernanda Pelizzon Garcia. – 1.ed. atual. – São Paulo : CETESB, 2019.

1 CD (106 p.) : il. color., PDF ; 18 MB.

Reúne 5 sumários executivos, que sintetizam os documentos que compõem o estudo de baixo carbono para a indústria no estado de São Paulo de 2014 a 2030.

Publicado também em Pen-drive.

Disponível também em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>

ISBN 978-85-9467-079-3.

1. Aquecimento global 2. Baixo carbono 3. Efeito estufa – gases 4. Indústrias 5. Mudanças climáticas 6. Tecnologia química 7. São Paulo (Est.) I. Pacca, Sérgio Almeida et al., Autor. II. Ferrer, Josilene Ticianelli Vannuzini, Coord. III. Título.

CDD (21. ed. Esp.) 363.738 748 161

CDU (2. ed. Port.) 504.7:661 (815.6)

---

Catalogação na fonte: Margot Terada CRB 8.4422

### **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**

Avenida Professor Frederico Hermann Jr., 345  
Alto de Pinheiros CEP 05459-900 São Paulo SP  
Tel.: (11) 3133 3000 Fax: (11) 3133 3402  
<http://www.cetesb.sp.gov.br>

© CETESB 2018

É permitida a reprodução total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte.  
Direitos reservados de distribuição.



## **GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO**

**Governador** João Doria

**Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente**

**Secretário** Marcos Penido

**CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo**

**Diretora-Presidente** Patrícia Iglecias

**Diretoria de Gestão Corporativa** Clayton Paganotto

**Diretoria de Controle e Licenciamento Ambiental** Zuleica Maria de Lisboa Perez

**Diretoria de Avaliação de Impacto Ambiental** Carlos Roberto dos Santos

**Diretoria de Engenharia e Qualidade Ambiental** Domenico Tremaroli

## **Ficha técnica**

### **Autores**

Sérgio Almeida Pacca  
Bruna Patrícia de Oliveira  
Jhonathan Fernandes Torres de Souza  
Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer  
Daniel Soler Huet

### **Revisão de texto**

Maria Cristina de Souza Leite

### **Projeto Gráfico e Diagramação**

Wilson Issao Shiguemoto  
Brainstorm – Arte em Comunicação  
Foto da capa Acervo CETESB/ BID

### **Colaborador**

Maria Fernanda Pelizzon Garcia

**Esta publicação reúne cinco Sumários Executivos, que sintetizam os documentos que compõem o Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Estado de São Paulo de 2014 a 2030.**

### **Relatório Síntese**

#### **Autores:**

Sérgio Almeida Pacca - Coordenação Técnica  
Jhonathan Fernandes Torres de Souza  
Bruna Patrícia de Oliveira  
Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer - Coordenação Executiva

### **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cal no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

#### **Autores:**

René Vogelaar  
Renato Vogelaar  
Bruna Patrícia de Oliveira  
Jhonathan Fernandes Torres de Souza  
José Milton de Freitas

### **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

#### **Autores:**

Kátia Regina Garcia Punhagui  
Vanderley Moacyr John  
Lidiane Santana Oliveira  
Bruna Patrícia de Oliveira  
Jhonathan Fernandes Torres de Souza

### **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

#### **Autores:**

René Vogelaar  
Renato Vogelaar  
Bruna Patrícia de Oliveira  
Jhonathan Fernandes Torres de Souza  
José Milton de Freitas

## **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Química no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

### **Autores:**

Obdúlio Diego Fanti

Roberto Strumpf

Natália Kurimori

Bruna Patrícia de Oliveira

Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Os Estudos sumarizados e reunidos nesta publicação foram realizados com recursos do Projeto BR T-1262: “Apoyo ao desenvolvimento de estudos de mitigación para o Estado de São Paulo”, provenientes da parceria entre o BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento e a CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

As opiniões e as conclusões expressas nesta publicação são de responsabilidade dos autores e não refletem necessariamente a posição da CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo e do BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento, de sua Diretoria Executiva ou dos países que eles representam.

O Banco Mundial, por meio de seu fundo de assistência técnica, ESMAP, apoiou o desenvolvimento deste estudo com a ferramenta Curva MAC e as informações que foram necessárias para sua utilização. A versão mais recente da referida ferramenta encontra-se no link <http://esmap.org/mactool> (acesso em 01/03/2019).

### **Agradecimentos**

Expressamos nossos sinceros agradecimentos ao Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) pela parceria e acompanhamento do trabalho desenvolvido. Agradecemos à equipe do BID pelas providências necessárias para que o estudo fosse concluído e pelas revisões e sugestões que resultaram no aprimoramento do trabalho, em especial Luciano Schweizer, Maria Netto, Simone Bauch, e aos prestadores de serviço do BID que apoiam este estudo, Mônica Conceição, Rogério Lessa da Paixão, Andreza Leodido e Sarah Rodrigues da Cunha Irff.

Salientamos nosso reconhecimento ao Banco Mundial, por meio de Christophe de Gouvello e do seu fundo de assistência técnica, ESMAP, que apoiou o desenvolvimento deste estudo com a ferramenta Curva MAC e as informações que foram necessárias para sua utilização.

Destacamos e agradecemos as contribuições dos colegas da SIMA e CETESB para as revisões técnicas dos estudos originais: Oswaldo Lucon, Carlos Lacava, Maria Cristina Poli, Margot Terada, Milton Norio Sogabe, Maria Heloisa Assumpção, Eduardo Serpa e Marta Emerich. Agradecemos ao Departamento de Comunicação Social da CETESB pelo apoio na revisão da redação, em especial à Núbia Rejane dos Santos Lentz e Maria Cristina de Souza Leite.

A todos os envolvidos neste projeto, nossos mais sinceros agradecimentos.



# **Sumário**

Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Estado de São Paulo - 2030 - Relatório Síntese .....	15
Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cal no Estado de São Paulo - 2030.....	33
Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo - 2030.....	49
Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Química no Estado de São Paulo - 2030.....	67
Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo - 2030.....	87



# Apresentação do Secretário

O ano é 2019, comemoramos 10 anos da Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), promulgada por meio da Lei nº 13.798, e para marcar esta data publicamos o documento “Sumários Executivos do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria no Estado de São Paulo - 2014 a 2030: Cal, Cimento, Química, Siderurgia e Síntese”.

Elaborado sob a coordenação da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), com o apoio do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), e a participação de especialistas convidados, o presente estudo contém sumários técnicos de documentos complexos que apresentam cenários tecnológicos de baixo carbono para importantes setores da indústria paulista e analisa os custos e as oportunidades na implantação de novas tecnologias de baixo carbono para cada um deles, além de traçar tendências e possibilidades para esses setores.

Este documento representa um marco, com conteúdo exploratório e propostas de ações voluntárias para cada um dos setores analisados. É o resumo de uma parceria com o BID, que agregou profissionais de várias instituições e empresas e foi submetido a um processo de consulta pública, com a participação de especialistas dos setores. Nossa objetivo é que esta publicação venha contribuir com a implementação dos objetivos da Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), articulando o conhecimento de diferentes instituições e órgãos do governo paulista, para o desenvolvimento de estudos e projetos que contribuam com a construção de capacidades para as ações futuras no âmbito do estado de São Paulo.

**Marcos Penido**  
Secretário de Infraestrutura e  
Meio Ambiente do Estado de São Paulo



# **Apresentação da Diretora-Presidente**

O “Projeto de Desenvolvimento de Estudos de Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) para o Estado de São Paulo”, coordenado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), constitui uma importante ferramenta para a promoção de uma economia mais sustentável e de baixo carbono. Realizado em parceria com o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e a participação de especialistas, o estudo traçou uma linha de base das emissões de GEE para o ano de 2014 e projetou um cenário exploratório para 2030, tendo em conta os setores mais significativos para o estado em termos de emissões de GEEs. Com isso, o projeto avaliou inúmeras possibilidades de tecnologias de baixo carbono e respectivos custos possíveis de implantação.

Esse documento reúne cinco sumários executivos de estudos completos e publicados recentemente, o sumário do documento síntese e dos seguintes setores: cal e cimento, química, siderurgia. Apresenta resultados exploratórios e inovadores, de relevância técnica e institucional, com o objetivo de tornar esse conteúdo mais acessível, contribuindo para a disseminação de conhecimento especializado, ao mesmo tempo em que incentiva que outros atores do Estado possam traçar políticas, apoiando os esforços voluntários para a mitigação das emissões de GEE.

A parceria entre a CETESB e o BID, se enquadra no esforço da agência ambiental de gerar informações e fomentar o desenvolvimento da indústria de baixo carbono, na busca por soluções estratégicas em apoio à Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), que já está em vigor há 10 anos, contribuindo com o esforço de promover a redução da intensidade de carbono associada ao desenvolvimento do Estado, sem com isso comprometer as metas de crescimento da indústria.

**Patrícia Iglecias**  
Diretora-Presidente da CETESB



# Apresentação do Representante do BID no Brasil

O Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) aprovou, na sua Assembleia de Governadores de 2016, a meta de dobrar o financiamento a projetos relacionados com a mudança do clima, os quais devem responder a 30% das aprovações do Grupo BID até 2020. A meta está sujeita à demanda por parte dos países membros, dos seus clientes e do acesso a fontes externas de financiamento, mas trata-se de uma diretriz fundamental para a nossa atuação na região. Dessa maneira, o BID reforça o seu papel de atuar estrategicamente na mitigação dos impactos ambientais e efeitos da mudança climática e está focado nos projetos que podem ajudar os países da América Latina e Caribe a implementar seus compromissos adotados na Conferência das Partes (COP 21), realizada em 2015, em Paris.

A parceria entre o BID e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) no “Projeto de Desenvolvimento de Estudos de Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) para o Estado de São Paulo” se enquadra no esforço do Banco em orientar e instrumentalizar o desenvolvimento da indústria de baixo carbono. As informações coletadas a partir da ferramenta *MACTool* — Curva de Custo Marginal de Abatimento — mostraram alternativas tecnológicas e possibilidades claras de reduções no futuro baseadas no manejo eficiente de insumos — principalmente no emprego da energia — apresentando oportunidades de redução de emissões de GEE, redução de custos e aumento de produtividade.

O apoio do BID ao Estado de São Paulo, por meio da CETESB, busca trazer soluções estratégicas em resposta à Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), e contribui para seu esforço de promover a redução da intensidade de carbono associada ao desenvolvimento do Estado, sem com isso comprometer as metas de crescimento da indústria.

Essa parceria representa uma experiência de extrema importância técnica e institucional, de caráter pioneiro. A presente publicação compartilha os resultados deste processo de cooperação técnica, e nos permite contribuir com a disseminação de conhecimento relevante e inovador para que outros atores do Brasil e da América Latina e Caribe possam igualmente contar com as bases adequadas para seus esforços de mitigar os efeitos da mudança do clima.

**Hugo Florez Timoran**  
Representante do BID no Brasil





# **Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Estado de São Paulo**

## **2030**

### **Relatório Síntese**



# **Lista de abreviaturas e siglas**

<b>a.a.</b>	ao ano
<b>ABAI</b>	Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas
<b>ABCP</b>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<b>ABESC</b>	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABRAMAT</b>	Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção
<b>BECP</b>	Preço de Equilíbrio de Carbono ( <i>Break-Even Carbon Price</i> )
<b>BEN</b>	Balanço Energético Nacional
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desenvolvimento
<b>CAPEX</b>	Investimento em Bens de Capital ( <i>Capital Expenditure</i> )
<b>CETESB</b>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<b>CH</b>	Cal Hidratada
<b>CP</b>	Cimento Portland
<b>CBIC</b>	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
<b>CDR</b>	Combustível Derivado de Resíduos
<b>CNI</b>	Confederação Nacional da Indústria
<b>DNIT</b>	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>IBÁ</b>	Indústria Brasileira de Árvores
<b>IBS</b>	Instituto Brasileiro de Siderurgia
<b>ICMS</b>	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
<b>IPI</b>	Imposto sobre Produtos Industrializados
<b>INDC</b>	<i>Intended Nationally Determined Contribution</i>
<b>MAC</b>	Custo Marginal de Abatimento ( <i>Marginal Abatement Cost</i> )
<b>MCT</b>	Ministério da Ciência e Tecnologia
<b>MME</b>	Ministério de Minas e Energia
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NDC</b>	Nationally Determined Contribution
<b>PAC</b>	Programa de Aceleração do Crescimento
<b>PEMC</b>	Política Estadual de Mudanças Climáticas
<b>Sabesp</b>	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
<b>SGT</b>	Superintendência de Gestão Tarifária
<b>Sinaproclim</b>	Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento
<b>SNIC</b>	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
<b>TIR-Benchmark</b>	Taxa de Atratividade
<b>WBCSD</b>	Conselho Mundial de Negócios para o Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development)

## Listas de símbolos

**CO<sub>2</sub>** dióxido de carbono (gás carbônico)

**Gg** gigagrama

**GJ** gigajoule

**kWh** quilowatt-hora

**m<sup>3</sup>** metro cúbico

**MPa** megapascal

**Mt** megatonelada

**PJ** petajoule

**t** tonelada

**TJ** terajoule

**E**m 2011, foi realizado o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo: Período 1990 a 2008, que apresentou emissões para os setores, que incluem processos industriais e uso de produtos, energia, agropecuária, uso da terra, mudança do uso da terra e florestas e resíduos sólidos e efluentes líquidos, para o período de 1990–2008. As emissões de GEE do Estado de São Paulo foram aproximadamente 0,14 GtCO<sub>2</sub>e e os processos industriais foram responsáveis por 14,7%, no ano de 2005 (CETESB, 2011). Adicionalmente, o setor de energia é responsável por 57,2% das emissões do estado em 2005, onde, desse total, 29,4% corresponde ao consumo energético do setor industrial (CETESB, 2011).

O “Estudo de baixo carbono para a indústria do Estado de São Paulo de 2014 a 2030” contribui com a disponibilização de análises de alternativas de baixo carbono para os setores de cal, siderurgia, química e cimento. Ressalta-se que, diferentemente dos inventários que separam as emissões de processos industriais e de energia, este estudo inclui as emissões decorrentes do consumo de energia pela indústria, visto que a energia subsidia esses setores para que as atividades ocorram, ou seja, é parte do sistema produtivo. De acordo com os parâmetros adotados, algumas escolhas preconizadas pelo estudo, demonstram que suas aplicações podem resultar em um potencial de mitigação com condições favoráveis de implementação.

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos e complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócioeconômico e mudança tecnológica, cuja evolução é incerta. As alternativas estudadas de redução de emissão foram analisadas a partir de cenários de referência e de baixo carbono considerando as emissões de GEE dos processos, do consumo

de energia e a avaliação de custos associados às alternativas de mitigação.

Os resultados apresentam alternativas de baixo custo que poderiam implicar em reduções substanciais sem comprometer a competitividade da indústria paulista. Os cenários colaboram na identificação das possíveis ameaças, avaliam as competências organizacionais e exercitam o pensamento global para desenvolver alianças e ações estratégicas, proporcionando a elaboração de análises alternativas. Portanto, não se trata apenas de prospecção, mas de construção de um futuro possível, auxiliando a construir as mudanças desejadas para o futuro (WRIGHT, 2008 *apud* MENDONÇA, 2011).

A partir dos cenários, o estudo avaliou economicamente medidas e tecnologias que visam à redução das emissões de GEE, apresentando os Custos Marginais de Abatimento (*Marginal Abatement Cost – MAC*) e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even Carbon Price – BECP*) de cada oportunidade. Os cenários exploratórios no presente estudo foram projetados de 2014 a 2030, tendo como base o ano de 2013, e foram construídos baseados na análise de dados históricos, nas informações apresentadas em publicações dos setores analisados e em informações atribuídas pelos autores. As reduções de emissões proporcionadas ao longo do período analisado por cada opção tecnológica foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*), que representa os potenciais de mitigação de cada alternativa.

Tendo em vista uma região em que se objetiva a redução de emissões, observa-se que nem sempre todos os setores apresentam sistemas produtivos com o mesmo nível de competitividade ou potencial de redução. Dessa forma, é fundamental estimar os custos associados e o potencial das tecnologias para que se possa atingir os objetivos de redução de forma economicamente mais atrativa. Não obstante, o resultado

final, considerando as medidas de baixo carbono, e as premissas adotadas no estudo, para os setores que o estudo abordou, indica um custo médio ponderado negativo de US\$ 29,15/tCO<sub>2</sub> atrelado a um cenário potencial de mitigação estimado em 78,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> até o ano de 2030<sup>1</sup>.

## ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

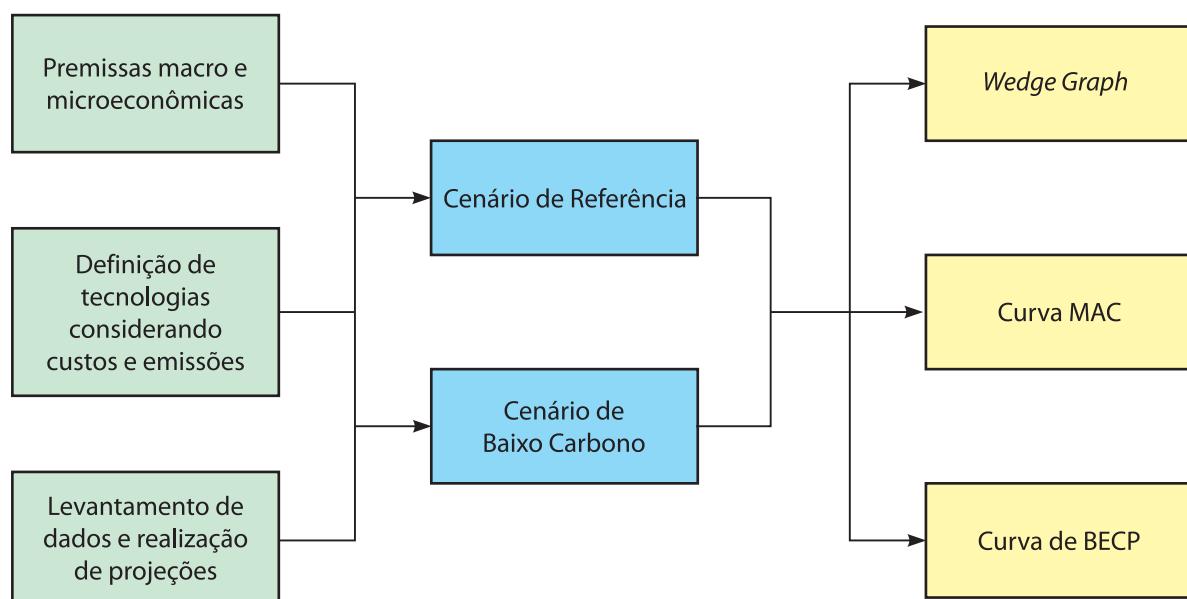
A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, no qual foram contactadas empresas e especialistas do setor para o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente, foram propostos os cenários de referência (CR) e baixo carbono (CBC) e apresentados os resulta-

dos MAC, BECP e o *Wedge Graph* (Gráfico de Cunhas) com os potenciais de mitigação.

As emissões de GEE foram estimadas pelo método apresentado no guia do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2000b), o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Essas estimativas consideraram dados de atividade, como produção ou energia consumida e o respectivo fator de emissão (FE).

A abordagem na determinação do MAC e do BECP<sup>2</sup> foi incremental e teve como referência o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil (GOUVELLO *et al.*, 2010). Para a construção das curvas de MAC e BECP empregou-se a ferramenta MACTool que, de acordo com *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento necessário para um crescimento de

**Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo**



Fonte: Pacca *et al.* (2017).

1. Existem questões relacionadas, como por exemplo, a logística (custos diretos e indiretos) de implementação de tecnologias, que não estão sendo incorporadas neste estudo.
2. O preço de equilíbrio de carbono indica o incentivo econômico que os agentes econômicos, como por exemplo, a indústria, necessitariam para que a medida de mitigação proposta se tornasse atrrente, quando comparada à referência. Este preço é determinado da mesma forma que o custo marginal de abatimento, porém utilizando uma taxa de atratividade (TIR) setorial. Usualmente, o *benchmark carbon price* é apresentado graficamente da mesma forma que a Curva MAC (GOUVELLO *et al.*, 2010).

baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços. Como entradas, a MACTool utiliza valores chave para caracterizar as medidas de mitigação e para as variáveis macroeconômicas, devendo o usuário especificar pelo menos um cenário sobre o futuro macroeconômico incluindo as variáveis de interesse, tais como o preço dos combustíveis fósseis e a demanda futura, e também fornecer cenários de adoção futura de tecnologias ou medidas de baixo carbono para uma linha de base e pelo menos uma via de redução de emissão (FAY *et al.*, 2015).

Para aferir quantitativamente o potencial de redução das emissões de GEE de cada tecnologia, são produzidas figuras que apresentaram cunhas de mitigação (*Wedge Graph*). Essas cunhas resultam da comparação entre o CR e o CBC com a implantação das respectivas tecnologias. Com essa informação foi possível visualizar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação de GEE.

## RESULTADOS

Nessa seção, são apresentados os resultados no período de 2014 a 2030, para os parâmetros adotados neste estudo, como a evolução da produção industrial no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões do CR e CBC, os custos de investimentos, as emissões evitadas por cada medida nos cenários, o custo marginal de abatimento (curva MAC) e o BECP das tecnologias.

### A EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO NO ESTADO DE SÃO PAULO

Em comparação com outros estudos, que geralmente atrelam o futuro a um cenário macroeconômico único, neste estudo os cenários de evolução da produção física dos setores são distintos

e foram caracterizados de acordo com as perspectivas dos especialistas de cada setor. Sendo assim, houve casos em que a produção futura terá um decréscimo, como o caso do setor da cal.

No setor da cal, foi considerada uma redução futura da produção da cal hidratada para construção civil, uma vez que ocorre uma migração da argamassa feita em obra para a argamassa pronta em saco. Esta redução no volume, segundo o estudo, também ocorrerá pela substituição da cal por outros produtos químicos denominados incorporadores de ar (FREITAS; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato, 2017a).

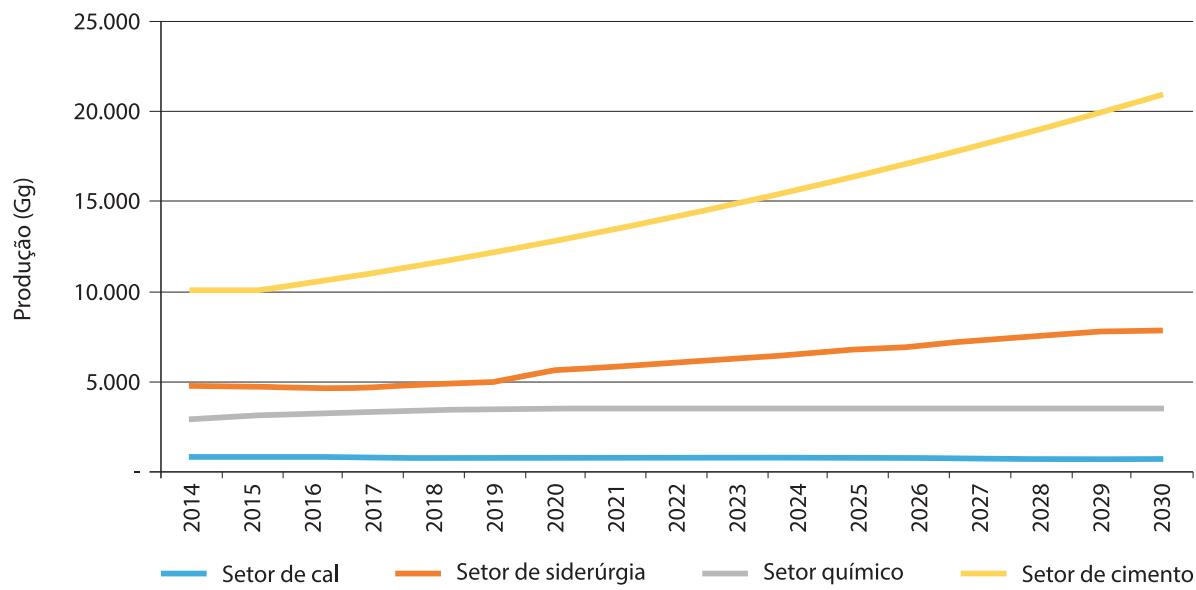
Já no setor de siderurgia, adotou-se que o crescimento da produção de aço ocorre a uma proporção constante de 1,5 em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Como exemplo, no ano em que o PIB brasileiro cresce 1,5%, a produção da siderurgia cresce 2,25%. Também foram consideradas ampliações na capacidade instalada da rota semi-integrada, que produz aço a partir da sucata de fornos elétricos a arco (FEA). Em 2015, entrou em operação a usina SIMEC em Pindamonhangaba, com 350 mil toneladas por ano. Até 2030, adotou-se que ainda haverá um aumento da capacidade de 850 mil toneladas por ano por meio da ampliação de duas usinas na rota semi-integrada (FREITAS; VOGELLAR, René; VOGELAAR, Renato, 2017b).

No setor químico, adotou-se uma taxa de crescimento de 3,7% a.a., mas que não haverá aumento da capacidade instalada no estado. Portanto, a produção crescerá até se estabilizar em 3,5 milhões de toneladas em 2025. Desse modo, o crescimento anual médio no período de 2014-2030 passa a ser de 1% a.a.. Esse é também o único setor em que a produção do CR difere do CBC, sendo que no CBC existe o incremento de 247 mil toneladas de bioeteno a partir de 2025 (FANTI *et al.*, 2017).

Por fim, no setor de cimento adotou-se uma taxa de crescimento de 5% a.a. a partir de 2016. Considerou-se que não haverá aumento da capacidade instalada por rota integrada. A produção por essa rota se estabilizará em 7,8 milhões de toneladas em 2019, a partir deste ano o aumento da produção se dará pela rota de moagem (PUNHAGUI *et al.*, 2017).

A partir do Gráfico 1, é possível observar a evolução e comparação dos cenários de produção para cada setor industrial do estudo. Os cenários de produção foram fundamentais para determinar os cenários de consumo de energia e os consequentes cenários de emissões de GEE no CR, e posteriormente no CBC.

**Gráfico 1 – Projeção da produção dos setores industriais abordados no estudo para São Paulo**



Fonte: Freitas, René Vogelaar e Renato Vogelaar (2017a, 2017b), Fanti *et al.* (2017) e Punhagui *et al.* (2017) apud Pacca *et al.* (2017).

## A evolução do consumo energético pelos setores pertencentes ao escopo do projeto

O consumo de energia projetado até 2030 para cada setor do estudo está apresentado na Tabela 1.

O consumo de energia tem grande peso na determinação do cenário de emissões de GEE, sobretudo pela composição da matriz energética de cada setor.

**Tabela 1 – Projeção do consumo de energia para a indústria de São Paulo**

Ano	Cal	Siderurgia	Química	Cimento	Total
	(TJ)				
2014R	4.405	24.529	71.332	19.014	119.280
2015E	4.408	24.707	73.923	18.684	121.723
2016E	4.374	24.191	76.609	19.680	124.854
2017E	4.340	24.736	79.324	20.952	129.353
2018E	4.307	25.478	81.579	22.290	133.653
2019E	4.238	26.242	82.648	23.698	136.826
2020E	4.241	30.743	82.742	24.077	141.803
2021E	4.209	31.896	82.808	24.582	143.496
2022E	4.177	33.092	82.877	25.091	145.237
2023E	4.146	34.333	82.947	25.601	147.028
2024E	4.149	35.621	83.021	26.112	148.903
2025E	4.119	36.957	83.023	26.625	150.723
2026E	4.088	38.342	83.023	27.147	152.600
2027E	4.024	39.780	83.023	27.673	154.500
2028E	3.962	41.176	83.023	28.205	156.365
2029E	3.900	42.426	83.023	28.745	158.093
2030E	3.841	42.681	83.023	29.299	158.843

Fonte: Freitas, René Vogelaar e Renato Vogelaar (2017a, 2017b), Fanti et al. (2017) e Punhagui et al. (2017) apud Pacca et al. (2017).

Nota: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

No caso do setor de cal, 100% do consumo de energia térmica são provenientes de lenha de reflorestamento (FREITAS; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato, 2017a). Por conta disso, foi assumido no CBC, que a eficiência energética nesse setor poderia ser utilizada para deslocar lenha para outros setores que ainda utilizam combustíveis fósseis, como o coque de petróleo.

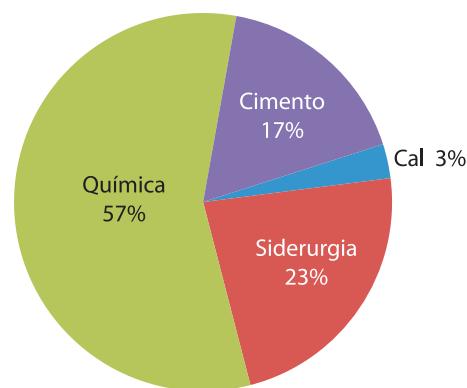
No setor de siderurgia, observa-se uma distinção entre a rota integrada e a semi-integrada. Na rota integrada a energia elétrica representa apenas 10% do total de energia consumida, já na rota semi-integrada ela representa 24% do total (FREITAS; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato, 2017b). Isso mostra que a rota semi-integrada é mais atrativa para receber oportunidades que envolvam eficiência elétrica.

No setor químico, apesar da diversidade de energéticos consumidos, observa-se que 49% da energia total correspondem à eletricidade e 39% ao gás natural. Existe uma grande relação entre esses dois energéticos, uma vez que é possível aproveitar a energia térmica do gás natural na cogeração de eletricidade, como foi avaliado no estudo setorial desenvolvido por Fanti et al. (2017).

No setor de cimento, apenas 8% do consumo energético é referente à eletricidade. Por isso e pelo fato do baixo FE da eletricidade frente ao FE do coque de petróleo, o combustível fóssil empregado nos fornos de cimento, as emissões de eletricidade tornam-se ínfimas, o que faz com que estratégias baseadas na eficiência elétrica sejam pouco atrativas para o setor.

No Gráfico 2, observa-se que o setor de química é responsável por 57% do total de energia

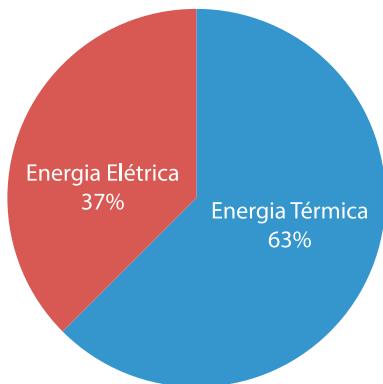
**Gráfico 2 – Consumo total de energia por setor 2014–2030**



Consumo total 2014-2030: 2.423.281 TJ  
Fonte: Pacca et al. (2017).

consumido no período, seguido pelo setor de siderurgia com 23%. Por sua vez, no Gráfico 3 é possível observar que a participação da energia térmica é de 63% do total, contra 37% da energia elétrica.

**Gráfico 3 – Participação da energia elétrica e térmica no total consumido 2014–2030**



Fonte: Pacca *et al.* (2017).

### A evolução das emissões da indústria paulista no cenário de referência

Na Tabela 2 são apresentadas as emissões setoriais de cal, siderurgia, química e cimento no CR no período de 2014 a 2030.

Considerando as emissões totais no período, a maior parcela das emissões se refere ao setor químico com 47%, seguido do setor de siderurgia com 32%, setor de cimento com 18% e, por último, o setor de cal com 2%.

Comparando o CR do ano de 2014 com o ano de 2030, observa-se uma redução de 13% nas emissões do setor de cal, um aumento de 51% no setor de siderurgia, um aumento de 34% no setor da indústria química, um aumento de 43% nas emissões provenientes do setor de cimento e um aumento de 40% considerando as emissões totais. Em termos absolutos, até 2030 estaria sendo emitido um total de 442,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

**Tabela 2 – Emissões estimadas do CR dos setores industriais no período de 2014 a 2030**

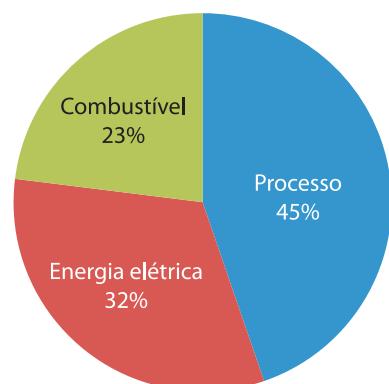
Ano	Cal	Siderurgia	Química	Cimento	Total
	(GgCO <sub>2</sub> e)				
2014R	588	7.078	9.976	3.758	21.400
2015E	589	6.830	10.333	3.676	21.428
2016E	584	6.581	10.841	3.874	21.880
2017E	579	6.728	11.345	4.137	22.790
2018E	575	6.929	11.825	4.413	23.742
2019E	566	7.136	12.152	4.702	24.556
2020E	566	7.737	12.289	4.746	25.338
2021E	562	8.026	12.439	4.817	25.844
2022E	557	8.326	12.590	4.886	26.359
2023E	553	8.637	12.740	4.953	26.883
2024E	554	8.960	12.873	5.018	27.404
2025E	549	9.294	13.011	5.080	27.935
2026E	545	9.642	13.148	5.141	28.476
2027E	536	10.002	13.267	5.200	29.005
2028E	528	10.366	13.404	5.257	29.555
2029E	520	10.701	13.395	5.313	29.928
2030E	512	10.725	13.385	5.367	29.989

Fonte: Freitas, René Vogelaar e Renato Vogelaar (2017a, 2017b), Fanti *et al.* (2017) e Punhagui *et al.* (2017) *apud* Pacca *et al.* (2017).

Nota: R - Dado Real. E - Dado Estimado

Em relação à origem das emissões, o Gráfico 4 apresenta a participação na emissão total do período 2014 a 2030. As emissões de processo se referem a 44,7%, sendo os outros 55,3% referentes à energia, tanto térmica como elétrica.

**Gráfico 4 – Participação das emissões de CO<sub>2</sub>e por origem no período 2014–2030**



Fonte: Pacca *et al.* (2017).

## Medidas de baixo carbono levantadas no estudo e o cenário de penetração

A Tabela 3 apresenta a lista das tecnologias e medidas de baixo carbono levantadas e avaliadas. Apresenta-se também um ano de início estimado da implementação das tecnologias e medidas, sendo que algumas delas possuem implantação pontual e hipotética, como a Captura e Armazenamento de Carbono (*Carbon Capture and Storage – CCS*) e a possibilidade de uma planta de bioeteno em 2025, enquanto que outras, possuem possível implantação gradual ao longo do período, como a substituição de fornos

Azbe por Maerz no setor de cal e a substituição da iluminação tradicional por lâmpadas LED no setor químico.

Em um período de curto prazo (2014–2019), dez das dezessete medidas poderiam ser implementadas em algum nível de penetração. Em médio prazo (2020–2024), mais três medidas poderiam ser implementadas, duas delas na parte de processos na indústria química e uma na rota semi-integrada em siderurgia. Já em um horizonte maior (2025–2030), mais quatro medidas poderiam ser implantadas, dentre elas o sistema CCS e o TGRBF-MDEA.

**Tabela 3 – Cenário de Baixo Carbono (CBC) na ferramenta MACTool**

Setor	Medida	Cenário de implementação
Química	Cogeração a gás natural	2016
	Substituição de iluminação tradicional por lâmpadas LED	2017
	Implementação de motores elétricos mais eficientes	2015
	Substituição de óleo combustível por lenha	2015
	Substituição de gás natural por lenha	2015
	Recuperação do gás de purga na amônia	2020
	Conversão catalítica de óxido nitroso ( $N_2O$ ) na produção de ácido nítrico	2023
	Produção de bioeteno (etenó a partir de etanol)	2025
Cal	<i>Carbon Capture and Storage (CCS)</i>	2025
	Substituição de forno Azbe por forno Maerz com lenha <i>in natura</i>	2018
	Substituição de forno Azbe por forno Maerz com lenha torrificada	2027
Siderurgia	<i>Top Gas Recovery Blast Furnace</i> metil-dietanolamina (TGRBF-MDEA)	2025
	Forno com alimentação contínua e preaquecimento da sucata (sistema CONSTEEL)	2017
	Fornos com corrente contínua (CC)	2022
Cimento	Substituição de combustíveis fósseis por combustível derivado de resíduos (CDR)	2016
	Substituição parcial de combustíveis fósseis por <i>pellets</i> de madeira	2016
	Aumento do teor de <i>filler</i> no cimento	2014

Fonte: Pacca *et al.* (2017).

## Emissões evitadas no cenário de baixo carbono

A mitigação das emissões de GEE é apresentada na Tabela 4. Considerando as premissas adotadas no estudo, conclui-se que, com a implantação das dezessete medidas analisadas, é possível gerar uma redução de 78,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, 18% das emissões totais no CR de 2014 a 2030.

O Gráfico 5 apresenta o *Wedge Graph* com a redução das emissões ao longo do período por medida de baixo carbono.

Do ponto de vista das medidas, a maior participação no total de emissões evitadas é da tecnologia TGRBF-MDEA no alto-forno da indústria siderúrgica, com 25%. Particularmente, o alto-forno está presente no processo produtivo por rota-integrada da usina siderúrgica e, no Estado de São Paulo, está presente ape-

nas em uma usina, a USIMINAS, sendo que a mesma teve o seu desligamento no final do ano de 2015 (FREITAS; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato, 2017b). Embora o alto-forno tenha sido desligado temporariamente, considerou-se no desenvolvimento do estudo a manutenção do funcionamento em todo o período. Uma análise realizada paralelamente mostrou que, se o alto-forno se mantiver desativado até o ano de 2030, considerando sua capacidade máxima de produção, deixariam de ser emitidas 104 milhões de toneladas CO<sub>2</sub> em um período de 15 anos. Isso representa 72% de toda a emissão do setor siderúrgico no CR, 24% considerando todos os setores.

Em segundo lugar, encontra-se a medida de cogeração na indústria química com 21% de participação nas emissões evitadas. Essa medida em especial apresenta um baixo valor de MAC como será visto a seguir, que aliado ao

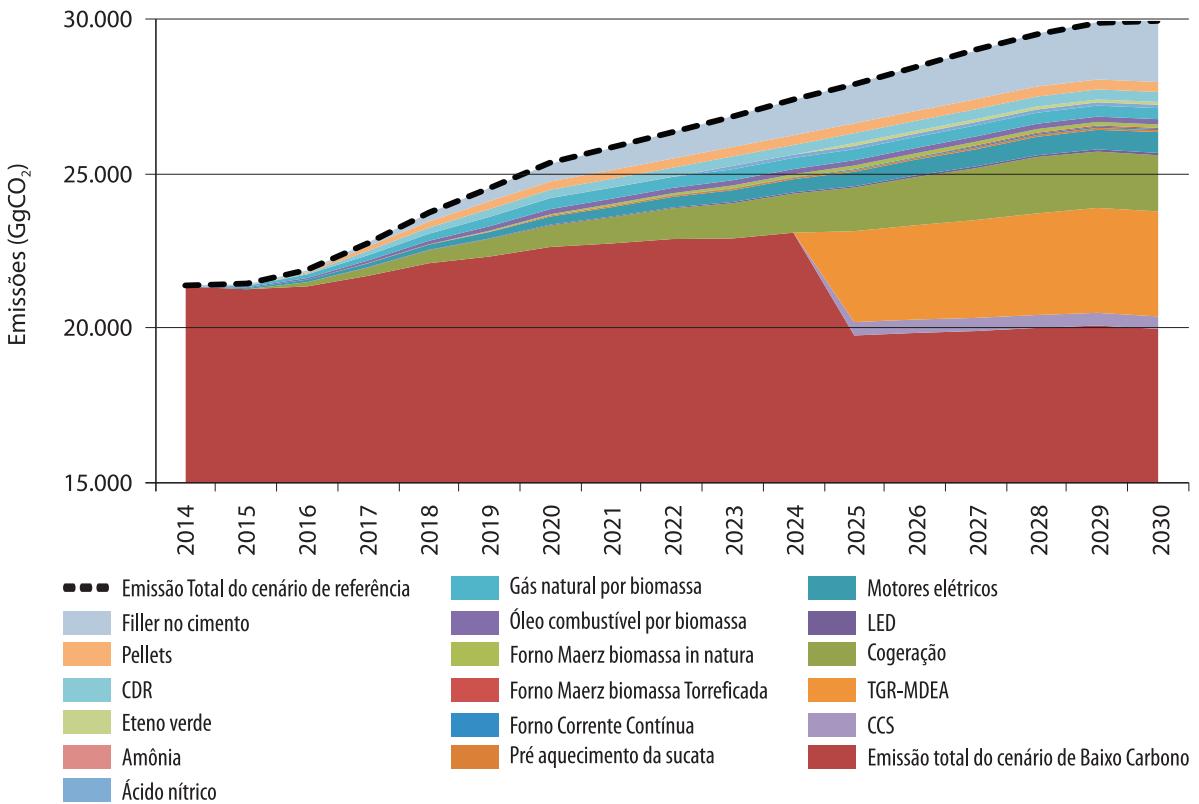
**Tabela 4 – Estimativas de emissões evitadas por setor no cenário de baixo carbono**

Ano	Emissões evitadas				Total das emissões CBC	Total das emissões CR
	Setor de cal	Setor siderúrgico	Setor químico	Setor de cimento		
(GgCO <sub>2</sub> )						
2014R	0	0	0	43	21.357	21.400
2015E	0	0	110	48	21.270	21.428
2016E	0	0	387	128	21.365	21.880
2017E	0	12	656	416	21.707	22.790
2018E	0	12	941	674	22.115	23.742
2019E	32	12	1.239	942	22.332	24.556
2020E	32	41	1.517	1.107	22.641	25.338
2021E	63	43	1.705	1.279	22.754	25.844
2022E	63	59	1.893	1.447	22.898	26.359
2023E	93	61	2.200	1.610	22.919	26.883
2024E	93	63	2.377	1.769	23.102	27.404
2025E	560	3.027	2.652	1.923	19.772	27.935
2026E	556	3.140	2.851	2.074	19.854	28.476
2027E	581	3.269	3.017	2.221	19.917	29.005
2028E	572	3.391	3.208	2.365	20.019	29.555
2029E	563	3.505	3.260	2.506	20.094	29.928
2030E	554	3.506	3.297	2.646	19.985	29.989

Fonte: Pacca *et al.* (2017).

Nota: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

**Gráfico 5 – Emissões evitadas pelas medidas de baixo carbono**



Fonte: Pacca et al. (2017).

seu potencial de redução pode gerar um volume de economia monetária consideravelmente alta.

Em terceiro lugar, encontra-se a medida de aumento de *filler* na indústria de cimento com 19% de participação nas emissões evitadas. Essa medida também apresenta MAC negativo e, portanto, gera economia quando comparado ao CR.

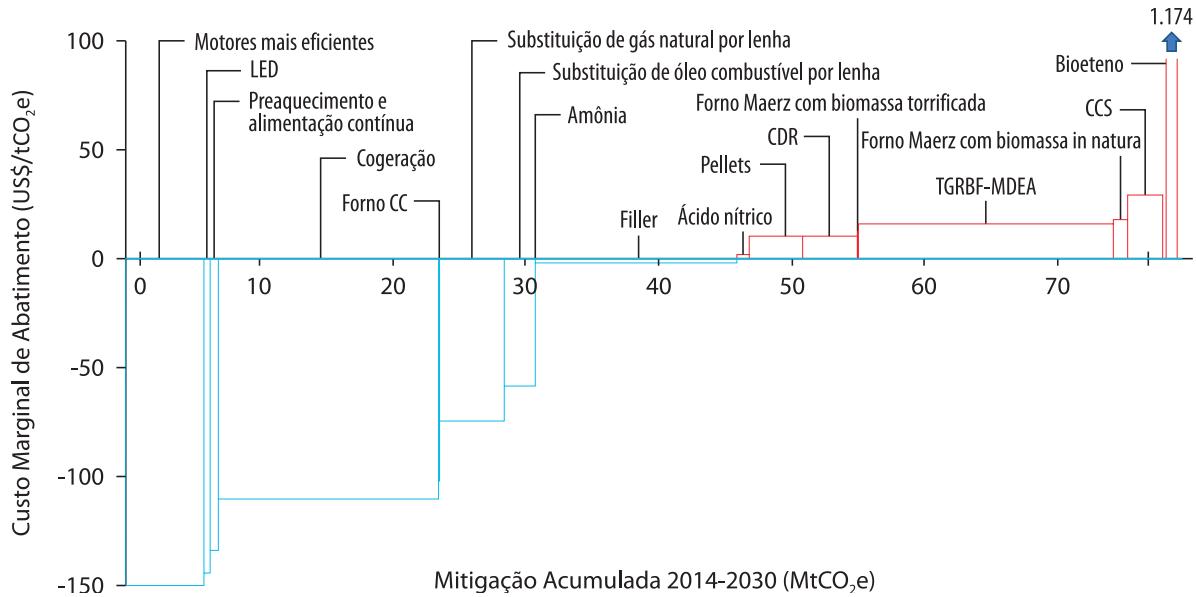
### Custo marginal de abatimento (curva MAC) e preço de equilíbrio do carbono das medidas de baixo carbono

O Gráfico 6 apresenta a curva MAC com as dezenove medidas avaliadas no estudo.

Na Tabela 5 são apresentadas 9 medidas para as quais o resultado econômico é negativo. Tais medidas são conhecidas como *no regrets*<sup>3</sup> ou seja, as medidas não apresentam um custo e até podem implicar em ganhos. Entre essas medidas destacam-se como as mais atraentes as medidas relacionadas com a redução no consumo de cimento e a redução no consumo de energia. Sendo que a quarta medida é a cogeração

3. “*No regrets*” (‘sem arrependimentos’ em tradução livre) é um termo da literatura especializada utilizada para se referir a medidas de redução de GEE cujos benefícios são iguais ou excedem os custos para a sociedade, fora os ganhos na questão das mudanças climáticas evitadas) (IPCC, 2016).

**Gráfico 6 – Curva de custo marginal de abatimento para os setores da indústria do Estado de São Paulo estudados**



Fonte: Freitas, René Vogelaar e Renato Vogelaar (2017a, 2017b), Fanti *et al.* (2017) e Punhagui *et al.* (2017) *apud* Pacca *et al.* (2017).

**Tabela 5 – Valores da curva MAC para a indústria do Estado de São Paulo**

Tipo de emissão	Medida	MAC	BECP	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(MtCO <sub>2</sub> )
Eletricidade	Motores mais eficientes	-150	-224	5,77
Eletricidade	LED	-145	-224	0,57
Eletricidade	Preaquecimento e alimentação contínua	-134	-288	0,61
Eletricidade	Cogeração	-111	-250	16,46
Eletricidade	Forno de corrente contínua	-102	-229	0,27
Combustível	Substituição de GN por lenha de reflorestamento	-75	-131	4,79
Combustível	Substituição de OC por lenha de reflorestamento	-58	-103	2,28
Processo	Amônia	-27	10	0,06
Processo e combustível	Filler	-2	-5	15,14
Processo	Ácido nitrico	2	31	0,84
Combustível	Pellets	10	23	4,03
Combustível	CDR	11	24	4,03
Combustível	Forno Maerz com biomassa torreficada	12	93	0,13
Processo	TGRBF-MDEA	16	95	19,27
Combustível	Forno Maerz com biomassa <i>in natura</i>	17	94	1,09
Processo	CCS	29	98	2,54
Processo	Bioeteno	1.174	3.907	0,54

Fonte: Freitas, René Vogelaar e Renato Vogelaar (2017a, 2017b), Fanti *et al.* (2017) e Punhagui *et al.* (2017) *apud* Pacca *et al.* (2017).

no setor químico, que também pode ser considerada como uma medida de redução das perdas energéticas.

Caso somente as medidas *no regrets* fossem adotadas, estariam sendo economizados US\$ 3,4 bilhões até o ano de 2030, com uma redução total de 45,95 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, 58,6% do potencial total de mitigação avaliado. Se a opção for por atingir o potencial total de 78,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, ainda assim seria gerado uma economia de US\$ 2,3 bilhões. Esses resultados econômicos totais variam se forem visualizados individualmente para cada setor.

Nos resultados do BECP, observa-se que poucas medidas mudam de posição em relação à ordem crescente de custo. No BECP, basicamente houve o aumento dos valores (em módulo) em relação à curva MAC, por conta das taxas de atratividade que para todos os setores são maiores que a taxa de desconto social adotada para o cálculo da MAC. Ao total, oito tecnologias de baixo carbono, consideradas pelo estudo em caráter exploratório, trazem uma taxa interna de retorno (TIR) acima do determinado como taxa de atratividade para o setor, portanto são investimentos atraentes. No caso das demais tecnologias, para que isso ocorra é necessário vender a tonelada de carbono pelo BECP levantado no estudo.

## CONCLUSÕES

O estudo abordou o potencial de mitigação existente nas ações referentes à eficiência energética, tanto térmica como elétrica; na substituição de combustíveis fósseis por renováveis; e, por fim, na introdução de medidas de captura, como o CCS e o TGRBF-MDEA. Trata-se de um estudo exploratório, inédito no estado com vistas ao desenvolvimento de baixo carbono da indústria paulista.

Dentre as dezessete medidas analisadas, nove apresentaram custo negativo, ou seja, a adoção das mesmas em detrimento do CR projetado seria benéfica. Considerando as premissas adotadas no estudo, todas as dezessete medidas para os quatro setores avaliados teriam o potencial de mitigar 78,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> até o ano de 2030.

Nesse contexto, o levantamento dos preços do carbono (MAC e BECP) podem assegurar que as opções de redução mais atrativas sejam adotadas com maior facilidade e que as organizações equalizem custos marginais de forma a se obter as condições necessárias para uma transição de baixo carbono. Contudo, deve-se lembrar que, além de considerar premissas, a curva MAC é datada para um ano de referência e um período específico. Nesse sentido, os resultados exploratórios deste estudo se caracterizam como uma contribuição para a discussão das possibilidades de mitigação para os setores estudados da indústria paulista.

Finalmente, destacam-se as limitações e dificuldades encontradas ao longo do período de execução deste documento, um dos seus principais objetivos foi identificar possíveis direções para um futuro de baixo carbono, tendo um recorte específico e exploratório, as indústrias de química, cal, cimento e siderurgia no Estado de São Paulo. Uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos, novos estudos deverão surgir para ampliar o escopo e aprofundar o caráter técnico, político, regulatório, social e ambiental dessas tecnologias de baixo carbono. Cabe ressaltar que o enfoque deste estudo foi a análise de tecnologias para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.

## REFERÊNCIAS

- CERQUEIRA, C. **The steel industry and its by-products for cement industries.** In: CBI BRAZIL & LATAM 2014 – BRAZILIAN AND LATIN AMERICAN CEMENT & LIME CONFERENCE. São Paulo, 6/02 2014.
- CETESB. **Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008:** Relatório de Referência. São Paulo, 2013. (1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo). Disponível em: <[http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro\\_inventario\\_setor\\_industria\\_web1.pdf](http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf)>. Acesso em: set. 2015.
- ESMAP. World Bank Group. **Modeling Tools and E-Learning: MACTool.** Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. 2016. Acesso em: 24 abr 2016.
- FANTI, O.D.; SOUZA, J.F.T. de; STRUMPF, R.; KURIMORI, N. **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Química no Estado de São Paulo 2014–2030.** São Paulo, 2017.
- FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T. **Decarbonizing Development. Three Steps to a Zero-Carbon Future.** Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.
- FREITAS, J.M. de; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato. **Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo 2014–2030.** São Paulo, 2017b.
- GOUVELLO, C. de et al. **Estudo de baixo carbono para o Brasil.**
- Washington, DC: Banco Mundial, 2010. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio\\_BM\\_Principal\\_Portugues\\_SumarioExecutivo.pdf](http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf)>. Acesso em: out.2015.
- IPCC. **Emission Scenarios. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III.** 2000a. 27p.
- IPCC. **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.** Hayama, JP, 2000b. Disponível em: <<http://www.ipcc-nppgiges.or.jp/public/english/>>. Acesso em mai de 2016.
- MENDONÇA, M.B. ANPAD. Técnicas de Prospecção e Análise de Cenários Futuros nos Governos e Administração Pública do Brasil: Revisão da Produção Científica Brasileira de 2001 a 2010. In: **V Encontro de Estudos em Estratégia.** Porto Alegre, 2011.
- MME. **Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM – 2030).** Brasília: MME, 2010.
- PACCA, S. A. et al. **Estudo de baixo carbono para a indústria de São Paulo: relatório síntese.** 1ª ed. 2017. São Paulo CETESB, 2017. 188 p.
- PUNHAGUI, K. R. S.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, J. F. T.; JOHN, V. M. **Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030.** São Paulo, 2017.
- SNIC. **Press Kit 2013.** SNIC, 2013. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/pdf/presskit\\_SNIC\\_2013\\_PB.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2013_PB.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2015
- SNIC. **Relatório anual 2013.** [s.l.] SNIC, 2014. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/relatorio\\_anual\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp)>. Acesso em: 1 jun. 2015

**WBCSD. CO<sub>2</sub> and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry – The Cement CO<sub>2</sub> and Energy Protocol – Version 3.0.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD\\_CO2\\_Protocol\\_En.pdf](http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD_CO2_Protocol_En.pdf)>. Acesso em: 11 nov. 2015.



The background of the image shows a large industrial facility, likely a cement or lime factory. It features several tall, white cylindrical silos connected by a network of pipes, ladders, and walkways. The structures are set against a clear blue sky. In the foreground, there are some green bushes and trees.

# **Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cal no Estado de São Paulo**

## **2030**



O presente sumário foi baseado no “Estudo de baixo carbono para a indústria de cal no Estado de São Paulo de 2014 a 2030”, o qual apresentou cenários de referência (CR) e de baixo carbono (CBC) considerando emissões de GEE de processo, de consumo de energia e avaliando alternativas de mitigação. No estudo foram apresentados os Custos Marginais de Abatimento (*Marginal Abatement Cost – MAC*) das tecnologias e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even Carbon Price – BECP*). As reduções de emissões estudadas ao longo do período analisado para cada opção tecnológica foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócioeconômico e mudança tecnológica, cuja evolução é altamente incerta. No entanto, os cenários são imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar e são ferramentas adequadas para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas, não apresentando relação com a probabilidade de ocorrência deles (IPCC, 2000a).

Os cenários colaboram na identificação das possíveis ameaças, avaliam as competências organizacionais e exercitam o pensamento global para desenvolver alianças e ações estratégicas, proporcionando a elaboração de análises alternativas. Portanto, não se trata apenas de prospecção, mas da construção de um futuro possível, auxiliando a construir as mudanças desejadas para o futuro (WRIGHT, 2008 *apud* MENDONÇA, 2011). Os cenários no presente estudo foram construídos com base na análise de dados históricos, nas informações apresentadas em publicações do setor e em informações atribuídas pelos autores.

No contexto mundial da indústria de cal o Brasil é responsável por 2,41% da produção mundial. Apesar dessa modesta participação percentual, o Brasil é o 5º maior produtor de cal, totalizando 8,42 milhões de toneladas em 2013, segundo dados fornecidos pela Associação Brasileira de Produtores de Cal (ABPC). A participação relativa do Estado de São Paulo na produção brasileira de cal é da ordem de 10%. De um modo geral, o Estado de São Paulo não possui reservas de calcário calcítico com a qualidade demandada pelo mercado industrial, sendo cerca de 70% do consumo aparente destinado ao segmento de cal de construção civil (ABPC, 2014).

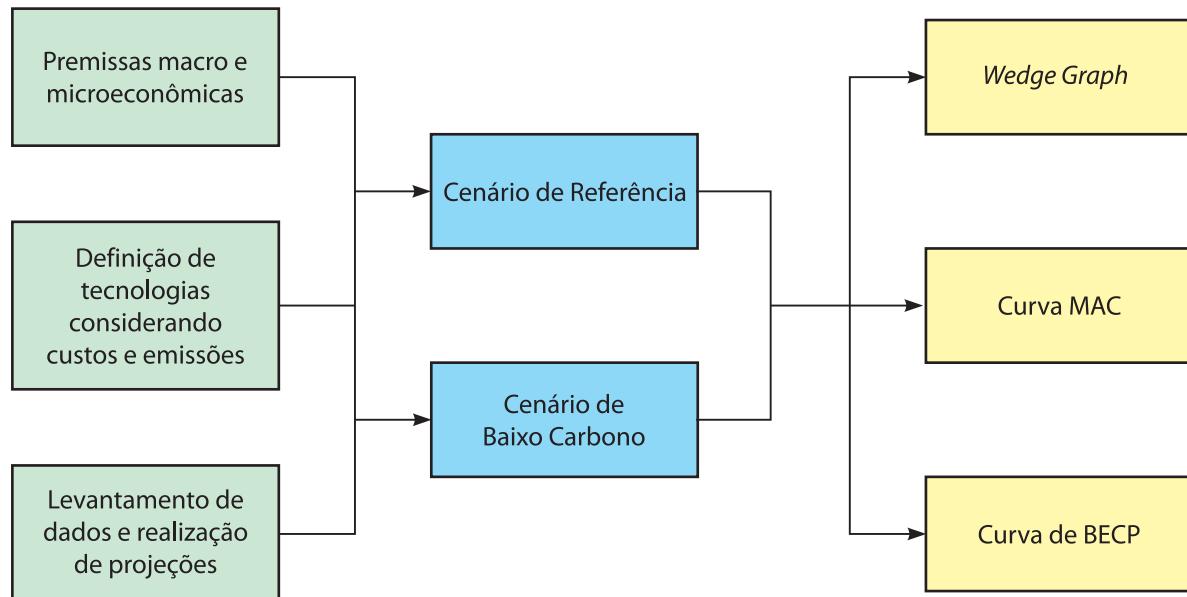
De acordo com o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo – Emissões do Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos de 1990 a 2008, em 2008, o setor de cal foi responsável por 4,65% das emissões de GEE provenientes de processos industriais no estado (CETESB, 2013). A maior parte das emissões do setor de cal ocorre durante o processo de transformação da rocha calcária em cal virgem, por meio do processo de calcinação de matéria-prima com a queima de combustíveis no interior do forno. Outras emissões estão relacionadas ao consumo de eletricidade nas fábricas.

## ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente seguiu-se com a realização dos cenários de referência (CR) e baixo carbono (CBC) e a apresentação dos resultados de mitigação, MAC e *Break Even*.

As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresentado no guia do Intergovernmental Panel on Climate

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo



Fonte: Pacca *et al.* (2017).

Change (IPCC, 2000b), o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Essas estimativas consideraram dados de atividade, como produção ou energia consumida e o respectivo fator de emissão.

A abordagem na determinação do MAC e do BECP<sup>4</sup> foi incremental e teve como referência o *Estudo de Baixo Carbono para o Brasil* (GOUVELLO *et al.*, 2010). Para a construção das curvas de MAC e BECP empregou-se a MACTool. De acordo com o Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços. Como entradas, a MACTool

utiliza os parâmetros chave para as medidas de mitigação e para as variáveis macroeconômicas, devendo o usuário especificar pelo menos um cenário sobre o futuro macroeconômico incluindo as variáveis de interesse, tais como o preço dos combustíveis fósseis e a demanda futura, e também fornecer cenários de futura inclusão de tecnologias ou medidas de baixo carbono para uma linha de base e pelo menos uma via de redução de emissão (FAY, *et al.*, 2015).

Para aferir quantitativamente a contribuição de cada tecnologia na redução das emissões de GEE, elaborou-se curvas que apresentaram cunhas de mitigação (*Wedge Graph*), referente à comparação entre o CR e o CBC com a implantação das respectivas tecnologias. Com esta informação foi possível visualizar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação de GEE.

4. O preço de equilíbrio de carbono indica o incentivo econômico que os agentes econômicos, como por exemplo, a indústria, necessitariam para que a medida de mitigação proposta se tornasse atraente, quando comparada à referência. Esse preço é determinado da mesma forma que o custo marginal de abatimento, porém utilizando uma taxa de atratividade (TIR) setorial. Usualmente, o BECP é apresentado graficamente da mesma forma que a Curva MAC (GOUVELLO *et al.*, 2010).

## RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados no período de 2014 a 2030 para a evolução da produção de cal no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões do CR e CBC, a evolução dos investimentos, as emissões evitadas por cada medida nos cenários, o custo marginal de abatimento (curva MAC) e o BECP das tecnologias.

### A evolução da produção de cal no Estado de São Paulo

O mercado de cal é dividido em dois principais segmentos: o da cal industrial, sendo normalmente denominado de forma genérica como o da cal virgem; e o outro segmento é o da cal para construção civil referente à cal hidratada.

Estima-se que a produção de cal no Estado de São Paulo será decrescente, uma vez que se considera que a produção da cal industrial (cal virgem) permanecerá estável no período

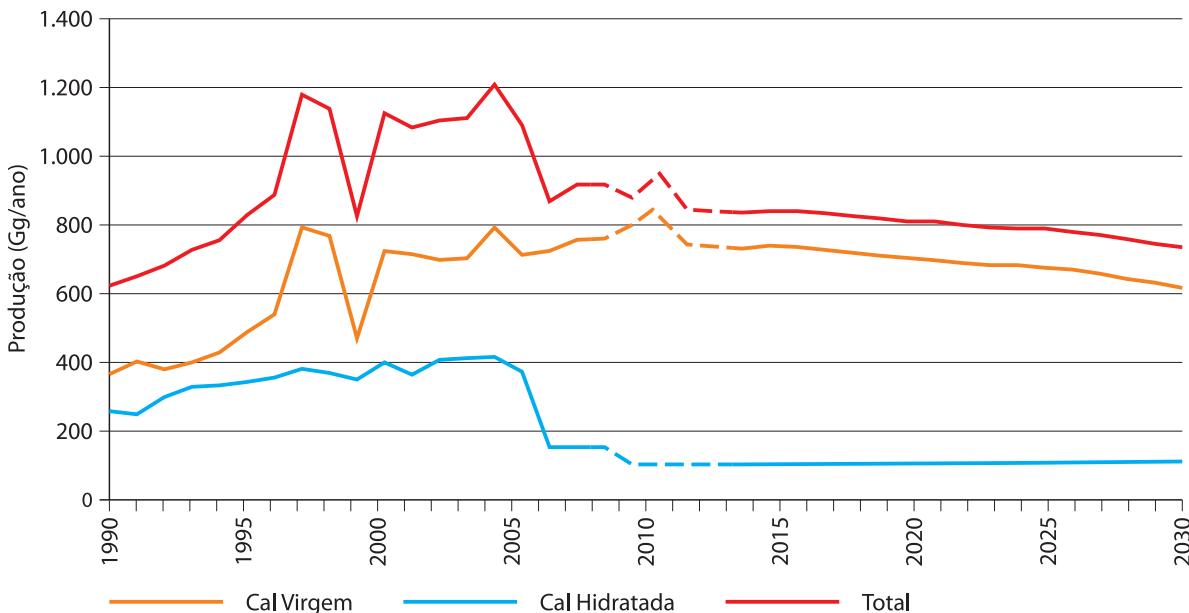
estudado, enquanto a produção de cal hidratada será reduzida ao longo do tempo.

Essa redução se dá devido à tendência de que a argamassa virada em obra migre para a argamassa industrializada e que ocorra a substituição da cal por produtos químicos denominados de incorporadores de ar. Caso novos volumes de cal industrial sejam necessários, assumiu-se que serão adquiridos no mercado em outros estados, já que essa é uma indústria que depende de escala, e uma nova unidade de produção no estado não teria as reservas minerais com a qualidade demandada.

No cenário de referência, estima-se que a produção se reduzirá dos 846 Gg/ano em 2014 para 732 Gg/ano em 2030, representando uma redução de 15,0% em 2030 em relação a 2014, ou seja, uma média aproximada de 0,8% ao ano.

O Gráfico 1 apresenta o perfil da produção da cal virgem e hidratada de 1990 a 2030, constando as oscilações da produção no período, refletindo, em grande parte a influência dos aspectos econômicos em relação ao setor. Sendo que até 2008 foi o período compreendido

**Gráfico 1 – Produção de 1990 a 2030**



Fonte: Elaboração própria (2017) baseado em Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) e CETESB (2013).

Nota: Os trechos em linhas tracejadas indicam o período de 2009 a 2013 intervalo dos estudos estaduais, inventário e cenário sobre o tema.

pelo inventário e a partir de 2014 referem-se a dados estimados no estudo de baixo carbono para a indústria de cal no Estado de São Paulo.

### Evolução do consumo de energia

Na Tabela 1 é apresentado o consumo de energia no CR e CBC. No CR, que foi construído tendo por base o forno Azbe, estimou-se um consumo de energia elétrica de 32 kWh/t<sub>cal</sub>. Já no CBC, considerando o forno Maerz, estimou-se um consumo de energia elétrica de 50 kWh/t<sub>cal</sub>. Conforme apresentado na Tabela 2, cenário de penetração, essa tecnologia entraria em operação a partir de 2019.

Em relação à energia elétrica, observa-se que a tecnologia estudada no CBC consome mais do que a tecnologia considerada no CR, porém, em relação ao consumo de combustível,

o forno tipo Maerz é mais eficiente. Esse utiliza 920 kcal/kg no processo de calcinação enquanto que o forno Azbe requer 1.500 kcal/kg, representando cerca de 39% menos.

No Estado de São Paulo o combustível utilizado para a calcinação é a lenha reflorestada, e sua emissão de gás carbônico foi considerada nula, sendo essa já uma escolha adequada de combustível com vistas à mitigação de emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). No forno Maerz para o CBC considerou-se a possibilidade de dois combustíveis, sendo a lenha *in natura* e a lenha torrificada. Se utilizado o processo de torrefação, o consumo do forno Maerz decresce para 860 kcal/kg, aumentando a diferença em relação ao forno Azbe para 43%. Considerando o cenário de penetração apresentado na Tabela 2, observa-se que essa tecnologia entraria em operação a partir de 2027.

**Tabela 1 – Consumo de energia**

Ano	Cenário de referência		Cenário de baixo carbono	
	Consumo de energia elétrica	Consumo de combustível	Consumo de energia elétrica	Consumo de combustível
	(GWh)	(GJ)	(GWh)	(GJ)
2014	22	4.325.359	22	4.325.221
2015	22	4.328.530	22	4.328.392
2016	22	4.295.043	22	4.294.906
2017	22	4.261.954	22	4.261.818
2018	22	4.229.261	24	4.229.126
2019	21	4.161.359	24	3.839.441
2020	21	4.164.692	26	3.842.517
2021	21	4.133.170	26	3.493.827
2022	21	4.102.030	28	3.467.505
2023	21	4.071.270	28	3.126.683
2024	21	4.074.738	30	3.129.347
2025	21	4.044.389	30	2.793.299
2026	20	4.014.413	31	2.772.596
2027	20	3.951.629	30	2.392.053
2028	20	3.890.207	30	2.354.872
2029	20	3.830.122	29	2.318.501
2030	19	3.771.348	29	2.282.923

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

**Tabela 2 – Cenário de penetração**

Anos	Fornos AZBE	Fornos MAERZ	Fornos Maerz (Torrefação)	Fornos com CCS
2014	10 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
2015	10 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
2016	10 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
2017	10 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
2018	10 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
2019	8 (80%)	1 (20%)	0 (0%)	0 (0%)
2020	8 (80%)	1 (20%)	0 (0%)	0 (0%)
2021	6 (60%)	2 (40%)	0 (0%)	0 (0%)
2022	6 (60%)	2 (40%)	0 (0%)	0 (0%)
2023	4 (40%)	3 (60%)	0 (0%)	0 (0%)
2024	4 (40%)	3 (60%)	0 (0%)	0 (0%)
2025	2 (20%)	4 (80%)	0 (0%)	6 (100%)
2026	2 (20%)	4 (80%)	0 (0%)	6 (100%)
2027	0 (0%)	4 (80%)	1 (20%)	5 (100%)
2028	0 (0%)	4 (80%)	1 (20%)	5 (100%)
2029	0 (0%)	4 (80%)	1 (20%)	5 (100%)
2030	0 (0%)	4 (80%)	1 (20%)	5 (100%)

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

## Evolução das emissões do cenário de referência e de baixo carbono

O Gráfico 2 e a Tabela 3 apresentam o perfil das emissões de GEE no período de 1990 a 2030. As emissões do período de 1990 a 2008 foram apresentadas no inventário de GEE estadual (CETESB, 2013). O período de 2009 a 2013 foi estimado para a visualização do perfil das emissões. O período de 2014 a 2030 foi estimado e se refere à abrangência deste estudo. No cenário de referência, as variações nas emissões de GEE se dão por conta exclusiva dos incrementos ou decréscimos na produção da indústria.

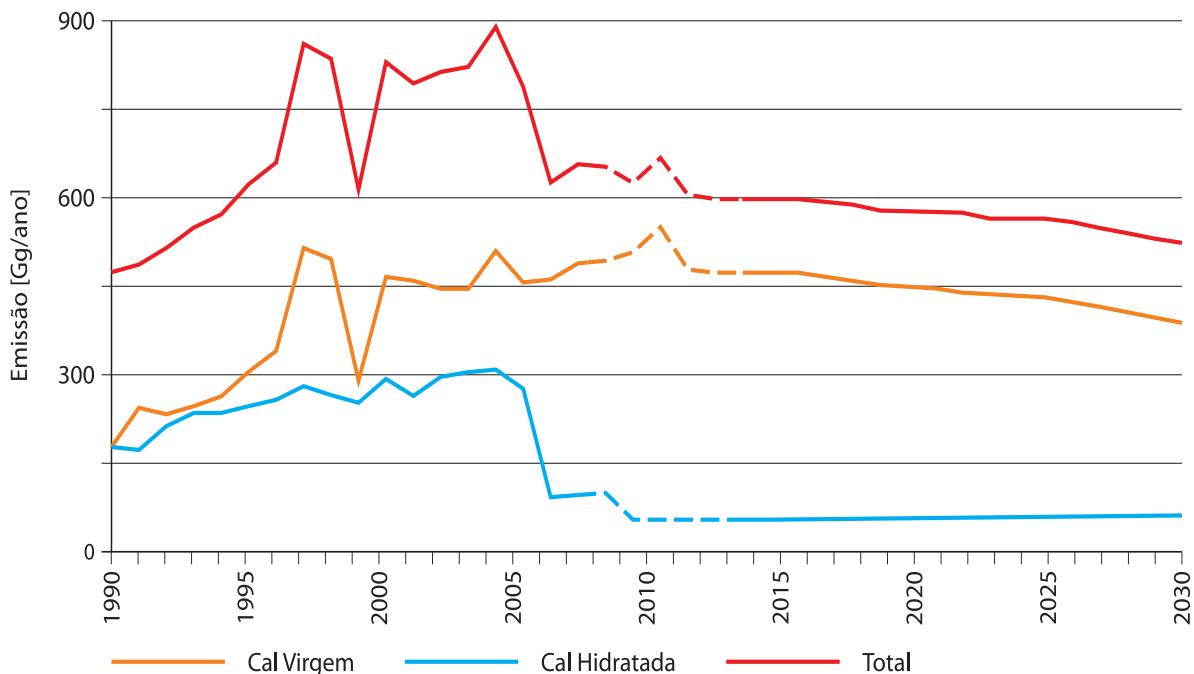
De acordo com o Gráfico 1 e Gráfico 2 foi possível observar a relação direta da produção com as emissões de processo. Quanto maior é a produção, maiores são as emissões por processo.

A tecnologia empregada no CR foi o forno Azbe<sup>5</sup> em todo o período.

Em relação ao cenário de baixo carbono, considerou-se as seguintes tecnologias a serem empregadas:

- a) O forno Maerz empregando lenha *in natura*;
- b) O forno Maerz empregando lenha torrificada<sup>6</sup>;
- c) Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)<sup>7</sup>.

**Gráfico 2 – Emissão de GEE de 1990 a 2030**



Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Nota: Os trechos em linhas tracejadas indicam o período de 2009 a 2013 intervalo dos estudos estaduais, inventário e cenário sobre o tema.

5. No Estado de São Paulo a tecnologia preponderante utilizada na produção de cal são os fornos do tipo Azbe.
6. A tecnologia de torrefação voltada para bioenergia está ainda em desenvolvimento, com pilotos bem-sucedidos e os primeiros testes em escala comercial em andamento (IEA, 2012). O último forno previsto para ser instalado em 2026 contará com essa tecnologia, prevendo a viabilidade comercial até essa data.
7. A Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) é um processo que consiste na separação de CO<sub>2</sub> emitido de fontes industriais, transporte para um local de armazenamento para seu isolamento em longo prazo da atmosfera (IPCC, 2005). A finalidade da fase de captura é separar o CO<sub>2</sub> das fontes de emissão e comprimí-lo em alta pressão para que possa ser facilmente transportado para um local de armazenagem (IPCC, 2005). Exceto quando as plantas estão localizadas diretamente acima de um local de armazenagem, o CO<sub>2</sub> capturado deve ser transportado do ponto de captação para um local de armazenagem, etapa que envolve a injeção de dióxido de carbono diretamente em formações geológicas subterrâneas.

**Tabela 3 – Emissões de gases de efeito estufa no cenário de referência**

Ano	Processo	Energia elétrica	Energia térmica (1) (lenha)	Energia térmica (coque)	Total (2)
(GgCO <sub>2</sub> )					
2014	585	3	0	432	1.020
2015	585	3	0	432	1.020
2016	581	3	0	429	1.013
2017	576	3	0	425	1.004
2018	572	3	0	422	997
2019	562	3	0	415	980
2020	563	3	0	416	982
2021	558	3	0	413	974
2022	554	3	0	409	966
2023	550	3	0	406	959
2024	550	3	0	407	960
2025	546	3	0	404	953
2026	542	3	0	401	946
2027	533	3	0	394	930
2028	525	3	0	388	916
2029	517	3	0	382	902
2030	509	3	0	376	888

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

- (1) A emissão da lenha foi considerada nula, porém, ao serem empregados fornos mais eficientes, uma quantidade de lenha ficará disponível para substituir combustíveis fósseis em algum outro setor. O combustível considerado para a realização das estimativas foi o coque de petróleo.
- (2) Os fatores de emissão utilizados foram: Lenha 0 tCO<sub>2</sub>/GJ Dong *et al.*(2006); Eletricidade 0,0001355 tCO<sub>2</sub>/kWh MCTI (2015); Cal calcítica 0,800 tCO<sub>2</sub>/tcal BRASIL (2010); Cal dolomítica 0,903 tCO<sub>2</sub>/tcal BRASIL (2010); Cal magnesiana 0,854 tCO<sub>2</sub>/tcal BRASIL (2010).

A Tabela 2 apresenta as modificações sugeridas para o CBC. Observa-se a partir de 2019 a inserção de forno Maerz utilizando lenha e a partir de 2027, a utilização também de biomassa torrificada. A introdução do CCS está prevista para 2025, prevendo o aumento da viabilidade e outros projetos similares no Brasil (KETZER *et al.*, 2015).

Considerando as tecnologias de baixo carbono e a inserção das mesmas no período do estudo conforme apresentado no cenário de penetração da Tabela 2, foram obtidas as emissões do CBC apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 – Emissões de GEE no cenário de baixo carbono**

Ano	Processo	Energia elétrica (1)	Energia térmica (lenha)	Energia térmica (2) (coque)	Total(3)
(GgCO <sub>2</sub> )					
2014	585	3	—	432	1.020
2015	585	3	0	432	1.020
2016	581	3	0	429	1.013
2017	576	3	0	425	1.004
2018	572	3	0	422	997
2019	562	4	0	383	949
2020	563	4	0	384	951
2021	558	4	0	349	911
2022	554	4	0	346	904
2023	550	4	0	312	866
2024	550	4	0	312	866
2025	109	5	0	279	393
2026	108	5	0	277	390
2027	107	5	0	239	351
2028	105	5	0	235	345
2029	103	5	0	231	339
2030	102	5	0	228	335

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

- (1) As estimativas de GEE pelo consumo de eletricidade consideraram as perdas na rede.
- (2) A emissão da lenha foi considerada nula, porém, ao serem empregados fornos mais eficientes, uma quantidade de lenha ficará disponível para substituir combustíveis fósseis em algum outro setor. O combustível considerado para a realização das estimativas foi o coque de petróleo.
- (3) Os fatores de emissão utilizados foram: Lenha 0 tCO<sub>2</sub>/GJ Dong *et al.*(2006); Eletricidade 0,0001355 tCO<sub>2</sub>/kWh BRASIL (2015); Coque 0,0998 tCO<sub>2</sub>/Gj ROSA *et al.* (2006); Cal calcítica 0,800 tCO<sub>2</sub>/tcal BRASIL (2010); Cal dolomítica 0,903 tCO<sub>2</sub>/tcal BRASIL (2010); Cal magnesiana 0,854 tCO<sub>2</sub>/tcal BRASIL (2010).

De acordo com a Tabela 4 observa-se a redução das emissões de processo de 80% a partir de 2025 em decorrência do emprego do CCS.

Considerando o ano de 2030, em decorrência do perfil estimado para o consumo de energia térmica no setor de cal, o CBC apresenta uma redução de 148 GgCO<sub>2</sub> (39%) comparativamente ao CR, pela maior eficiência térmica do Maerz. Além disso, observa-se que a emissão pelo aumento do consumo de eletricidade proveniente da troca dos fornos representa 1% das emissões evitadas pelo consumo mais eficiente de combustível. Isso prova que, no balanço

total, o aumento das emissões de eletricidade é ínfimo comparado à oportunidade de mitigação na área de energia térmica.

### Custos de Investimento e de operação

A seguir, na Tabela 5, são apresentados os Investimentos (*Capital Expenditures – CAPEX*) e as despesas de operação (*Operational Expenses – OPEX*) necessários às tecnologias no cenário de referência e no cenário de baixo carbono. O CAPEX refere-se ao custo da tecnologia e o OPEX, incluem, nas tecnologias que se referem à utilização de fornos, o calcário (posto no forno), materiais auxiliares, serviços na operação, materiais de manutenção e fretes, refratários, serviços de manutenção, mão de obra, benefícios de mão-de-obra, serviço de terceiros e outros custos fixos, além do custo de hidratação<sup>8</sup> de US\$ 19,20/t<sub>cal</sub>.

**Tabela 5 – CAPEX e OPEX**

Tecnologia	CAPEX	OPEX
	(US\$ milhões/ forno)	(US\$/t <sub>cal</sub> )
Azbe	16	42,65
Forno Maerz (biomassa in natura)	24	45,11
Forno Maerz (biomassa torrificada)	27	46,84
CCS	14	71,35

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

O CAPEX para uma planta em forno Azbe foi estimado em US\$ 16 milhões, supondo uma produção diária de 400 toneladas<sup>9</sup>. O *Operational Expenditure* (OPEX) foi estimado em US\$ 42,65/t<sub>cal</sub>.

O CAPEX do forno Maerz utilizando biomassa *in natura*, no caso lenha, foi estimado em US\$ 24 milhões. Apesar de apresentar maior

consumo de energia em relação ao forno Azbe, apresenta maior capacidade e maior eficiência. O OPEX foi estimado em US\$ 45,11/t<sub>cal</sub>.

O CAPEX do forno Maerz com o sistema de biomassa torrificada aumenta para US\$ 27 milhões devido a mudanças no sistema de injeção de combustível. Corresponde a um aumento de 70% no custo de investimento por tonelada de cal comparado ao cenário de referência com forno Azbe. O OPEX foi estimado em US\$ 46,84/t<sub>cal</sub>.

No caso do CCS, O CAPEX, referente a um sistema de captura de CO<sub>2</sub> com processo de pós-combustão por absorção química utilizando carbonos ativados impregnados com monoetanolamina (MEA) que inclui *stripper*, compressor, absorber, solvente, torre de lavagem, trocador de calor, bombas, ventilador e outros foi de US\$ 73 milhões, cerca de US\$ 29/tCO<sub>2</sub> evitada. Esse valor desconsidera os custos de transporte e armazenamento. O OPEX foi estimado em US\$ 71,35/t<sub>cal</sub> e inclui stripper, compressor, absorber, solvente, torre de lavagem, trocador de calor, bombas, ventilador e outros.

### Emissões evitadas por cada medida ou tecnologia

A partir da aplicação das tecnologias de baixo carbono, é possível alcançar uma redução no período de 3.761 GgCO<sub>2</sub>, 40% em relação às emissões do cenário de referência da indústria da cal até o ano de 2030. Como observado na Tabela 6, essa redução tem participação predominante da tecnologia CCS (67% do total das emissões evitadas), apesar da previsão de introdução no cenário de baixo carbono apenas no ano de 2025.

No Gráfico 3, é possível observar que, a partir de 2025 com a implantação das três tecnologias de baixo carbono (BC) avaliadas, o

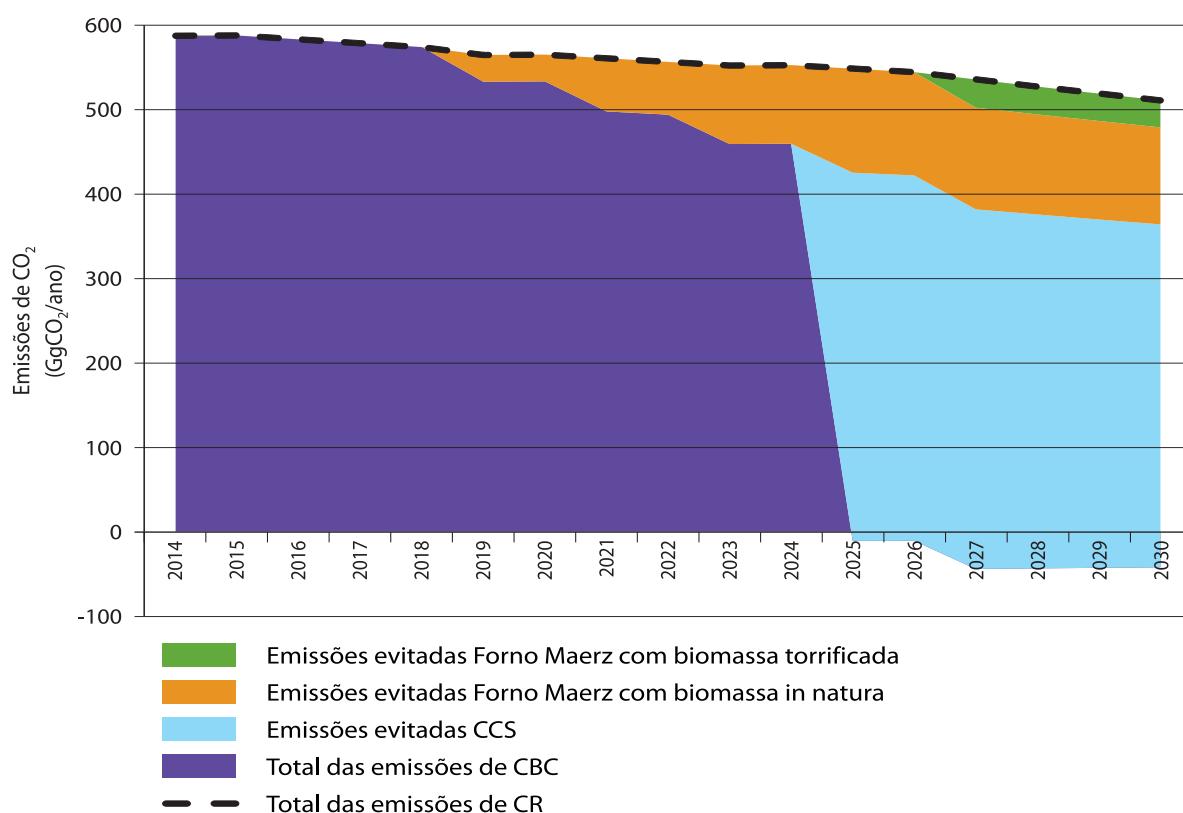
8. A cal hidratada contém em média 21,3% de água (CETESB, 2013).

9. Foi escolhida essa quantidade de produção para poder compará-la ao forno Maerz.

**Tabela 6 – Emissões evitadas**

Ano	CCS	Forno Maerz com biomassa <i>in natura</i>	Forno Maerz com biomassa torrificada	Total das emissões do CBC	Total das emissões do CR
				(GgCO <sub>2</sub> )	
2014	0	0	0	588	588
2015	0	0	0	589	589
2016	0	0	0	584	584
2017	0	0	0	579	579
2018	0	0	0	575	575
2019	0	32	0	534	566
2020	0	32	0	534	566
2021	0	63	0	499	562
2022	0	63	0	495	557
2023	0	93	0	460	553
2024	0	93	0	460	554
2025	437	123	0	-11	549
2026	434	123	0	-11	545
2027	427	121	34	-44	536
2028	420	119	33	-44	528
2029	413	117	32	-43	520
2030	407	115	32	-42	512

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

**Gráfico 3 – Wedge Graph para a indústria de cal em São Paulo 2014-2030**

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

setor da cal, além de zerar suas emissões de CO<sub>2</sub>, gera um excedente de mitigação equivalente a 195 GgCO<sub>2</sub>, isto é possível devido à premissa adotada de que a energia térmica poupada com os fornos Maerz disponibilizaria lenha para outros setores que ainda utilizam combustíveis fósseis, como o coque de petróleo, em sua matriz.

### Custo marginal de abatimento e o preço de equilíbrio de carbono das medidas/tecnologias

Conforme apresentado na Tabela 7, para cada tonelada de CO<sub>2</sub> evitada, os custos de abatimento são de US\$ 12 em fornos Maerz com biomassa torrificada, de US\$ 17 para fornos Maerz com lenha sem torrefação, e de US\$ 29 para CCS. Até o ano de 2030, a indústria da cal gastaria a mais: 19,0 milhões de dólares com a implantação do forno Maerz com biomassa *in natura* (lenha)<sup>10</sup>; US\$ 1,6 milhão com a implantação do forno Maerz com biomassa torrificada<sup>11</sup>; e US\$ 73,6 milhões com a implantação do CCS.

Considerando que o produtor de cal deseja um retorno do projeto de 15% do total investido, seria necessário pagar US\$ 93, US\$ 94

e US\$ 98 dólares por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada, respectivamente, para que as tecnologias de forno Maerz com torrefação, forno Maerz e CCS, se tornassem atrativas. A Tabela 7 apresenta os valores de MAC e BECP, juntamente com a emissão total evitada por cada tecnologia.

O Gráfico 4 apresenta a curva MAC para a indústria de cal elaborada no estudo.

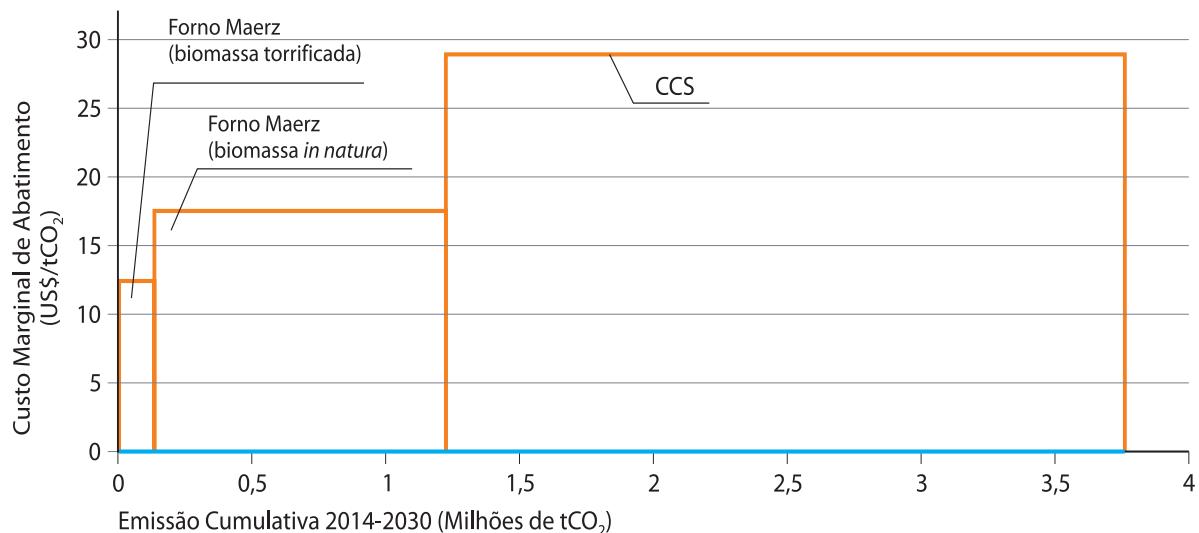
**Tabela 7 – Custo de abatimento e preço de equilíbrio de carbono para o potencial de emissões evitadas**

Tipo de emissão	Medida/Tecnologia	MAC	Break-Even Carbon Price	Redução de emissões 2014–2030
		(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(10 <sup>6</sup> tCO <sub>2</sub> )
Combustível	Cal: Forno Maerz com biomassa torrificada	12	93	0,13
Combustível	Cal: Forno Maerz com biomassa <i>in natura</i>	17	94	1,09
Processo	Cal: CCS	29	98	2,54

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

10. Considerando a implantação em quatro fornos.  
11. Considerando a implantação em apenas um forno.

**Gráfico 4 – Curva de Custo Marginal de Abatimento para o setor de cal no Estado de São Paulo 2014-2030**



Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

## CONCLUSÃO

No CR, as emissões de CO<sub>2</sub> do setor de cal para o Estado de São Paulo sofrerão um decréscimo de 76 GgCO<sub>2</sub>, cerca de 13% em 2030 em relação a 2014. Estima-se que as emissões sejam decrescentes no CR devido a uma redução na demanda de cal hidratada até 2030 em decorrência de sua substituição desta por produtos químicos, como incorporadores de ar. Estima-se que a produção física reduzirá dos atuais 847 Gg/ano para 732 Gg/ano, representando uma redução na produção de 13% em 2030 com relação a 2014, num cenário normal de crescimento do PIB da construção civil e da indústria.

No processo de produção da cal em São Paulo, aproximadamente 99,5% das emissões de CO<sub>2</sub> estão relacionadas ao processo. As emissões de processo poderão ser reduzidas ou eliminadas pela interrupção na produção da cal, ou por meio do mecanismo de captura e armazenamento ou uso (CCS ou CCU), que ainda são tecnologias que se encontram em estágio embrionário. Essas tecnologias apresentam elevado potencial de captura, consequentemente,

contribuindo de forma significativa para as reduções da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido na atmosfera, no entanto, apresentam elevado custo de implantação.

Outras tecnologias relacionadas às mitigações de GEE nessa indústria se devem à adoção de tecnologias que propõem a melhor eficiência energética por meio de troca de fornos proporcionando uma maior disponibilidade de combustíveis renováveis para o uso em outros setores. No CBC, as tecnologias relacionadas ao tipo de forno, substituição dos fornos Azbe por Maerz, implicam num aumento das emissões devido ao maior consumo de energia elétrica dessa tecnologia de fornos totalizando 2 GgCO<sub>2</sub> em 2030. Em contrapartida, a eficiência térmica dos fornos Maerz com biomassa *in natura* e torrefeita causa uma redução indireta pelo deslocamento da lenha para outros setores de 148 GgCO<sub>2</sub> em 2030.

Os resultados obtidos no *Wedge Graph* gerado na MACTool, a partir da comparação do CR e do CBC, permitem concluir que é possível alcançar uma redução de 3.761 GgCO<sub>2</sub>, 40% das emissões de referência da indústria da cal

até o ano de 2030. Essa redução tem participação predominante da tecnologia CCS, 67% do total das emissões evitadas, apesar de este só ser introduzido no cenário de baixo carbono só no ano de 2025.

Todas as três tecnologias avaliadas apresentaram MAC e BECP positivos, sendo a tecnologia CCS a mais custosa, apresentando 29 e 98 US\$/tCO<sub>2</sub>, respectivamente. Para atingir o potencial total de mitigação levantado, a indústria de cal teria que investir US\$ 94,2 milhões até 2030, assumindo que o Estado deva arcar com os custos de transporte e armazenamento de carbono para o CCS.

Ao longo do período de execução deste documento, foram encontradas limitações na coleção de dados, pois informações sobre produção e

emissão da indústria da cal, no ano base do estudo (2014) eram fundamentais, contudo essa dificuldade foi superada, e optou-se pela não identificação da maioria das empresas que forneceram subsídios para sua realização.

Dado seu caráter exploratório e uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos de baixo carbono, novas possibilidades de tecnologias podem ser consideradas. Finalmente, cabe ressaltar que o enfoque deste projeto foi analisar tecnologias para a mitigação de emissões de GEE, com ênfase no dióxido de carbono, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos

## REFERÊNCIAS

**ABPC. Informações e estatísticas de produção no Brasil e no Estado de São Paulo no período de 1990 a 2013.** Brasil: 2014. Acesso em: ago. 2015.

**BRASIL. MCTI. Arquivos dos fatores de emissão: fatores médios de emissão CO<sub>2</sub> grid mês ano.** Brasília, DF, 2015. Programa Nacional de Mudanças Climáticas. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/320907.html>>. Acesso em: abr. 2015.

**BRASIL. MCTI. Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais: produtos minerais – Parte II: produção de cal, outros usos do calcário e dolomita, produção e uso de barrilha.** Brasília, DF, 2010. (Segundo Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Relatórios de Referência). Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0219/219294.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0219/219294.pdf)>. Acesso em: jun. 2013.

**CETESB. Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008: Relatório de Referência.** São Paulo, 2013. (1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo). Disponível em: <[http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro\\_inventario\\_setor\\_industria\\_web1.pdf](http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf)>. Acesso em: set. 2015.

**DONG, H. et al.** Emissions from Livestock and Manure Management. In: IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, JP: IGES, 2006. v. 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, chap: 10, p. 10.7.

Disponível em: <[http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_10\\_Ch10\\_Livestock.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf)>. Acesso em: set. 2016.

**ESMAP. World bank group. Modeling Tools and E-Learning: MACTool.** c2017 Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. Acesso em: abr. 2017.

**FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T. Decarbonizing Development. Three Steps to a Zero-Carbon Future.** Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.

**FREITAS, J.M; VOGELAAR, Rene; VOGELAAR, Renato. Estudo de baixo carbono para a indústria de cal no estado de São Paulo de 2014 a 2030.** São Paulo: CETESB, 2017.

**GOUVELLO, C. de et al. Estudo de baixo carbono para o Brasil.** Washington, DC: Banco Mundial, 2010. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio\\_BM\\_Principal\\_Portugues\\_SumarioExecutivo.pdf](http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf)>. Acesso em: out. 2015.

**MENDONÇA, M.B. ANPAD.** Técnicas de Prospecção e Análise de Cenários Futuros nos Governos e Administração Pública do Brasil: Revisão da Produção Científica Brasileira de 2001 a 2010. In: **V Encontro de Estudos em Estratégia.** Porto Alegre, 2011.

**IEA Bioenergy. Status overview of torrefaction technologies: final report.** Enschede,, 2012. (IEA Bioenergy Task 32 report). Disponível em: <[http://www.ieabcc.nl/publications/IEA\\_Bioenergy\\_T32\\_Torrefaction\\_review.pdf](http://www.ieabcc.nl/publications/IEA_Bioenergy_T32_Torrefaction_review.pdf)>. Acesso em: set. 2015.

**IPCC. Emission Scenarios.** Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. 2000a. 27p.

**IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.** Hayama, JP, 2000b. Disponível em: <<http://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em mai de 2016.

**IPCC. IPCC special report on carbon dioxide capture and storage.** New York, US: Cambridge University Press, 2005. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_wholereport.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf)>. Acesso em: ago. 2015.

KETZER, J. M. M. et al. (Org.). **Brazilian atlas of CO<sub>2</sub> capture and geological storage:** Center of Excellence. Porto Alegre: EDPUCRS: CEPAC, c2014. Published in apr. 2015. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/publications/brazilian-atlas-co2-capture-and-geological-storage>>. Acesso em: fev. 2016.

ROSA, L.P. et al. **Emissões de CO<sub>2</sub> por queima de combustíveis: abordagem top-down.** Brasília, DF: MCTI; Rio de Janeiro: COPPE, 2006. (Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa). Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0008/8812.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0008/8812.pdf)>. Acesso em: out. 2015





# **Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo**

**2030**



# **Lista de abreviaturas e siglas**

<b>a.a.</b>	ao ano
<b>ABAI</b>	Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas
<b>ABCP</b>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<b>ABESC</b>	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>ABRAMAT</b>	Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção
<b>BECP</b>	Preço de Equilíbrio de Carbono ( <i>Break-Even Carbon Price</i> )
<b>BEN</b>	Balanço Energético Nacional
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desenvolvimento
<b>CAPEX</b>	Investimentos ( <i>Capital Expenditures</i> )
<b>CETESB</b>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<b>CH</b>	Cal Hidratada
<b>CP</b>	Cimento <i>Portland</i>
<b>CBIC</b>	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
<b>CDR</b>	Combustível Derivado de Resíduos
<b>CNI</b>	Confederação Nacional da Indústria
<b>DNIT</b>	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>IBÁ</b>	Indústria Brasileira de Árvores
<b>IBS</b>	Instituto Brasileiro de Siderurgia
<b>ICMS</b>	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
<b>IPI</b>	Imposto sobre Produtos Industrializados
<b>INDC</b>	Intended Nationally Determined Contribution
<b>MAC</b>	Custo Marginal de Abatimento ( <i>Marginal Abatement Cost</i> )
<b>MCT</b>	Ministério da Ciência e Tecnologia
<b>MME</b>	Ministério de Minas e Energia
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NDC</b>	Nationally Determined Contribution
<b>PAC</b>	Programa de Aceleração do Crescimento
<b>PEMC</b>	Política Estadual de Mudanças Climáticas
<b>Sabesp</b>	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
<b>SGT</b>	Superintendência de Gestão Tarifária
<b>Sinaproclim</b>	Sindicato Nacional da Indústria de Produtos de Cimento
<b>SNIC</b>	Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento
<b>TIR-Benchmark</b>	Taxa de Tratividade
<b>WBCSD</b>	Conselho Mundial de Negócios para Desenvolvimento Sustentável (World Business Council for Sustainable Development)

## **Lista de símbolos**

**CO<sub>2</sub>** dióxido de carbono (gás carbônico)

**Gg** gigagrama

**GJ** gigajoule

**kWh** quilowatt-hora

**m<sup>3</sup>** metro cúbico

**MPa** megapascal

**Mt** megatonelada

**PJ** petajoule

**t** tonelada

**TJ** terajoule

O presente sumário foi baseado no “Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030” o qual apresentou cenários de referência (CR) e o cenário de baixo carbono (CBC) considerando emissões de GEE no processo industrial, no consumo de energia e alternativas de mitigação. No estudo foram avaliados os Custos Marginais de Abatimento (*Marginal Abatement Cost – MAC*) das tecnologias avaliadas e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even Carbon Price – BECP*). As reduções de emissões proporcionadas ao longo do período analisado em cada opção tecnológica de mitigação foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócioeconômico e mudança tecnológica, cuja evolução é altamente incerta. No entanto, os cenários são imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar e são ferramentas adequadas para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas, não apresentando relação com a probabilidade de ocorrência deles (IPCC, 2000a).

Os cenários colaboram na identificação das possíveis ameaças, avaliam as competências organizacionais e exercitam o pensamento global para desenvolver alianças e ações estratégicas, proporcionando a elaboração de análises alternativas. Portanto, não se trata apenas de prospecção, mas da construção de um futuro possível, auxiliando a construir as mudanças desejadas para o futuro (WRIGHT, 2008 *apud* MENDONÇA, 2011). Os cenários no presente estudo foram construídos baseados na análise

de dados históricos, nas informações apresentadas em publicações do setor e em informações atribuídas pelos autores.

O Setor de Cimento no Estado de São Paulo, em 2005, contribuiu com 8,4% das emissões de GEE no Setor de Processos Industriais, fato que se relaciona com a produção, em que o estado foi responsável por 8,1% da produção nacional de cimento (CETESB, 2013).

## ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

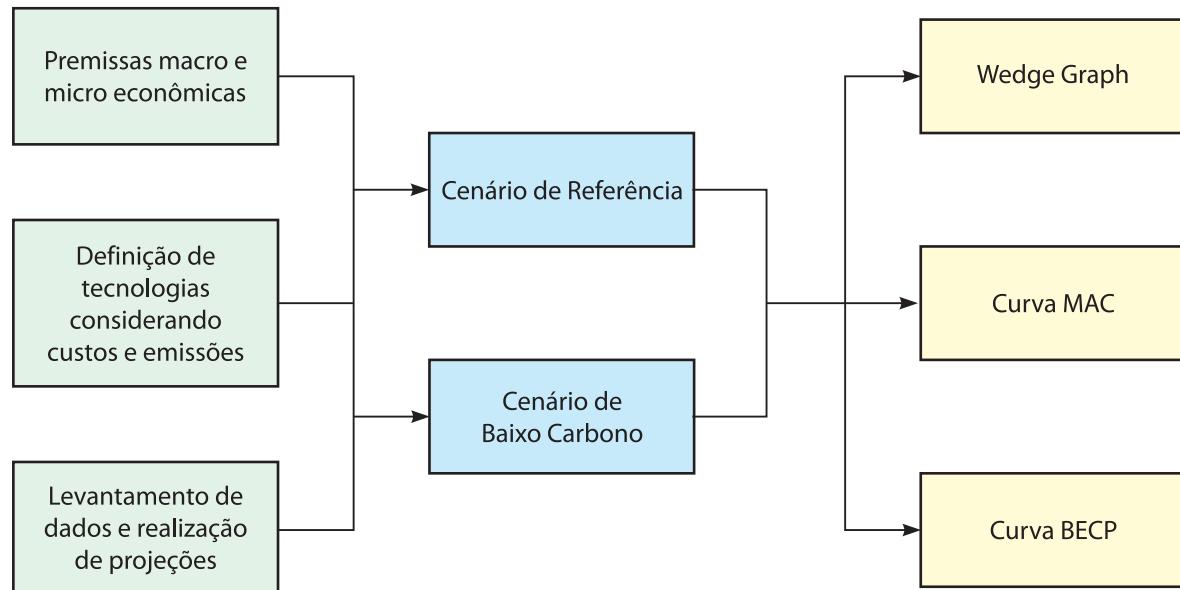
A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, no qual foram contactadas empresas e especialistas do setor para o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente, seguiu-se com a realização dos CR e CBC e a apresentação dos resultados de mitigação, MAC e BECP.

As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresentado no guia do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2000b), o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Essas estimativas consideraram dados de atividade, como produção ou energia consumida e o respectivo fator de emissão.

A abordagem na determinação do MAC e do BECP<sup>12</sup> foi incremental e teve como referência o Estudo de Baixo Carbono para o Brasil (GOUVELLO *et al.*, 2010). Para a construção das curvas de MAC e BECP empregou-se a MACTool. De acordo com Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investi-

---

12. O preço de equilíbrio de carbono indica o incentivo econômico que os agentes, como por exemplo, a indústria, necessitariam para que a medida de mitigação estudada se tornasse atraente, quando comparada à referência. Esse preço é determinado da mesma forma que o custo marginal de abatimento (MAC), porém utilizando uma taxa de atratividade (TIR) setorial. Usualmente, o *benchmark carbon price* é apresentado graficamente da mesma forma que a Curva MAC (GOUVELLO *et al.*, 2010).

**Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo**

Fonte: Pacca *et al.* (2017).

mento necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços. Como entradas, a MACTool utiliza os parâmetros chave para as medidas de mitigação e para as variáveis macroeconômicas, devendo o usuário especificar pelo menos um cenário sobre o futuro macroeconômico incluindo as variáveis de interesse, tais como o preço dos combustíveis fósseis e a demanda futura, e também fornecer cenários de futura inclusão de tecnologias ou medidas de baixo carbono para uma linha de base e pelo menos uma via de redução de emissão (FAY, *et al.*, 2015).

Para aferir quantitativamente a contribuição de cada tecnologia na redução das emissões de GEE, foram elaboradas curvas que apresentam cunhas de mitigação (*Wedge Graph*), referentes à comparação entre o CR e o CBC, com a implantação das respectivas tecnologias. Com essa informação foi possível visualizar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação de GEE.

## RESULTADOS

Nessa seção, são apresentados os resultados no período de 2014 a 2030 para a evolução da produção de cimento no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões do CR e CBC, os custos de investimentos, as emissões evitadas por cada medida nos cenários, o custo marginal de abatimento (curva MAC) e o BECP das tecnologias.

### A evolução da produção de cimento no estado de São Paulo

A produção de cimento no estado de São Paulo não é suficiente para suprir sua demanda. No período de 2004 a 2013 o consumo esteve em média 62% acima de sua produção, o que faz com que o estado seja um importador de cimento proveniente de outras regiões do país. Além do cimento, São Paulo importa o clínquer que passa por processo de moagem e adições nas indústrias cimenteiras localizadas no estado.

O estudo do setor do cimento considerou dados primários de fontes de informação setoriais, bem como, referências bibliográficas, sendo uma das limitações encontradas, a obtenção de dados acurados sobre a produção de clínquer no estado de São Paulo. A deficiência de dados para criação dos cenários foi superada por meio da obtenção de informações primárias e estimativas obtidas em entrevistas com especialistas, pesquisadores e agentes do mercado. As empresas e associações contatadas para participar do estudo foram: Votorantim Cimentos, Intercement, SINAPROCIM, ABAI, ABRAMAT, ABESC, MC-Bauchemie, Grace, Fives Group, Saint-Gobain, ABCP, ArtSpray, França e Associados, Cyrela e Infibra.

Para a composição do cenário de evolução da produção de cimento no estado de São Paulo, assumiu-se que não haverá aumento da capacidade instalada por rota integrada do cimento, ou seja, a rota que inclui a etapa de clinquerização, em razão da dificuldade de obtenção de licença ambiental para a construção de novas fábricas integradas. Quando a produção atingir essa capacidade, o incremento vai se dar por construção de usinas de moagem.

Para a projeção da produção de cimento adotou-se um crescimento de 5% a.a. (ao ano), com exceção de 2014 e 2015 onde foi utilizada uma taxa de 0,4% a.a. conforme o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC). Existem, no entanto, estimativas mais conservadoras e mais otimistas, que variam entre 3% e 8% a.a.. Considerou-se que ao se atingir a capacidade instalada das usinas integradas em São Paulo, o crescimento continuaria a partir da ampliação de usinas de moagem (PUNHAGUI *et al.*, 2017; MME, 2010).

Na Tabela 1 e no Gráfico 1 é apresentada a produção de cimento correspondente a rota integrada e moagem para o CR e CBC. Observa-se que em 2014 a produção por rota integrada corresponde a 64% e a moagem a 36%, mas

**Tabela 1 – Produção de cimento**

Ano	Rota integrada	Moagem	Produção de cimento total (integrada + somente moagem)
			(Gg)
2014R	6.413	3.607	10.020
2015E	6.441	3.623	10.064
2016E	6.763	3.804	10.567
2017E	7.101	3.995	11.096
2018E	7.457	4.194	11.651
2019E	7.800	4.433	12.233
2020E	7.800	5.045	12.845
2021E	7.800	5.687	13.487
2022E	7.800	6.361	14.161
2023E	7.800	7.069	14.869
2024E	7.800	7.813	15.613
2025E	7.800	8.593	16.393
2026E	7.800	9.413	17.213
2027E	7.800	10.274	18.074
2028E	7.800	11.178	18.978
2029E	7.800	12.126	19.926
2030E	7.800	13.123	20.923

Fonte: Punhagui *et al.* (2017).

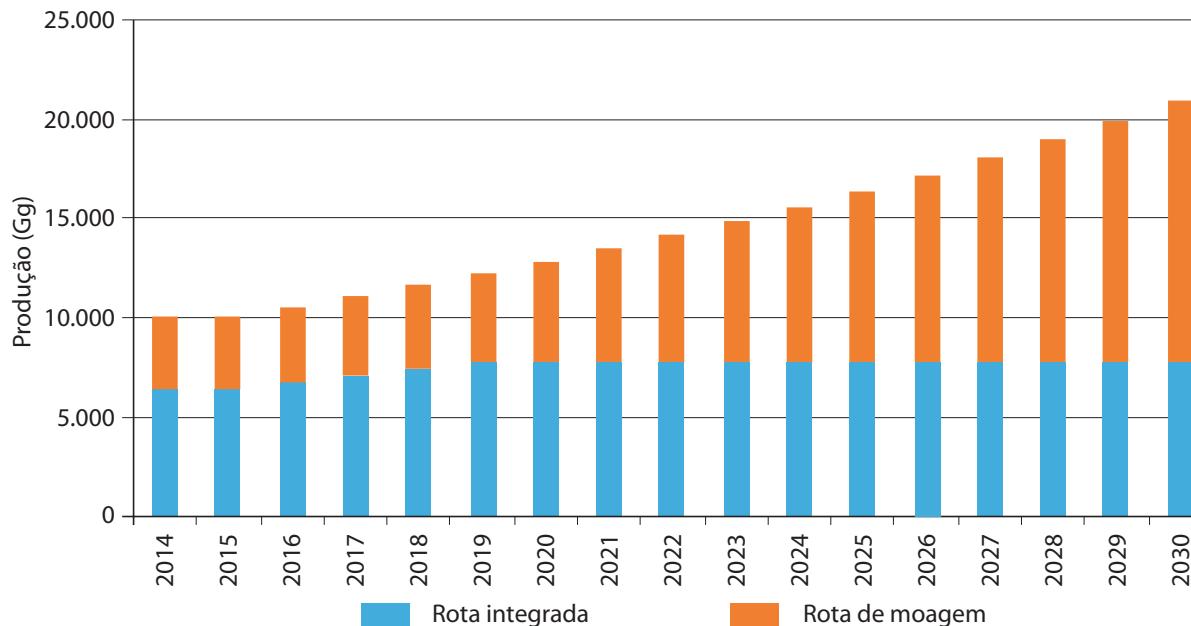
Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

em 2030 a rota integrada corresponde a 37% e a moagem a 63%. Essa inversão se deve principalmente a proposta da ausência de novas usinas integradas no estado, incentivando que ocorra uma importação de materiais para que sejam apenas moídos nos limites territoriais.

O Gráfico 1 apresenta a produção no Estado de São Paulo de 2014 a 2030.

### A evolução do consumo de energia

A energia térmica consumida por tonelada de cimento varia devido à composição do mesmo e das condições dos processos industriais. Quanto maior o teor de clínquer no cimento, maior a energia térmica necessária para produzi-lo. Já o consumo de energia elétrica para produção de cimento foi considerado fixo e igual a 107 kWh/t. Como a energia elétrica consumi-

**Gráfico 1 – Produção de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

Fonte: Punhagui *et al.* (2017) baseado em dados do (SNIC, 2014), (WBCSD, 2013), (CERQUEIRA, 2014), (MME, 2010).

da na moagem é baixa, em média 32 kWh/t, e fortemente influenciada pelo que é moído, dadas às incertezas, assumiu-se que a demanda de eletricidade não será afetada no futuro. No ano de 2013, a energia total, térmica e elétrica, consumida por tonelada de cimento foi de 2,74 GJ, cerca de 86% térmica e 14% elétrica (PUNHAGUI *et al.*, 2017).

No CBC, o consumo de energia térmica diminui devido ao aumento da participação do *filler* no cimento, com seu teor atingindo 39% em 2030, enquanto que o teor de clínquer se reduz para 46% (19,6% a menos do que em 2014). O consumo de energia elétrica, entretanto, permanece inalterado. Isso pode ser conferido na Tabela 2, que apresenta a comparação do consumo de energia estimado para o setor de cimento no CR e no CBC.

No CR, a energia térmica corresponde a 80% do total de energia em 2014. Essa relação diminui para 73% em 2030 por conta do aumento da participação das usinas de moagem, em detrimento das usinas de rota integrada ao

**Tabela 2 – Consumo de energia do cimento produzido em São Paulo**

Ano	Cenário de referência		Cenário de baixo carbono	
	Energia térmica	Energia elétrica	Energia térmica	Energia elétrica
	(TJ)	(GWh)	(TJ)	(GWh)
2014R	15.166	1.069	14.985	1.069
2015E	14.818	1.074	14.617	1.074
2016E	15.619	1.128	15.619	1.128
2017E	16.690	1.184	16.142	1.184
2018E	17.815	1.243	16.663	1.243
2019E	18.996	1.306	17.182	1.306
2020E	19.141	1.371	16.740	1.371
2021E	19.402	1.439	16.401	1.439
2022E	19.651	1.511	16.049	1.511
2023E	19.888	1.587	15.686	1.587
2024E	20.114	1.666	15.312	1.666
2025E	20.329	1.749	14.926	1.749
2026E	20.534	1.837	14.531	1.837
2027E	20.729	1.929	14.126	1.929
2028E	20.915	2.025	13.711	2.025
2029E	21.091	2.126	13.288	2.126
2030E	21.260	2.233	12.856	2.233

Fonte: PUNHAGUI *et al.* (2017) baseado em dados do (SNIC, 2014), (WBCSD, 2013), (CERQUEIRA, 2014), (MME, 2010).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

longo do período. De acordo com as estimativas, espera-se que ocorra um aumento do consumo energético total de 54% em 2030 em relação a 2014.

Já no CBC, a diminuição do consumo de energia térmica é de 14% em 2030 em comparação a 2014. Comparado ao CR, seria possível economizar um total de 63.323 TJ ao longo do período 2014-2030 com a implantação das estratégias de baixo carbono.

### A evolução das emissões do cenário de referência

A produção do clínquer é responsável pela maior parte da energia consumida e da emissão

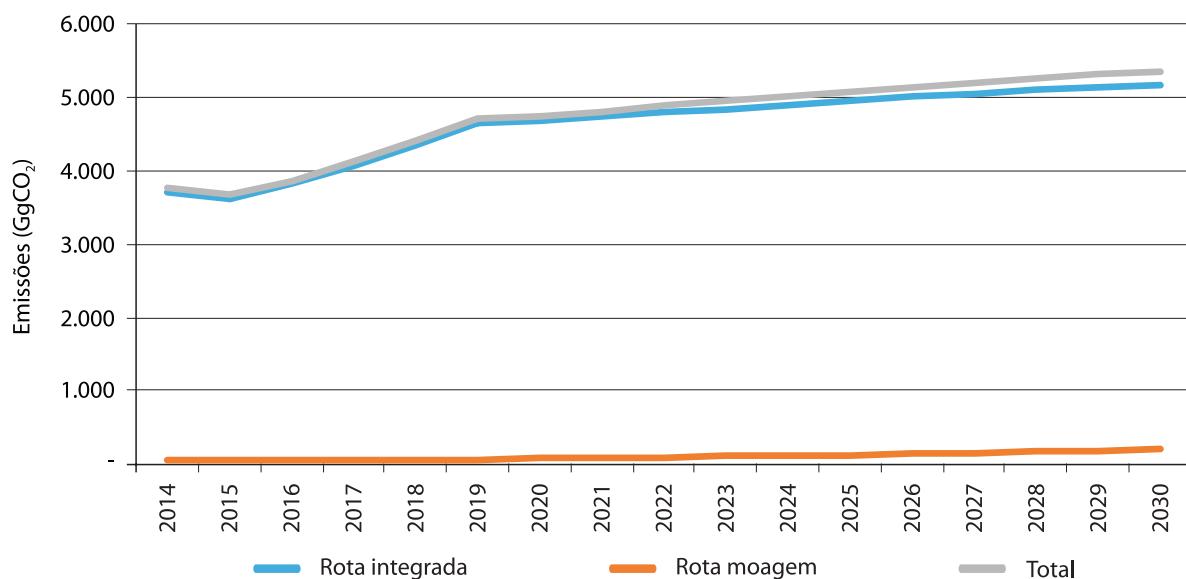
são de processo (HUNTZINGER; EATMON, 2009). Para construir o cenário de emissão, foram consideradas as emissões da rota integrada (descarbonatação, queima de combustível fóssil e consumo de eletricidade) juntamente com as emissões da rota de moagem que ocorrem dentro dos limites físicos do estado, ou seja, as emissões pelo consumo de eletricidade.

O Gráfico 2 apresenta as emissões de CO<sub>2</sub> projetadas no CR para a produção de cimento, discriminando cada rota.

A Tabela 3 apresenta as emissões de GEE de 2014 a 2030 considerando a emissão da produção no Estado de São Paulo.

Em relação ao CBC, foram levantadas três possibilidades de mitigação:

**Gráfico 2 – Emissões da produção de cimento em São Paulo no cenário de referência**



Fonte: Punhagui *et al.* (2017).

**Tabela 3 – Emissões da produção de cimento do Estado de São Paulo no cenário de referência**

Ano	Rota integrada			Rota de moagem	Total
	Descarbonatação	Combustível	Eletricidade		
	(GgCO <sub>2</sub> )				
2014R	2.347	1.266	93	52	3.758
2015E	2.293	1.237	93	52	3.676
2016E	2.455	1.304	98	55	3.874
2017E	2.583	1.393	103	57	4.137
2018E	2.757	1.487	108	60	4.413
2019E	2.940	1.586	114	63	4.702
2020E	2.962	1.598	113	73	4.746
2021E	3.003	1.620	113	82	4.817
2022E	3.041	1.641	113	92	4.886
2023E	3.078	1.660	113	102	4.953
2024E	3.113	1.679	113	113	5.018
2025E	3.146	1.697	113	124	5.080
2026E	3.178	1.714	113	136	5.141
2027E	3.208	1.731	113	149	5.200
2028E	3.237	1.746	113	162	5.257
2029E	3.264	1.761	113	175	5.313
2030E	3.290	1.775	113	190	5.367

Fonte: Adaptado de Punhagui *et al.* (2017)Nota: O FE do cimento foi calculado ano a ano, uma vez que esse varia devido o teor de clínquer no cimento. O FE do clínquer é considerado constante a 848 kgCO<sub>2</sub>/t. Mais informações ao longo do relatório principal.

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

- a) Redução do teor de clínquer no cimento pelo aumento do teor de *filler*;
- b) Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por combustível derivado de resíduos (CDR);
- c) Substituição de combustível fóssil (coque de petróleo) por *pellets* de madeira.

A Tabela 4 apresenta o cenário de penetração dessas três medidas. É possível observar a introdução gradual de cada uma até atingirem o máximo estipulado em 2030. Para *filler*, considerou-se que esse limite será 39% do percentual do cimento. Para a substituição de combustíveis fósseis por biomassa, considerou-se que o máximo potencial de substituição é de 60% da energia térmica. Uma vez que CDR e *pellets* partilham da mesma energia, para evitar duplas contagens, estipulou-se 30% de penetração para cada uma destas opções.

**Tabela 4 – Penetração das medidas de baixo carbono 2014–2030**

Ano	Filler (1)	CDR (2)	Pellets (2)
2014R	2%	0%	0%
2015E	5%	0%	0%
2016E	7%	2%	2%
2017E	9%	4%	4%
2018E	12%	6%	6%
2019E	14%	8%	8%
2020E	16%	10%	10%
2021E	19%	12%	12%
2022E	21%	14%	14%
2023E	24%	16%	16%
2024E	26%	18%	18%
2025E	28%	20%	20%
2026E	31%	22%	22%
2027E	33%	24%	24%
2028E	35%	26%	26%
2029E	38%	28%	28%
2030E	40%	30%	30%

Fonte: Punhagui *et al.*

(1) Sobre a produção total de cimento, que afeta as emissões de descarbonatação e de energia térmica.

(2) Apenas sobre as emissões de energia térmica.

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

A partir da produção de cimento (Gráfico 1), da penetração das tecnologias (Tabela 4) e dos fatores de emissão específicos, pode-se projetar as emissões no CBC, apresentado na Tabela 5.

A partir da Tabela 3 e da Tabela 5, pode-se observar que no CBC as emissões de processo (pelo aumento do *filler*) e de energia térmica (pelo aumento do *filler* mais o uso de combustíveis renováveis) no período de análise apresentam uma redução de emissões de 19,7% e 50,0% em relação às emissões totais do CR 2030. Considerando as emissões totais, processo, energia térmica e elétrica, ocorreria uma redução de 28,9% das emissões no CBC em relação ao CR.

## Custo de investimento e de operação

Foi assumido que não haverá aumento da capacidade instalada por rota integrada do cimento, como já explicitado anteriormente. O incremento vai se dar por construção de usinas de moagem.

Os custos de investimento (CAPEX) e os custos de operação e manutenção (OPEX) estão resumidos na Tabela 6. Esses custos foram essenciais para a análise econômica da estratégia *filler* e determinação do MAC e BECP. Por outro lado, para a substituição de combustível fóssil, considerou-se que não há necessidade de adaptação da estrutura industrial para utilização de CDR ou *pellets*, igualmente não há variação nos custos de operação, portanto, tanto CAPEX quanto OPEX foram considerados zero em ambos CR e CBC. O MAC e BECP das estratégias

**Tabela 5 – Emissões no Cenário de Baixo Carbono**

Ano	Rota integrada			Rota de moagem	Total		
	Descarbonatação	Combustível	Eletricidade				
2014R	2.319	1.251	93	52	3.715		
2015E	2.262	1.220	93	52	3.627		
2016E	2.417	1.139	98	55	3.709		
2017E	2.498	1.062	103	57	3.720		
2018E	2.579	991	108	60	3.738		
2019E	2.659	925	114	63	3.761		
2020E	2.590	863	113	73	3.639		
2021E	2.538	805	113	82	3.538		
2022E	2.484	751	113	92	3.440		
2023E	2.427	701	113	102	3.343		
2024E	2.369	654	113	113	3.249		
2025E	2.310	610	113	124	3.157		
2026E	2.249	569	113	136	3.067		
2027E	2.186	531	113	149	2.979		
2028E	2.122	495	113	162	2.892		
2029E	2.056	462	113	175	2.806		
2030E	1.989	429	113	190	2.721		

Fonte: Adaptado de Punhagui *et al.* (2017).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

de CDR e *pellets* ficaram em razão unicamente da diferença dos preços adotados para cada um desses combustíveis em relação aos preços do coque de petróleo.

**Tabela 6 – CAPEX e OPEX**

Tipo de custo	Equipamento	Unidade	Custo
CAPEX	Fábrica de moagem (1)	(US\$)	87.500.000,00
	Silo de armazenamento (2)	(US\$)	51.852,00
OPEX	Clínquer + gipsita	(US\$/t)	56,34
	<i>Filler</i>	(US\$/t)	21,72
	Escória granulada	(US\$/t)	17,50
	Água (3)	(US\$/m <sup>3</sup> )	6,45

Fonte: Punhagui *et al.* (2017).

(1) Capacidade instalada aproximada: 900 Gg/ano.

(2) Capacidade de 100 toneladas.

(3) Tabela tarifária – acima de 50 m<sup>3</sup>/mês.

A partir da Tabela 6 é possível perceber que, apesar de haver um CAPEX adicional no CBC por conta da implantação de silos para armazenamento do *filler*, o OPEX torna-se menor quando se aumenta o teor de *filler* no cimento, já que seu custo por tonelada é 61% menor que o custo do clínquer.

### Emissões evitadas em cada medida de baixo carbono

A partir da aplicação das tecnologias de baixo carbono, é possível alcançar uma redução no período de 23.199 GgCO<sub>2</sub>, 29% em relação às emissões do CR da indústria do cimento até o ano de 2030. Considerando os resultados apre-

**Tabela 7 – Emissões evitadas por medida ou tecnologia no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

Ano	Aumento do teor de <i>filler</i> no cimento	Substituição de combustível fóssil por CDR	Substituição de combustível fóssil por <i>pellets</i> de madeira	(GgCO <sub>2</sub> )	
				Total das emissões do CBC	Total das emissões do CR
2014R	43	0	0	3.715	3.758
2015E	48	0	0	3.628	3.676
2016E	58	35	35	3.746	3.874
2017E	131	143	143	3.721	4.137
2018E	274	200	200	3.738	4.413
2019E	432	255	255	3.761	4.702
2020E	572	267	267	3.639	4.746
2021E	715	282	282	3.538	4.817
2022E	858	294	294	3.439	4.886
2023E	1.001	304	304	3.343	4.953
2024E	1.144	312	312	3.249	5.018
2025E	1.287	318	318	3.157	5.080
2026E	1.430	322	322	3.067	5.141
2027E	1.573	324	324	2.978	5.200
2028E	1.716	325	325	2.892	5.257
2029E	1.859	324	324	2.807	5.313
2030E	2.002	322	322	2.721	5.367

Fonte: Punhagui *et al.* (2017).

Legenda: R - Dado Real. E - Dado Estimado.

sentados na Tabela 7, essa redução tem participação predominante da medida de *filler* (65% do total das emissões evitadas), enquanto as medidas referentes aos combustíveis têm igual representação ao longo do período (17,4% cada uma).

A redução das emissões de CO<sub>2</sub> é diretamente proporcional ao percentual de *filler* adicionado, pois esse atua substituindo o ligante (clínquer) que é o principal emissor da mescla que compõe o cimento, por emissões de processo e energia térmica. Parte da energia remanescente (60%), após a introdução do *filler*, é substituída por CDR e pellets. No Gráfico 3, observa-se a evolução da participação de cada medida avaliada no estudo na mitigação das emissões.

### Custo marginal de abatimento (curva MAC) e preço de equilíbrio do carbono das medidas de baixo carbono

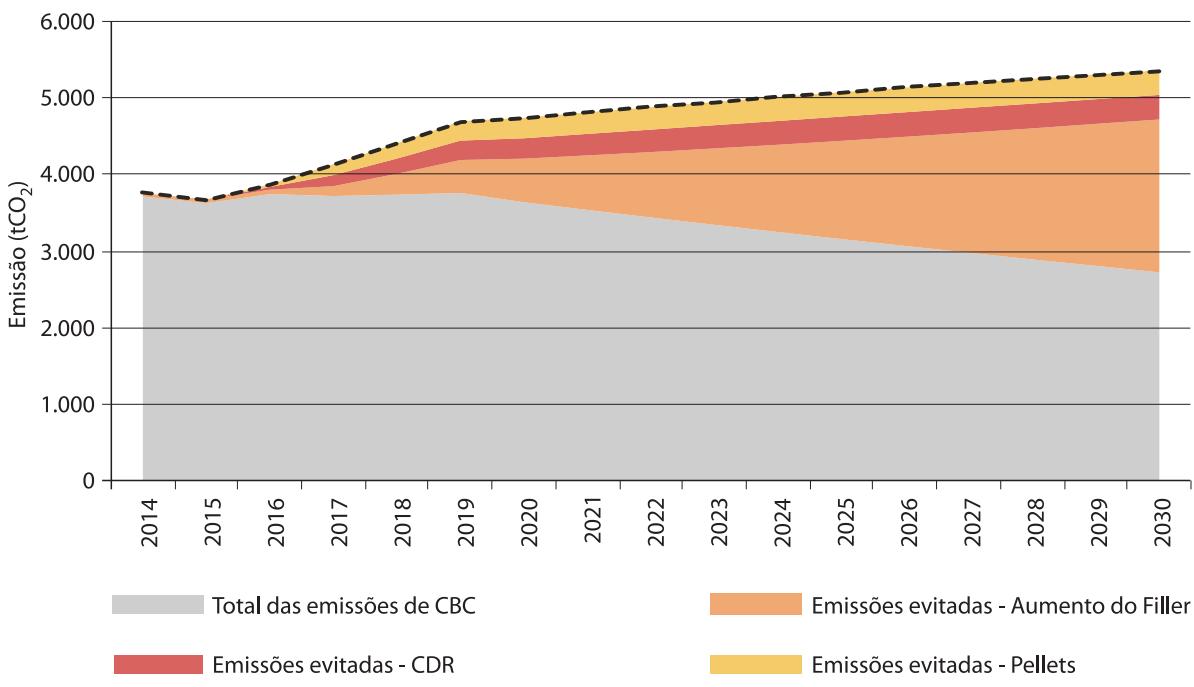
De acordo com os resultados da curva MAC na Tabela 8, conclui-se que a medida de *filler* traz um retorno econômico de US\$ 2 a cada tonelada de CO<sub>2</sub> evitada. As medidas de pellets

**Tabela 8 – Dados para a elaboração  
da curva MAC, baseados  
nos resultados dos cenários  
estratégicos propostos**

Tipo de emissão	Medida	MAC	BECP	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(MtCO <sub>2</sub> )
Processo e combustível	<i>Filler</i>	-2	-5	15,14
Combustível	<i>Pellets</i>	10	23	4,03
	CDR	11	24	4,03

Fonte: Punhagui *et al* (2017).

**Gráfico 3 – Wedge Graph para a indústria de cimento em São Paulo 2014–2030**



Fonte: Punhagui *et al.* (2017).

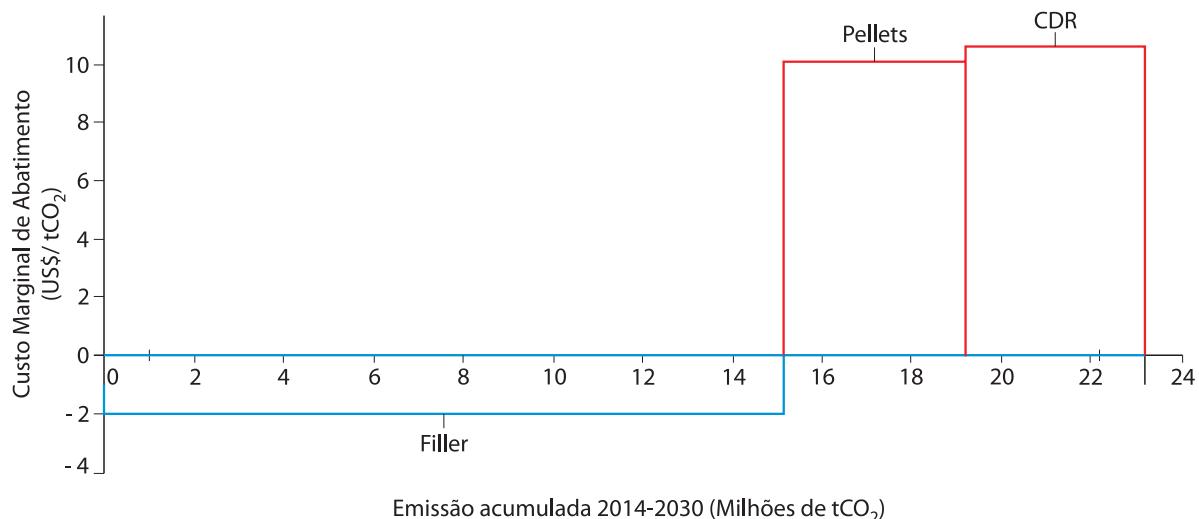
e CDR, entretanto, apresentam MAC positivo, respectivamente US\$ 10 e US\$ 11. Se a indústria de cimento optasse por adotar somente a medida de *filler*, geraria uma economia total de US\$ 28 milhões, evitando 15,14 MtCO<sub>2</sub> até 2030. Logo, se a indústria desejar atingir o potencial máximo de redução avaliado (23,2 MtCO<sub>2</sub>), terá que investir US\$ 54,3 milhões ao longo do período.

O resultado do BECP foi análogo ao MAC, com o *filler* trazendo um retorno interno maior

do que o *Benchmark-TIR* estipulado pela indústria (13%), o que a torna uma medida atrativa para investimentos. Já as medidas de *pellets* e CDR não atingem o retorno esperado, portanto, seria necessário vender a tonelada de carbono, respectivamente por US\$ 23 e US\$ 24, para que elas se tornassem atraentes.

O Gráfico 4 apresenta a curva MAC com as três medidas avaliadas para a indústria de cimento no estado.

**Gráfico 4 – Curva de custo marginal de abatimento para a indústria de cimento no Estado de São Paulo 2014–2030**



Fonte: Punhagui *et al.* (2017).

## CONCLUSÕES

As mudanças no teor de clínquer são afetadas pelo fornecimento de escória, que deve apresentar dificuldades nos próximos anos. A única fonte paulista de escória de alto forno, Usiminas, anunciou em outubro de 2015 o fechamento da usina de Cubatão. Assim, as cinzas volantes ou escória não são consideradas uma solução para o estado de São Paulo, já que não existe fornecedor local. Embora haja opções de adição para a diminuição de ligantes, considera-se que o *filler* é a melhor opção para o momento e o local.

No CR, as emissões de CO<sub>2</sub> do setor de cimento para o Estado de São Paulo sofrerão um aumento de 1609 GgCO<sub>2</sub>, cerca de 43% em 2030 em relação a 2014. Estima-se que as emissões sejam crescentes por conta do aumento da produção de cimento de 5% a.a., que a partir de 2019 ocorre pelo incremento de fábricas de moagem, já que não haverá aumento de capacidade instalada por rota integrada no estado. Também existe o aumento do teor do clínquer no cimento, que atinge 77% em 2030, e por conta disto o fator de emissão por tonelada de cimento vai aumentar. O aumento do teor de clínquer ocorrerá por não haver fornecedor local de cinzas volantes e escória, e se identificou dificuldades (futuras) deste fornecimento.

Na produção de cimento, 60% a 65% das emissões são relacionadas à descarbonatação do clínquer, sobre a qual não é possível propor mitigação, uma vez que é um processo químico. A mitigação dessa fração de emissão pode ser feita pela substituição parcial dessa matéria-prima por alternativas que não necessitem ser descarbonatadas, como o *filler* analisado no presente estudo. A outra parte expressiva da emissão (35%–40%) está relacionada à queima de combustíveis fósseis. A eficiência energética não foi considerada como uma possível medida para o CBC pois, para o setor, estratégias desta natureza surtem pouco efeito. As possibilidades

na área de energia nesse setor se encontram no aumento da participação de biomassa, como o CDR e os *pellets* analisados no estudo, dentro do *mix* de combustíveis utilizados na produção de cimento.

Os resultados obtidos no *Wedge Graph* gerado na MACTool, a partir da comparação do CR e do CBC, permitem concluir que é possível alcançar uma redução de 23.199 GgCO<sub>2</sub>, que considerando o total mitigado no período de 2014 a 2030 representa uma redução de 28,9% sobre as emissões do CR. Essa redução tem participação predominante da estratégia do *filler*, 65,3% do total das emissões evitadas, que inclusive é a única medida que apresentou MAC e BECP negativos. Esse resultado mostra que é atrativo para a indústria de cimento investir no aumento do *filler*, podendo gerar uma economia de US\$ 28 milhões até o ano de 2030.

Por outro lado, *pellets* e CDR apresentaram MAC e BECP positivos. O preço dos combustíveis foi o único determinante desse resultado, já que se pressupõe que não há mudanças no CAPEX ou no OPEX para implantação dessas medidas. Por conta disto, o futuro cenário dos preços dos combustíveis poderá acarretar em MAC e BECP maiores ou menores do que foi apresentado para essas medidas.

O uso de CDR em substituição ao combustível fóssil convencional (nesse caso carvão) em fornos de cimento além de permitir reduzir as emissões de GEE, também, diminui a demanda por aterros e, dessa, a probabilidade de contaminação do ambiente.

A implementação de tais estratégias depende de política fiscal e de um plano de desenvolvimento setorial. O custo dessas ações deve ser baixo, uma vez que se trata de práticas existentes.

Finalmente, destacam-se as limitações e dificuldades encontradas ao longo do período de execução deste documento, um dos seus principais objetivos foi identificar possíveis direções para um futuro de baixo carbono, tendo

um recorte específico e exploratório, a indústria de cimento no Estado de São Paulo. Uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos, novos estudos deverão surgir para ampliar o escopo e aprofundar o caráter técnico, político, regulatório, social e ambiental dessas tecnologias de baixo carbono. Cabe res-

saltar que o enfoque deste estudo foi a análise de tecnologias para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, com enfoque no dióxido de carbono, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.

## REFERÊNCIAS

CERQUEIRA, C. *The steel industry and its by-products for cement industries*. In: CBI BRAZIL & LATAM 2014 – BRAZILIAN AND LATIN AMERICAN CEMENT & LIME CONFERENCE. São Paulo, 6/02 2014.

CETESB. *Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008: Relatório de Referência*. São Paulo, 2013. (1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo). Disponível em: <[http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro\\_inventario\\_setor\\_industria\\_web1.pdf](http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf)>. Acesso em: set. 2015.

ESMAP. World bank group. *Modeling Tools and E-Learning: MACTool*. Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. 2016. Acesso em: 24 abr 2016.

FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T. Decarbonizing Development. *Three Steps to a Zero-Carbon Future*. Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.

GOUVELLO, C. de et al. *Estudo de baixo carbono para o Brasil*. Washington, DC: Banco Mundial, 2010. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio\\_BM\\_Principal\\_Portugues\\_SumarioExecutivo.pdf](http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf)>. Acesso em: out.2015.

IPCC. *Emission Scenarios*. Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. 2000a. 27p.

IPCC. *Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories*. Hayama, JP, 2000b. Disponível em: <<http://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em mai de 2016.

MENDONÇA, M.B. ANPAD. Técnicas de Prospecção e Análise de Cenários Futuros nos Governos e Administração Pública do Brasil: Revisão da Produção Científica Brasileira de 2001 a 2010. In: *V Encontro de Estudos em Estratégia*. Porto Alegre, 2011.

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

PACCA, S. A. et al. *Estudo de baixo carbono para a indústria de São Paulo: relatório síntese*. 1ª ed. 2017. São Paulo CETESB, 2017. 188 p.

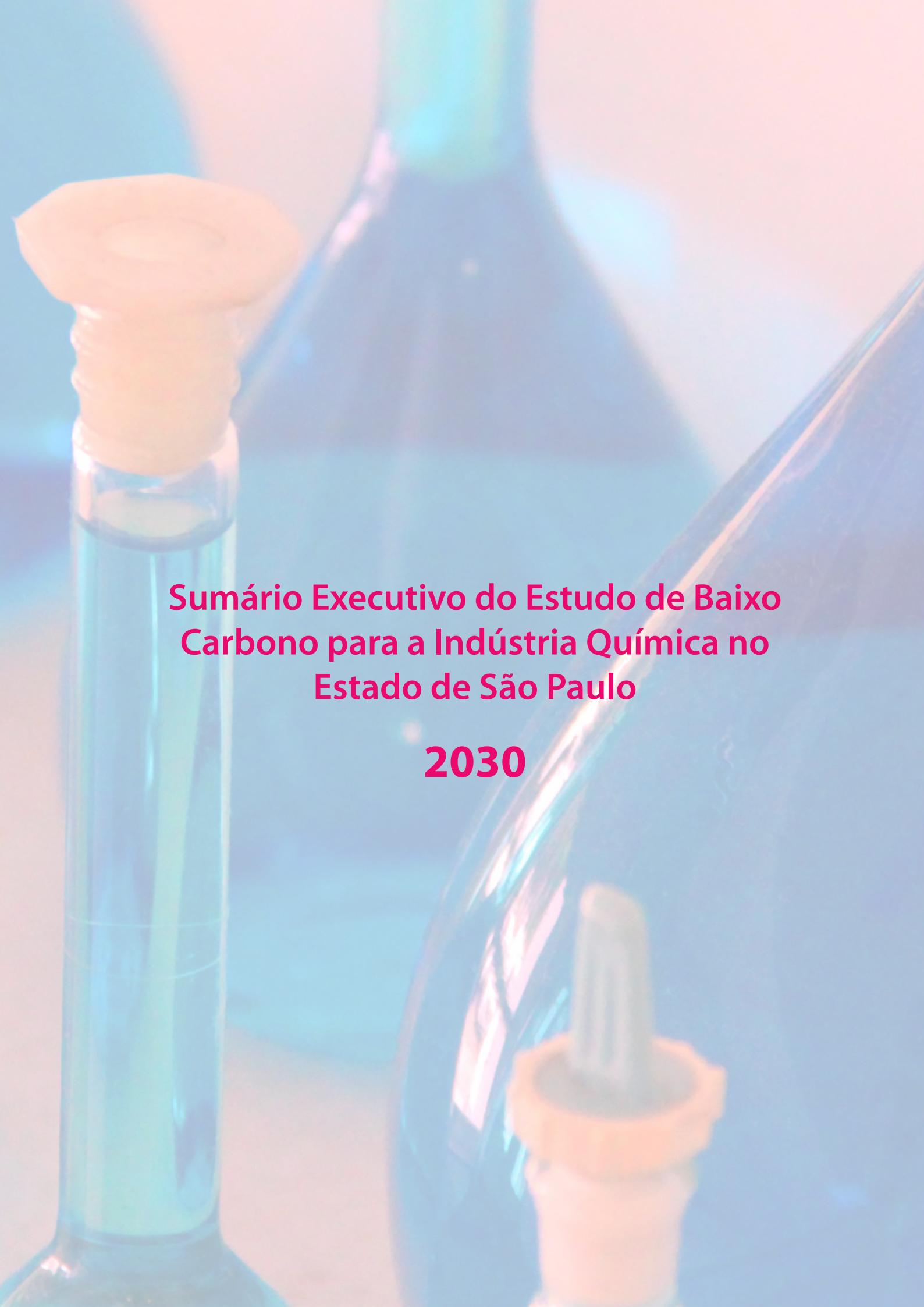
PUNHAGUI, K. R. S.; OLIVEIRA, L. S.; SOUZA, J. F. T. de; JOHN, V. M. *Estudo de baixo carbono para a indústria de cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030*. São Paulo, 2017.

SNIC. *Press Kit 2013*. SNIC,, 2013. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/pdf/presskit\\_SNIC\\_2013\\_PB.pdf](http://www.snic.org.br/pdf/presskit_SNIC_2013_PB.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2015

SNIC. *Relatório anual 2013*. [s.l.] SNIC, 2014. Disponível em: <[http://www.snic.org.br/relatorio\\_anual\\_dinamico.asp](http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp)>. Acesso em: 1 jun. 2015

WBCSD. *CO<sub>2</sub> and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry – The Cement CO<sub>2</sub> and Energy Protocol – Version 3.0*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD\\_CO2\\_Protocol\\_En.pdf](http://www.cement-co2-protocol.org/v3/Content/Resources/Downloads/WBCSD_CO2_Protocol_En.pdf)>. Acesso em: 11 nov. 2015.



The background of the image is a close-up, slightly blurred photograph of laboratory glassware. It features several pieces of glassware, including a large Erlenmeyer flask containing a dark liquid, a graduated cylinder with blue liquid, and a smaller beaker. The lighting creates a soft, pastel-like glow with shades of pink, blue, and yellow.

# **Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Química no Estado de São Paulo**

**2030**



## **Lista de abreviaturas e siglas**

<b>ABDI</b>	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
<b>ABIQUIM</b>	Associação Brasileira da Indústria Química
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desenvolvimento
<b>CAPEX</b>	Investimentos ( <i>Capital Expenditures</i> )
<b>CETESB</b>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<b>CBC</b>	Cenário de Baixo Carbono
<b>CR</b>	Cenário de Referência
<b>ESMAP</b>	Energy Sector Management Assistance Program
<b>GEE</b>	Gases de Efeito Estufa
<b>GWP</b>	Potencial de Aquecimento Global ( <i>Global Warming Potential</i> )
<b>GLP</b>	Gás Liquefeito de Petróleo
<b>IPCC</b>	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change)
<b>LED</b>	Diodo Emissor de Luz ( <i>Light Emitting Diode</i> )
<b>MACTool</b>	<i>Marginal Abatement Cost Tool</i> (Ferramenta para Custo Marginal de Abatimento)
<b>MDIC</b>	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
<b>RPBC</b>	Refinaria Presidente Bernardes – Cubatão
<b>SP</b>	São Paulo
<b>TIR</b>	Taxa Interna de Retorno

## **Lista de símbolos**

<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	eteno
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub></b>	dicloroetano
<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O</b>	óxido de eteno
<b>C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH</b>	etanol
<b>C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>4</sub></b>	ácido adípico
<b>CH<sub>2</sub>CHCl</b>	cloreto de vinila (MVC)
<b>CH<sub>4</sub></b>	metano
<b>CO<sub>2</sub></b>	dióxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub>e</b>	dióxido de carbono equivalente
<b>Gg</b>	gigagrama
<b>GJ</b>	gigajoule
<b>H<sub>2</sub></b>	hidrogênio
<b>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></b>	ácido fosfórico
<b>HCl</b>	ácido clorídrico
<b>HNO<sub>3</sub></b>	ácido nítrico
<b>MWh</b>	megawatt-hora
<b>N<sub>2</sub></b>	nitrogênio
<b>N<sub>2</sub>O</b>	óxido nitroso
<b>NH<sub>3</sub></b>	amônia
<b>NO</b>	óxido nítrico
<b>O<sub>2</sub></b>	oxigênio
<b>t</b>	tonelada
<b>Tep</b>	tonelada equivalente de petróleo

O presente sumário foi baseado no “Estudo de baixo carbono para a indústria química no Estado de São Paulo de 2014 a 2030” o qual construiu cenários de referência e de baixo carbono considerando emissões de gases de efeito estufa (GEE) de processo e do consumo de energia e a avaliação de alternativas de mitigação. No estudo foram apresentados o Custo Marginal de Abatimento (*Marginal Abatement Cost – MAC*) das tecnologias e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-even carbon price – BECP*). As reduções de emissões proporcionadas ao longo do período analisado por cada opção tecnológica foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócioeconômico e mudança tecnológica, cuja evolução é altamente incerta. No entanto, os cenários são imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar e são uma ferramenta adequada para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas, não apresentando relação com a probabilidade de ocorrência delas (IPCC, 2000b).

Os cenários colaboram na identificação das possíveis ameaças, avaliam as competências organizacionais e exercitam o pensamento global para desenvolver alianças e ações estratégicas, proporcionando a elaboração de análises alternativas. Portanto, não se trata apenas de prospecção, mas da construção de um futuro possível, auxiliando a construir as mudanças desejadas para o futuro (WRIGHT, 2008 *apud* MENDONÇA, 2011). Os cenários no presente estudo exploratório foram construídos baseados na análise de dados históricos, nas informações apresentadas em publicações do setor e em informações atribuídas pelos autores.

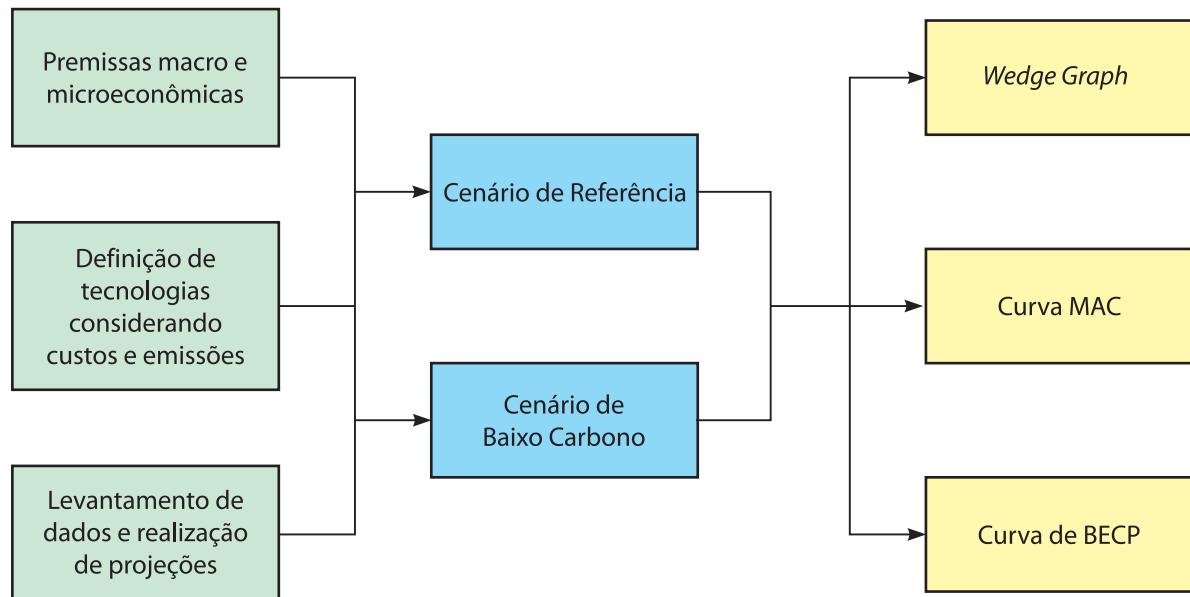
A CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo publicou em 2011 o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo, CETESB (2011), que destacou que, em 2005, no Estado de São Paulo, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) foi de 139.811Gg de CO<sub>2</sub>e (sem incluir os gases controlados pelo Protocolo de Montreal), sendo que 57,2% das emissões foram advindas da categoria de energia. Além disso, os processos industriais paulistas foram responsáveis por 14,7% das emissões. Dessa emissões referentes aos processos, o setor químico foi responsável por 38,8% associado à produção de ácido adípico, ácido fosfórico, ácido nítrico, amônia, dicloroetano e cloreto de vinila, eteno, negro de fumo e óxido de eteno.

Diante do contexto do estado frente às mudanças climáticas, o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e a CETESB estabeleceram uma Cooperação Técnica, na qual se enquadra o estudo em pauta, que teve como principais objetivos apresentar os custos e o potencial de mitigação de GEE para a indústria no Estado de São Paulo, a partir da elaboração de cenários de referência (CR) e de baixo carbono (CBC), considerando emissões de GEE de processo e de consumo de energia.

## ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente seguiu-se com a realização dos cenários de referência (CR) e baixo carbono (CBC) e a apresentação dos resultados de mitigação, MAC e BECP.

As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresenta-

**Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo**

Fonte: Pacca *et al.* (2017).

do nos guias do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2000a, 2006) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Greenhouse Gas Inventories Programme, Energy, Volume 2* e o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. As estimativas consideraram os dados de atividade, como produção, combustível, energia elétrica consumida e os respectivos fatores de emissão.

Para a construção das curvas de MAC e BECP<sup>13</sup> empregou-se a MACTool. De acordo com o Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços (ESMAP, 2016; FAY, *et al.*, 2015).

Para aferir quantitativamente a contribuição de cada tecnologia na redução das emissões de GEE, foram elaboradas curvas que apresentaram cunhas de mitigação (*Wedge Graph*), referente à comparação entre o CR e o CBC com a implantação das respectivas tecnologias. Com essa informação foi possível visualizar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação de GEE.

## RESULTADOS

Nesta seção, são apresentadas os resultados no período de 2014 a 2030 para a evolução da produção química no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões do CR e CBC, as emissões evitadas por cada medida nos cenários, o MAC e o BECP das tecnologias.

13. O preço de equilíbrio de carbono indica o incentivo econômico que os agentes econômicos estabelecem como necessário para que a medida de mitigação estudada se torne atraente, quando comparada à referência (GOUVELLO *et al.*, 2010).

## A evolução da produção química no Estado de São Paulo

A projeção de produção na indústria química considerou a premissa de crescimento de 3,7%

ao ano (a.a.) limitada pela capacidade instalada ou licenciada das unidades de produção existentes. No Quadro 1 são apresentadas as considerações específicas sobre a produção dos produtos químicos abordados no estudo.

**Quadro 1 – Considerações específicas sobre a produção**

Produto	Considerações sobre a produção
Ácido adípico (C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>4</sub> )	A produção está limitada à capacidade instalada e não há previsão de aumento da capacidade de produção
Ácido fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	A produção está limitada à capacidade instalada. A expansão da capacidade produtiva de ácido fosfórico está projetada pela instalação de fábricas nas proximidades das minas de rocha fosfática localizadas em Patrocínio em Minas Gerais, Catalão em Goiás, Santa Quitéria no Ceará, porém, no estado de São Paulo, não há previsão de aumento da capacidade de produção.
Ácido nítrico (HNO <sub>3</sub> )	A produção está limitada à capacidade de produção e não há previsão de nova instalação de produção no estado.
Amônia (NH <sub>3</sub> )	Não há previsão de aumento da produção. A unidade existente já aumentou sua capacidade de projeto de 530 t/dia para 600 t/dia em 2003 e depende da disponibilidade de matéria prima (gás de refinaria e ou gás natural). Portanto, a capacidade de produção no horizonte de 2030, no cenário BC, está limitada à capacidade instalada (CIESP, 2014).
Dicloroetano (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> )	Não há previsão de aumento da capacidade de produção, assim, a capacidade de produção está limitada à capacidade instalada.
Cloreto de vinila (CH <sub>2</sub> CHCl)	Não há previsão de aumento da produção, assim, a capacidade de produção está limitada à capacidade instalada
Eteno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	O cenário de produção está relacionado à gestão da produção de eteno (ou etileno) no Brasil. Como não há previsão de novos projetos "crakers" para produção de eteno a partir de nafta, a produção de eteno por essa via é considerada constante (BAIN & COMPANY, GAS ENERGY, 2014). Assim, a produção de eteno "petroquímico", no horizonte de 2030, está limitada à capacidade instalada.
Negro de fumo	Não há previsão de aumento da produção devido a não disponibilidade de matéria-prima. Já foi aumentada a capacidade em 55.000 toneladas, em 2008. Não há previsão de expansão ou novas instalações, refinarias e petroquímicas no estado para a produção da matéria-prima primária, o resíduo aromático. Assim, a produção no horizonte de 2030 está limitada pelas capacidades licenciadas.
Óxido de Eteno (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	Não há previsão para expansão da capacidade produtiva. A capacidade instalada já foi ampliada em 2005, de 52.000 t/ano para o atual patamar de 95.000 t/ano. Assim, considerou-se que a produção no horizonte de 2030 será limitada pela capacidade atualmente licenciada.
Coque de petróleo	Não há previsão de aumento de produção na unidade de Cubatão, limitada ao fornecimento de matéria-prima da RPBC.

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

Na Tabela 1 é apresentada a produção de ácido adípico, ácido fosfórico, ácido nítrico, amônia, dicloroetano, cloreto de vinila, eteno, negro de fumo, óxido de eteno e coque de petróleo no período de 2014 a 2030. Ao atingir a capacidade instalada, a produção se mantém constante até o final do período.

No cenário de referência, estima-se que a produção aumentará dos 3.002 Gg em 2014 para 3.503 Gg em 2030, representando um aumento de 16,7%, cerca de 1,0% ao ano. A produção de ácido adípico apresentou um aumento de 45% em 2030 em relação a 2014. Considerando

esse mesmo período, ácido fosfórico aumentou 14,9%, a produção de ácido nítrico aumentou 14,7%, a produção de amônia aumentou 14,8%, a produção de dicloroetano aumentou 16,7%, a produção de cloreto de vinila aumentou 10,8%, a produção de eteno aumentou 20,1%, a produção de negro de fumo aumentou 18,6%, óxido de eteno 17,3% e a produção de coque de petróleo aumentou 17,6%.

No CBC a produção difere do CR pela inserção de bioeteno a partir de 2025 totalizando, no período de 2025 a 2030, uma produção de 1.482 Gg de bioeteno<sup>14</sup>.

**Tabela 1 – Produção química no Estado de São Paulo no período de 2014 a 2030**

Ano	Ácido adípico	Ácido fosfórico	Ácido nítrico	Amônia	Dicloroetano	Cloreto de vinila	Eteno	Negro de fumo	Óxido de eteno	Coque de petróleo	Total
	(Gg)										
2014	60	442	468	182	120	316	583	318	81	425	3.002
2015	63	459	485	189	131	327	605	330	84	441	3.114
2016	65	476	503	196	136	340	627	342	87	457	3.229
2017	67	493	522	203	140	350	651	355	90	474	3.345
2018	70	508	537	209	140	350	675	368	93	492	3.442
2019	72	508	537	209	140	350	700	376	95	500	3.487
2020	75	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.491
2021	78	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.494
2022	81	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.497
2023	84	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.500
2024	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2025	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2026	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2027	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2028	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2029	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2030	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

14. As informações são resultados de um levantamento exploratório cujos dados estão referenciados no Anexo B do documento "Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Química no Estado de São Paulo de 2014 a 2030".

## A evolução do consumo de energia

O cenário de referência de consumo energético na indústria química paulista foi construído a partir das informações publicadas no Balanço Energético Estadual (SÃO PAULO, 2014), que disponibiliza o consumo energético por setor da economia, incluindo a indústria química. Na Tabela 2 são apresentados os dados de consumo de energia pela indústria química de 2014 a 2030, considerando um crescimento anual médio de 3,7% limitado à capacidade instalada.

No CR observa-se que a maior parcela de consumo energético é proveniente da eletricidade e do gás natural (GN) e correspondendo a 48,6% e 38,6% respectivamente, conforme a tabela 2.

No CBC ocorre uma redução de 85.873 TJ em relação ao consumo de GN. O óleo combustível (OC) apresenta redução de 29.796 TJ, eletricidade redução de 120.865 TJ. No CBC é proposto a partir de 2015 o consumo de biomassa como medida de baixo carbono totalizando em energia 115.670 TJ no período de 2015 a 2030.

**Tabela 2 – Consumo de energia pela indústria química no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

Ano	Gás natural	Lenha	Óleo diesel	Óleo combustível	GLP	Gás de refinaria	Eletricidade (1)	Bagaço de cana	Outros secundários	Total
	(TJ)									
2014	27.509	217	955	1.909	1.779	2.083	34.668	781	1.432	71.332
2015	28.508	225	989	1.978	1.844	2.158	35.927	809	1.484	73.923
2016	29.544	233	1.025	2.050	1.911	2.237	37.233	839	1.538	76.609
2017	30.591	241	1.062	2.123	1.978	2.316	38.552	869	1.592	79.324
2018	31.461	248	1.092	2.183	2.035	2.382	39.648	893	1.638	81.579
2019	31.873	251	1.106	2.212	2.061	2.413	40.168	905	1.659	82.648
2020	31.909	252	1.107	2.215	2.064	2.416	40.214	906	1.661	82.742
2021	31.935	252	1.108	2.216	2.065	2.418	40.246	907	1.662	82.808
2022	31.961	252	1.109	2.218	2.067	2.420	40.279	907	1.664	82.877
2023	31.988	252	1.110	2.220	2.069	2.422	40.313	908	1.665	82.947
2024	32.017	252	1.111	2.222	2.070	2.424	40.349	909	1.666	83.021
2025	32.017	253	1.111	2.222	2.071	2.424	40.350	909	1.667	83.023
2026	32.017	253	1.111	2.222	2.071	2.424	40.350	909	1.667	83.023
2027	32.017	253	1.111	2.222	2.071	2.424	40.350	909	1.667	83.023
2028	32.017	253	1.111	2.222	2.071	2.424	40.350	909	1.667	83.023
2029	32.017	253	1.111	2.222	2.071	2.424	40.350	909	1.667	83.023
2030	32.017	253	1.111	2.222	2.071	2.424	40.350	909	1.667	83.023

Fonte: Fanti et al. (2017).

(1) Os dados de consumo de energia foram extraídos do Balanço Energético Estadual (SÃO PAULO, 2014) em tonelada equivalente de petróleo (tep) e foram convertidos em Joule (J) empregando-se o fator 41.868 GJ/tep.

## A evolução das emissões no cenário de referência e baixo carbono

A Tabela 3 apresenta as emissões totais de GEE que abrangem o processo, a energia térmica e a energia elétrica. As estimativas foram realizadas considerando os dados estimados de produção e os respectivos fatores de emissão.

No cenário de referência as emissões de 2030 em relação a 2014 apresentam um aumento de 1.861 GgCO<sub>2</sub>e, representando 15,7%. Em relação às emissões de processo, estima-se que ocorrerá um aumento de 18,7% GgCO<sub>2</sub>e em 2030 em relação à 2014. Para as emissões de energia térmica e energia elétrica estima-se um aumento de 16,4% e 14,1%, respectivamente.

Para o CBC foram consideradas três medidas associadas ao processo e cinco à energia. As mesmas estão descritas no Quadro 2.

Alternativamente para a implantação de tecnologias de baixo carbono, podem-se avaliar outras tecnologias disponíveis com as quais se obtenham resultados similares em termos de CBC.

O cenário de penetração, apresentado na Tabela 4, representa a evolução da adoção das tecnologias do CBC. As tecnologias referentes a processos possuem uma penetração pontual em seus respectivos anos, enquanto as referentes à energia são implantadas gradualmente ao longo do período de análise.

**Tabela 3 – Emissões de GEE no cenário de referência no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

Ano	Processo (1)	Energia térmica (2)	Energia elétrica (3)	Total
				(GgCO <sub>2</sub> e) (4)
2014	3.073	2.143	6.630	11.846
2015	3.186	2.221	6.862	12.269
2016	3.304	2.302	7.102	12.708
2017	3.426	2.383	7.344	13.153
2018	3.543	2.451	7.543	13.537
2019	3.622	2.483	7.633	13.738
2020	3.629	2.486	7.632	13.747
2021	3.633	2.488	7.629	13.750
2022	3.637	2.490	7.626	13.754
2023	3.642	2.492	7.623	13.758
2024	3.646	2.495	7.621	13.762
2025	3.647	2.495	7.612	13.753
2026	3.647	2.495	7.603	13.744
2027	3.647	2.495	7.593	13.735
2028	3.647	2.495	7.584	13.725
2029	3.647	2.495	7.575	13.716
2030	3.647	2.495	7.566	13.707

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

- (1) Os FE utilizadas para as estimativas de emissões no CR foram: ácido adipíco 1,494 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> (FANTI *et al.*, 2017), ácido nítrico 0,634 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> (FANTI *et al.*, 2017), ácido fosfórico 0,059 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> (FANTI *et al.*, 2017), amônia 1,30 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> Brasil (2015), cloreto de vinila 0,294 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> Brasil (2015), coque de petróleo 0,730 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> (FANTI *et al.*, 2017), dicloroetano 0,196 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> IPCC (2006), eteno 1,870 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub> (FANTI *et al.*, 2017), gás natural 0,0558 tCO<sub>2</sub>/GJ, óleo diesel: 0,0733 tCO<sub>2</sub>/GJ, óleo combustível: 0,0766 tCO<sub>2</sub>/GJ, GLP: 0,0624 tCO<sub>2</sub>/GJ, querossene: 0,0708 tCO<sub>2</sub>/GJ, gás de refinaria: 0,0661 tCO<sub>2</sub>/GJ, coque de petróleo: 0,0998 tCO<sub>2</sub>/GJ.
- (2) Gás natural: 0,0558 tCO<sub>2</sub>/GJ, óleo diesel: 0,0733 tCO<sub>2</sub>/GJ, óleo combustível: 0,0766 tCO<sub>2</sub>/GJ, GLP: 0,0624 tCO<sub>2</sub>/GJ, querossene: 0,0708 tCO<sub>2</sub>/GJ, gás de refinaria: 0,0661 tCO<sub>2</sub>/GJ, coque de petróleo: 0,0998 tCO<sub>2</sub>/GJ.
- (3) O FE para eletricidade foi o 0,5884 tCO<sub>2</sub>/MWh baseado em (BRASIL 2014) e (FANTI *et al.*).
- (4) O potencial de aquecimento global (*Global Warm Potencial* – GWP) dos GEE foram empregados conforme apresentado pelo IPCC (2000b) onde, para um horizonte de 100 anos, o GWP do CO<sub>2</sub> é de 1 e o do N<sub>2</sub>O é de 310.

## Quadro 2 – Tecnologias de baixo carbono

Tecnologia		Descrição
Processo	<b>Amônia</b>	A oportunidade de redução de emissão de CO <sub>2</sub> em unidade de amônia está associada à recuperação de H <sub>2</sub> do gás de purga no circuito da síntese de amônia.
	<b>Ácido nítrico</b>	A oportunidade de redução de emissão de N <sub>2</sub> O em unidade de ácido nítrico está associada ao abatimento de N <sub>2</sub> O na unidade de ácido nítrico de tecnologia de baixa pressão empregando catalisador.
	<b>Produção de bioeteno</b>	O eteno, de origem renovável para a produção de dois produtos químicos de uso industrial: o óxido de eteno e o cloreto de vinila promovendo a neutralização do CO <sub>2</sub> gerado na produção desses dois derivados do eteno.
Energia	<b>LED</b>	Substituição de lâmpadas convencionais por lâmpadas diodo emissor de luz ( <i>Light Emitting Diode – LED</i> ). visando a um menor consumo de energia elétrica.
	<b>GN</b>	Substituição de GN por biomassa cultivada.
	<b>OC</b>	Substituição de OC por biomassa cultivada.
	<b>Motores</b>	Substituição de motores convencionais por motores mais eficientes visando a um menor consumo de energia elétrica.
	<b>Cogeração</b>	Associada à produção simultânea e de forma sequenciada, de eletricidade e energia térmica a partir do uso de GN (o estudo não considera o reaproveitamento de gases residuais).

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

Tabela 4 – Cenário de penetração das tecnologias do CBC

Tipo	Processo				Energia				
	Tecnologia	Amônia (recuperação de gás de purga)	Ácido nítrico (abatimento de N <sub>2</sub> O)	Bioeteno	LED	Motores mais eficientes	Cogeração (1)	Substituição de GN por biomassa (2)	Substituição de OC por biomassa (2)
2014	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
2015	0%	0%	0%	0%	6%	0%	3%	17%	
2016	0%	0%	0%	0%	13%	6%	7%	33%	
2017	0%	0%	0%	20%	19%	12%	10%	50%	
2018	0%	0%	0%	20%	25%	18%	13%	67%	
2019	0%	0%	0%	20%	31%	25%	17%	83%	
2020	100%	0%	0%	40%	38%	30%	20%	100%	
2021	100%	0%	0%	40%	44%	37%	20%	100%	
2022	100%	0%	0%	40%	50%	43%	20%	100%	
2023	100%	100%	0%	60%	56%	50%	20%	100%	
2024	100%	100%	0%	60%	63%	55%	20%	100%	
2025	100%	100%	100%	60%	69%	62%	20%	100%	
2026	100%	100%	100%	80%	75%	68%	20%	100%	
2027	100%	100%	100%	80%	81%	74%	20%	100%	
2028	100%	100%	100%	80%	88%	80%	20%	100%	
2029	100%	100%	100%	100%	94%	80%	20%	100%	
2030	100%	100%	100%	100%	100%	100%	20%	100%	

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

(1) Estimativa do autor com base na Associação Paulista de Cogeração de Energia (COGEN, 2008).

(2) Estimativa do autor com base em ABDI; MDIC e FGV (2012).

Na Tabela 5 são apresentadas as emissões de GEE no CBC.

No cenário de baixo carbono em relação ao cenário de referência observa-se uma emissão evitada de 31.311 GgCO<sub>2</sub>e no período de 2014 a 2030. Essa redução está 4,6% associada a processo, 72,8% a energia elétrica e 22,6% à energia térmica.

**Tabela 5 – Emissões de GEE no cenário de baixo carbono no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**

Ano	Processo (1)	Energia térmica (2)	Energia elétrica (3)	Total
	(GgCO <sub>2</sub> e) (4)			
2014	3.073	2.143	6.630	11.846
2015	3.186	2.148	6.825	12.159
2016	3.304	2.135	6.882	12.321
2017	3.426	2.131	6.940	12.497
2018	3.543	2.111	6.943	12.596
2019	3.622	2.040	6.837	12.499
2020	3.624	1.960	6.646	12.230
2021	3.628	1.962	6.455	12.045
2022	3.632	1.964	6.265	11.861
2023	3.531	1.965	6.061	11.557
2024	3.536	1.967	5.883	11.385
2025	3.446	1.967	5.688	11.101
2026	3.446	1.967	5.480	10.893
2027	3.446	1.967	5.304	10.717
2028	3.446	1.967	5.104	10.517
2029	3.446	1.967	5.043	10.456
2030	3.446	1.967	4.996	10.409

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

- (1) Os FF utilizadas para as estimativas de emissões no CBC foram: ácido nítrico 0,438 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub>, amônia: 1,275 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub>, cloreto de vinila, 0,271 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub>, óxido de eteno 0,000 tCO<sub>2</sub>e/t<sub>produto</sub>. Os demais produtos componentes CR não tiveram alteração em seus FE no cenário proposto.
- (2) Gás natural: 0,0558 tCO<sub>2</sub>/GJ, óleo diesel: 0,0733 tCO<sub>2</sub>/GJ, óleo combustível: 0,0766 tCO<sub>2</sub>/GJ, GLP: 0,0624 tCO<sub>2</sub>/GJ, querosene: 0,0708 tCO<sub>2</sub>/GJ, gás de refinaria: 0,0661 tCO<sub>2</sub>/GJ, coque de petróleo: 0,0998 tCO<sub>2</sub>/GJ.
- (3) O FE para eletricidade foi o 0,5884 tCO<sub>2</sub>/MWh baseado em (BRASIL 2014).
- (4) O potencial de aquecimento global (*Global Warm Potencial – GWP*) dos GEE foram empregados conforme apresentado pelo IPCC (2000b) onde, para um horizonte de 100 anos, o GWP do CO<sub>2</sub> é de 1 e o do N<sub>2</sub>O é de 310.

## Custos de investimento e operação

A Tabela 6 apresenta o Investimento (*Capital Expenditures – CAPEX*) das tecnologias de processo de Recuperação de purga na síntese da amônia, implementação de catalisador na produção de ácido nítrico e utilização de bioeteno para a produção de cloreto de vinila e óxido de etileno.

A diferença do investimento entre o CR e o CBC é o da instalação de um sistema para recuperação de H<sub>2</sub> do gás de purga da síntese de amônia.

Em relação à tecnologia associada à produção de ácido nítrico, o catalisador é utilizado para converter o N<sub>2</sub>O em CO<sub>2</sub>.

A produção de bioeteno visa à obtenção dos derivados cloreto de vinila e óxido de eteno a partir de matéria-prima renovável em substituição à utilização de eteno petroquímico.

**Tabela 6 – CAPEX das tecnologias de baixo carbono para processos**

Cenário	Recuperação de purga na síntese da amônia	Catalisador na produção de ácido nítrico	Utilização de bioeteno para a produção de cloreto de vinila e óxido de etileno
	(US\$)		
Referência	—	—	237.687.720
Baixo carbono	3.905.000	3.538.250	369.721.000

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

Nota: A não apresentação de valores para o cenário de referência relaciona-se ao fato de serem tecnologias que no CBC receberão complementos à instalação previamente existente no CR.

A Tabela 7 apresenta o CAPEX das tecnologias relacionadas à energia sendo a substituição de lâmpadas incandescentes por lâmpadas a LED, a substituição de gás natural e óleo combustível por biomassa, o emprego de motores mais eficientes e a cogeração de energia pela combustão do gás natural.

A Tabela 8 apresenta o MAC e o *Break-Even Carbon Price* para o setor da indústria química.

A curva MAC contemplando as oito tecnologias do CBC abordadas no presente trabalho é apresentada no Gráfico 1. Por sua vez, as emissões evitadas representadas na curva MAC são apresentadas na Tabela 9.

### Emissões evitadas por cada medida ou tecnologia

A Tabela 9 apresenta as emissões evitadas por tipo de medida ou tecnologia.

A partir da análise, conclui-se que é possível reduzir 16% (31,3 milhões de tCO<sub>2</sub>) das emissões totais do CR no período de 2014–2030. A medida que mostrou o maior potencial foi a cogeração a partir de GN, com 52,6% (16,4 milhões de tCO<sub>2</sub>) de participação no CBC, seguida pelos motores mais eficientes (18,4%) e substituição do GN por biomassa (15,3%). A participação dessas tecnologias fica visível no Gráfico 2.

**Tabela 7 – CAPEX das tecnologias de baixo carbono para o setor químico**

Cenário	Lâmpadas LED	Substituição de gás natural	Substituição de óleo combustível	Motores eficientes	Cogeração (gás natural)
	(US\$/MWh)	(US\$/GJ)	(US\$/GJ)	(US\$/MWh)	(US\$/GJ)
Referência	132	5,18	5,18	—	5,18
Baixo carbono	800	10,39	10,39	6	15,11

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

Nota: A não apresentação de valores para o cenário de referência relaciona-se ao fato de serem tecnologias que no CBC receberão complementos à instalação previamente existente no CR.

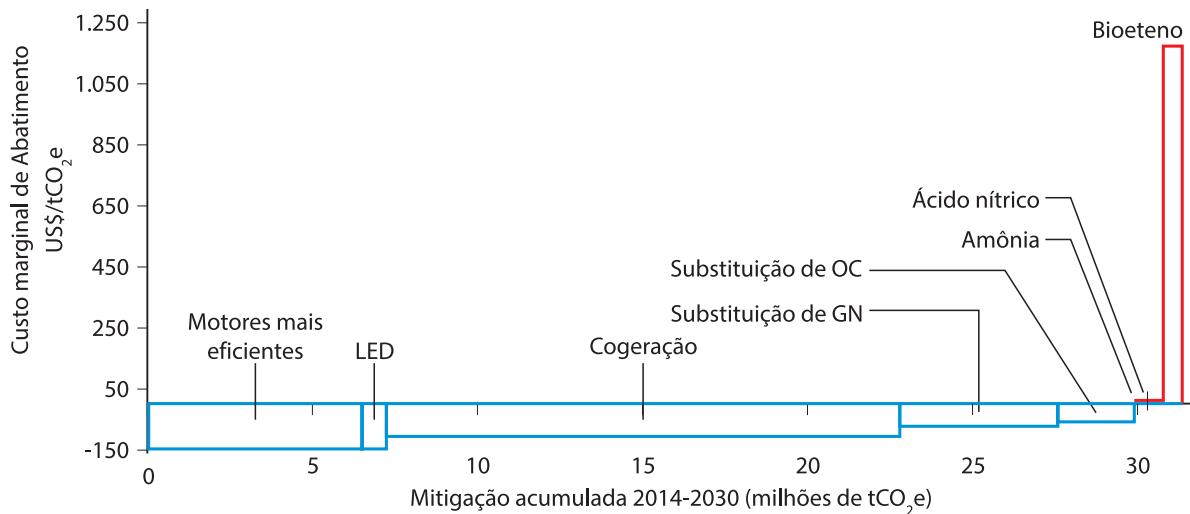
**Tabela 8 – MAC e Break-Even do setor químico no Estado de São Paulo**

Setor	Tecnologia	MAC (1)	BECP (2)	Emissões evitadas
		(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(MtCO <sub>2</sub> )	
Energia elétrica	Motores mais eficientes	-150	-224	5,77
Energia elétrica	LED	-145	-224	0,57
Energia elétrica	Cogeração	-111	-250	16,46
Energia térmica	Substituição de GN por lenha de reflorestamento	-75	-131	4,79
Energia térmica	Substituição de OC por lenha de reflorestamento	-58	-103	2,28
Processo	Amônia	-27	31	0,06
Processo	Ácido nitrico	2	10	0,84
Processo	Bioeteno	1.174	3.907	0,54

Fonte: Fanti *et al.* (2017).

(1) A taxa de desconto adotada no projeto para o cálculo do MAC foi de 8% ao ano (Pacca *et al.*, 2017).

(2) A taxa de atratividade considerada foi de 18% para calcular o BECP.

**Gráfico 1 – Curva de custo marginal de abatimento**

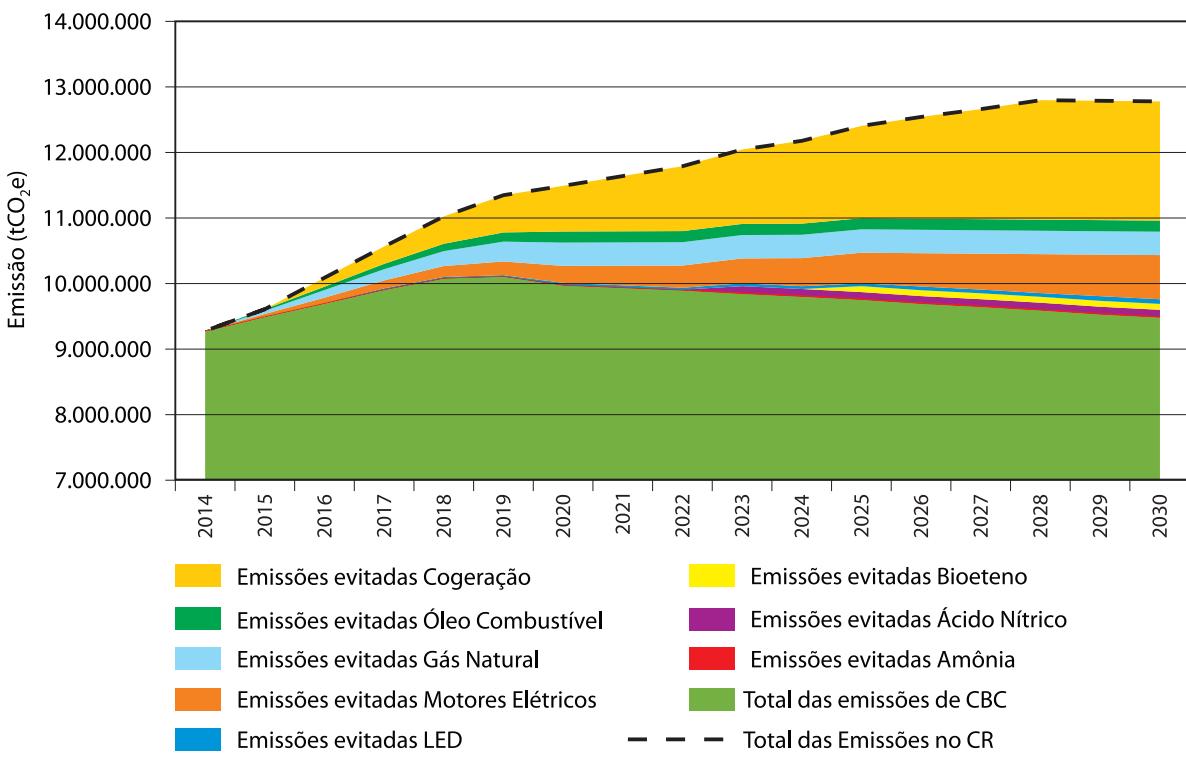
Fonte: Fanti *et al.* (2017).

**Tabela 9 – Emissões de gases de efeito estufa evitadas na indústria química 2014–2030**

Ano	Emissões evitadas (tCO <sub>2</sub> e)								Total das emissões no CBC	Total das emissões no CR
	Amônia	Ácido nítrico	Bioeteno	LED	Motores elétricos	Cogeração	GN	OC		
2014	—	—	—	—	—	—	—	—	9.279.111	9.279.111
2015	—	—	—	—	36.760	—	47.739	25.761	9.500.629	9.610.889
2016	—	—	—	—	82.434	136.857	115.439	51.824	9.704.833	10.091.387
2017	—	—	—	13.832	124.590	265.360	170.757	81.305	9.913.383	10.569.227
2018	—	—	—	14.207	168.376	417.912	228.294	112.045	10.088.498	11.029.333
2019	—	—	—	14.376	211.269	569.969	302.451	140.621	10.115.984	11.354.669
2020	5.200	—	—	28.750	258.957	698.625	356.231	169.616	9.980.028	11.497.408
2021	5.200	—	—	28.738	299.722	845.357	356.514	169.752	9.942.098	11.647.382
2022	5.200	—	—	28.727	340.463	991.996	356.809	169.892	9.904.555	11.797.642
2023	5.200	105.328	—	43.075	381.184	1.138.555	357.114	170.037	9.853.046	12.053.538
2024	5.200	105.328	—	43.061	428.692	1.266.689	357.430	170.188	9.809.497	12.186.085
2025	5.200	105.328	90.062	43.010	468.961	1.411.868	357.437	170.191	9.762.267	12.414.324
2026	5.200	105.328	90.062	57.277	509.121	1.556.665	357.437	170.191	9.700.567	12.551.850
2027	5.200	105.328	90.062	57.208	549.183	1.682.815	357.437	170.191	9.653.303	12.670.728
2028	5.200	105.328	90.062	57.138	595.918	1.826.923	357.437	170.191	9.599.366	12.807.563
2029	5.200	105.328	90.062	71.336	635.774	1.824.699	357.437	170.191	9.538.041	12.798.067
2030	5.200	105.328	90.062	71.249	675.531	1.822.475	357.437	170.191	9.491.099	12.788.571
Total das emissões no período 2014–2030	57.200	842.624	540.372	571.983	5.766.935	16.456.765	4.793.404	2.282.187	165.836.305	197.147.776

Fonte: Elaboração própria (2017).

Gráfico 2 – *Wedge Graph* para a indústria química em São Paulo de 2014 a 2030



Fonte: Fanti *et al.* (2017).

## CONCLUSÃO

A indústria química paulista, ainda depende, quase que exclusivamente, do uso de matéria-prima fóssil para produzir os seus produtos químicos básicos, intermediários e produtos finais de consumo. Recentes desenvolvimentos baseados em matéria-prima alternativa possibilitarão uma gradual redução na dependência de matérias-primas fósseis nas próximas décadas.

No estudo, o fator limitante para o crescimento das emissões de processo, no período 2014–2030, está relacionado com a capacidade instalada ou licenciada dos produtos. Esta condição pode indicar que, se houverem expansões de produção após 2030, os novos processos de produção podem ser implementados com tecnologias com menores emissões de GEE que as existentes.

De um modo geral, em relação à energia, o reaproveitamento de calor em reações químicas, minimiza a queima de combustíveis para a produção de vapor e consequentemente a emissão de CO<sub>2</sub>. Deve-se considerar também que diversos processos na indústria química necessitam de calor para seu desenvolvimento. Uma forma de minimizar a utilização de fontes externas para a geração de energia e consequente emissão de CO<sub>2</sub> é a criação de programas internos de eficiência energética, abordando aspectos, tais como a avaliação de eficiência em isolamento térmico.

Os resultados mostram que é necessário estruturar mecanismos que possam alavancar as ações de redução de GEE das medidas de mitigação que, depois de implementadas e ao longo do tempo, apresentem continuamente um custo de abatimento e preço de equilíbrio de carbono positivos.

Ao longo do período de execução deste documento, foram encontradas limitações na coleta de dados, pois informações sobre produção e emissão do segmento da química no ano

base do estudo (2014) eram fundamentais, contudo essa dificuldade foi superada, e optou-se pela não identificação da maioria das empresas que forneceram subsídios para sua realização.

Dado seu caráter exploratório e uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos de baixo carbono, novas possibilidades de tecnologias podem ser consideradas. Cabe ressaltar que o enfoque deste projeto foi analisar tecnologias para a mitigação de emissões de GEE, com ênfase no dióxido de carbono e óxido nitroso, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.

A metodologia para as curvas de custo marginal de redução de emissões se mostra uma ferramenta adequada para ser aplicada na identificação de tecnologias de mitigação e seus custos associados para redução da emissões de gases de efeito estufa nos segmentos industriais, tanto nos processos de produção como no uso e na geração de energia e na construção de políticas públicas de mitigação. O valor do carbono associado a cada iniciativa e tecnologia de mitigação pode ser utilizado para orientar o estabelecimento de estruturas de precificação de carbono e seus impactos.

A abordagem para construir a curva MAC requer inicialmente a definição das políticas de mitigação e dos programas e atividades que tenham sido identificadas como impactadas por essas políticas de mitigação de gases de efeito estufa tendo uma visão do futuro sobre o progresso das tecnologias de baixo carbono. Uma vez construída, uma curva MAC para um dado período ela pode continuar a ser atualizada adicionando novas medidas de mitigação e atualizando as já definidas, modificando os pressupostos para melhor refletir a realidade temporal, e revisando o potencial de redução baseado na velocidade de difusão das tecnologias de miti-

gação e de sua penetração do mercado. As atualizações das curvas MAC devem, no possível, terem frequências de atualização em razão das características dos segmentos envolvidos nas políticas de mitigação, consistentes com as atualizações dos inventários de GEE e com o desenvolvimento tecnológico, até para identificar se é necessário redefinir as estruturas de precifi-

cação de carbono. Existem questões relacionadas a aspectos logísticos que não foram considerados neste estudo.

Finalmente, o estudo apresentou um modelo de redução de emissões, com base na curva MAC, de forma a promover novos estudos que se utilizam dessa metodologia para avaliar opções de mitigação e de especificação de carbono.

## REFERÊNCIAS

- ABDI. MDIC. FGV. Subsídios para elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono – Caderno 4: Nota Técnica Química.** 2012. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br/Estudo/Caderno%2004%20-%20Nota%20T%C3%A9cnica%20Qu%C3%ADmica.pdf>>. Acesso em: outubro de 2015.
- ABIQUIM. Anuário da indústria química brasileira.** São Paulo: ABIQUIM, 2013a.
- BAIN & COMPANY, GÁS ENERGY. Potencial de diversificação da indústria química brasileira.** Relatório 6: matéria-prima petroquímica. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <[http://www.bnDES.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep\\_fep/chamada\\_publica\\_FEPprospec0311\\_Quimicos\\_Petroquimica.pdf](http://www.bnDES.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_FEPprospec0311_Quimicos_Petroquimica.pdf)>. Acesso: dez. 2014.
- CETESB. 1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo.** São Paulo, 2011. Disponível em: <[http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/01/Primeiro\\_Inventario\\_GEE\\_WEB\\_Segunda-Edicao-v1.pdf](http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/01/Primeiro_Inventario_GEE_WEB_Segunda-Edicao-v1.pdf)>. Acesso em outubro de 2015.
- CETESB. Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008: Relatório de Referência.** São Paulo, 2013. (1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo). Disponível em: <[http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro\\_inventario\\_setor\\_industria\\_web1.pdf](http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf)>. Acesso em: set. 2015.
- CIESP. Fertilizantes: Petrobrás amplia atuação.** Cubatão, 2014. Disponível em: <<http://www.ciesp.com.br/cubatao/noticias/fertilizantes-petrobras-amplia-a-tuacao/>>. Acesso em: 25 janeiro 2015.
- ESMAP. World bank group. Modeling Tools and E-Learning: MACTool.** Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. 2016. Acesso em: 24 abr 2016.
- FANTI, O. D.; SOUZA, J. F. T. de. Projeto BR-T1262:** Apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o Estado de São Paulo – setor da indústria química (emissões de GEE oriundas de processos de transformação não energéticos). Produto 6 – Relatório Final. São Paulo, 2016. Documento não editado.
- FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T.** Decarbonizing Development. **Three Steps to a Zero-Carbon Future.** Cimate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.
- GOUVELLO, C. de et al. Estudo de baixo carbono para o Brasil.** Washington, DC: Banco Mundial, 2010. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio\\_BM\\_Principal\\_Portugues\\_SumarioExecutivo.pdf](http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf)>. Acesso em: out.2015.
- IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Volume. 3: Industrial Processes and Product Use. 2006. Disponível em: <[http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3\\_Volume3/V3\\_3\\_Ch3\\_Chemical\\_Industry.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_3_Ch3_Chemical_Industry.pdf)>. Acesso em: jul. 2015.
- IPCC. Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment**

**Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Austrália, 1996. 588p.

**IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.** Hayama, JP, 2000a. Disponível em: <<http://www.ipcc-nccc.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em mai de 2016.

**IPCC. Mudança do clima 1995: a ciência da mudança do clima – sumário para formuladores de políticas e sumário técnico do relatório do grupo do trabalho I.** Editado e traduzido pelo MCT. Brasília, DF: MCT, 2000b. Disponível em: <[http://inventariogee.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/29/2013/12/mudanca\\_clima\\_1995.pdf](http://inventariogee.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/29/2013/12/mudanca_clima_1995.pdf)>. Acesso em: jul. 2017.

**MENDONÇA, M.B. ANPAD.** Técnicas de Prospecção e Análise de Cenários Futuros nos Governos e Administração Pública do Brasil: Revisão da Produção Científica Brasileira de 2001 a 2010. In: **V Encontro de Estudos em Estratégia.** Porto Alegre, 2011.

**PACCA, S. A.** Relatório Preliminar da coordenação. Projeto **BRT1262:** apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o Estado de São Paulo – consolidação dos setores. Produto 4. São Paulo, 2016.

**PACCA, S. A. et al. Estudo de baixo carbono para a indústria de São Paulo: relatório síntese.** 1ª ed. 2017. São Paulo CETESB, 2017. 188 p.

**PETROBRAS. Coque verde de petróleo.** c2016. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/industriais/coque-verde-de-petroleo/>>. Acesso em: mar. 2015

**PETROCOQUE S. A. Coque Petrocoque.** 2008. Disponível em: <<http://www.petrocoque.com.br/site/336/Default.aspx>>. Acesso em: mar. 2015

**SÃO PAULO (2014). Balanço Energético do Estado de São Paulo: Ano Base 2013.** Secretaria de Energia. São Paulo: s.n., 2014. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/642.pdf>>. Acesso em: outubro de 2015.

**STRUMPF, R; KURIMORI, N. Projeto BR-T1262:** apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o Estado de São Paulo – setor da indústria química (emissões de GEE oriundas do consumo de energia). Produto 6 – Relatório Final. São Paulo, 2015. Documento não editado.





# **Sumário Executivo do Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo**

**2030**



# **Lista de abreviaturas e siglas**

<b>BECP</b>	Preço de Equilíbrio de Carbono ( <i>Break-Even Carbon Price</i> )
<b>BC</b>	Baixo Carbono
<b>BenchMark-TIR</b>	Taxa de Atratividade
<b>BID</b>	Banco Interamericano de Desenvolvimento
<b>CAPEX</b>	Investimentos ( <i>Capital Expenditures</i> )
<b>CETESB</b>	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CBC</b>	Cenário Baixo Carbono
<b>CR</b>	Cenário de Referência
<b>ESMAP</b>	Energy Sector Management Assistance Program
<b>SP</b>	Estado de São Paulo
<b>FEA</b>	Fornos Elétricos a Arco
<b>GEE</b>	Gás ou Gases de Efeito Estufa
<b>GLP</b>	Gás Liquefeito de Petróleo
<b>IABr</b>	Instituto Aço Brasil
<b>IETD</b>	Industrial Efficiency Technology Database
<b>IPCC</b>	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (Intergovernmental Panel on Climate Change)
<b>PEMC</b>	Política Estadual de Mudanças Climáticas
<b>PIB</b>	Produto Interno Bruto
<b>MAC</b>	Custo Marginal de Abatimento ( <i>Marginal Abatement Cost</i> )
<b>MDEA</b>	Metildietanolamina
<b>Oxy Blast – TGR</b>	Alto Forno a Oxigênio com Turbina de Recuperação dos Gases de Topo ( <i>Oxygen Blast Furnace with Top Gas Recycling Blast Furnace</i> )
<b>TGR</b>	Turbina de Recuperação dos Gases de Topo ( <i>Top Gas Recycling</i> )
<b>TGRBF</b>	Turbina de Recuperação dos Gases de Topo do Alto Forno ( <i>Top Gas Recycling Blast Furnace</i> )
<b>TIR</b>	Taxa Interna de Retorno
<b>WSA</b>	World Steel Association
<b>OPEX</b>	Despesas de Operação ( <i>Operational Expenses</i> )

## **Lista de símbolos**

**CO** monóxido de carbono

**CO<sub>2</sub>** dióxido de carbono

**Gg** gigagrama

**GJ** gigaJoule

**t** tonelada

**M** mega

**GWh** gigawatt-hora

**kWh** quilowatt-hora

O presente sumário foi baseado no “Estudo de baixo carbono para a indústria siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030”, o qual construiu cenários de referência e de baixo carbono considerando emissões de GEE de processo e do consumo de energia e a avaliação de alternativas de mitigação. No estudo foram apresentados o Custo Marginal de Abatimento (*Marginal Abatement Cost – MAC*) das tecnologias e o preço de equilíbrio de carbono (*Break-Even carbon price – BECP*). As reduções de emissões proporcionadas ao longo do período analisado por cada opção tecnológica foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócioeconômico e mudança tecnológica, cuja evolução é altamente incerta. No entanto, os cenários são imagens alternativas de como o futuro poderá se desdobrar e são uma ferramenta adequada para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas, não apresentando relação com a probabilidade de ocorrência deles (IPCC, 2000a).

Os cenários colaboram na identificação das possíveis ameaças, avaliam as competências organizacionais e exercitam o pensamento global para desenvolver alianças e ações estratégicas, proporcionando a elaboração de análises alternativas. Portanto, não se trata apenas de prospecção, mas da construção de um futuro possível, auxiliando a construir as mudanças desejadas para o futuro (WRIGHT, 2008 apud MENDONÇA, 2011). Os cenários no presente estudo foram construídos baseados na análise de dados históricos, nas informações apresenta-

das em publicações do setor e em informações atribuídas pelos autores.

No contexto mundial da indústria siderúrgica o Brasil é responsável por 2,1% da produção de aço bruto. Apesar dessa participação percentual bastante reduzida, o Brasil é o 9º maior produtor de aço, totalizando uma produção de 34,2 milhões de toneladas em 2013, segundo dados fornecidos pelo Instituto do Aço Brasil (IABr, 2013). Considerando a América Latina, o Brasil é o maior produtor com 52,2% da produção. O parque industrial brasileiro é composto de 27 usinas, pertencentes a nove grupos empresariais, sendo que 93,6% da produção é oriunda da Região Sudeste. A produção de aço no Estado de São Paulo (SP) corresponde a 16% da produção total brasileira no ano de 2013 (IABr, 2013). O Estado de São Paulo possui 6 unidades produtivas: cinco que utilizam fornos elétricos a arco (FEA) e uma usina integrada (com alto-forno) (IABr, 2013).

O segmento da indústria metalúrgica no Estado de São Paulo, em 2005, que englobou o setor de produção siderúrgica e de alumínio, contribuiu com 9.467 GgCO<sub>2</sub>e, correspondente a 34,2% das emissões de GEE no Setor de Processos Industriais no inventário estadual (CETESB, 2013).

O processo de produção de ferro-gusa é a etapa que mais consome energia em usinas integradas, em grande medida devido ao uso do coke como agente redutor na transformação do minério de ferro em ferro-gusa<sup>15</sup>. As usinas semi-integradas não têm a etapa de redução, consequentemente, consomem carbono para fins de ajustes metalúrgicos energéticos (IABr, 2012). Na siderurgia o carbono está presente nos combustíveis utilizados para geração de energia, que no caso de usinas integradas, desempenha seu papel como agente redutor do minério de ferro. Posteriormente uma fração desse carbono é

15. No processo siderúrgico as outras fontes de carbono, além do carvão/coque, também são utilizadas, óleo diesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural.

incorporada aos produtos, a outra parte após a combustão é emitida na forma de CO<sub>2</sub>.

O objetivo deste estudo foi avaliar os custos e o potencial de mitigação de GEE de tecnologias para a indústria no estado de São Paulo, onde o setor de siderurgia é parte integrante.

## ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

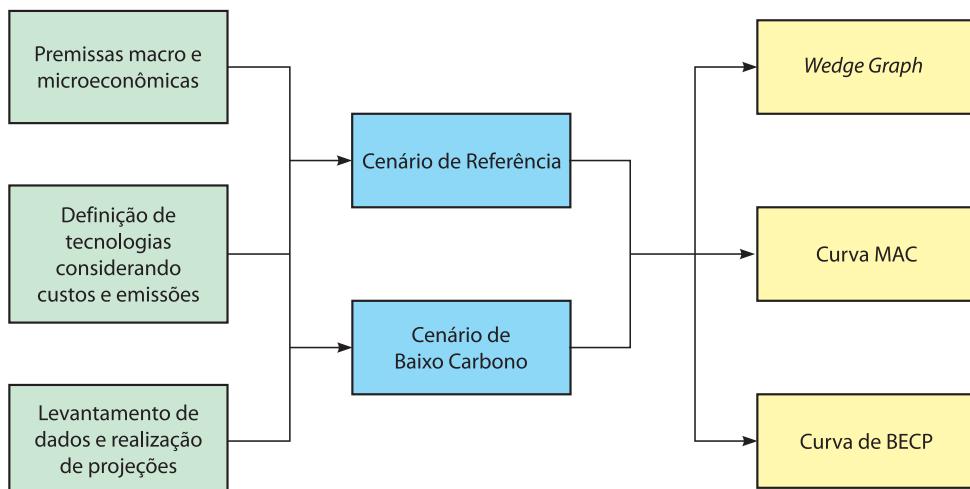
A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente seguiu-se com a realização dos cenários de referência (CR) e baixo carbono (CBC) e a apresentação dos resultados de mitigação, MAC e BECP.

As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresentado nos guias do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) no *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Greenhouse Gas Inventories Programme, Energy, Volume 2* e o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006, 2000b). As estimativas consideraram os dados de atividade, como produção, combustível, energia elétrica consumida e os respectivos fatores de emissão.

Para a construção das curvas de MAC e BECP<sup>16</sup> empregou-se a MACTool. De acordo com o Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços (ESMAP, 2016; FAY *et al.*, 2015).

Para aferir quantitativamente a contribuição de cada tecnologia na redução das emissões de GEE, elaborou-se curvas que apresentaram cunhas de mitigação (*Wedge Graph*), referentes à comparação entre o CR e o CBC com a implantação das respectivas tecnologias. Com essa informação foi possível visualizar a contribuição de cada tecnologia para a mitigação de GEE.

**Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo**



Fonte: Pacca *et al.* (2017).

16. O preço de equilíbrio de carbono indica o incentivo econômico que os agentes econômicos estabelecem como necessário para que a medida de mitigação estudada se torne atraente, quando comparada à referência (GOUVELLO *et al.*, 2010).

## RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados no período de 2014 a 2030 para a evolução da produção siderúrgica no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões do cenário de referência e baixo carbono, a evolução dos investimentos, as emissões evitadas por cada medida nos cenários, o MAC e o BECP das tecnologias.

### A evolução da produção siderúrgica no Estado de São Paulo

Um dos possíveis modelos para se estabelecer um critério para estimar a demanda futura de produtos siderúrgicos é por meio da análise da série histórica em que se estabelece a correlação entre o consumo de produtos siderúrgicos e a evolução do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil. Historicamente há uma correlação positiva entre o PIB e o consumo aparente de aço no país variando entre 1,5 a 2,0 o crescimento do PIB. Foi considerado que a indústria responde a uma taxa 1,5 vez maior do que a taxa anual do PIB brasileiro.

Em relação ao CR, embora tenha sido desligado o alto-forno localizado na baixada santista em 2015<sup>17</sup>, considerou-se no desenvolvimento do estudo a manutenção do funcionamento em todo o período. Ressalte-se que o ano de referência do estudo é 2014. No Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030 foi apresentada também, como um cenário exploratório<sup>18</sup>, a hipótese, que considera o desligamento do forno no período de 2016 a 2021.

Até o final de 2015, o estado possuía seis unidades de produção de aço pertencentes a qua-

tro grupos econômicos. Dessa unidades instaladas, somente uma unidade produzia aço bruto através da redução do minério de ferro (alto-forno). As outras cinco unidades instaladas no estado produziam aço a partir de gusa e sucata em fornos elétricos. No final de 2015 mais uma unidade com forno elétrico entrou em operação. Trata-se de uma empresa com uma unidade de produção na cidade de Pindamonhangaba, no Estado de São Paulo. Na Tabela 1 são apresentados os dados de produção de aço, projetados para São Paulo até o ano de 2030.

Os dados e produção apresentados na Tabela 1 foram empregados para o estabelecimento dos dois cenários, o CR e o CBC.

**Tabela 1 – Projeção da produção de aço no Estado de São Paulo**

Ano	PIB*	Produção – usina integrada	Produção – usina semi-integrada	Aço bruto
		(10 <sup>3</sup> t/ano)	(10 <sup>3</sup> t/ano)	(10 <sup>3</sup> t/ano)
2014 R	0,50%	3.048	1.752	4.800
2015 E	-1,50%	2.874	1.862	4.736
2016 E	1,00%	2.745	1.858	4.603
2017 E	1,50%	2.807	1.900	4.706
2018 E	2,00%	2.891	1.957	4.847
2019 E	2,00%	2.978	2.015	4.993
2020 E	2,30%	3.080	2.564	5.644
2021 E	2,50%	3.196	2.660	5.856
2022 E	2,50%	3.316	2.760	6.076
2023 E	2,50%	3.440	2.863	6.303
2024 E	2,50%	3.569	2.971	6.540
2025 E	2,50%	3.703	3.082	6.785
2026 E	2,50%	3.842	3.198	7.039
2027 E	2,50%	3.986	3.318	7.303
2028 E	2,50%	4.135	3.429	7.565
2029 E	2,50%	4.275	3.526	7.801
2030 E	2,50%	4.275	3.560	7.835

Fonte: Freitas; Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Nota: \* PIB nominal do estudo em 2014 e cenário até 2030.

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

17. O ano base do estudo é 2014, portanto para efeito do cenário estudado foi considerada a possibilidade de emissão da USIMINAS no período de desenvolvimento do estudo, que é de 2014 a 2030.

18. Cenários exploratórios: exploram possíveis futuros. Eles enfatizam direções e não especificam um final desejado predeterminado para o desenvolvimento (DIXON, 2011).

No cenário de referência, estima-se que a produção aumentará de  $4.800 \cdot 10^3$  t/ano em 2014<sup>19</sup> para  $7.835 \cdot 10^3$  t/ano em 2030, representando um aumento de 63% em 2030 em relação a 2014, ou seja, uma média aproximada de 3,06% ao ano. Comparando o mesmo período, a produção em usina semi-integrada, observa-se um crescimento de 103% e, para usinas integradas, um crescimento de 40%<sup>20</sup>.

**Tabela 2 – Consumo de energia no CR**

Ano	Energia elétrica			Consumo de combustível		
	Rota semi-integrada	Rota integrada	Total	Rota semi-integrada	Rota integrada	Total
	(GWh)			(GJ)		
2014 R	876	323	1.199	9.993.583	10.219.030	20.230.609
2015 E	931	305	1.236	10.621.810	9.636.545	20.274.675
2016 E	929	291	1.220	10.597.019	9.202.901	19.815.258
2017 E	950	298	1.247	10.835.452	9.409.966	20.261.102
2018 E	978	306	1.285	11.160.515	9.692.265	20.868.934
2019 E	1.008	316	1.323	11.495.331	9.983.033	21.495.004
2020 E	1.282	327	1.609	14.625.258	10.327.447	24.968.434
2021 E	1.330	339	1.669	15.173.705	10.714.727	25.904.750
2022 E	1.380	351	1.731	15.742.719	11.116.529	26.876.177
2023 E	1.432	365	1.796	16.333.071	11.533.399	27.884.035
2024 E	1.485	378	1.864	16.945.561	11.965.901	28.929.685
2025 E	1.541	393	1.934	17.581.020	12.414.623	30.014.550
2026 E	1.599	407	2.006	18.240.308	12.880.171	31.140.094
2027 E	1.659	422	2.081	18.924.320	13.363.177	32.307.847
2028 E	1.715	438	2.153	19.560.976	13.864.296	33.446.427
2029 E	1.763	453	2.216	20.114.242	14.332.793	34.468.961
2030 E	1.780	453	2.233	20.308.655	14.332.793	34.663.268

Fonte: Freitas; Vogelaar, René; Vogelaar, Renato, (2017), com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado.

**Quadro 1 – Tecnologias empregadas no CBC**

Integrada	Semi integrada	
	TGRBF - MDEA	Preaquecimento
Alto-forno com Turbina de Recuperação dos Gases de Topo do alto-forno. Essa tecnologia capture os gases de exaustão do Alto-Forno (TGRBF), segregando o CO <sub>2</sub> do CO. O CO é reinjetado no forno com oxigênio reduzindo o consumo de coque. O CO <sub>2</sub> capturado é removido por um processo de absorção química com o uso do solvente Metildietanolamina (MDEA) / Piperazina.	No sistema Consteel o carregamento de sucata é feito de forma contínua. O sistema é composto basicamente de duas seções: uma de carregamento outra de preaquecimento. O carregamento da sucata é feito em esteiras que estão dentro do túnel do sistema de despoieiramento. Os gases de exaustão do FEA passam pelo túnel de preaquecimento a uma temperatura regular acima de 900°C preaquecem a carga de sucata até uma temperatura na superfície superior a 600°C, com uma temperatura média na faixa de 300°C a 400°C, dependendo do tipo da sucata	O transformador de corrente contínua evita perdas durante a transmissão da eletricidade

Fonte: Freitas; Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) baseado em European Comission (2014) e Memoli *et al* (2009).

19. O início do período de análise é 2014 e portanto todas as premissas consideradas no cenário de referência estão baseadas naquele ano.

20. O estudo é de caráter exploratório e o setor poderá construir outros cenários.

## A evolução do consumo de energia

Na Tabela 2 está apresentada a projeção do consumo de energia elétrica e do consumo de combustível (gás natural, gás de coqueria e gás de alto-forno) no cenário de referência.

Em relação às medidas de baixo carbono, como apresentado no Quadro 1, foram consideradas o alto-forno com Turbina de

Recuperação dos Gases no Topo do Alto Forno (*Top Gas Recycling BlastFurnace TGRBF MDEA*), nessa tecnologia a absorção do CO<sub>2</sub> se dá por absorção química através do solvente Metildietanolamina Piperazina (MDEA), o Consteel que considera o preaquecimento da matéria-prima e o transformador de corrente contínua (CC). As medidas que apresentam relação com energia são o Constell e o CC. Na

Tabela 3 são apresentados o consumo de energia elétrica e o consumo de combustível, no CBC.

No cenário de baixo carbono, em decorrência das medidas de preaquecimento e corrente contínua aplicadas às plantas integradas, observa-se uma diminuição do consumo de eletricidade correspondente a 6% do consumo previsto no CR em 2030.

**Tabela 3 – Consumo de energia no CBC**

Ano	Energia elétrica			Consumo de combustível		
	Rota semi-integrada	Rota integrada	Total	Rota semi-integrada	Rota integrada	Total
	(GWh)			(GJ)		
2014R	876	323	1.199	9.993.583	10.219.030	20.230.609
2015E	931	305	1.236	10.621.810	9.636.545	20.274.675
2016E	929	291	1.220	10.597.019	9.202.901	19.815.258
2017E	933	298	1.231	10.835.452	9.409.966	20.261.102
2018E	961	306	1.267	11.160.515	9.692.265	20.868.934
2019E	990	316	1.306	11.495.331	9.983.033	21.495.004
2020E	1.222	327	1.549	14.625.258	10.327.447	24.968.434
2021E	1.268	339	1.607	15.173.705	10.714.727	25.904.750
2022E	1.294	351	1.645	15.742.719	11.116.529	26.876.177
2023E	1.342	365	1.707	16.333.071	11.533.399	27.884.035
2024E	1.393	378	1.771	16.945.561	11.965.901	28.929.685
2025E	1.422	393	1.815	17.581.020	12.414.623	30.014.550
2026E	1.476	407	1.883	18.240.308	12.880.171	31.140.094
2027E	1.515	422	1.937	18.924.320	13.363.177	32.307.847
2028E	1.565	438	2.003	19.560.976	13.864.296	33.446.427
2029E	1.609	453	2.062	20.114.242	14.332.793	34.468.961
2030E	1.625	453	2.078	20.308.655	14.332.793	34.663.268

Fonte: Freitas; Vogelaar, René; Vogelaar, Renato, (2017), com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.  
Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado.

## A evolução das emissões do cenário de referência e baixo carbono

As estimativas do CR foram elaboradas considerando as plantas semi-integradas e integradas, sendo as emissões totais do CR, a soma das emissões das duas rotas apresentadas na Tabela 4 e na Tabela 5.

Na Tabela 4 são apresentadas as emissões de GEE pela rota semi-integrada no CR.

De acordo com a Tabela 4, no CR as emissões provenientes das plantas semi-integradas

apresentarão um aumento de 103% em 2030 em relação a 2014.

A Tabela 5 apresenta as estimativas de emissões para a rota integrada no CR. O processo de redução que ocorre no alto-forno é a principal fonte de CO<sub>2</sub>. Como nas usinas integradas há cogeração de energia, as emissões relacionadas à energia elétrica são baixas.

De acordo com a Tabela 5, no CR as emissões provenientes das plantas integradas apresentarão um aumento de cerca de 40% em 2030 em relação a 2014.

**Tabela 4 – Estimativa de emissão para plantas semi-integradas no CR**

Ano	Processo	Combustível	Energia	Total
			elétrica*	
(GgCO <sub>2</sub> )				
2014R	140	561	0,6	701
2015E	149	596	0,6	745
2016E	149	594	0,6	744
2017E	152	608	0,7	760
2018E	157	626	0,7	783
2019E	161	645	0,7	807
2020E	205	820	0,9	1.026
2021E	213	851	0,9	1.065
2022E	221	883	0,9	1.105
2023E	229	916	1,0	1.146
2024E	238	951	1,0	1.189
2025E	247	986	1,0	1.234
2026E	256	1.023	1,1	1.280
2027E	265	1.062	1,1	1.328
2028E	274	1.097	1,2	1.373
2029E	282	1.128	1,2	1.412
2030E	285	1.139	1,2	1.425

Fonte: Freitas; Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Nota: \* Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO<sub>2</sub>/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada) 0,5884 tCO<sub>2</sub>/MWh BRASIL (2015); gás natural 0,0561 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS *et al.*, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS *et al.*, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

**Tabela 5 – Estimativa de emissão para plantas integradas no CR**

Ano	Integrada	Integrada	Integrada	Total
	processo	combustível	elettricidade	
(GgCO <sub>2</sub> )				
2014R	4.450	1.274	44	5.768
2015E	4.196	1.201	41	5.439
2016E	4.008	1.147	39	5.194
2017E	4.098	1.173	40	5.311
2018E	4.221	1.208	42	5.471
2019E	4.347	1.245	43	5.635
2020E	4.497	1.288	44	5.829
2021E	4.666	1.336	46	6.048
2022E	4.841	1.386	48	6.274
2023E	5.022	1.438	49	6.510
2024E	5.211	1.492	51	6.754
2025E	5.406	1.548	53	7.007
2026E	5.609	1.606	55	7.270
2027E	5.819	1.666	57	7.543
2028E	6.037	1.729	59	7.825
2029E	6.242	1.787	61	8.090
2030E	6.242	1.787	61	8.090

Fonte: Freitas; Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO<sub>2</sub>/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada) 0,5884 tCO<sub>2</sub>/MWh BRASIL (2015); gás natural 0,0561 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS *et al.*, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS *et al.*, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

A Tabela 6 apresenta o cenário de penetração por tecnologia em termos percentuais, considerando a relação da capacidade instalada em cada rota. Observa-se que, para a rota integrada, como se trata apenas de uma usina, a tecnologia de BC atinge 100% de sua penetração. Já na rota semi-integrada, as duas tecnologias de BC são implantadas concomitantemente.

**Tabela 6 – Penetração em relação à capacidade instalada das plantas no Estado de São Paulo**

Ano	Integrada	Semi-integrada	
	TGRBF - MDEA	Pré-aquecimento	Transformador corrente contínua
	(%)		
2014 R	0	0,0	0,0
2015 E	0	0,0	0,0
2016 E	0	0,0	0,0
2017 E	0	15,9	0,0
2018 E	0	15,9	0,0
2019 E	0	15,9	0,0
2020 E	0	51,5	0,0
2021 E	0	51,5	0,0
2022 E	0	55,1	26,4
2023 E	0	55,1	26,4
2024 E	0	55,1	26,4
2025 E	100	55,1	55,5
2026 E	100	55,1	55,5
2027 E	100	55,1	74,0
2028 E	100	55,1	74,0
2029 E	100	55,1	74,0
2030 E	100	55,1	74,0

Fonte: Freitas; Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017).

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO<sub>2</sub>/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada): 0,5884 tCO<sub>2</sub>/MWh BRA-SIL (2015); gás natural 0,0561 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS et. al, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS et. al, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

Na Tabela 7 são apresentadas as emissões de GEE pela rota semi-integrada no CBC.

Em relação à rota semi-integrada no CBC, comparando-se ao CR, não se observam mudanças significativas nas emissões de processo e combustível. Analisando a evolução dos consumos no CBC em relação à energia elétrica, em 2030 é previsto um aumento de 82% em relação a 2014.

**Tabela 7 – Estimativa de emissão para plantas semi-integradas no CBC**

Ano	Processo	Combustível	Energia	Total
			elétrica	
2014 R	140	561	0,6	701
2015 E	149	596	0,6	745
2016 E	149	594	0,6	744
2017 E	152	608	0,6	760
2018 E	157	626	0,7	783
2019 E	161	645	0,7	807
2020 E	205	820	0,8	1.026
2021 E	213	851	0,9	1.065
2022 E	221	883	0,9	1.105
2023 E	229	916	0,9	1.146
2024 E	238	951	0,9	1.189
2025 E	247	986	1,0	1.234
2026 E	256	1.023	1,0	1.280
2027 E	265	1.062	1,0	1.328
2028 E	274	1.097	1,1	1.373
2029 E	282	1.128	1,1	1.412
2030 E	285	1.139	1,1	1.425

Fonte: Freitas; Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO<sub>2</sub>/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada): 0,5884 tCO<sub>2</sub>/MWh BRA-SIL (2015); gás natural 0,0561 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS et. al, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS et. al, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

A Tabela 8 apresenta as estimativas de emissões para a rota integrada no CBC.

Em relação à rota integrada no CBC, em comparação ao CR, não se observam mudanças significativas nas emissões de combustível e eletricidade. Analisando a evolução dos consumos no CBC, em relação ao processo em 2030 é previsto uma diminuição de 37% em relação à 2014. Em relação às emissões totais é previsto uma diminuição de 19% das emissões em 2030 em relação a 2014.

**Tabela 8 – Estimativa de emissão para plantas integradas no CBC**

Ano	Integrada processo	Integrada combustível	Integrada eletricidade	Total
	(GgCO <sub>2</sub> )			
2014 R	4.450	1.274	44	5.768
2015 E	4.196	1.201	41	5.439
2016 E	4.008	1.147	39	5.194
2017 E	4.098	1.173	40	5.311
2018 E	4.221	1.208	42	5.471
2019 E	4.347	1.245	43	5.635
2020 E	4.497	1.288	44	5.829
2021 E	4.666	1.336	46	6.048
2022 E	4.841	1.386	48	6.274
2023 E	5.022	1.438	49	6.510
2024 E	5.211	1.492	51	6.754
2025 E	2.433	1.548	53	4.034
2026 E	2.524	1.606	55	4.185
2027 E	2.619	1.666	57	4.342
2028 E	2.717	1.729	59	4.505
2029 E	2.809	1.787	61	4.657
2030 E	2.809	1.787	61	4.657

Fonte: Freitas; Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO<sub>2</sub>/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada): 0,5884 tCO<sub>2</sub>/MWh BRA-SIL (2015); gás natural 0,0561 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO<sub>2</sub>/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS *et al.*, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO<sub>2</sub>/t<sub>aço</sub> (MARKS *et al.*, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

## Custos de investimento e operação

A seguir, na Tabela 9, são apresentados os Investimentos (*Capital Expenditures – CAPEX*) e as despesas de operação (*Operational Expenses – OPEX*) necessários às tecnologias.

O CAPEX para a planta TGRBF-MDEA da Rota Integrada com capacidade de produzir anualmente 4,0 milhões de toneladas/ano de bobinas quentes é estimado em US\$ 1.219/t<sub>aço</sub>. O custo total estimado para a instalação é de US\$ 4.877 milhões de dólares. A capacidade instalada de uma planta é de 4 milhões, dessa forma, o CAPEX, considerando essa capacidade, foi de US\$ 1.219/t<sub>bq</sub> (não se considerando os custos a estrutura de transporte e armazenamento). O OPEX foi estimado em US\$ 330/t<sub>bq</sub>.

O CAPEX para uma planta com Sistema de Preaquecimento em Rota Semi-Integrada, foi estimado em 583 milhões de dólares. A capacidade instalada de uma planta é de 1 milhão de toneladas, dessa forma, o CAPEX, considerando essa capacidade, foi de US\$ 583/t<sub>vergalhão</sub>. O OPEX foi estimado em US\$ 362/t<sub>vergalhão</sub>.

**Tabela 9 – CAPEX e OPEX**

	Tecnologia	CAPEX	OPEX
		(US\$ milhões)	
Rota integrada	Planta – CR	4.124	324 (US\$/t <sub>bq</sub> )
	Planta CBC com – TGRBF-MDEA	4.877	330 (US\$/t <sub>bq</sub> )
Rota semi-integrada	Planta – CR	576	362 (US\$/t <sub>vergalhão</sub> )
	Planta CBC com preaquecimento – Consteel	583	362 (US\$/t <sub>vergalhão</sub> )
	Planta CBC com transformador de corrente contínua (CC)	584	362 (US\$/t <sub>vergalhão</sub> )

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Nota: No baixo carbono para as estimativas foi considerado apenas o valor incremental de cada tecnologia associada à planta e acrescido um fator de implantação de 1,6 para integrada e 1,4 para semi-integrada, dado a necessidade de adaptação da planta já existente. Trata-se de um critério da modelagem, os segmentos da indústria podem eventualmente divergir.

O CAPEX para a planta com Fornos de corrente contínua em Rota Semi-Integrada segundo a pesquisa realizada *Industrial Efficiency Technology Database – Electric Arc Furnace – Technologies & Measures* (IETD, 2016) foi estimado em um custo total de instalação de US\$ 584 milhões. A capacidade instalada de uma planta é de 1 milhão de toneladas, dessa forma, o CAPEX, considerando essa capacidade, foi de US\$ 584/t<sub>vergalhão</sub>. O OPEX foi estimado em US\$ 362/t<sub>vergalhão</sub>.

### Emissões evitadas por cada medida nos cenários

A Tabela 10 apresenta as emissões evitadas com a implantação do CBC, considerando como CR à hipótese de funcionamento do alto-forno da Usiminas para todo o período.

O total de emissões evitadas seria de 20.141 GgCO<sub>2</sub>, sendo que a medida de preaquecimento foi responsável por 3,0%, corrente contínua por 1,3% e o TGRBF-MDEA por 95,7%.

No Gráfico 1 são apresentadas as contribuições em relação às emissões evitadas de cada medida ou tecnologia considerada no estudo.

**Tabela 10 – Emissões evitadas**

Ano	CR	CBC	Siderurgia preaquecimento	Siderurgia-corrente contínua	TGRBF-MDEA
	(GgCO <sub>2</sub> )				
2014	7.078	7.078	—	—	—
2015	6.830	6.830	—	—	—
2016	6.581	6.581	—	—	—
2017	6.728	6.717	12	—	—
2018	6.929	6.917	12	—	—
2019	7.136	7.124	12	—	—
2020	7.737	7.696	41	—	—
2021	8.026	7.984	43	—	—
2022	8.326	8.267	47	12	—
2023	8.637	8.576	49	12	—
2024	8.960	8.897	51	12	—
2025	9.294	6.267	52	28	2.946
2026	9.642	6.501	54	29	3.057
2027	10.002	6.733	56	41	3.171
2028	10.366	6.975	58	43	3.290
2029	10.701	7.195	60	44	3.401
2030	10.725	7.219	60	44	3.401

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

**Desativação do alto-forno da Usiminas**

O alto-forno da planta da Usiminas localizado em Cubatão foi desativado em novembro de 2015, devido a uma retração forte de demanda de aço no mercado interno, aliado as estatísticas do World Steel Association (WSA, 2016), em que fica evidente o excesso de oferta mundial de aço. Em razão destes fatores a unidade da Usiminas em Cubatão está operando somente com o setor de laminção. Há alguns indicativos sobre a reativação desse alto-forno, mas se o mesmo permanecer desativado até 2030, considerando sua capacidade máxima de 4.500 milhões de toneladas, estima-se que serão evitadas cerca de 103.850 GgCO<sub>2</sub> (valor que poderá ser recalculado em razão da alteração da capacidade instalada).

### Custo marginal de abatimento e o preço de equilíbrio de carbono das tecnologias

A Tabela 11 apresenta os resultados das oportunidades de mitigação na área de processo (TGRBF-MDEA) e energia (Transformador de Corrente Contínua e Preaquecimento de Sucata).

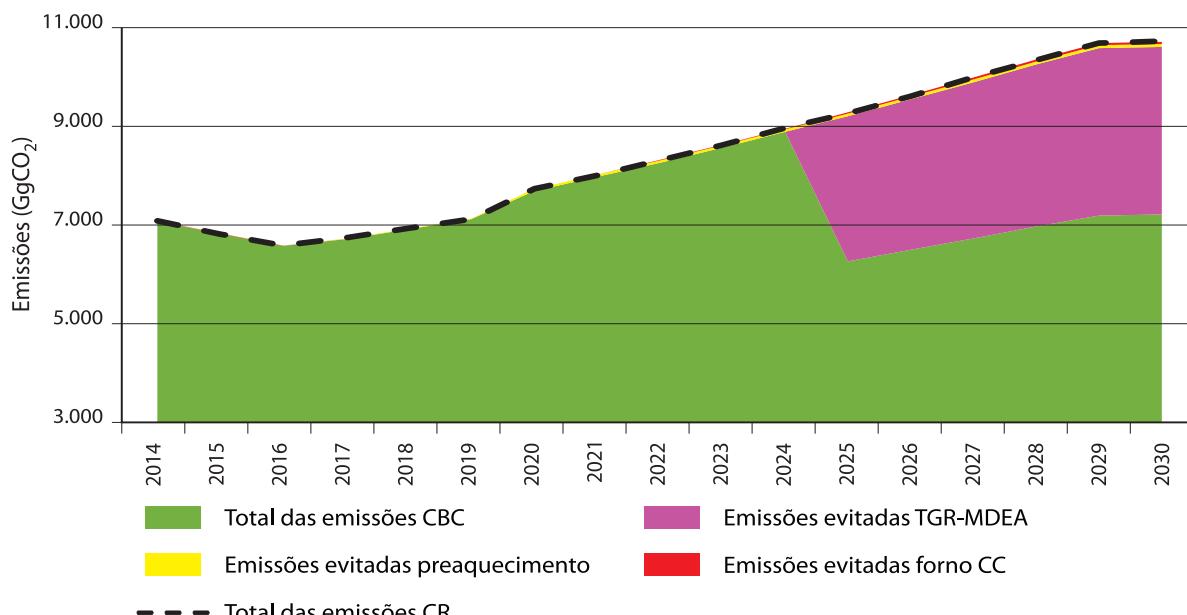
De acordo com a Tabela 11 as medidas de corrente contínua e preaquecimento adotadas para a rota semi-integrada proporcionariam, dentro das premissas adotadas por este estudo, um ganho econômico quando comparadas

**Tabela 11 – Custo marginal de abatimento e potencial de emissões evitadas**

Setor	Atividade	Custo de abatimento	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/t CO <sub>2</sub> )	(Mt CO <sub>2</sub> )
Energia	Pré-aquecimento	– 134	0,61
Energia	Forno corrente contínua	– 102	0,27
Processo	TGRBF-MDEA	16	19,27

Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

**Gráfico 1 – Wedge Graph para a indústria siderúrgica em São Paulo de 2014 a 2030**



Fonte: Elaboração própria (2017).

com o cenário de referência, ou seja, no caso, na ausência delas. Em relação à medida de TGRBF, essa apresentou custo positivo, porém, apresentou grande potencial de redução de emissões quando comparada às outras tecnologias.

No Gráfico 2 é apresentada a curva do custo marginal de abatimento.

A Tabela 12 apresenta os preços de equilíbrio para cada oportunidade de mitigação. A partir dos resultados, conclui-se que as medidas da rota semi-integrada (preaquecimento em forno CC) trazem um retorno acima dos 15% determinados pelo setor como *Benchmark*.

**Tabela 12 – Preço de equilíbrio de carbono para a indústria siderúrgica de 2014 a 2030**

Setor	Atividade	BECP	Emissões evitadas 2014 – 2030
		(US\$/t CO <sub>2</sub> )	(Mt CO <sub>2</sub> )
Energia	Pré-aquecimento	- 218	0,61
Energia	Forno corrente contínua	- 155	0,27
Processo	TGRBF-MDEA	95	19,27

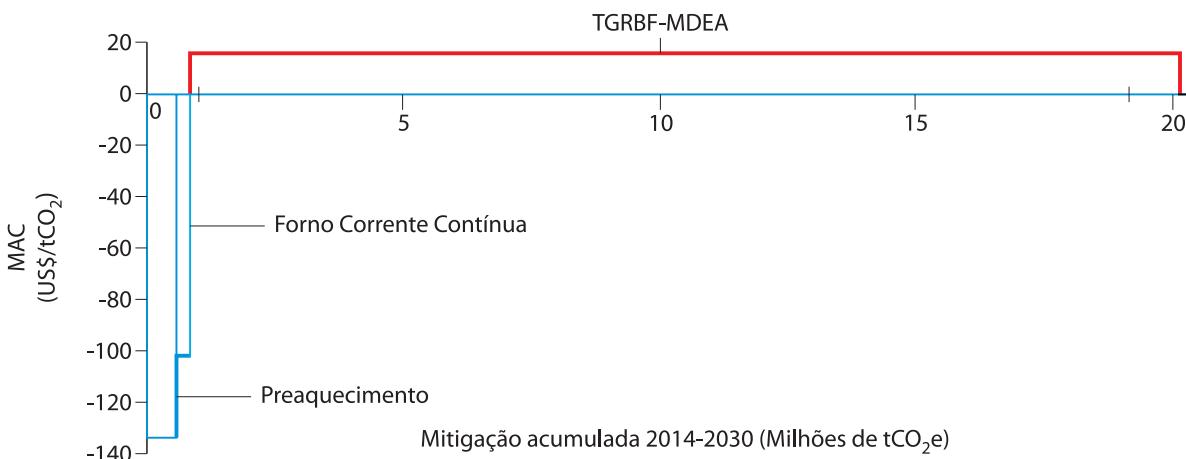
Fonte: Freitas, Vogelaar, René e Vogelaar, Renato (2017) com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

TIR, portanto, resultam em preços de equilíbrio negativo. Apenas o TGRBF-MDEA não resulta na taxa interna de retorno esperada, nesse caso seria necessário pagar US\$ 95 por tonelada de carbono evitada para que a tecnologia se torne atrativa.

## CONCLUSÕES

A lenta difusão de processos alternativos ao alto-forno, seja por tecnologias já consolidadas de redução direta (a gás ou carvão não-coqueificável), seja por tecnologias ainda emergentes de fusão redutora (incluindo Corex, Finex, Tecnored, entre outros), tem sido uma tendência mundial. Alguns dos projetos de fusão redutora resultaram em grandes perdas financeiras para as companhias envolvidas. Outro aspecto que retarda a introdução de novas tecnologias de redução é a elevada vida útil dos altos-fornos; mesmo que tais tecnologias atingissem desempenho superior do ponto de vista tecnológico, seriam necessárias algumas décadas para a completa eliminação dos altos-fornos (DE PAULA, 2012).

**Gráfico 2 – Curva de custo marginal de abatimento para o setor de siderurgia**



Fonte: Elaboração própria (2017) com base na Tabela 9.

No mundo, o maior problema enfrentado pela indústria do aço é o excesso de capacidade de produção da ordem de 719 milhões de toneladas, que tem pressionado, globalmente, os preços. A maior parte desse excedente de capacidade encontra-se na China, país que conta, principalmente, com subsídios governamentais<sup>21</sup>.

Segundo as estatísticas do IABr (IABr, 2014), em 2014, o Brasil tinha uma capacidade instalada de 48,8 milhões de toneladas para uma produção de 33,9 milhões de toneladas, um consumo aparente interno de 25,6 milhões de toneladas e exportações totalizando 9,78 milhões de toneladas.

As premissas adotadas para a indústria até 2030 foram definidas com relação a volumes de produção física, custos dos insumos (matérias-primas e energia), os fatores de emissão, os custos de investimento e operação para cada uma das rotas tecnológicas, tanto para o cenário de referência como para o cenário de baixo carbono.

Na análise das tecnologias sugeridas para o cenário de CBC, as maiores emissões evitadas são as que estão relacionadas ao processo de redução do minério de ferro (alto-forno). A tecnologia TGRBF–MDEA no cenário normal da indústria, representa uma redução de 19 milhões de tCO<sub>2</sub> até 2030, ou seja, 15% das emissões do cenário de referência da indústria siderúrgica, e representando 96% das emissões evitadas no período. Os fornos da rota semi-integrada reduzem apenas 873 mil tCO<sub>2</sub>, o que equivale a 0,7% das emissões do cenário de referência e 4% das emissões evitadas.

A partir dos resultados apresentados na curva MAC, estima-se que, para atingir o potencial total de mitigação avaliado, serão gastos US\$ 199 milhões até o ano de 2030. Ressalte-se que essa estimativa, que compõe este estudo, tem um caráter exploratório. Sobre a curva BECP, conclui-se que as tecnologias na rota semi-integrada trazem um retorno acima de 15% (Benchmark-TIR), portanto são investimentos atrativos. Todavia, se considerarmos o cenário em que o alto-forno permanece desativado até o final do período, 15 anos, seriam evitados aproximadamente 104 MtCO<sub>2</sub>. Nesse cenário, a tecnologia TGRBF-MDEA apresenta valores distintos de MAC e BECP.

Ao longo do período de execução deste documento, foram encontradas limitações na coleta de dados, pois informações sobre produção e emissão da indústria siderúrgica no ano base do estudo (2014) eram fundamentais, contudo essa dificuldade foi superada, e optou-se pela não identificação da maioria das empresas que forneceram subsídios para sua realização.

Dado seu caráter exploratório e uma vez que tomadores de decisão optem por determinados caminhos de baixo carbono, novas possibilidades de tecnologias podem ser consideradas. Finalmente, cabe ressaltar que o enfoque deste projeto foi analisar tecnologias para a mitigação de emissões de GEE, com ênfase no dióxido de carbono, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.

---

21. Com relação a intensidade de emissões da produção da China. Hasanbeigi *et al.* (2015) propõe uma metodologia para cálculo que estima uma intensidade de emissões de 2,15 tCO<sub>2</sub>/t de aço para o país, significativamente superior à média mundial de 1,8tCO<sub>2</sub>/t aço. Considerando o aspecto global do mercado do aço, esse contexto exemplifica que mecanismos de proteção de mercado produtivo nacional contra o fenômeno do *carbon leakage* (EU, 2017) pode trazer melhores resultados mitigadores das mudanças do clima global.[Esta informação é uma contribuição da consulta pública].

(HASANBEIGI, A. *et al.* Comparison of Energy-Related Carbon Dioxide Emissions Intensity of the International Iron and Steel Industry: Case Studies from China, Germany, Mexico, and the United States. Berkeley CA: Berkeley Lab, 2015.)

## REFERÊNCIAS

**BRASIL.** MCTI. Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil. [On-line] 2015. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764/Fatores\\_de\\_Emissao\\_de\\_CO\\_sub\\_2\\_sub\\_pela\\_geracao\\_de\\_energia\\_eletrica\\_no\\_Sistema\\_Interligado\\_Nacional\\_do\\_Brasil.html](http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764/Fatores_de_Emissao_de_CO_sub_2_sub_pela_geracao_de_energia_eletrica_no_Sistema_Interligado_Nacional_do_Brasil.html)>. Acesso em: mar. 2015.

**CETESB.** Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008: Relatório de Referência. São Paulo, 2013. (1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo). Disponível em: <[http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro\\_inventario\\_setor\\_industria\\_web1.pdf](http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf)>. Acesso em: set. 2015.

DE PAULA, G. M. (2012). Núcleo de Estudos de Baixo Carbono – Avaliação de Impactos de Restrições Perspectivas Tecnológica na Siderurgia. Segundo Relatório Preliminar. Abril de 2012.

DIXON, T. Low Carbon Scenarios, Roadmaps, Transitions and Pathways: an Overview and Discussion. Retrofit 2050 Re-engineering the city 2020-2050: urban foresight and transition management. Oxford Institute for Sustainable Development, Oxford Brookes University. Retrofit 2050 Working Paper. 2011. 30p.

ESMAP. World bank group. Modeling Tools and E-Learning: MACTool. Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. 2016. Acesso em: 24 abr 2016.

EUROPEAN COMISSION. Top Gas Recycling Blast Furnace Process: ULCOS TGRBF. Bruxelas, 2014. Disponível em: <<http://bookshop.europa.eu/bg/ulcos-top-gas-recyc>>

ling-blast-furnace-process-ulcos-tgrbf-pbKI NA26414/downloads/KI-NA-26414-EN-N/KINA26414ENN\_002.pdf;pgid=y8dIS7GUWMdSR0EAlMEUUsWb0000sKPM7Kup;sid=BhWJ01WbYxSJ8wapFvMXdDe-AcaPAbj4GGc=?FileName=KINA26414ENN\_002.pdf&SKU=KINA26414ENN\_PDF&CatalogueNumber=KI-NA-26414-EN-N>. Acesso em: agosto de 2015.

FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T. Decarbonizing Development. **Three Steps to a Zero-Carbon Future**. Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.

FREITAS, J.M; VOGELAAR, Rene; VOGELAAR, Renato. **Estudo de baixo carbono para a indústria siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030**. São Paulo: CETESB, 2017.

GOUVELLO, C. de et al. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Washington, DC: Banco Mundial, 2010. Disponível em: <[http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio\\_BM\\_Principal\\_Portugues\\_SumarioExecutivo.pdf](http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf)>. Acesso em: out.2015.

IABr. **Relatório de Sustentabilidade 2012**. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil (IABr), 2012. Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/relatorio\\_sustentabilidade\\_2012.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf)>. Acesso em: agosto de 2015.

IABr. **Relatório de Sustentabilidade**. 2013. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/publicacoes.asp>>. Acesso em: 14/06/2014. Acesso em: maio 2015.

**IABr. Anuário Estatístico 2014.** Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil, 2015.

**IETD. Industrial Efficiency Technology Database — Electric Arc Furnace — Technologies & measures.** c2016. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace>>. Acesso em: outubro 2015.

**IPCC. Emission Scenarios.** Summary for Policymakers. A Special Report of IPCC Working Group III. 2000a. 27p.

**IPCC. Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories.** Hayama, JP, 2000b. Disponível em: <<http://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/gp/english/>>. Acesso em mai de 2016.

MARKS, Jerry et al. Metal industry emission. In: **IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.** Hayama, JP: IPCC: IGES, 2006. v. 3: Industrial processes and product use, Chap. 4. Disponível em: <[http://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3\\_Volume3/V3\\_4\\_Ch4\\_Metal\\_Industry.pdf](http://www.ipcc-nngip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf)>. Acesso em: abr. 2017.

**MEMOLI, F et al. Aumento das plantas Consteel no Mundo: Flexibilidade para Carga Contínua de Gusa Líquido Sucata no Forno elétrico a Arco Agora na Siderurgia Brasileira, Tecnologia em metalurgia, Materiais e Mineração,** 2009, v. 6, n. 1. p. 54–60

**MENDONÇA, M.B. ANPAD. Técnicas de Prospecção e Análise de Cenários Futuros nos Governos e Administração Pública do Brasil: Revisão da Produção Científica Brasileira de 2001 a 2010.** In: **V Encontro de Estudos em Estratégia.** Porto Alegre, 2011.

**PACCA, S. A. et al. Estudo de baixo carbono para a indústria de São Paulo:** relatório síntese. 1<sup>a</sup> ed. 2017. São Paulo CETESB, 2017. 188 p.

**USEPA. Technical support document for the iron and steel sector: proposed rule for mandatory reporting of greenhouse gases.** [United States], 2009. 43 p. Disponível em: <[https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/tsd\\_iron\\_and\\_steel\\_epa\\_9-8-08.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-02/documents/tsd_iron_and_steel_epa_9-8-08.pdf)>. Acesso em: abr. 2017







Apoio técnico:



Realização:



| Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente