

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

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 de Cal no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

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 de cal no estado de São Paulo de 2014 a 2030 [recurso eletrônico] : sumário executivo / CETESB ; Apoio Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) ; Elaboração Bruna Patrícia de Oliveira, Jhonathan Fernandes Torres de Souza ; Coordenação executiva Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer ; Coordenação técnica Sérgio Almeida Pacca ; Colaboradores Bruna Chyoshi... [et al.]. – 1.ed. atual. – São Paulo : CETESB, 2018.

1 arquivo de texto (20 p.) : il. color., PDF ; 3,7 MB.

Elaborado a partir do texto de mesmo título dos autores: FREITAS, José Milton de; VOGELAAR, René; VOGELAAR, Renato. 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 978-85-9467-023-6

1. Aquecimento global 2. Baixo carbono 3. Cal – indústria 4. Efeito estufa – gases - cenário 5. Mudanças climáticas 6. Tecnologia química 7. São Paulo (Est.) I. Oliveira, Bruna Patrícia de. II. Souza, Jhonathan Fernandes Torres de. III. Título.

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

CDU (2. ed. Port.) 504.7:666.92 (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 Agnelo

**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**

---

**Elaboração**

Bruna Patrícia de Oliveira  
Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Eduardo Shimabokuro  
Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer  
Jussara de Lima Carvalho  
Maria Fernanda Pelizzon Garcia

**Coordenação Executiva**

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Marta Emerich  
Oswaldo dos Santos Lucon  
Renan Pelegrine  
Wilson Issao Shiguemoto

**Coordenação Técnica**

Sérgio Almeida Pacca

**Projeto Gráfico e Diagramação**

Brainstorm – Arte em Comunicação

**Colaboradores**

Bruna Chyoshi  
Carlos Alberto Sequeira Paiva  
Daniel Soler Huet

**Foto da capa**

Acervo CETESB

---

Documento elaborado a partir do *Estudo de baixo carbono para a indústria de cal no Estado de São Paulo de 2014 a 2030*, de autoria de José Milton de Freitas, René Vogelaar e Renato Vogelaar.

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 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.

Salientamos nosso reconhecimento ao Banco Mundial, através de Christophe de Gouvello e do seu programa de assistência técnica, ESMAP, que 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 março/2018)

## Lista de abreviaturas e siglas

ABPC	Associação Brasileira dos Produtores de Cal
BCEP	Preço de Equilíbrio de Carbono ( <i>Break-Even Carbon Price</i> )
BC	Baixo Carbono
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CAPEX	Investimentos ( <i>Capital Expenditures</i> )
CBC	Cenário de Baixo Carbono
CCS	Captura e Armazenamento de Carbono ( <i>Carbon Capture and Storage</i> )
CCU	Captura e Utilização de Carbono ( <i>Carbon Capture and Utilization</i> )
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH	Cal Hidratada
CV	Cal Virgem
ESMAP	<i>Energy Sector Management Assistance Program</i>
FE	Fator de Emissão
GEE	Gás ou Gases de Efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima ( <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> )
MAC	Custo Marginal de Abatimento ( <i>Marginal Abatement Cost</i> )
MEA	Monoetanolamina
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia (atual MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
OPEX	Despesas de Operação ( <i>Operational Expenses</i> )
SP	Estado de São Paulo
TIR	Taxa Interna de Retorno

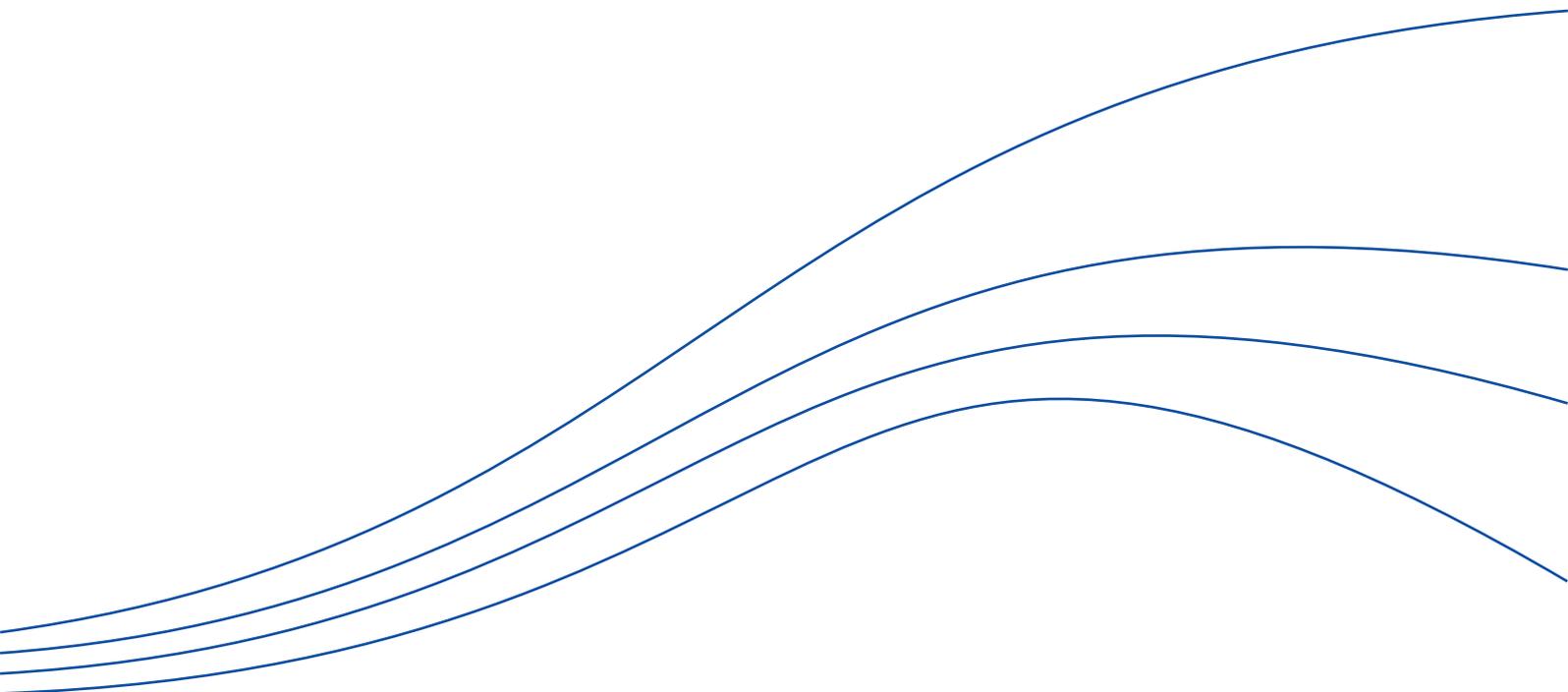
## Lista de símbolos

C	carbono
CO <sub>2</sub>	gás carbônico ou dióxido de carbono
CO <sub>2e</sub>	gás carbônico equivalente ou dióxido de carbono equivalente
Gg	giga-grama
Gt	giga tonelada
GJ	giga-joule
kcal	quilocaloria
kWh	quilowatt hora
t	tonelada
W	watt





# Sumário executivo



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 sócio-econômico 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 dos mesmos (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 desta 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).

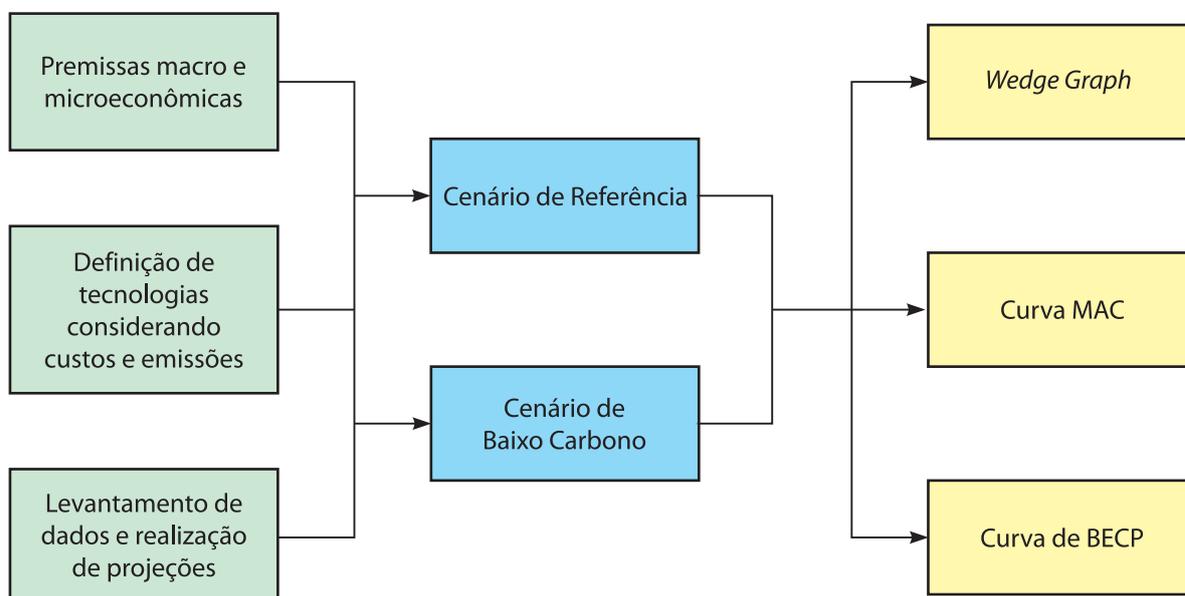
De acordo com o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo – Emissões do Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos de 1990 a 2008, em 2008 o setor de cal foi responsável por 4,65% das emissões de GEE provenientes de processos industriais 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>1</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.

1. 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 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

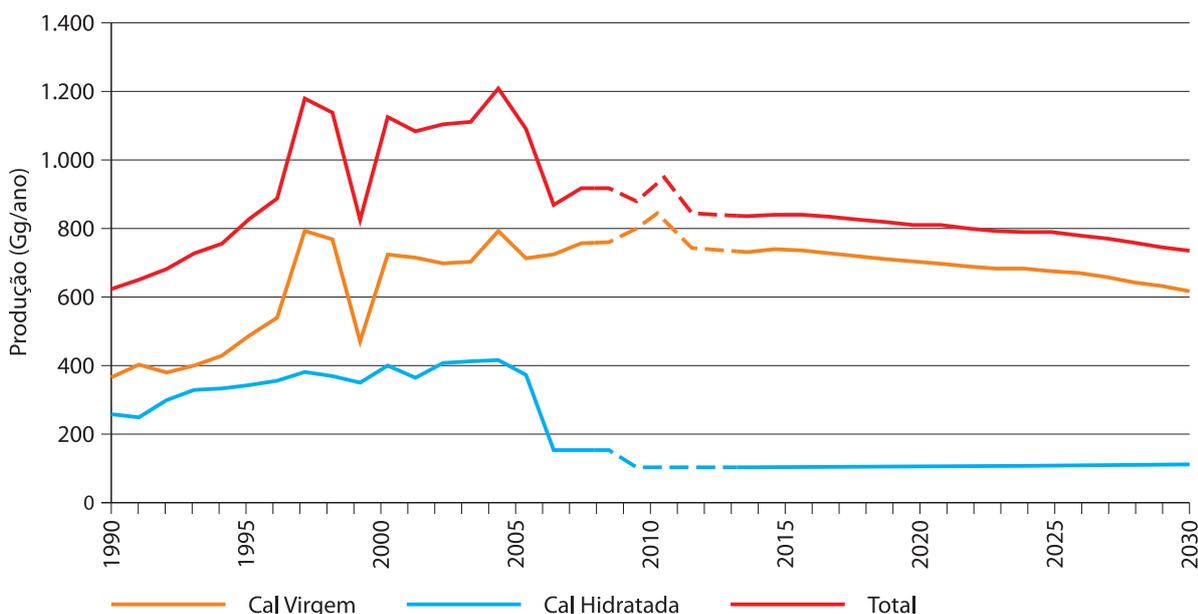
estudado, enquanto a produção de cal hidratada será reduzida ao longo do tempo.

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 esta 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

**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.

que até 2008 foi o período compreendido 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, esta 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. Este 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 esta 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 esta 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.

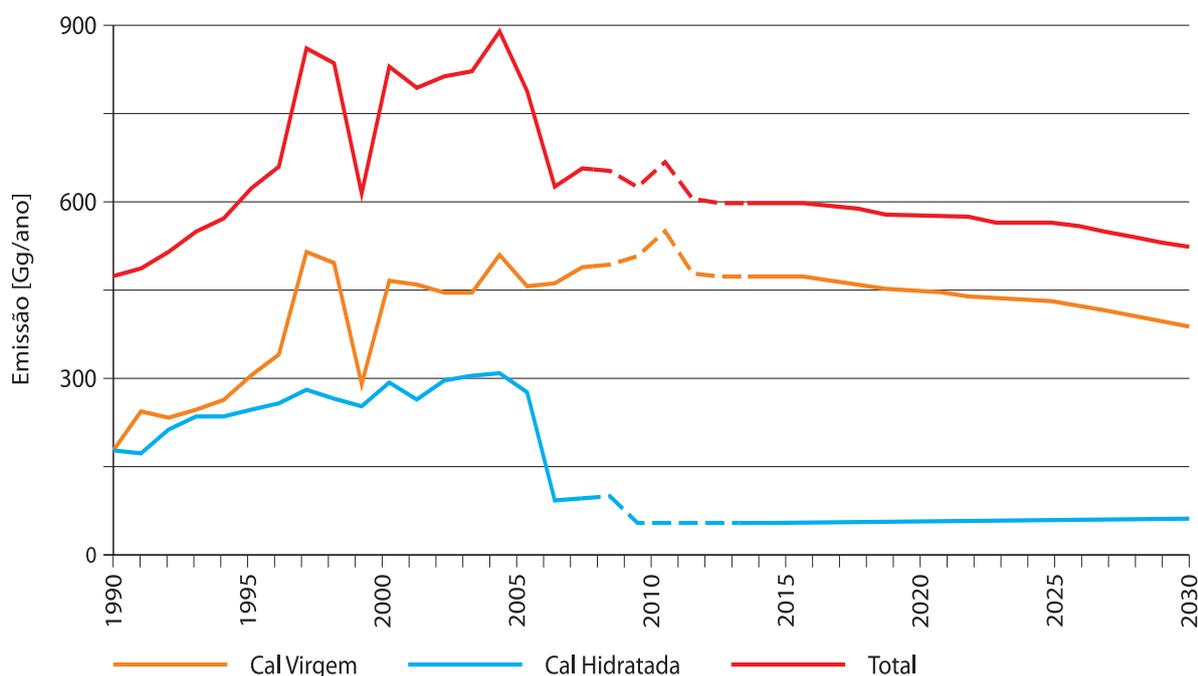
De acordo com o Gráfico 1 e Gráfico 2 foi possível observar a relação direta da produção com as emissões de processo. Quanto maior é a produção, maiores são as emissões por processo.

A tecnologia empregada no CR foi o forno Azbe<sup>2</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 torreficada<sup>3</sup>;
- c) Captura e Armazenamento de Carbono (CCS)<sup>4</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.

2. No Estado de São Paulo a tecnologia preponderante utilizada na produção de cal são os fornos do tipo Azbe.
3. 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 esta tecnologia, prevendo a viabilidade comercial até esta data.
4. 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 comprimi-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)
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.

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. Isto prova que, no balanço

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

Ano	Processo	Energia elétrica (1)	Energia térmica (lenha)	Energia térmica (2) (coque)	Total(3)
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).

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>5</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>6</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. Este 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, esta 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

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

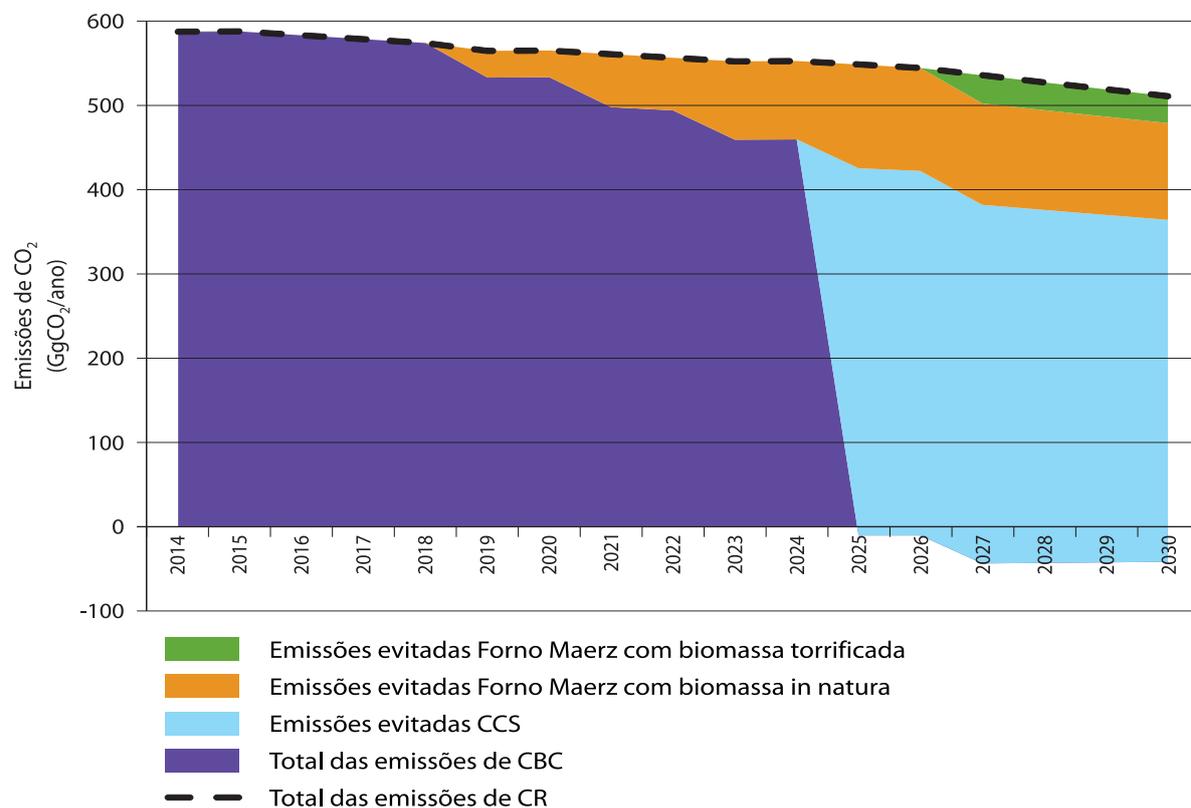
6. Foi escolhida esta quantidade de produção para poder compará-la ao forno Maerz.

**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>7</sup>; US\$ 1,6 milhão com a implantação do forno Maerz com biomassa torrificada<sup>8</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 tornem 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 e potencial de emissões evitadas**

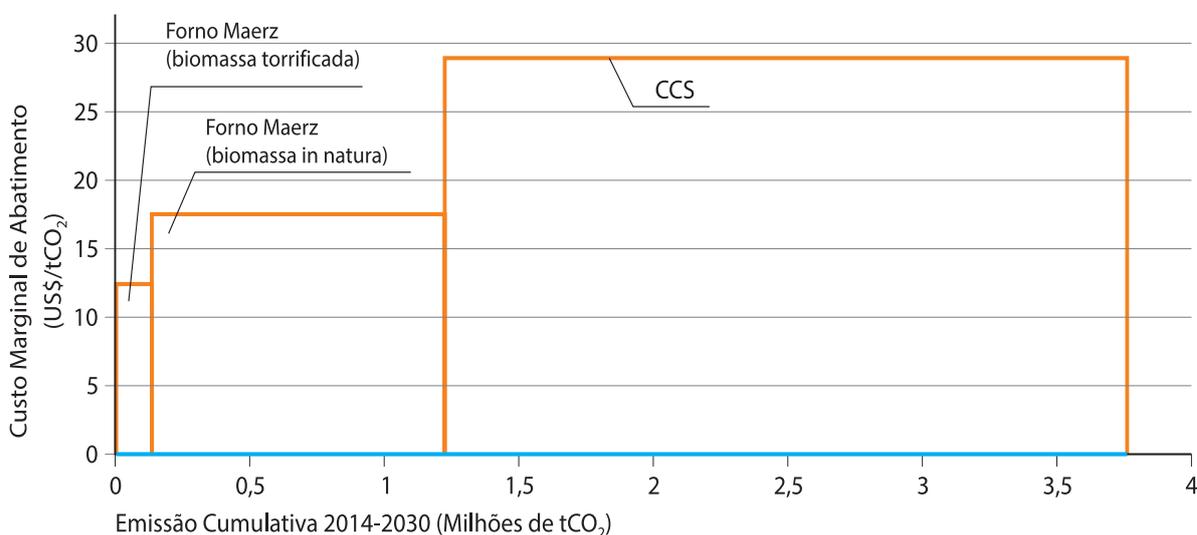
Tipo de emissão	Medida/Tecnologia	MAC	Break-Even Carbon Price	Redução de emissões 2014–2030
		(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(US\$/tCO <sub>2</sub> )	(10 <sup>6</sup> tCO <sub>2</sub> )
Combustível	Cal: Forno Maerz com biomassa torrificada	12	93	0,13
Combustível	Cal: Forno Maerz com biomassa in natura	17	94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

7. Considerando a implantação em 4 fornos.

8. Considerando a implantação em apenas 1 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 da 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 nesta 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 desta 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 causam 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. Esta redução tem participação predominante da tecnologia CCS, 67% do total das emissões evitadas, apesar de este só ser introduzido no cenário de baixo carbono 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 coleta de dados, pois informações sobre produção e

emissão da indústria de cal, no ano base do estudo (2014) eram fundamentais, contudo esta 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. 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.
- 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.
- 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://inventariogeosp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro\\_inventario\\_setor\\_industria\\_web1.pdf](http://inventariogeosp.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.

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.

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. **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



Agenda 2030:



Apoio técnico:



Realização:

