

# Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Estado de São Paulo - 2030

## Relatório Síntese

2ª edição

Sumário Executivo



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

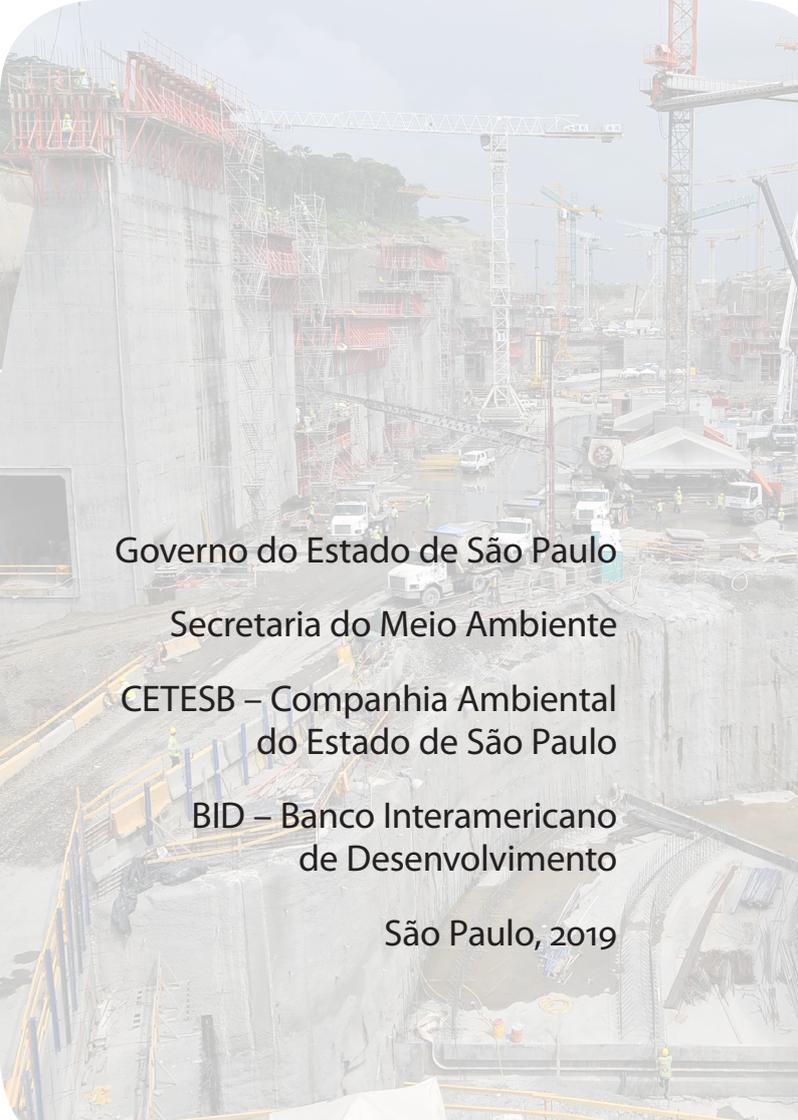




# Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Estado de São Paulo de 2014 a 2030 – Relatório Síntese

2ª edição

## Sumário Executivo



Governo do Estado de São Paulo

Secretaria do 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)

2.ed. Estudo de baixo carbono para a indústria do estado de São Paulo de 2014 a 2030 [recurso eletrônico] : relatório síntese : sumário executivo / CETESB, BID ; Autores Bruna Patrícia de Oliveira ... [et al.] ; Coordenação executiva Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer ; Coordenação técnica [e] revisor Sérgio Almeida Pacca ; Colaboradores Daniel Soler Huet, Maria Fernanda Pelizzon Garcia. – 2.ed. – São Paulo : CETESB, 2019.

1 pen-drive (22 p.) : il. color., PDF ; 5,9 MB.

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

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

ISBN 978-85-9467-XXX-X

1. Aquecimento global 2. Baixo carbono 3. Efeito estufa – gases 4.

Indústrias 5. Medidas mitigadoras 6. Mudanças climáticas 7. São Paulo (BR) I.

BID. II. Pacca, Sérgio Almeida, Coord., Rev. III. Oliveira, Bruna Patrícia de et al., Autor. IV. Ferrer, Josilene Ticianelli Vannuzini, Coord. V. Título.

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

CDU (2. ed. Port.) 504.7:661.66 (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

<http://www.cetesb.sp.gov.br>

© CETESB 2019

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

---

### Coordenação Técnica

Sérgio Almeida Pacca

### Coordenação Executiva

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

### Revisor da 2ª edição

Sérgio Almeida Pacca

### Autores

Bruna Patrícia de Oliveira

Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Sérgio Almeida Pacca

### Colaboradores

Daniel Soler Huet

Maria Fernanda Pelizzon Garcia

### Projeto Gráfico e Diagramação

Brainstorm – Arte em Comunicação

Wilson Issao Shiguemoto

### Foto da capa

Acervo BID

---

Este Sumário trata-se de uma síntese dos seguintes estudos, disponível no site da CETESB:

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

##### **Autores:**

José Milton de Freitas

René Vogelaar

Renato Vogelaar

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

##### **Autores:**

José Milton de Freitas

René Vogelaar

Renato Vogelaar

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

##### **Autores:**

Obdúlio Diego Fanti

Roberto Strumpf

Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Natália Kurimori

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

##### **Autores:**

Kátia Regina Garcia Punhagui

Lidiane Santana Oliveira

Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Vanderley Moacyr John

---

Estudo realizado com recursos do Projeto BR T-1262: "Apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o Estado de São Paulo", proveniente da parceria entre o Banco Interamericano de Desenvolvimento e a CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

As opiniões e 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, através do 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 01/12/2017).

## Lista de abreviaturas e siglas

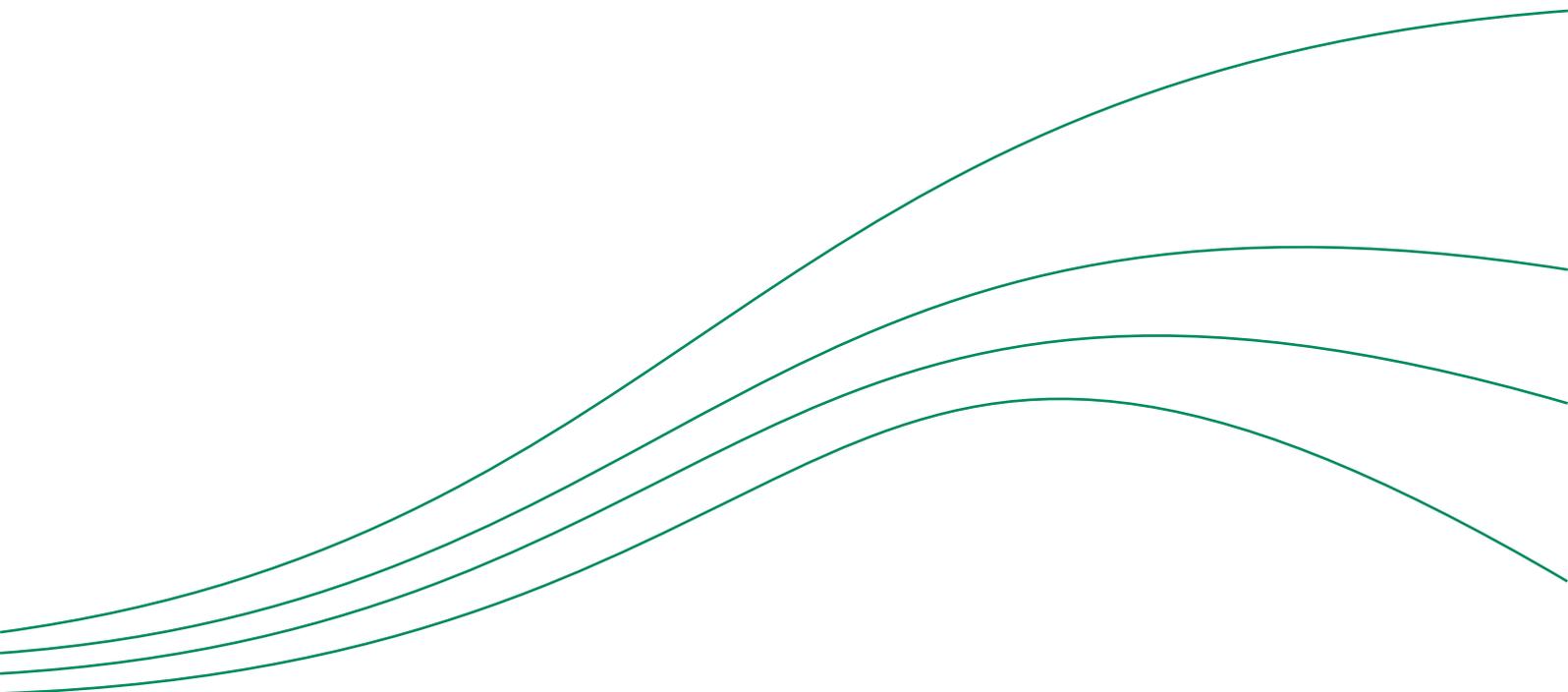
a.a.	ao ano
ABAI	Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAT	Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção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

## Lista de símbolos

<b>CO<sub>2</sub></b>	dióxido de carbono (gás carbônico)
<b>Gg</b>	gigagrama
<b>GJ</b>	gigajoule
<b>kWh</b>	quilowatt-hora
<b>m<sup>3</sup></b>	metro cúbico
<b>MPa</b>	megapascal
<b>Mt</b>	megatonelada
<b>PJ</b>	petajoule
<b>t</b>	tonelada
<b>TJ</b>	terajoule



# Sumário executivo



**E**m 2011, foi publicado o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (GEE) 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 em questão. 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 foi responsável por 57,2% das emissões do estado em 2005, onde, desse total, 29,4% correspondia 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 transformações ocorram, ou seja, é parte do sistema produtivo. De acordo com as conjecturas adotadas, 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, apresentadas nos cenários, são o produto de sistemas dinâmicos e complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento socioeconômico e mudança tecnológica, cuja evolução é incerta. As alternativas estudadas de redução de emissão foram analisadas a partir de cenários de referência (CR) e de baixo carbono (CBC) considerando as emis-

sões 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. Nesta segunda edição dados históricos foram utilizados até o ano de 2018 (SNIC 2019; SÃO PAULO 2019; IABr 2019; IABr 2018; IABr 2016; IABr 2015) e manteve-se as projeções entre 2019 e 2030. 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 compe-

titividade 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 atraente. Não obstante, o resultado final, considerando as medidas de baixo carbono, e as premissas adotadas no estudo, para os setores abordados, indica um custo médio ponderado negativo de US\$ 21,96/tCO<sub>2</sub> atrelado a um cenário potencial de mitigação estimado em 68,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> até o ano de 2030<sup>1</sup>.

## ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

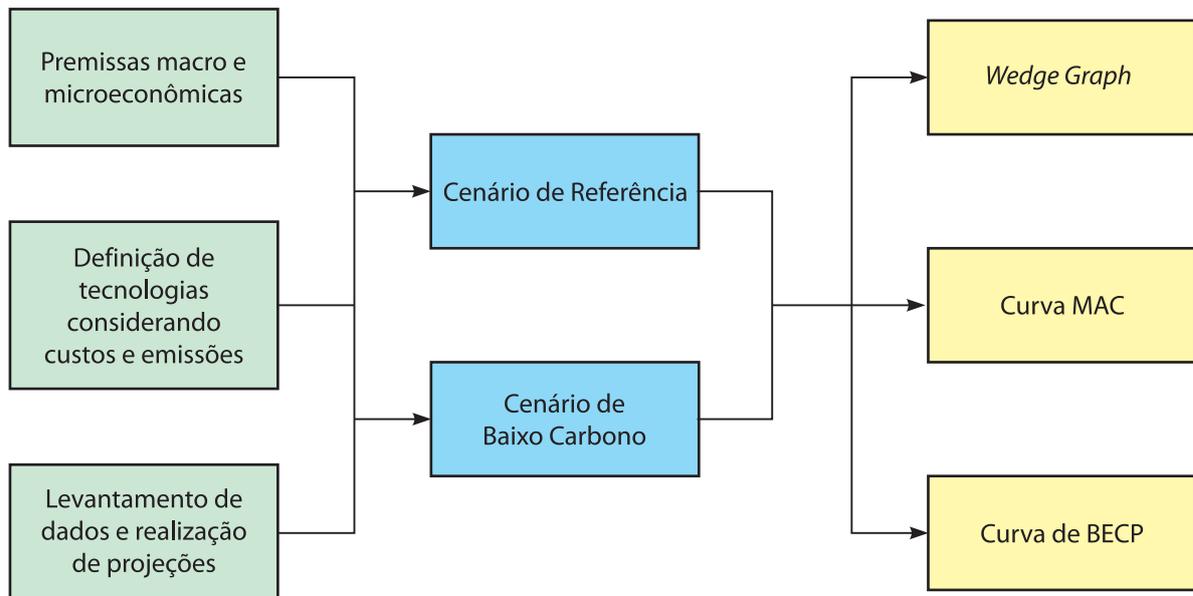
A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, para o qual foram contactadas empresas e especialistas do

setor para o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente, foram propostos os cenários de referência e baixo carbono e apresentados os resultados 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*

**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 atraente, 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).

*Sector Management Assistance Program* (ESMAP, 2016), é 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 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 apresentam cunhas de mitigação (*Wedge Graph*). Essas cunhas resultam da 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 emissão de GEE.

## RESULTADOS

Nessa seção, são apresentados os resultados para o período de 2014 a 2030, considerando as informações utilizadas neste estudo, como a evolução da produção industrial no estado, a evolução do consumo de energia, a evolução das emissões de GEE do CR e CBC, os custos de investimentos, as emissões de GEE 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, ocorreu a paralisação do único alto forno que produzia ferro gusa no estado. O religamento do mesmo está previsto para 2022 e, a partir desse ano, foi considerado 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 em 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).

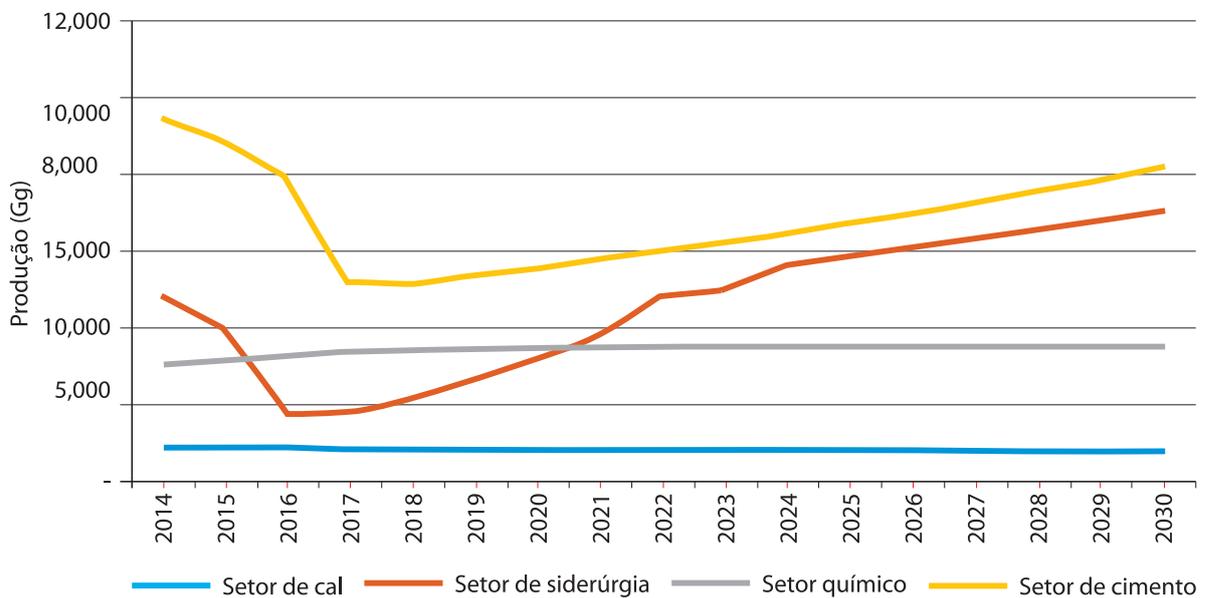
No setor químico, adotou-se uma taxa de crescimento de 0,37% a.a., a partir do ano de 2018, mas considerou-se que não haverá aumento da capacidade instalada no estado. Portanto, a produção crescerá até se estabilizar em cerca de 3,5 milhões de toneladas em 2027. Desse modo, o crescimento anual médio 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, o setor de cimento sofreu uma severa redução na produção entre 2014 e 2018, mas adotou-se uma taxa de crescimento de 4% a.a. a

partir de 2020, que foi o valor recomendado pelos especialistas para o cenário de médio prazo (CETESB 2018). A produção pela rota integrada chegará a 5,2 milhões de toneladas em 2030.

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)				
2014	4.405	87.780	79.796	17.633	189.614
2015	4.408	75.240	82.221	15.800	177.669
2016	4.374	29.469	85.188	13.235	132.266
2017	4.340	29.678	84.812	7.932	126.762
2018	4.307	35.990	79.044	7.913	127.254
2019	4.238	37.339	79.324	8.299	129.200
2020	4.241	38.740	81.579	8.812	133.372
2021	4.209	40.192	82.648	9.345	136.395
2022	4.177	75.794	82.742	9.900	172.614
2023	4.146	78.636	82.808	10.477	176.068
2024	4.149	81.585	82.877	11.077	179.689
2025	4.119	84.645	82.947	11.702	183.413
2026	4.088	87.819	83.021	12.351	187.279
2027	4.024	91.112	83.023	13.026	191.185
2028	3.962	94.529	83.023	13.728	195.241
2029	3.900	98.074	83.023	14.458	199.455
2030	3.841	101.751	83.023	15.218	203.832

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

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.

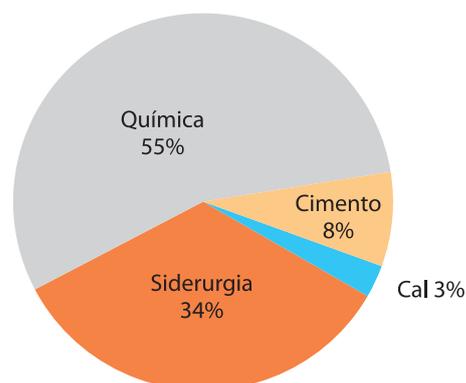
Na rota integrada a energia elétrica representa apenas 10% do total de energia consumida, já na rota semi-integrada ela representa 24% do total (FREITAS; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato, 2017b). Isso mostra que a rota semi-integrada é mais atraente para medidas de eficiência elétrica.

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, que é 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 atraentes para o setor.

No Gráfico 2, observa-se que o setor de química é responsável por 55% do total de energia consumido no período, seguido pelo setor de siderurgia com 34%. Por sua vez, no

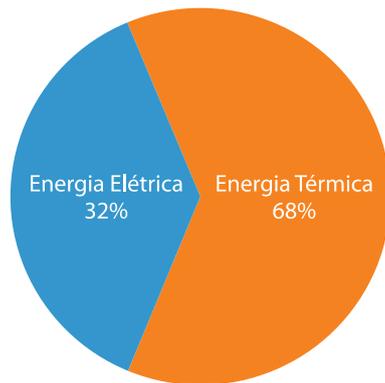
**Gráfico 2 – Consumo total de energia por setor 2014–2030**



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

Gráfico 3 é possível observar que a participação da energia térmica é de 68% do total, contra 32% 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 55%, seguido do setor de siderurgia com 32%, setor de cimento com 11% 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 33% no setor de siderurgia, um aumento de 20% no setor da indústria química, um aumento de 14% nas emissões provenientes do setor de cimento e um aumento de 19% considerando as emissões totais. Em termos absolutos, até 2030 estaria sendo emitido um total de 360 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>.

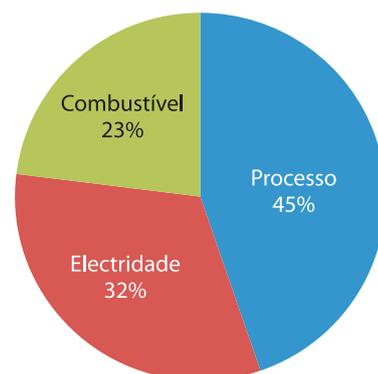
**Tabela 2** – Emissões estimadas do CR dos setores industriais no período de 2014 a 2030

Ano	Cal	Siderurgia	Química	Cimento	Total
	(GgCO <sub>2</sub> e)				
2014	588	8.051	10.650	3.466	22.755
2015	589	6.572	10.784	3.077	21.021
2016	584	1.755	11.101	1.744	15.185
2017	579	1.764	11.256	1.489	15.088
2018	575	2.109	11.058	1.488	15.229
2019	566	2.311	10.569	1.567	15.013
2020	566	2.745	11.029	1.673	16.013
2021	562	2.847	11.355	1.783	16.546
2022	557	8.326	11.497	1.898	22.278
2023	553	8.637	11.647	2.017	22.854
2024	554	8.960	11.798	2.140	23.451
2025	549	9.294	12.054	2.269	24.166
2026	545	9.642	12.186	2.403	24.776
2027	536	10.002	12.414	2.542	25.495
2028	528	10.366	12.552	2.687	26.133
2029	520	10.701	12.671	2.838	26.729
2030	512	10.725	12.808	2.994	27.038

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

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 45%, sendo os outros 55% 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, dez das dezessete medidas poderiam ser implementadas em algum nível de penetração. Em médio prazo, 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, mais quatro medidas poderiam ser implantadas, dentre elas o sistema CCS e o TGRBF-MDEA. Em relação ao estudo publicado em 2018 (CETESB 2018) verificamos que algumas das ações propostas, como por exemplo o uso de CDR pela indústria cimenteira, já foram adotadas.

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

Setor	Medida	Cenário de implementação
Química	Cogeração a gás natural	Curto prazo
	Substituição de iluminação tradicional por lâmpadas LED	Curto prazo
	Implementação de motores elétricos mais eficientes	Curto prazo
	Substituição de óleo combustível por lenha	Curto prazo
	Substituição de gás natural por lenha	Curto prazo
	Recuperação do gás de purga na amônia	Médio prazo
	Conversão catalítica de óxido nitroso (N <sub>2</sub> O) na produção de ácido nítrico	Médio prazo
	Produção de bioeteno (eteno a partir de etanol)	Longo prazo
Cal	<i>Carbon Capture and Storage (CCS)</i>	Longo prazo
	Substituição de forno Azbe por forno Maerz com lenha <i>in natura</i>	Curto prazo
	Substituição de forno Azbe por forno Maerz com lenha torreficada	Longo prazo
Siderurgia	<i>Top Gas Recovery Blast Furnace</i> metil-dietanolamina (TGRBF-MDEA)	Longo prazo
	Forno com alimentação contínua e preaquecimento da sucata (sistema CONSTEEL)	Curto prazo
	Fornos com corrente contínua (CC)	Médio prazo
Cimento	Substituição de combustíveis fósseis por combustível derivado de resíduos (CDR)	Curto prazo
	Substituição parcial de combustíveis fósseis por <i>pellets</i> de madeira	Curto prazo
	Aumento do teor de <i>filler</i> no cimento	Curto prazo

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 68,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, 19% 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 28%. 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, considerou-se no desenvolvimento do estudo a volta da operação do mesmo. 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 91% de toda a emissão do setor siderúrgico no CR, 29% considerando todos os setores.

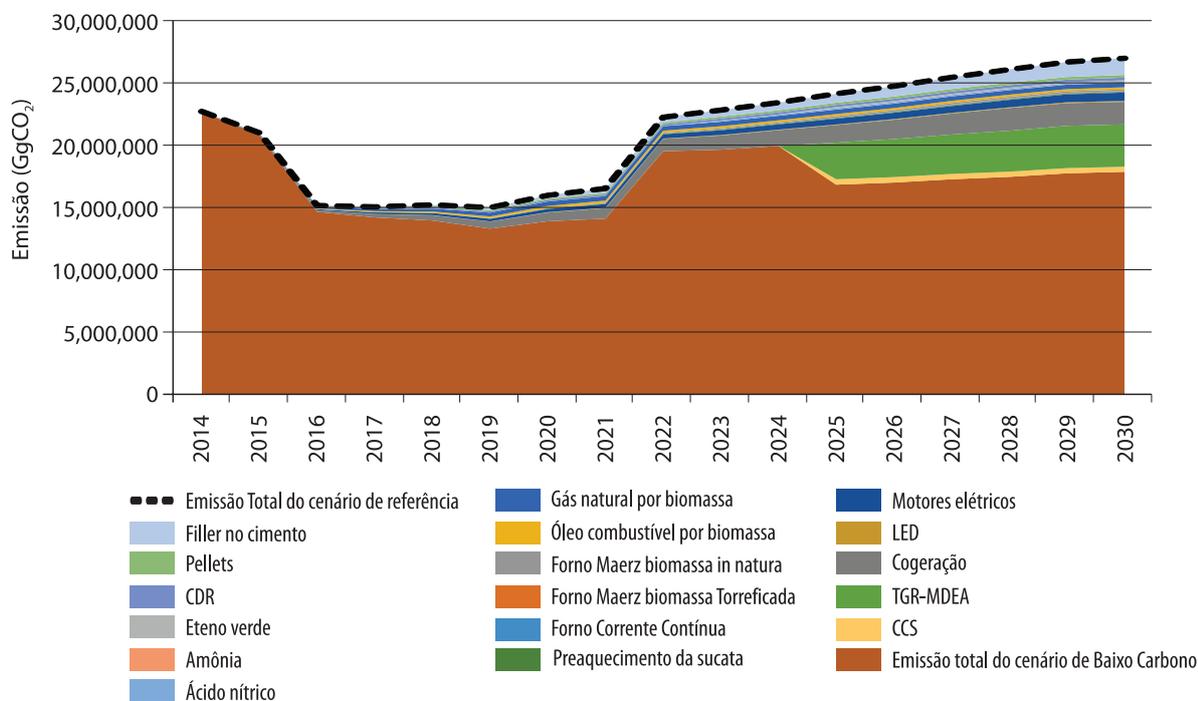
Em segundo lugar, encontra-se a medida de cogeração na indústria química com 24% de participação nas emissões evitadas. Essa medida em especial apresenta um baixo valor de MAC como será visto a seguir, que aliado ao

**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> )					
2014	0	-	-	46	22.709	22.755
2015	0	-	110	51	20.859	21.021
2016	0	-	387	125	14.673	15.185
2017	0	12	656	195	14.226	15.088
2018	0	12	941	299	13.978	15.229
2019	32	12	1.239	409	13.321	15.013
2020	32	41	1.517	504	13.919	16.013
2021	63	43	1.705	606	14.130	16.546
2022	63	59	1.893	713	19.551	22.278
2023	93	61	2.200	825	19.675	22.854
2024	93	63	2.377	942	19.976	23.451
2025	560	3.027	2.652	1.065	16.862	24.166
2026	556	3.140	2.851	1.195	17.033	24.776
2027	581	3.269	3.017	1.331	17.297	25.495
2028	572	3.391	3.208	1.474	17.488	26.133
2029	563	3.505	3.260	1.624	17.777	26.729
2030	554	3.506	3.297	1.783	17.897	27.038

Fonte: Pacca et al. (2017).

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



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 13% 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 dezessete medidas avaliadas no estudo.

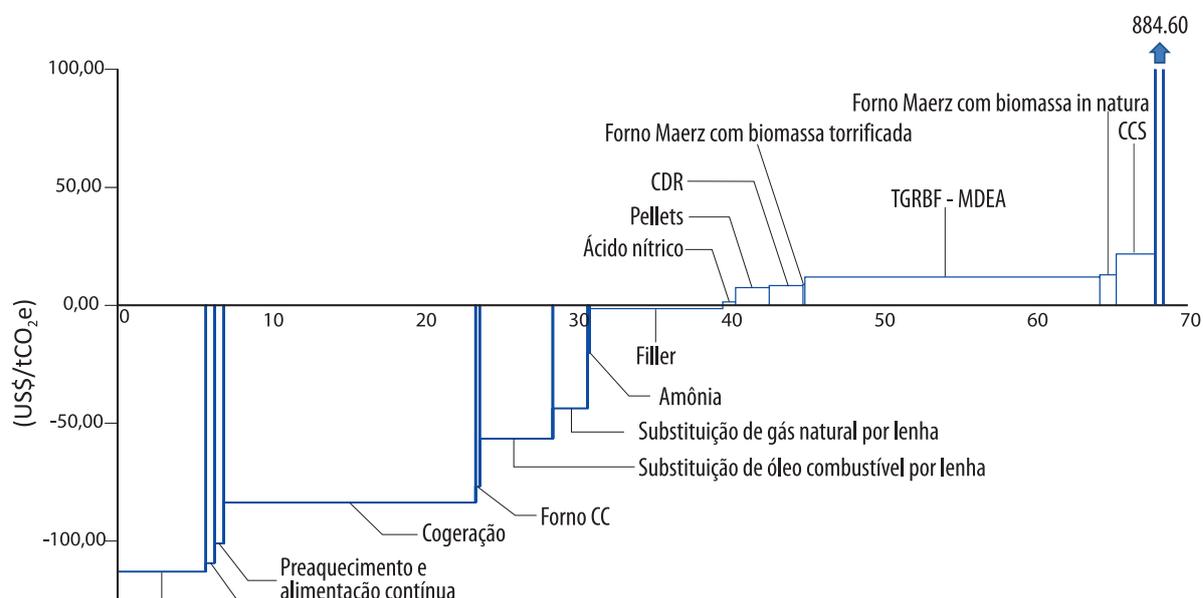
Na Tabela 5 são apresentadas 9 medidas para as quais o resultado econômico é negativo. Tais medidas são conhecidas como *no regrets*<sup>3</sup> ou seja, as medidas não apresentam um custo e até

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 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\$ 2,56 bilhões até o ano de 2030, com uma redução total de 39,58 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, 58% do potencial total de mitigação avaliado. Se a opção for por atingir o potencial total de 68,4 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, ainda assim seria gerado uma economia de US\$ 1,7 bilhões. Esses resultados econômicos totais variam se forem visualizados individualmente para cada setor.

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**



**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> e)	(US\$/tCO <sub>2</sub> e)	(million tCO <sub>2</sub> e)
Eletricidade	Motores mais eficientes	-113,02	-168,78	5,77
Eletricidade	LED	-109,26	-168,78	0,57
Eletricidade	Preaquecimento e alimentação contínua	-100,97	-217,01	0,61
Eletricidade	Cogeração	-83,64	-188,37	16,46
Eletricidade	Forno de corrente contínua	-76,86	-172,55	0,27
Combustível	Substituição de GN por lenha de reflorestamento	-56,51	-98,71	4,79
Combustível	Substituição de OC por lenha de reflorestamento	-43,7	-77,61	2,28
Processo	Amônia	-20,34	7,53	0,06
Processo	Filler	-1,51	-3,77	8,77
Processo	Ácido nítrico	1,51	23,36	0,84
Combustível	Pellets	7,53	17,33	2,21
Combustível	CDR	8,29	18,08	2,21
Combustível	Forno Maerz com biomassa torreficada	9,04	70,08	0,13
Processo	TGRBF-MDEA	12,06	71,58	19,27
Combustível	Forno Maerz com biomassa in natura	12,81	70,83	1,09
Processo	CCS	21,85	73,84	2,54
Processo	Bioeteno	884,6	2943,91	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).

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 68,4 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. Neste 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, para 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 (São Paulo). **Estudo de baixo carbono para a indústria no estado de São Paulo de 2014 a 2030** [recurso eletrônico] : sumário executivo / CETESB, BID ; Elaboração Bruna Patrícia de Oliveira, Jhonathan Fernandes Torres de Souza ; Coordenação executiva Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer ; Coordenação técnica Sérgio Almeida Pacca ; Colaboradores Carlos Alberto Sequeira Paiva... [et al.]. – 1.ed. atual. – São Paulo : CETESB, 2018.

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.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatísticas Econômicas; Preços e Custos** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos.html>>. Acesso em: 7 de outubro de 2019.

Instituto Aço Brasil (IABr). **Estatística preliminar nº 045** Janeiro 19 Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/ESTATIS%20PDF/Preliminar\\_Janeiro\\_2019\\_646869976\\_2.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/ESTATIS%20PDF/Preliminar_Janeiro_2019_646869976_2.pdf)>. Acesso em: 22 de outubro de 2019

Instituto Aço Brasil (IABr). **Estatística preliminar nº 010** dezembro 15 Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar\\_Dezembro\\_2015.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar_Dezembro_2015.pdf)>. Acesso em: 22 de outubro de 2019

Instituto Aço Brasil (IABr). **Estatística preliminar nº 022** dezembro 16 Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/ESTATIS%20PDF/Preliminar\\_Janeiro\\_2017.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/ESTATIS%20PDF/Preliminar_Janeiro_2017.pdf)>. Acesso em: 22 de outubro de 2019

Instituto Aço Brasil (IABr). **Estatística preliminar nº 034** Janeiro 18 Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar\\_Janeiro\\_2018\\_9146.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/arquivos/estatisticas/Preliminar_Janeiro_2018_9146.pdf)>. Acesso em: 22 de outubro de 2019

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-nggip.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.; 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.







Apoio técnico:



Realização:



| Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente