

Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Química 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 Química 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 química 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 ; 2,3 MB.

Elaborado a partir do texto de mesmo título dos autores: FANTI, Obdúlio Diego 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 978-85-9467-036-6

1. Aquecimento global 2. Baixo carbono 3. Efeito estufa – gases - cenário 4. Mudanças climáticas 5. Química – indústria 6. Tecnologia química 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 (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 Oliveira
Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Carlos Alberto Sequeira Paiva
Daniel Soler Huet
Eduardo Shimabokuro
Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer
Jussara de Lima Carvalho
Maria Fernanda Pelizzon Garcia
Marta Emerich
Oswaldo dos Santos Lucon
Renan Pelegrine
Wilson Issao Shiguemoto

Coordenação executiva

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Coordenação técnica

Sérgio Almeida Pacca

Revisão e reestruturação

Bruna Patrícia de Oliveira

Projeto Gráfico e Diagramação

Brainstorm Arte em Comunicação

Colaboradores

Bruna Chyoshi

Fotos

José Jorge Neto/ CETESB

O presente relatório trata-se de uma consolidação dos estudos complementares realizados por Fanti e Souza (2017) para os processos envolvidos e por Strumpf e Kurimori (2017) para a energia. A estrutura final, aqui apresentada, e a harmonização dos conteúdos de ambos os estudos foi realizada pela equipe de consultores do projeto de apoio à CETESB, assim como a adequação do modelo de consumo de energia. Originalmente, na análise de energia, foram realizados dois cenários exploratórios de evolução de consumo, um com o crescimento de 2,7% e outro com 3,7% ao ano. Para gerar a harmonização entre os resultados finais, o modelo foi ajustado apenas sobre a taxa de 3,7%, incluindo a premissa de que existe um limite imposto pela capacidade instalada da indústria. Esta é a mesma taxa de crescimento adotada na evolução da produção química, parte da análise sobre os processos. Os resultados originais de energia sobre as taxas de 2,7% e 3,7% (não limitadas à capacidade instalada) podem ser consultados no APÊNDICE A do documento "Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Química no estado de São Paulo de 2014 a 2030".

Documento elaborado a partir do *Estudo de baixo carbono para a indústria química no Estado de São Paulo de 2014 a 2030* de autoria de Obdúlio Diego Fanti, Roberto Strumpf, Jhonathan Fernandes Torres de Souza e Natália Kurimori.

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.

Reitera-se que este é um estudo exploratório. 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 programa 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 março/2018).

Lista de abreviaturas e siglas

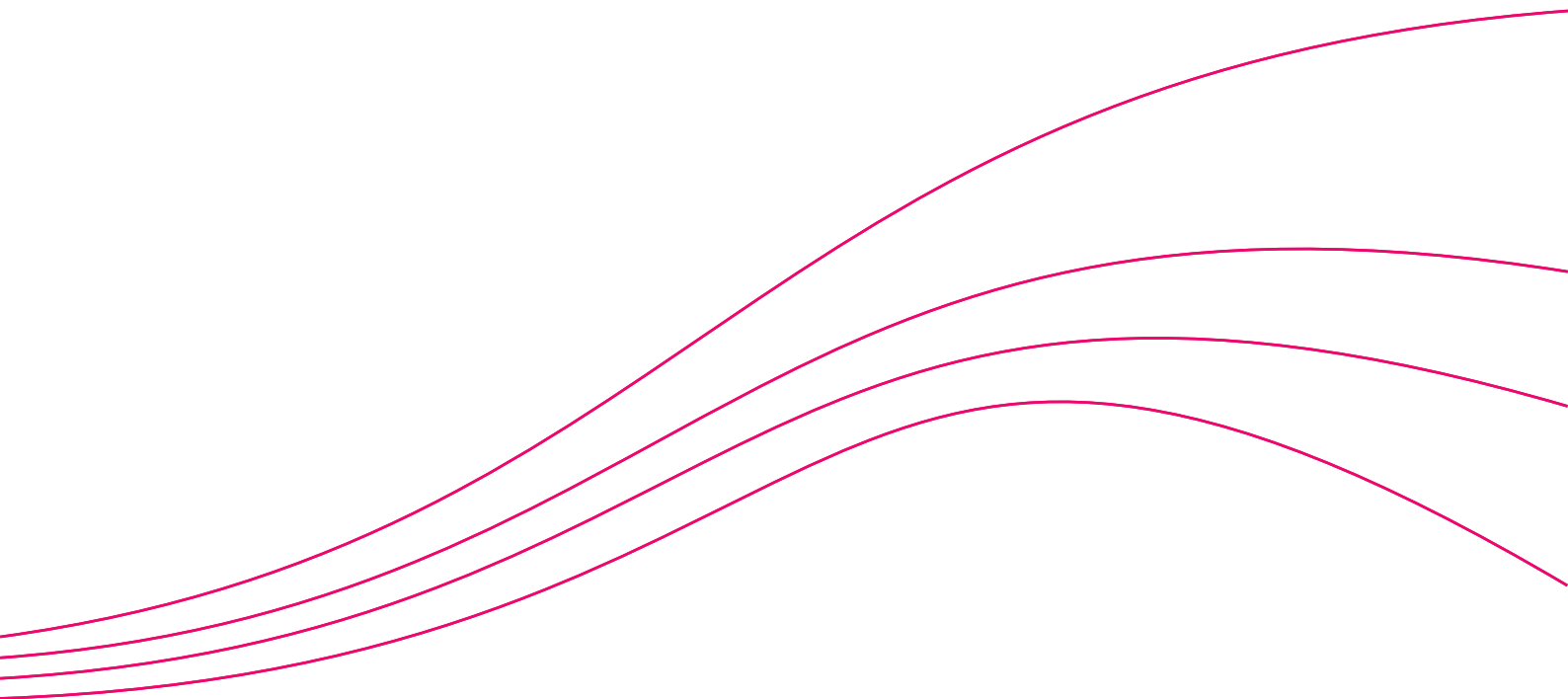
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CAPEX	Investimentos (<i>Capital Expenditures</i>)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CBC	Cenário de Baixo Carbono
CR	Cenário de Referência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

Lista de símbolos

C_2H_4	eteno
$C_2H_4Cl_2$	dicloroetano
C_2H_4O	óxido de eteno
C_2H_5OH	etanol
$C_6H_{10}O_4$	ácido adípico
CH_2CHCl	cloreto de vinila (MVC)
CH_4	metano
CO_2	dióxido de carbono
CO_2e	dióxido de carbono equivalente
Gg	gigagrama
GJ	gigajoule
H_2	hidrogênio
H_3PO_4	ácido fosfórico
HCl	ácido clorídrico
HNO_3	ácido nítrico
MWh	megawatt-hora
N_2	nitrogênio
N_2O	óxido nitroso
NH_3	amônia
NO	óxido nítrico
O_2	oxigênio
t	tonelada
Tep	tonelada equivalente de petróleo



Sumário executivo



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

As emissões futuras de GEE são o produto de sistemas dinâmicos muito complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento 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 uma ferramenta adequada para analisar como as forças motrizes podem influenciar no resultado de emissões futuras, assim como avaliar as incertezas associadas, não apresentando relação com a probabilidade de ocorrência dos mesmos (IPCC, 2000b).

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

A CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo publicou em 2011 o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo, CETESB (2011), que destacou que, em 2005, no Estado de São Paulo, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) foi de 139.811Gg de CO₂e (sem incluir os gases controlados pelo Protocolo de Montreal), sendo que 57,2% das emissões foram advindas da categoria de energia. Além disso, os processos industriais paulistas foram responsáveis por 14,7% das emissões. Dessas emissões referentes aos processos, o setor químico foi responsável por 38,8% associado à produção de ácido adípico, ácido fosfórico, ácido nítrico, amônia, dicloroetano e cloreto de vinila, eteno, negro de fumo e óxido de eteno.

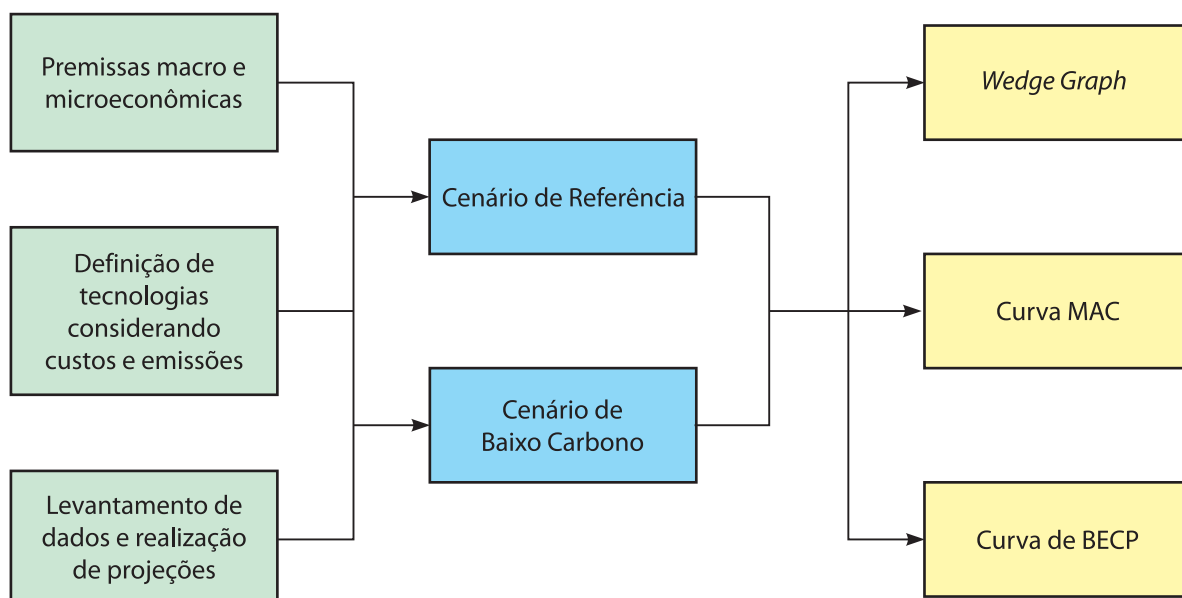
Diante do contexto do estado frente às mudanças climáticas, o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e a CETESB estabeleceram uma Cooperação Técnica, na qual se enquadrava o estudo em pauta, que teve como principais objetivos apresentar os custos e o potencial de mitigação de GEE para a indústria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

ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

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

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

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo



Fonte: Pacca et al. (2017).

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

Para a construção das curvas de MAC e BECP¹ empregou-se a MACTool. De acordo com o *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços (ESMAP, 2016; FAY, et al., 2015).

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

RESULTADOS

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

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

A evolução da produção química no Estado de São Paulo

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

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

Quadro 1 – Considerações específicas sobre a produção

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

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

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

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

No CBC a produção difere do CR pela inserção de bioeteno a partir de 2025 totalizando, no período de 2025 a 2030, uma produção de 1.482 Gg de bioeteno².

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

Ano	Ácido adípico	Ácido fosfórico	Ácido nítrico	Amônia	Dicloroetano	Cloreto de vinila	Eteno	Negro de fumo	Óxido de eteno	Coque de petróleo	Total
(Gg)											
2014	60	442	468	182	120	316	583	318	81	425	3002
2015	63	459	485	189	131	327	605	330	84	441	3.114
2016	65	476	503	196	136	340	627	342	87	457	3.229
2017	67	493	522	203	140	350	651	355	90	474	3.345
2018	70	508	537	209	140	350	675	368	93	492	3.442
2019	72	508	537	209	140	350	700	376	95	500	3.487
2020	75	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.491
2021	78	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.494
2022	81	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.497
2023	84	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.500
2024	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2025	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2026	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2027	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2028	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2029	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503
2030	87	508	537	209	140	350	700	377	95	500	3.503

Fonte: Fanti et al. (2017).

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

A evolução do consumo de energia

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

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

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

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

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

(1) Os dados de consumo de energia foram extraídos do Balanço Energético Estadual (SÃO PAULO, 2014) em tonelada equivalente de petróleo (tep) e foram convertidos em Joule (J) empregando-se o fator 41,868 GJ/tep.

A evolução das emissões no cenário de referência e baixo carbono

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

No cenário de referência as emissões de 2030 em relação a 2014 apresentam um aumento de 1.861 GgCO₂e, representando 15,7%. Em relação às emissões de processo, estima-se que ocorrerá um aumento de 18,7% GgCO₂e em 2030 em relação à 2014. Para as emissões de energia térmica e energia elétrica estima-se um aumento de 16,4% e 14,1%, respectivamente.

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

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

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

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

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

- (1) Os FE utilizadas para as estimativas de emissões no CR foram: ácido adípico 1,494 tCO₂e/t_{produto} (FANTI et al., 2017), ácido nítrico 0,634 tCO₂e/t_{produto} (FANTI et al., 2017), ácido fosfórico 0,059 tCO₂e/t_{produto} (FANTI et al., 2017), amônia 1,30 tCO₂e/t_{produto} Brasil (2015), cloreto de vinila 0,294 tCO₂e/t_{produto} Brasil (2015), coque de petróleo 0,730 tCO₂e/t_{produto} (FANTI et al., 2017), dicloroetano 0,196 tCO₂e/t_{produto} IPCC (2006), eteno 1,870 tCO₂e/t_{produto} (FANTI et al., 2017), negro de fumo 2,620 tCO₂e/t_{produto} IPCC (2006), óxido de eteno 0,863 tCO₂e/t_{produto} IPCC (2006).
- (2) Gás natural: 0,0558 tCO₂/GJ, óleo diesel: 0,0733 tCO₂/GJ, óleo combustível: 0,0766 tCO₂/GJ, GLP: 0,0624 tCO₂/GJ, querosene: 0,0708 tCO₂/GJ, gás de refinaria: 0,0661 tCO₂/GJ, coque de petróleo: 0,0998 tCO₂/GJ.
- (3) O FE para eletricidade foi o 0,5884 tCO₂/MWh baseado em (BRASIL 2014) e (FANTI et al.).
- (4) O potencial de aquecimento global (*Global Warm Potencial* – GWP) dos GEE foram empregados conforme apresentado pelo IPCC (2000b) onde, para um horizonte de 100 anos, o GWP do CO₂ é de 1 e o do N₂O é de 310.

Quadro 2 – Tecnologias de baixo carbono

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

Tabela 4 – Cenário de penetração das tecnologias do CBC

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

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

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

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

No cenário de baixo carbono em relação ao cenário de referência observa-se uma emissão evitada de 31.311 GgCO₂e no período de 2014 a 2030. Essa redução está 4,6% associada a processo, 72,8% a energia elétrica e 22,6% à energia térmica.

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

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

- (1) Os FE utilizadas para as estimativas de emissões no CBC foram: ácido nítrico 0,438 tCO₂e/t_{produto}, amônia: 1,275 tCO₂e/t_{produto}, cloreto de vinila, 0,271 tCO₂e/t_{produto}, óxido de eteno 0,000 tCO₂e/t_{produto}. Os demais produtos componentes CR não tiveram alteração em seus FE no cenário proposto.
- (2) Gás natural: 0,0558 tCO₂/GJ, óleo diesel: 0,0733 tCO₂/GJ, óleo combustível: 0,0766 tCO₂/GJ, GLP: 0,0624 tCO₂/GJ, querosene: 0,0708 tCO₂/GJ, gás de refinaria: 0,0661 tCO₂/GJ, coque de petróleo: 0,0998 tCO₂/GJ.
- (3) O FE para eletricidade foi o 0,5884 tCO₂/MWh baseado em (BRASIL 2014).
- (4) O potencial de aquecimento global (*Global Warm Potencial – GWP*) dos GEE foram empregados conforme apresentado pelo IPCC (2000b) onde, para um horizonte de 100 anos, o GWP do CO₂ é de 1 e o do N₂O é de 310.

Custos de investimento e operação

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

A diferença do investimento entre o CR e o CBC é o da instalação de um sistema para recuperação de H₂ do gás de purga da síntese de amônia.

Em relação à tecnologia associada à produção de ácido nítrico, o catalisador é utilizado para converter o N₂O em CO₂.

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

Tabela 6 – CAPEX das tecnologias de baixo carbono para processos

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

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

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

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

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

Emissões evitadas por cada medida ou tecnologia

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

A partir da análise, conclui-se que é possível reduzir 16% (31,3 milhões de tCO₂) das emissões totais do CR no período de 2014–2030. A medida que mostrou o maior potencial foi a cogeração a partir de GN, com 52,6% (16,4 milhões de tCO₂) de participação no CBC, seguida pelos motores mais eficientes (18,4%) e substituição do GN por biomassa (15,3%). A participação destas tecnologias fica visível no Gráfico 2.

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

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

Fonte: Fanti et al. (2017).

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

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

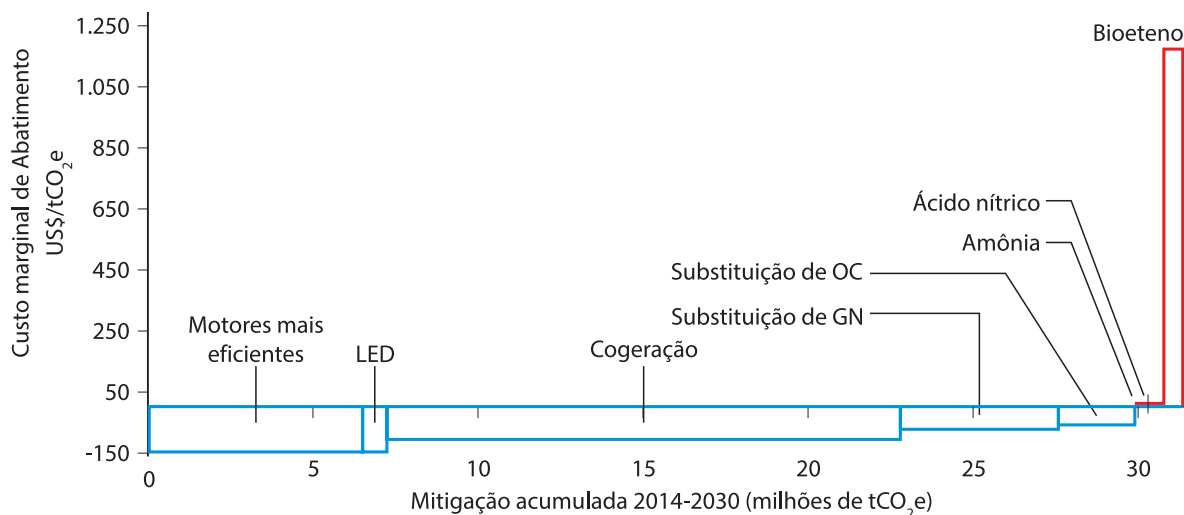
Setor	Tecnologia	MAC (1)	BECP (2)	Emissões evitadas
		(US\$/tCO ₂)		(MtCO ₂)
Energia elétrica	Motores mais eficientes	-150	-224	5,77
Energia elétrica	LED	-145	-224	0,57
Energia elétrica	Cogeração	-111	-250	16,46
Energia térmica	Substituição de GN por lenha de reflorestamento	-75	-131	4,79
Energia térmica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

Fonte: Fanti et al. (2017).

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

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

Gráfico 1 – Curva de custo marginal de abatimento



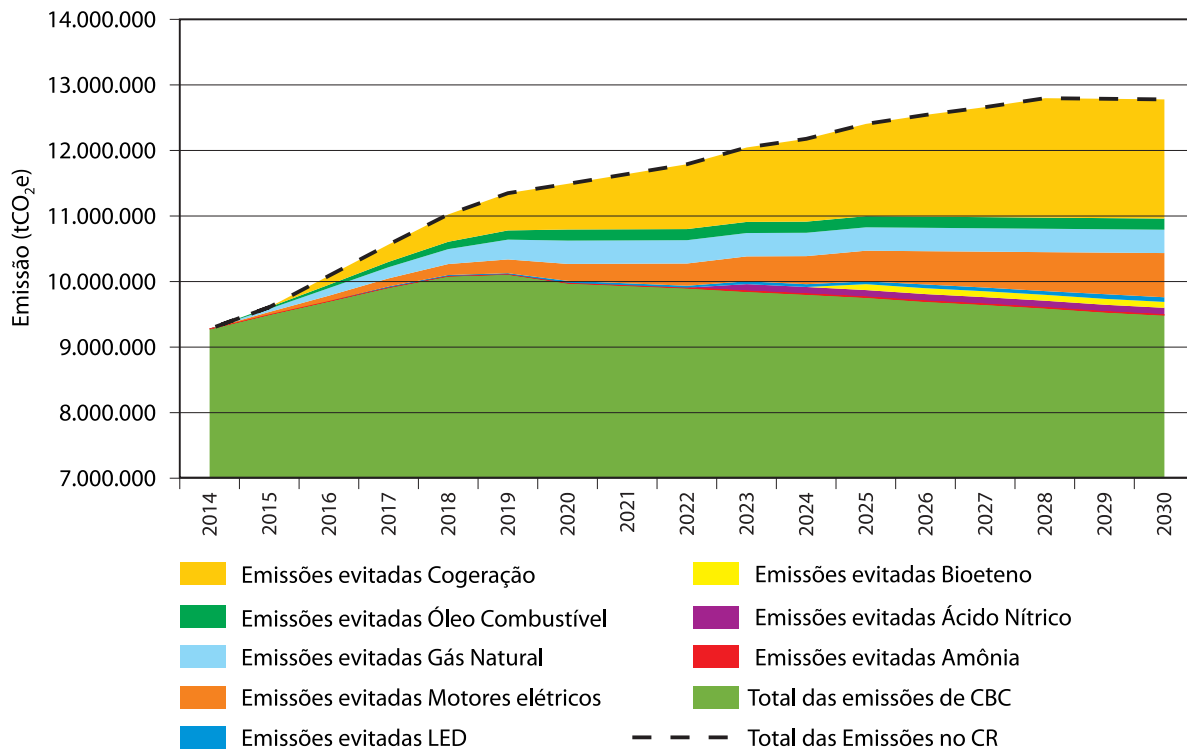
Fonte: Fanti et al. (2017).

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

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

Fonte: Elaboração própria (2017).

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



CONCLUSÃO

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

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

De um modo geral, em relação à energia, o reaproveitamento de calor em reações químicas, minimiza a queima de combustíveis para a produção de vapor e conseqüentemente a emissão de CO₂. Deve-se considerar também que diversos processos na indústria química necessitam de calor para seu desenvolvimento e, uma forma de minimizar a utilização de fontes externas para a geração de energia e conseqüente emissão de CO₂, é a criação de programas internos de eficiência energética, abordando aspectos, tais como a avaliação de eficiência em isolamento térmico.

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

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

do estudo (2014) eram fundamentais, contudo 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. Cabe ressaltar que o enfoque deste projeto foi analisar tecnologias para a mitigação de emissões de GEE, com ênfase no dióxido de carbono e óxido nitroso, e, portanto, a emissão de outros poluentes deve ser analisada de acordo com a legislação vigente, sendo necessária por vezes a regulamentação de procedimentos específicos.

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

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

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

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

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

REFERÊNCIAS

- ABDI. MDIC. FGV. **Subsídios para elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono – Caderno 4: Nota Técnica Química**. 2012. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br/Estudo/Caderno%2004%20-%20Nota%20T%C3%A9cnica%20Qu%C3%ADmica.pdf>>. Acesso em: outubro de 2015.
- ABIQUIM. **Anuário da indústria química brasileira**. São Paulo: ABIQUIM, 2013a.
- BAIN & COMPANY, GÁS ENERGY. **Potencial de diversificação da indústria química brasileira**. Relatório 6: matéria-prima petroquímica. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_FEPprospec0311_Quimicos_Petroquimica.pdf>. Acesso: dez. 2014.
- CETESB. **1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/01/Primeiro_Inventario_GEE_WEB_Segunda-Edicao-v1.pdf>. Acesso em outubro de 2015.
- CETESB. **Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008: Relatório de Referência**. São Paulo, 2013. (1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo). Disponível em: <http://inventariogeesp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/primeiro_inventario_setor_industria_web1.pdf>. Acesso em: set. 2015.
- CIESP. **Fertilizantes: Petrobrás amplia atuação**. Cubatão, 2014. Disponível em: <<http://www.ciesp.com.br/cubatao/noticias/fertilizantes-petrobras-amplia-atuacao/>>. Acesso em: 25 janeiro 2015.
- ESMAP. **World bank group. Modeling Tools and E-Learning: MACTool**. Disponível em: <<http://www.esmap.org/MACTool>>. 2016. Acesso em: 24 abr 2016.
- FANTI, O. D.; SOUZA, J. F. T. de. **Projeto BR-T1262: Apoio ao desenvolvimento de estudos de mitigação para o Estado de São Paulo – setor da indústria química (emissões de GEE oriundas de processos de transformação não energéticos)**. Produto 6 – Relatório Final. São Paulo, 2016. Documento não editado.
- FAY, M.; HALLEGATTE, S.; VOGT-SCHILB, A.; ROZENBERG, J.; NARLOCH, U.; KERR, T. **Decarbonizing Development. Three Steps to a Zero-Carbon Future**. Climate Change and Development. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0479-3. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO. Washington, 2015. 182p.
- GOUVELLO, C. de et al. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Washington, DC: Banco Mundial, 2010. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_BM_Principal_Portugues_SumarioExecutivo.pdf>. Acesso em: out.2015.

IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume. 3: Industrial Processes and Product Use. 2006. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/3_Volume3/V3_3_Ch3_Chemical_Industry.pdf>. Acesso em: jul. 2015.

IPCC. **Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Austrália, 1996. 588p.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Agenda 2030:



Apoio técnico:



Realização:

