

Estudo de Baixo Carbono para a Indústria do Estado de São Paulo de 2014 a 2030

Relatório Síntese

1ª edição atualizada

Sumário Executivo



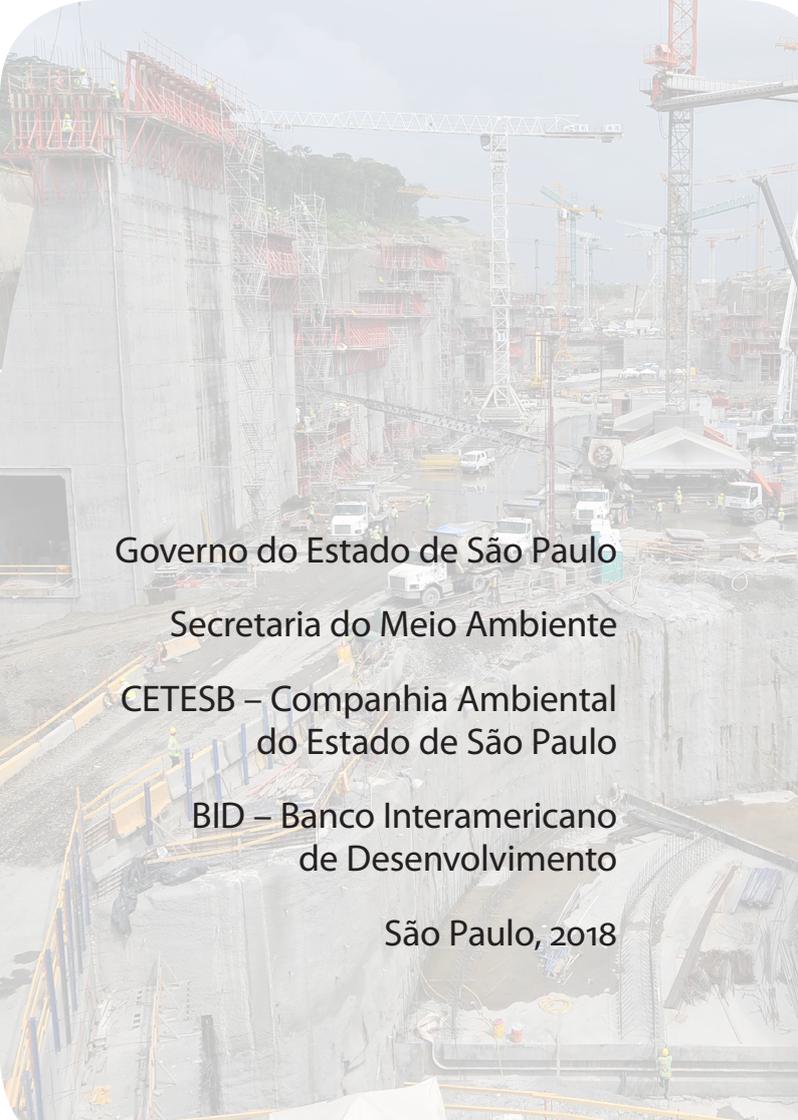
Governo do Estado de São Paulo
Secretaria do Meio Ambiente
CETESB – Companhia Ambiental
do Estado de São Paulo
BID – Banco Interamericano
de Desenvolvimento
São Paulo, 2018



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

1ª edição atualizada

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, 2018

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

C418e 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.

1 arquivo de texto (22 p.) : il. color., PDF ; 5,8 MB.

Elaborado a partir do texto de mesmo título dos autores: PACCA, Sérgio Almeida et al. Projeto BR-T1262: apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o estado de São Paulo.

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

ISBN 978-85-9467-037-3

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

Indústrias 5. Medidas mitigadoras 6. Mudanças climáticas 7. São Paulo (Est.) I. Oliveira, Bruna Patrícia de, autor. II. Souza, Jhonathan Fernandes Torres de, autor. III. BID. IV. 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 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 Márcio França

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE

Secretário Eduardo Trani

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Diretor Presidente Carlos Roberto dos Santos

Diretoria de Gestão Corporativa Waldir Agnello

**Diretoria de Controle
e Licenciamento Ambiental** Geraldo do Amaral Filho

**Diretoria de Avaliação
de Impacto Ambiental** Ana Cristina Pasini da Costa

**Diretoria de Engenharia
e Qualidade Ambiental** Eduardo Luis Serpa

Presidência

Carlos Roberto dos Santos

Departamento de Cooperação Institucional e Internacional

Fátima Aparecida Carrara

Divisão de Mudanças Climáticas

Maria Fernanda Pelizzon Garcia

Ficha técnica

Autores

Bruna Patrícia de Oliveira
Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer
Jussara de Lima Carvalho
Maria Fernanda Pelizzon Garcia
Marta Emerich

Coordenação Executiva

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Neuza Maria Maciel
Oswaldo dos Santos Lucon

Coordenação Técnica

Sérgio Almeida Pacca

Renan Pelegrine

Wilson Issao Shiguemoto

Colaboradores

Bruna Chyoshi
Carlos Alberto Sequeira Paiva
Daniel Soler Huet
Eduardo Shimabokuro

Projeto Gráfico e Diagramação

Brainstorm – Arte em Comunicação

Foto da capa

Acervo BID

Este Sumário trata-se de uma síntese dos seguintes estudos:

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

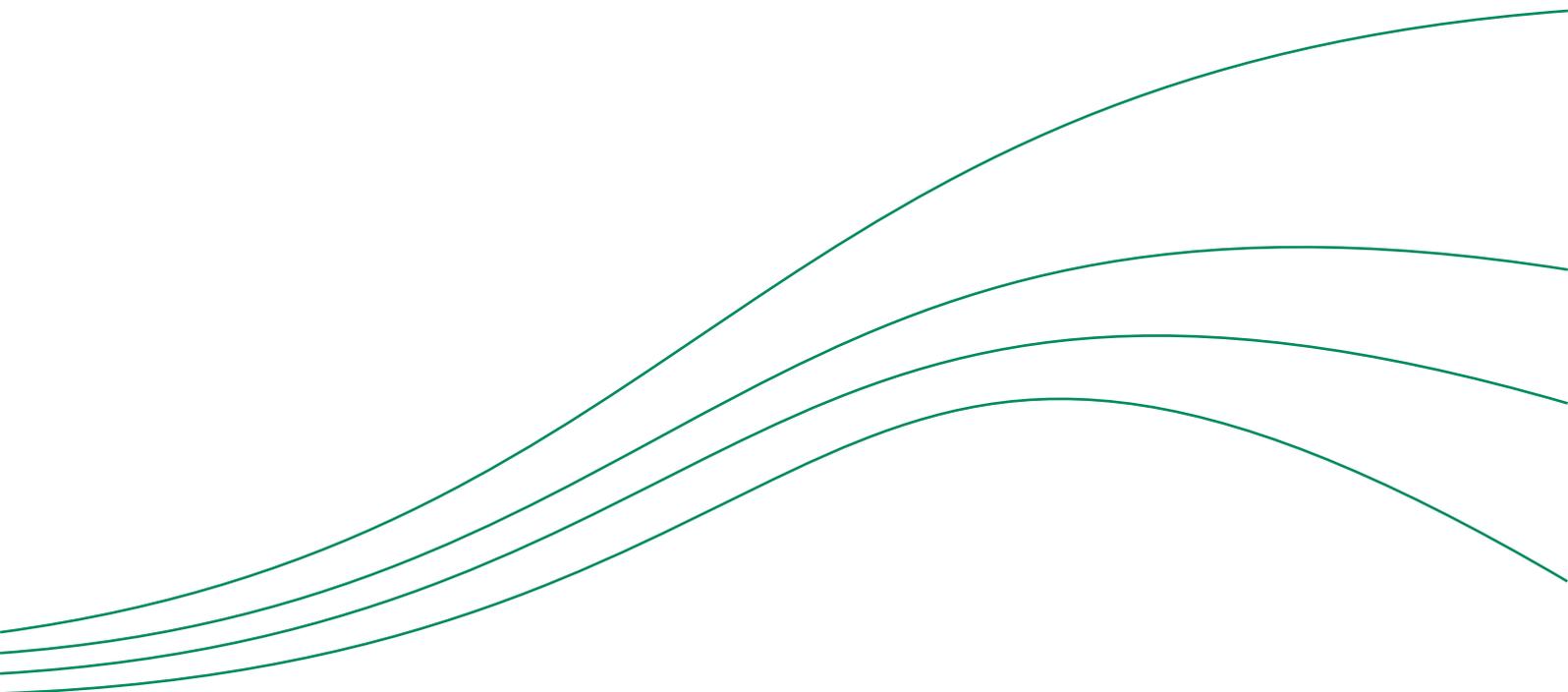
a.a.	ao ano
ABAI	Associação Brasileira de Argamassas Industrializadas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABESC	Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Concretagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAT	Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção
BECP	Preço de Equilíbrio de Carbono (<i>Break-Even Carbon Price</i>)
BEN	Balanço 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

CO₂	dióxido de carbono (gás carbônico)
Gg	gigagrama
GJ	gigajoule
kWh	quilowatt-hora
m³	metro cúbico
MPa	megapascal
Mt	megatonelada
PJ	petajoule
t	tonelada
TJ	terajoule



Sumário executivo



Em 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 GtCO₂e 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, deste 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 estes 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 sócio-econômico 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 pro-

cessos, 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. Desta 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/tCO₂ atrelado a um cenário potencial de mitigação estimado em 78,4 milhões de toneladas de CO₂ até o ano de 2030¹.

ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

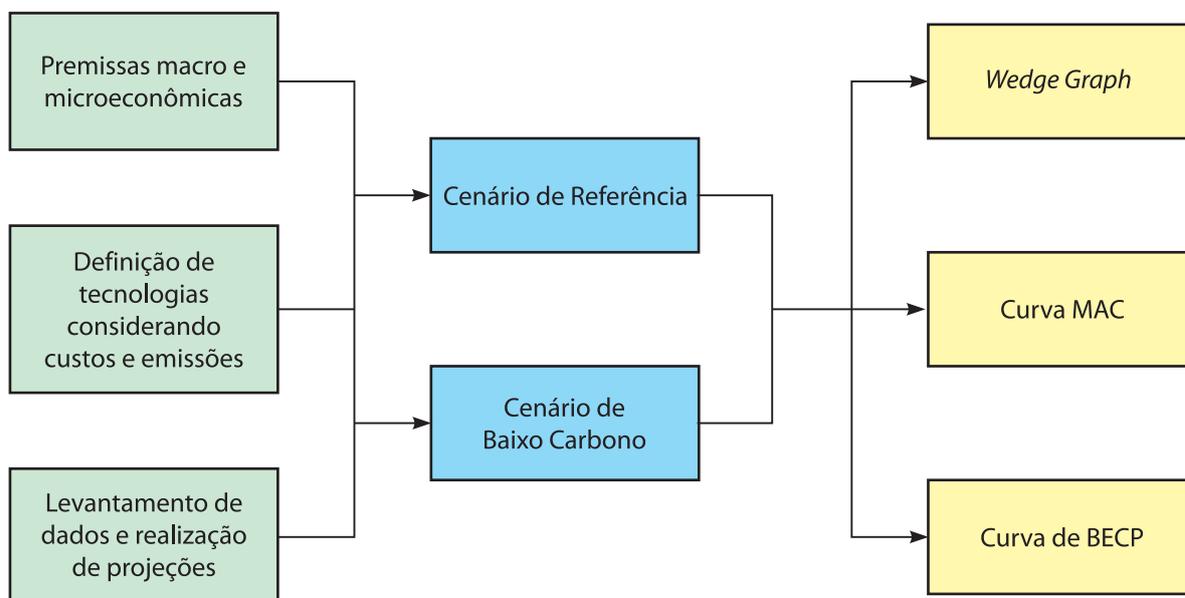
A construção dos cenários seguiu o roteiro metodológico apresentado na Figura 1, onde consta um levantamento inicial de dados, onde foram contactadas empresas e especialistas do setor para o estabelecimento de premissas e a realização de projeções. Posteriormente, foram propostos os cenários de referência (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 BECP² 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 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).

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*). Estas 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 GEE.

RESULTADOS

Nesta 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).

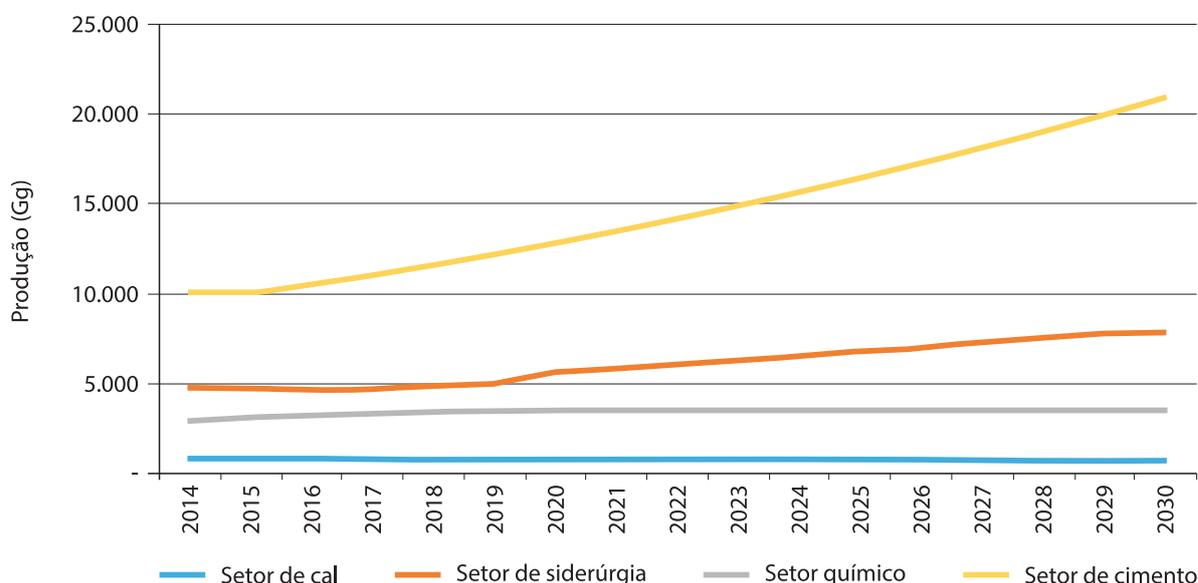
Já no setor de siderurgia, adotou-se que o crescimento da produção de aço ocorre a uma proporção constante de 1,5 em relação ao Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Como exemplo, no ano em que o PIB brasileiro cresce 1,5%, a produção da siderurgia cresce 2,25%. Também foram consideradas ampliações 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 através 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. Deste modo, o crescimento anual médio no período de 2014-2030 passa a ser de 1% a.a.. Este 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 esta 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 disto, foi assumido no CBC, que a eficiência energética neste setor poderia ser utilizada para deslocar lenha para outros setores que ainda utilizam combustíveis fósseis, como o coque de petróleo.

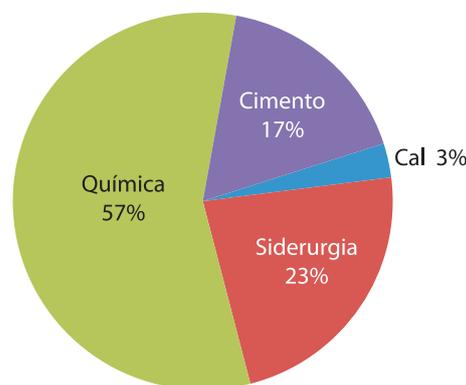
No setor de siderurgia, observa-se uma distinção entre a rota integrada e a semi-integrada. Na rota integrada a energia elétrica representa apenas 10% do total de energia consumida, já na rota semi-integrada ela representa 24% do total (FREITAS; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato, 2017b). Isto mostra que 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 estes 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 atrativas para o setor.

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

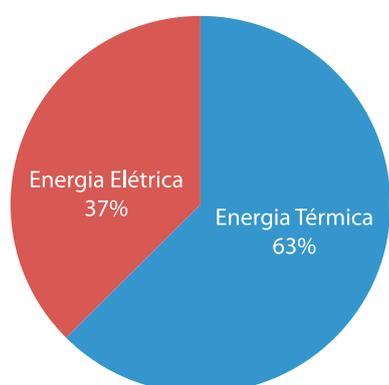
Gráfico 2 – Consumo total de energia por setor 2014–2030



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

gia 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 CO₂.

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

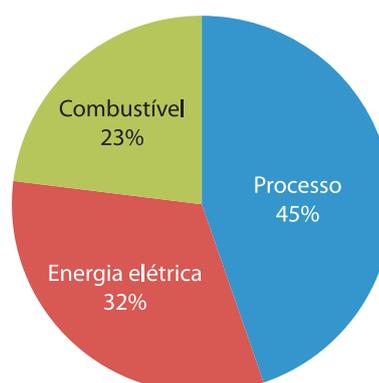
Ano	Cal	Siderurgia	Química	Cimento	Total
	(GgCO ₂ e)				
2014R	588	7.078	9.976	3.758	21.400
2015E	589	6.830	10.333	3.676	21.428
2016E	584	6.581	10.841	3.874	21.880
2017E	579	6.728	11.345	4.137	22.790
2018E	575	6.929	11.825	4.413	23.742
2019E	566	7.136	12.152	4.702	24.556
2020E	566	7.737	12.289	4.746	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 CO₂e 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 ₂ O) na produção de ácido nítrico	2023
	Produção de bioeteno (eteno 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 pré aquecimento 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 CO₂, 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 CO₂ em um período de 15 anos. Isto 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. Esta medida em especial apresenta um baixo valor de MAC como será visto a seguir, que aliado ao seu po-

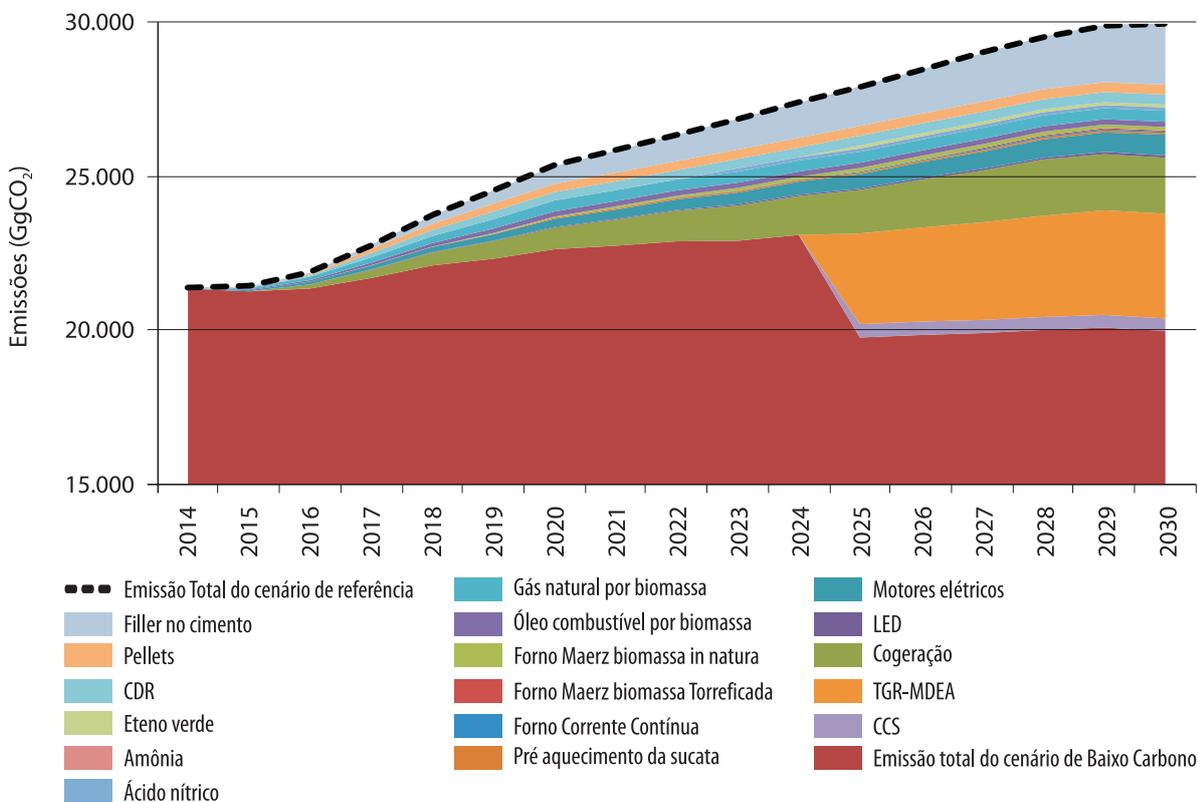
Tabela 4 – Estimativas de emissões evitadas por setor no cenário de baixo carbono

Ano	Emissões evitadas				Total das emissões CBC	Total das emissões CR
	Setor de cal	Setor siderúrgico	Setor químico	Setor de cimento		
	(GgCO ₂)					
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).

tencial 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. Esta 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

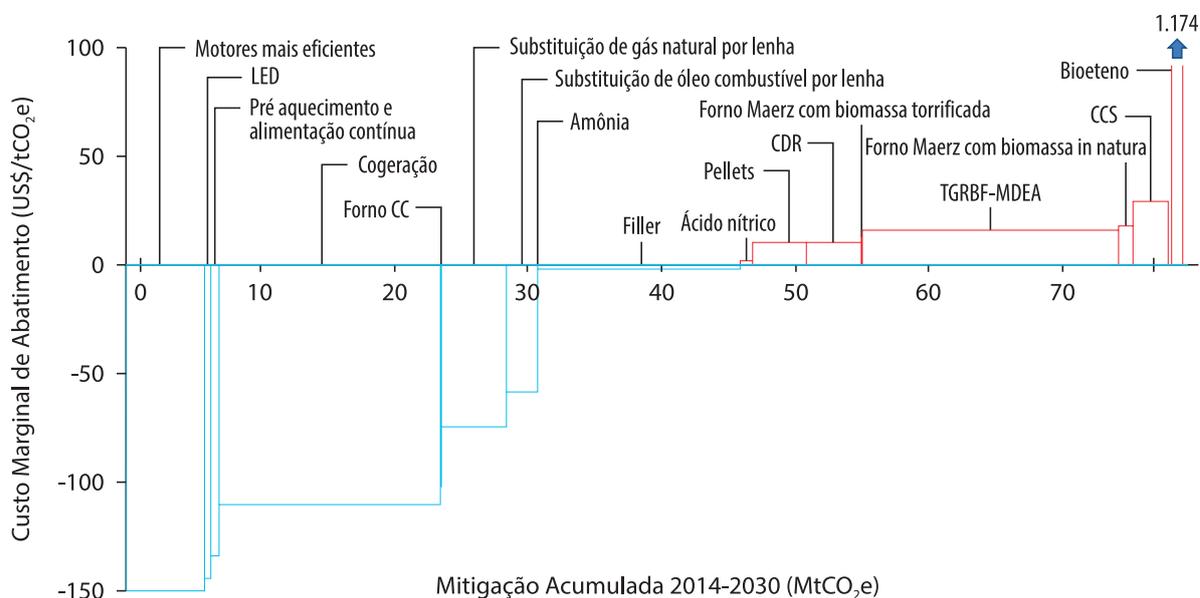
O Gráfico 6 apresenta a curva MAC com as dezessete medidas avaliadas no estudo.

Na Tabela 5 são apresentadas 9 medidas para as quais o resultado econômico é negativo. Tais medidas são conhecidas como *no regrets*² ou seja, as medidas não apresentam um custo e até podem implicar em ganhos. Entre estas 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\$ 3,4 bilhões até o ano de 2030, com uma

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 ₂ e)	(US\$/tCO ₂ e)	(MtCO ₂ e)
Eletricidade	Motores mais eficientes	-150	-224	5,77
Eletricidade	LED	-145	-224	0,57
Eletricidade	Pré-aquecimento 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 nítrico	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).

redução total de 45,95 milhões de toneladas de CO₂, 58,6% do potencial total de mitigação avaliado. Se a opção for por atingir o potencial total de 78,4 milhões de toneladas de CO₂, ainda assim seria gerado uma economia de US\$ 2,3 bilhões. Estes 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 isto 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 CO₂ até o ano de 2030.

Neste 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, 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 destas 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>. 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>. 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-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>. Acesso em: 28 set. 2015
- SNIC. **Relatório anual 2013**. [s.l.] SNIC, 2014. Disponível em: <http://www.snic.org.br/relatorio_anual_dinamico.asp>. Acesso em: 1 jun. 2015

WBCSD. CO₂ and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry – The Cement CO₂ 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>. Acesso em: 11 nov. 2015.

Agenda 2030:



Apoio técnico:



Realização:

