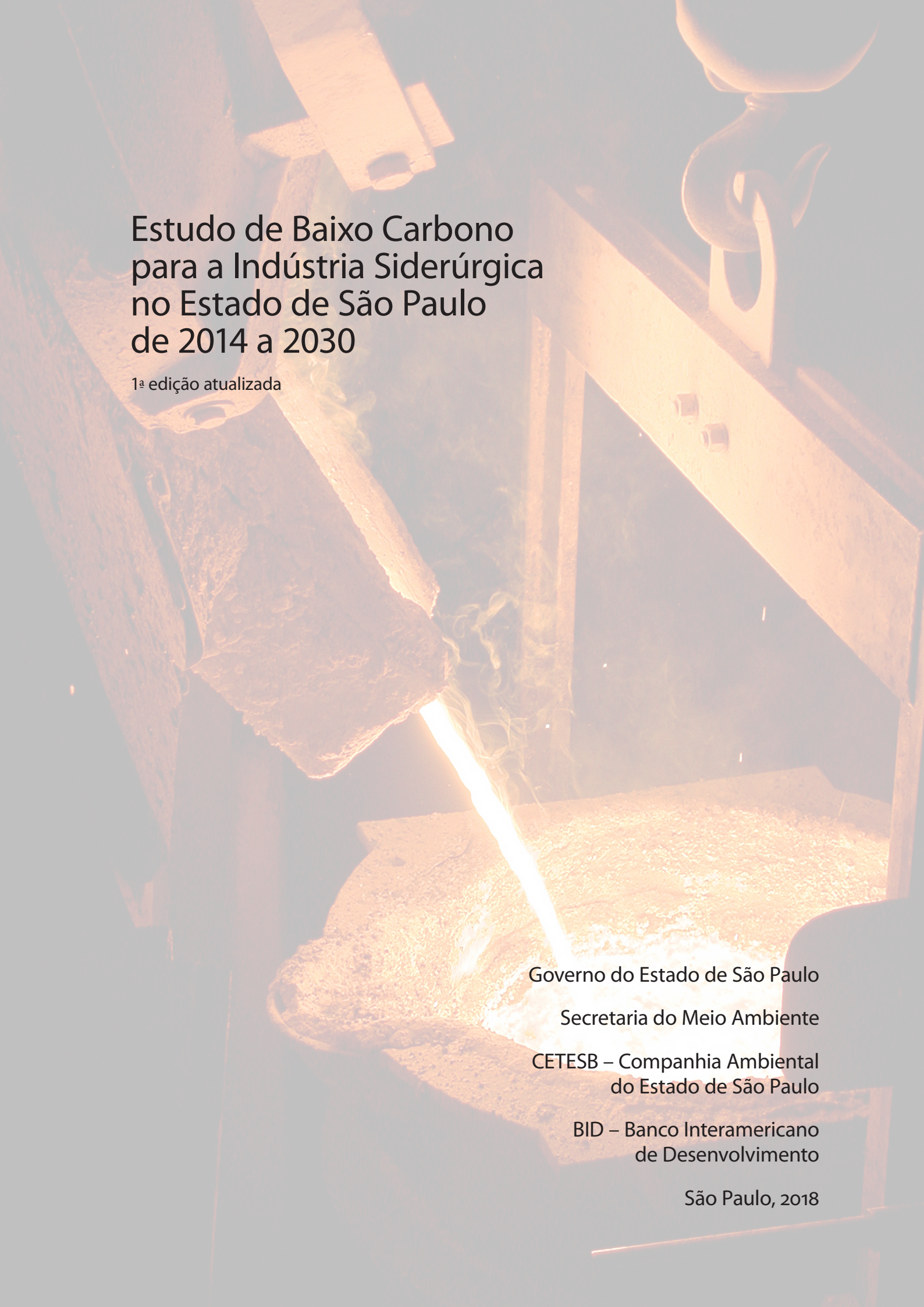


Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

1ª edição atualizada



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 Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030

1ª edição atualizada

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 siderúrgica no estado de São Paulo de 2014 a 2030 [recurso eletrônico] / CETESB, BID ; Autores José Milton de Freitas, René Vogelaar, Renato Vogelaar ; 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 (108 p.) : il. color., PDF ; 9,3 MB.

Publicado no suporte papel em 2017.

Publicado também em pen-drive.

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

ISBN 978-85-9467-027-4

1. Aquecimento global 2. Baixo carbono 3. Efeito estufa – gases - cenário 4. Mudanças climáticas 5. Siderurgia – indústria 6. Tecnologia química 7. São Paulo (Est.) I. Freitas, José Milton de, autor. II. Vogelaar, René, autor. III. Vogelaar, Renato, autor. IV. BID. V. Título.

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

CDU (2. ed. Port.) 504.7:669.1 (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

Autores

José Milton de Freitas

René Vogelaar

Renato Vogelaar

Coordenação Executiva

Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer

Coordenação Técnica

Sérgio Almeida Pacca

Assistência Técnica

Jhonathan Fernandes Torres de Souza

Revisão e Reestruturação

Bruna Patrícia de Oliveira

Colaboradores

Bruna Chyoshi

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

Projeto Gráfico e Diagramação

Brainstorm – Arte em Comunicação

Foto da capa

Acervo BID

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.

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).

Apresentação do Secretário

O Estado de São Paulo foi pioneiro na instituição da Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), que começou a ser discutida no âmbito da Secretaria do Meio Ambiente em 1995 e adotada por meio da Lei Estadual nº 13.798, de 9 de novembro de 2009. A PEMC confere atribuições aos diversos órgãos do Estado no sentido de apoiar e facilitar a realização de estudos, pesquisas e ações nos temas relacionados às Mudanças Climáticas, para fins de promover medidas de prevenção, adaptação e mitigação. Considerando este contexto, a CETESB realizou o “Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030”, apresentando contribuições ao Estado de São Paulo para subsidiar os segmentos envolvidos na articulação de estratégias de médio e longo prazos para harmonização com a PEMC, sem comprometer as metas de crescimento do setor.

O estudo compreendeu outros setores industriais, sendo fundamental para a construção de políticas públicas que irão orientar decisões em direção a uma economia competitiva, sustentável e de baixo carbono. Assim, o Estado de São Paulo apresenta este trabalho como parte do compromisso assumido para contribuir com os esforços climáticos nacionais e internacionais.

Eduardo Trani

Secretário do Meio Ambiente do Estado de São Paulo

Apresentação do Presidente

O “Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030” é um dos produtos do “Projeto de Desenvolvimento de Estudos de Mitigação de Gases de Efeito Estufa (GEE) para o Estado de São Paulo”, desenvolvido pela Divisão de Mudanças Climáticas, da CETESB — Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, com a finalidade de subsidiar a promoção de uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

Além do setor siderúrgico, o projeto contemplou também os setores de química, cal e cimento, os mais significativos do Estado em termos de emissões de GEE.

Realizado com apoio de Cooperação Técnica do Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), o presente estudo foi elaborado por especialistas, com vasta experiência e conhecimento na indústria siderúrgica.

Como resultado, foram apresentadas alternativas de tecnologias com potencial de redução de emissão de GEE no processo siderúrgico, atuando principalmente na melhoria da eficiência energética e na captura e reaproveitamento do CO₂. Com base neste levantamento, foi possível estimar os possíveis investimentos necessários para a implantação das ações de mitigação.

Esta publicação disponibiliza informações atualizadas e de qualidade, com o mérito de, ao mesmo tempo, mostrar os esforços do Governo do Estado frente aos desafios das mudanças climáticas e de propiciar o diálogo técnico com o setor produtivo em busca do desenvolvimento competitivo e com menor potencial emissor de GEE.

Carlos Roberto dos Santos
Diretor Presidente da CETESB

Apresentação do Representante do BID no Brasil

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

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

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

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

Hugo Florez Timoran
Representante do BID no Brasil

Agradecimentos

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

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.

Agradecemos ao Dr. Nelson Bugalho, vice-presidente da CETESB na época do início deste trabalho pela facilitação da cooperação junto ao BID e pelo apoio e entusiasmo durante todo o projeto.

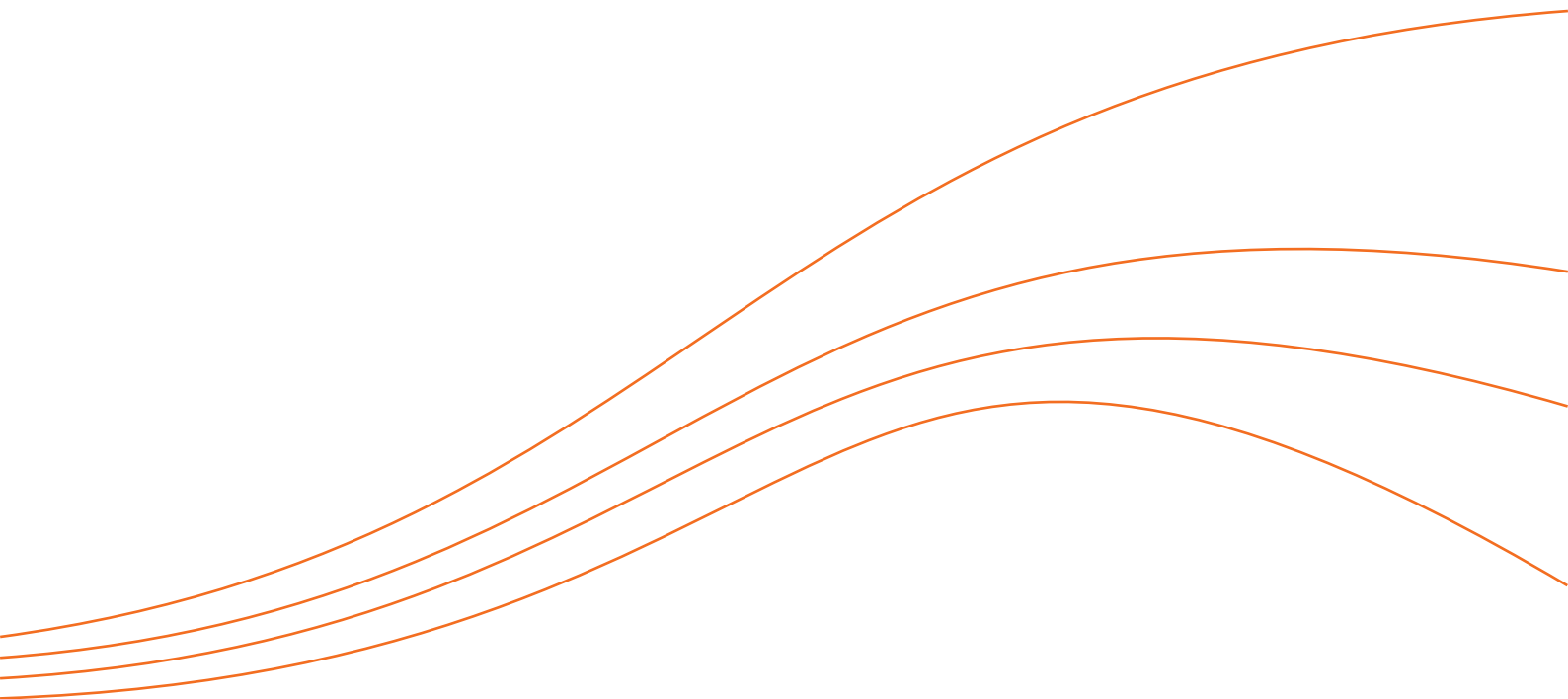
Destacamos e agradecemos as contribuições dos colegas da CETESB: Fátima A. Carrara, Carlos Lacava, Maria Cristina Poli, Margot Terada, Lígia Espíndola, Milton Norio Sogabe, Volf Steinbaun (*in memoriam*), Eduardo Serpa e Maria Heloísa Pádua Lima de Assumpção.

Aos colaboradores que enviaram suas contribuições durante o período da consulta pública, nossa gratidão e reconhecimento, pois tornaram o documento melhor: Anicia Pio (FIESP), Ariadne Bernardino Pereira (GERDAU AÇOS ESPECIAIS BRASIL), Cenira de Moura Nunes (GERDAU AÇOS BRASIL), Felipe Marinho Maciel (ARCELORMITTAL BRASIL), Guilherme Corrêa Abreu (ARCELORMITTAL BRASIL), Jorge Luis Rocco (FIESP), Lucila Caselato (INSTITUTO AÇO BRASIL), Mariana Berteline de França (GERDAU AÇOS LONGOS BRASIL), Mônica Silveira Costa Cheng (USIMINAS), Mônica Varejão (INSTITUTO AÇO BRASIL), Natasha Nogueira Britschka (FIESP), Priscila Freire Rocha (FIESP).

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



Sumário executivo



O presente sumário foi baseado no “Estudo de baixo carbono para a indústria siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030”, o qual construiu cenários de referência e de baixo carbono considerando emissões de GEE de processo e do consumo de energia e a avaliação de alternativas de mitigação. No estudo foram apresentadas 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, 2000a).

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

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

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

O segmento da indústria metalúrgica no Estado de São Paulo, em 2005, que englobou o setor de produção siderúrgica e de alumínio, contribuiu com 9.467 GgCO₂e, correspondente a 34,2% das emissões de GEE no Setor de Processos Industriais no inventário estadual (CETESB, 2013).

O processo de produção de ferro-gusa é a etapa que mais consome energia em usinas integradas, em grande medida devido ao uso do coque como agente redutor na transformação do minério de ferro em ferro-gusa¹. As usinas semi-integradas não têm a etapa de redução, consequentemente, consomem carbono para fins de ajustes metalúrgicos energéticos (IABr, 2012). Na siderurgia o carbono está presente nos combustíveis utilizados para geração de energia, que no caso de usinas integradas, desempenha seu papel como agente redutor do minério de ferro. Posteriormente uma fração deste carbono é

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

incorporada aos produtos, a outra parte após a combustão é emitida na forma de CO₂.

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

ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

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

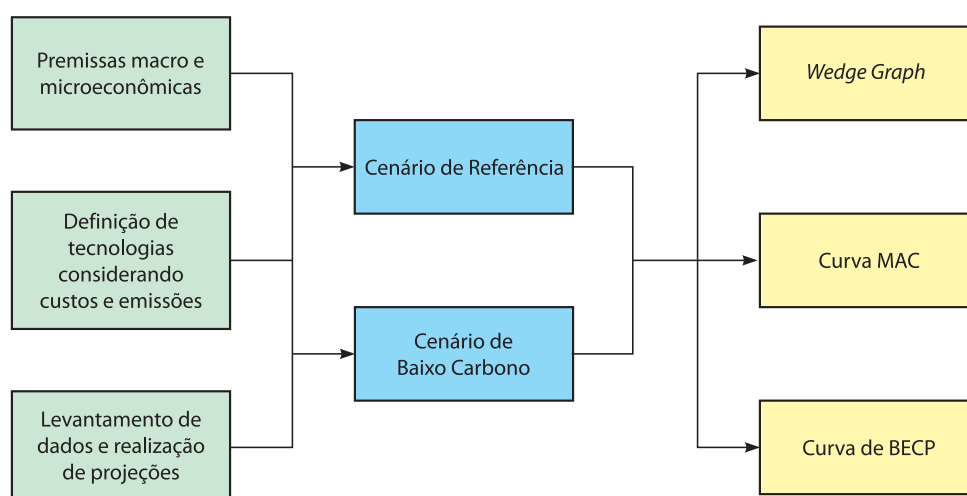
As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresentado nos guias do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) no *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Greenhouse Gas Inventories Programme, Energy, Volume 2*

e o *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006, 2000b). As estimativas consideraram os dados de atividade, como produção, combustível, energia elétrica consumida e os respectivos fatores de emissão.

Para a construção das curvas de MAC e BECP² empregou-se a MACTool. De acordo com o *Energy Sector Management Assistance Program* (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada para testar as possibilidades setoriais e as respectivas respostas aos preços (ESMAP, 2016; FAY, *et al.*, 2015).

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

Figura 1 – Etapas do desenvolvimento do estudo



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

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

RESULTADOS

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

A evolução da produção siderúrgica no Estado de São Paulo

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

Em relação ao CR, embora tenha sido desligado o alto-forno localizado na baixada santista em 2015³, considerou-se no desenvolvimento do estudo a manutenção do funcionamento em todo o período. Ressalte-se que o ano de referência do estudo é 2014. No Estudo de Baixo Carbono para a Indústria Siderúrgica no Estado de São Paulo de 2014 a 2030 foi apresentada também, como um cenário exploratório⁴, a hipótese, que considera o desligamento do forno no período de 2016 a 2021.

Até o final de 2015, o estado possuía 6 unidades de produção de aço pertencentes a 4

grupos econômicos. Destas unidades instaladas, somente uma unidade produzia aço bruto através da redução do minério de ferro (alto-forno). As outras 5 unidades instaladas no estado produziam aço a partir de gusa e sucata em fornos elétricos. No final de 2015 mais uma unidade com forno elétrico entrou em operação. Trata-se de uma empresa com uma unidade de produção na cidade de Pindamonhangaba, no Estado de São Paulo. Na Tabela 1 são apresentados os dados de produção de aço, projetados para São Paulo até o ano de 2030.

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

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

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

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

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

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

- O ano base do estudo é 2014, portanto para efeito do cenário estudado, foi considerada a possibilidade de emissão da USIMINAS no período de desenvolvimento do estudo, que é de 2014 a 2030.
- Cenários exploratórios: exploram possíveis futuros. Eles enfatizam direções e não especificam um final desejado predeterminado para o desenvolvimento (DIXON, 2011).

No cenário de referência, estima-se que a produção aumentará de 4.800 10³ t/ano em 2014⁵ para 7.835 10³ t/ano em 2030, representando um aumento de 63% de 2030 em relação a 2014, ou seja, uma média aproximada de 3,06% ao ano. Comparando o mesmo período, a produção em usina semi-integrada, observa-se um crescimento de 103% e, para usinas integradas, um crescimento de 40%⁶.

A evolução do consumo de energia

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

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

Tabela 2 – Consumo de energia no CR

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

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

Quadro 1 – Tecnologias empregadas no CBC

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

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

- O início do período de análise é 2014 e portanto todas as premissas consideradas no cenário de referência estão baseadas naquele ano.
- O estudo é de caráter exploratório e o setor poderá construir outros cenários.

dos Gases no Topo do Alto Forno (*Top Gas Recycling Blast Furnace* TGRBF MDEA), nesta tecnologia a absorção do CO₂ se dá por absorção química através do solvente Metildietanolamina Piperazina (MDEA), o Consteel que considera o pré-aquecimento da matéria prima e o transformador de corrente contínua (CC). As medidas que apresentam relação com energia são o Constell e o CC. Na Tabela 3 são

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

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

Tabela 3 – Consumo de energia no CBC

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

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

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

A evolução das emissões do cenário de referência e baixo carbono

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

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

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

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

A Tabela 5 apresenta as estimativas de emissões para a rota integrada no CR. O processo de redução que ocorre no alto-forno é a principal fonte de CO₂. Como nas usinas integradas há cogeração de energia, as emissões relacionadas à energia elétrica são baixas.

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

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

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

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

Nota: * Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO₂/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada) 0,5884 tCO₂/MWh BRASIL (2015); gás natural 0,0561 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

Tabela 5 – Estimativa de emissão para plantas integradas no CR

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

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

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO₂/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada) 0,5884 tCO₂/MWh BRASIL (2015); gás natural 0,0561 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

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

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

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

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

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO₂/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada):0,5884 tCO₂/MWh BRASIL (2015); gás natural 0,0561 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

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

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

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

Ano	Processo	Combustível	Energia elétrica	Total
	(GgCO ₂)			
2014 R	140	561	0,6	701
2015 E	149	596	0,6	745
2016 E	149	594	0,6	744
2017 E	152	608	0,6	760
2018 E	157	626	0,7	783
2019 E	161	645	0,7	807
2020 E	205	820	0,8	1.026
2021 E	213	851	0,9	1.065
2022 E	221	883	0,9	1.105
2023 E	229	916	0,9	1.146
2024 E	238	951	0,9	1.189
2025 E	247	986	1,0	1.234
2026 E	256	1.023	1,0	1.280
2027 E	265	1.062	1,0	1.328
2028 E	274	1.097	1,1	1.373
2029 E	282	1.128	1,1	1.412
2030 E	285	1.139	1,1	1.425

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

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO₂/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada):0,5884 tCO₂/MWh BRASIL (2015); gás natural 0,0561 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

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

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

Tabela 8 – Estimativa de emissão para plantas integradas no CBC

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

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

Nota: Os fatores de emissão empregados nas estimativas foram: eletricidade (para rota integrada) 0,1355 tCO₂/MWh BRASIL (2015); eletricidade (para rota semi-integrada) 0,5884 tCO₂/MWh BRASIL (2015); gás natural 0,0561 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de coqueria 0,0447 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); gás de alto-forno 0,2600 tCO₂/GJ (USEPA, 2009); processo (rota integrada) 1,46 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006); processo (rota semi-integrada) 0,08 tCO₂/t_{aco} (MARKS et. al, 2006).

Legenda: R – Dado Real; E – Dado Estimado

Custos de investimento e operação

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

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

O CAPEX para uma planta com Sistema de Pré-Aquecimento em Rota Semi-Integrada, foi estimado em 583 milhões de dólares. A capacidade instalada de uma planta é de 1 milhão de toneladas, dessa forma, o CAPEX, considerando esta capacidade, foi de US\$ 583/t^{vergalhão}. O OPEX foi estimado em US\$ 362/t^{vergalhão}.

Tabela 9 – CAPEX e OPEX

	Tecnologia	CAPEX	OPEX
		(US\$ milhões)	
Rota integrada	Planta – CR	4.124	324 (US\$/tbq)
	Planta CBC com – TGRBF-MDEA	4.877	330 (US\$/tbq)
Rota semi-integrada	Planta – CR	576	362 (US\$/t ^{vergalhão})
	Planta CBC com pré-aquecimento – Consteel	583	362 (US\$/t ^{vergalhão})
	Planta CBC com transformador de corrente contínua (CC)	584	362 (US\$/t ^{vergalhão})

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

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

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

Emissões evitadas por cada medida nos cenários

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

O total de emissões evitadas seria de 20.141 GgCO₂, sendo que a medida de pré-aquecimento foi responsável por 3,0%, corrente contínua por 1,3% e o TGRBF-MDEA por 95,7%.

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

Tabela 10 – Emissões evitadas

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

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

Desativação do alto-forno da Usiminas

O alto-forno da planta da Usiminas localizado em Cubatão foi desativado em novembro de 2015, devido a uma retração forte de demanda de aço no mercado interno, aliado as estatísticas do World Steel Association (WSA, 2016), onde fica evidente o excesso de oferta mundial de aço. Em função destes fatores a unidade da Usiminas em Cubatão está operando somente com o setor de laminação. Há alguns indicativos sobre a reativação deste alto-forno, mas se o mesmo permanecer desativado até 2030, considerando sua capacidade máxima de 4.500 milhões de toneladas, estima-se que serão evitadas cerca de 103.850 GgCO₂ (valor que poderá ser recalculado em função da alteração da capacidade instalada).

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

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

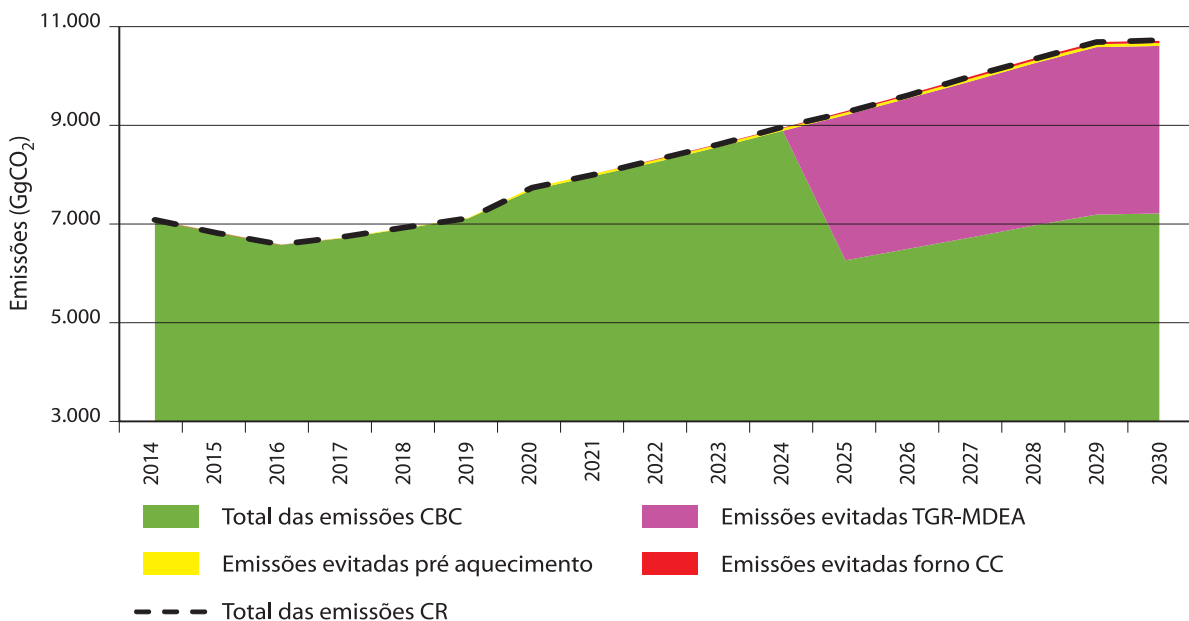
De acordo com a Tabela 11 as medidas de corrente contínua e pré-aquecimento adotadas para a rota semi-integrada proporcionariam, dentro das premissas adotadas por este estudo, um ganho econômico quando comparadas

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

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

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

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



Fonte: Elaboração própria (2017).

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

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

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

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

CONCLUSÕES

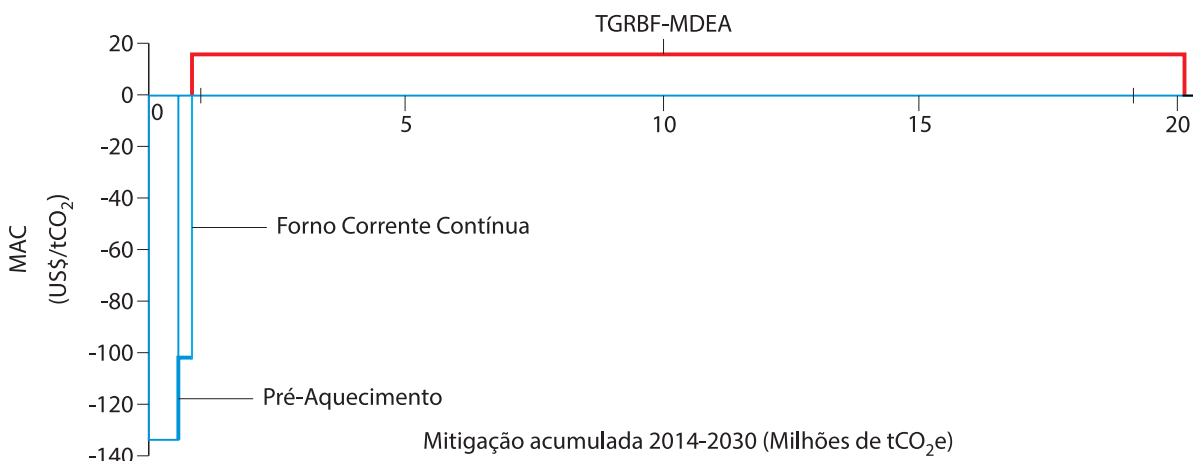
A lenta difusão de processos alternativos ao alto-forno, seja por tecnologias já consolidadas de redução direta (a gás ou carvão não-coqueificável), seja por tecnologias ainda emergentes de fusão redutora (incluindo Correx, Finex, Tecnoled, entre outros), tem sido uma tendência mundial. Alguns dos projetos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

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

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

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

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



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

No mundo, o maior problema enfrentado pela indústria do aço é o excesso de capacidade de produção da ordem de 719 milhões de toneladas, que tem pressionado, globalmente, os preços. A maior parte deste excedente de capacidade encontra-se na China, país que conta, principalmente, com subsídios governamentais⁷.

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

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

Na análise das tecnologias sugeridas para o cenário de CBC, as maiores emissões evitadas são as que estão relacionadas ao processo de redução do minério de ferro (alto-forno). A tecnologia TGRBF-MDEA no cenário normal da indústria, representa uma redução de 19 milhões de tCO₂ até 2030, ou seja, 15% das emissões do cenário de referência da indústria siderúrgica, e representando 96% das emissões evitadas no período. Os fornos da rota semi-integrada reduzem apenas 873 mil tCO₂, o que equivale a 0,7% das emissões do cenário de referência e 4% das emissões evitadas.

A partir dos resultados apresentados na curva MAC, estima-se que, para atingir o potencial total de mitigação avaliado, serão gastos US\$ 199 milhões até o ano de 2030, ressalte-se que esta estimativa, que compõe este estudo, tem um caráter exploratório. Sobre a curva BECP, conclui-se que as tecnologias na rota semi-integrada trazem um retorno acima de 15% (Benchmark-TIR), portanto são investimentos atrativos. Todavia, se considerarmos o cenário em que o alto-forno permanece desativado até o final do período, 15 anos, seriam evitados aproximadamente 104 MtCO₂. Neste cenário, a tecnologia TGRBF-MDEA apresenta valores distintos de MAC e BECP.

Ao longo do período de execução deste documento, foram encontradas limitações na coleta de dados, pois informações sobre produção e emissão da indústria siderúrgica, no ano base do estudo (2014) eram fundamentais, contudo 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.

7. Com relação a intensidade de emissões da produção da China. Hasanbeigi *et al.* (2015) propõe uma metodologia para cálculo que estima uma intensidade de emissões de 2,15 tCO₂/t de aço para o país, significativamente superior à média mundial de 1,8tCO₂/t aço. Considerando o aspecto global do mercado do aço, esse contexto exemplifica que mecanismos de proteção de mercado produtivo nacional contra o fenômeno do carbon leakage (EU, 2017) pode trazer melhores resultados mitigadores das mudanças do clima global. [Esta informação é uma contribuição da consulta pública].

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

Lista de Gráficos

Gráfico 1 – Produção mundial de aço bruto por país e região.	41
Gráfico 2 – Participação relativa da América Latina e Brasil na produção mundial de aço..	42
Gráfico 3 – Participação relativa da América Latina e Brasil na produção mundial de aço..	42
Gráfico 4 – Produção de aço bruto por empresa no ano de 2013 e participação relativa de mercado	43
Gráfico 5 – Produção nominal de aço bruto e ociosidade implícita em 2013 por estado	44
Gráfico 6 – Produção nominal de aço no Estado de São Paulo por empresa em 2013 . .	44
Gráfico 7 – Produção de aço bruto no Brasil por rota tecnológica	47
Gráfico 8 – Esquematização de uma curva MAC	57
Gráfico 9 – Projeção de produção de aço bruto no Estado de São Paulo.	65
Gráfico 10 – Consumo de energia no cenário de referência 2014–2030	80
Gráfico 11 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono	83
Gráfico 12 – Curva de custo marginal de abatimento para o setor de siderurgia	83
Gráfico 13 – Curva de <i>Break-Even Carbon Price</i> para o setor de siderurgia	84
Gráfico 14 – Comparação dos cenários de emissão com e sem desativação do alto-forno 2014–2030	86
Gráfico 15 – Perdas de energia para a Região Sudeste de 2013 a 2030.	103

Lista de Figuras

Figura 1 – Diagrama esquemático de usina integrada a coque	45
Figura 2 – Diagrama esquemático de uma usina semi-integrada	46
Figura 3 – Diagrama esquemático de produção independente de ferro gusa	46
Figura 4 – Fluxograma dos processos siderúrgicos de usina integrada a coque	48
Figura 5 – Esquema simplificado de um alto-forno mostrando os principais insumos e equipamentos	50
Figura 6 – Etapas do desenvolvimento do estudo	56
Figura 7 – Esquematização de um <i>Wedge Graph</i>	58
Figura 8 – Diagrama de um forno elétrico a arco com corrente alternada (esquerda) e com corrente contínua (direita)	76

Lista de Equações

Equação 1 – Estimativa de custos de implementação.	62
Equação 2 – Estimativa da emissão de GEE.	102
Equação 3 – Energia elétrica real gerada mediante perdas de eletricidade na rede . .	102
Equação 4 – Custo de investimento por MWh.	103
Equação 5 – Custo de investimento anualizado por MWh	104
Equação 6 – Custo de operação e manutenção por MWh	104
Equação 7 – Cálculo dos custos do combustível por MWh.	104
Equação 8 – Cálculo da porcentagem mensal referente aos impostos da eletricidade	105

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Unidades produtoras de aço no Brasil por segmento de mercado	43
Tabela 2 – Fatores de emissão para rota integrada	60
Tabela 3 – Fatores de emissão para rota semi-integrada	60
Tabela 4 – Fatores de perda de eletricidade na rede	61
Tabela 5 – Discretização dos combustíveis utilizados na rota integrada	61
Tabela 6 – Preço da eletricidade	62
Tabela 7 – Distribuição do custo de investimento para implementação da tecnologia na rota integrada	63
Tabela 8 – Capacidade instalada de aço no Estado de São Paulo em 2013	63
Tabela 9 – Expansões das plantas de aço previstas em São Paulo até 2030	64
Tabela 10 – Projeção de produção de aço bruto no Estado de São Paulo	65
Tabela 11 – Projeção do consumo de energia elétrica no cenário de referência	67
Tabela 12 – Projeção do consumo de energia térmica no cenário de referência	67
Tabela 13 – Estimativa do custo de investimento para a planta de referência: rota integrada.	68
Tabela 14 – Estimativa dos custos de investimento para a planta de referência: rota semi-integrada	69
Tabela 15 – Estimativa dos custos de operação e manutenção para a planta de referência: rota integrada.	69
Tabela 16 – Custo de operação e manutenção para a planta de referência: rota semi-integrada	70
Tabela 17 – Tecnologias de BC avaliadas	71
Tabela 18 – Projeção do consumo de energia no cenário de baixo carbono	72
Tabela 19 – Cenário exploratório de penetração discretizadas em plantas no Estado de São Paulo, no período de 2014 a 2030	73
Tabela 20 – Cenário prospectivo quanto a penetração em relação à capacidade instalada das plantas no Estado de São Paulo	73
Tabela 21 – Estimativa dos custos de investimento para uma planta com <i>Top Gas</i> <i>Recycling BlastFurnace</i> com absorção CO ₂ através de MDEA	74
Tabela 22 – Custo de operação e manutenção para uma planta com <i>Top Gas Recycling</i> <i>BlastFurnace</i> com absorção CO ₂ através de MDEA.	75

Tabela 23 – Custo de investimento para uma planta com fornos de corrente contínua .	77
Tabela 24 – Custo de investimento para uma planta com forno com pré-aquecimento e alimentação contínua	78
Tabela 25 – Consumo de GEE decorrente do uso de energia elétrica projetada entre os cenários de referência e baixo carbono na rota semi-integrada	81
Tabela 26 – Comparação das emissões projetadas de GEE decorrentes de processo entre os cenários de referência e baixo carbono na rota integrada	81
Tabela 27 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono	82
Tabela 28 – Custo marginal de abatimento e potencial de emissões evitadas	83
Tabela 29 – <i>Break-Even Carbon Price</i>	84
Tabela 30 – Fatores de emissão para rota integrada no cenário de fechamento do alto-forno instalado na Baixada Santista	85
Tabela 31 – Comparação dos cenários de emissão com e sem desativação do alto-forno 2014–2030	85
Tabela 32 – Custos associados à produção de energia elétrica (<i>Power Baseline</i>)	105
Tabela 33 – Projeção dos preços de compra e venda da eletricidade (MACTool).	106

Lista de abreviaturas e siglas

a.a.	ao ano
ABM	Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
BC	Baixo Carbono
BF	Alto-forno (<i>Blast Furnace</i>)
BFG	Gás de Alto-Forno (<i>Blast Furnace Gas</i>)
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
BOF	Forno Básico de Oxigênio (<i>Basic Oxygen Furnace</i>)
BTU	British Thermal Unit
CAPEX	Investimentos (Capital Expenditure)
CBC	Cenário de Baixo Carbono
CCS	Captura e Armazenagem de Carbono (<i>Carbon Capture and Storage</i>)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
C.G.	Chapas grossas
CR	Cenário de Referência
DRI	Direct Reduced Iron
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FE	Fator ou Fatores de Emissão
FEA	Forno Elétrico a Arco
GEE	Gás ou Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HBI	Ferro Briquetado a Quente (<i>Hot Briquetted Iron</i>)
IABr	Instituto Aço Brasil
IEA-GHG	International Energy Agency – Greenhouse Gases R&D Programme
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel for Climate Change)
LD	Linz Donawitz
MAC	Custo Marginal de Abatimento (Marginal Abatement Cost)
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDEA	Metildietanolamina
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
OBF	Alto-Forno a Oxigênio (<i>Oxygen Blast Furnace</i>)
OBF-TGRBF	Alto-Forno a Oxigênio com Turbina de Recuperação dos Gases de Topo do Alto-Forno (<i>Oxygen Blast Furnace with Top Gas Recycling Blast Furnace</i>)
OPEX	Despesas com a operação (Operational Expenses)

PEMC	Política Estadual de Mudanças Climáticas
PIB	Produto Interno Bruto
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
RH	<i>Ruhrstahl Heraeus</i>
SP	Estado de São Paulo
tbq	Tonelada de Bobina Quente
T.F.	Trabalho a Frio
T.Q.	Trabalho a Quente
TGR	Captura e Recirculação do Gás de Topo (<i>Top Gas Recycling</i>)
TGRBF	Alto-Forno com Captura e Recirculação do Gás de Topo (<i>Top Gas Recycling Blast Furnace</i>)
TIR	Taxa Interna de Retorno
ULCOS	<i>Ultra Low CO₂ Steelmaking</i>
UNFCCC	Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas (<i>United Nations Framework Convention on Climate Change Convention</i>)
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WSA	Associação Mundial do Aço (<i>World Steel Association</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

CO	monóxido de carbono
CO₂	dióxido de carbono
GWh	giga watt-hora
ft³	pés cúbicos
kWh	quilo watt-hora
mm	milímetro
MWh	mega watt-hora
Mt	mega tonelada
P	fósforo
ppm	partes por milhão
S	enxofre
Si	silício
US\$	dólares

SUMÁRIO

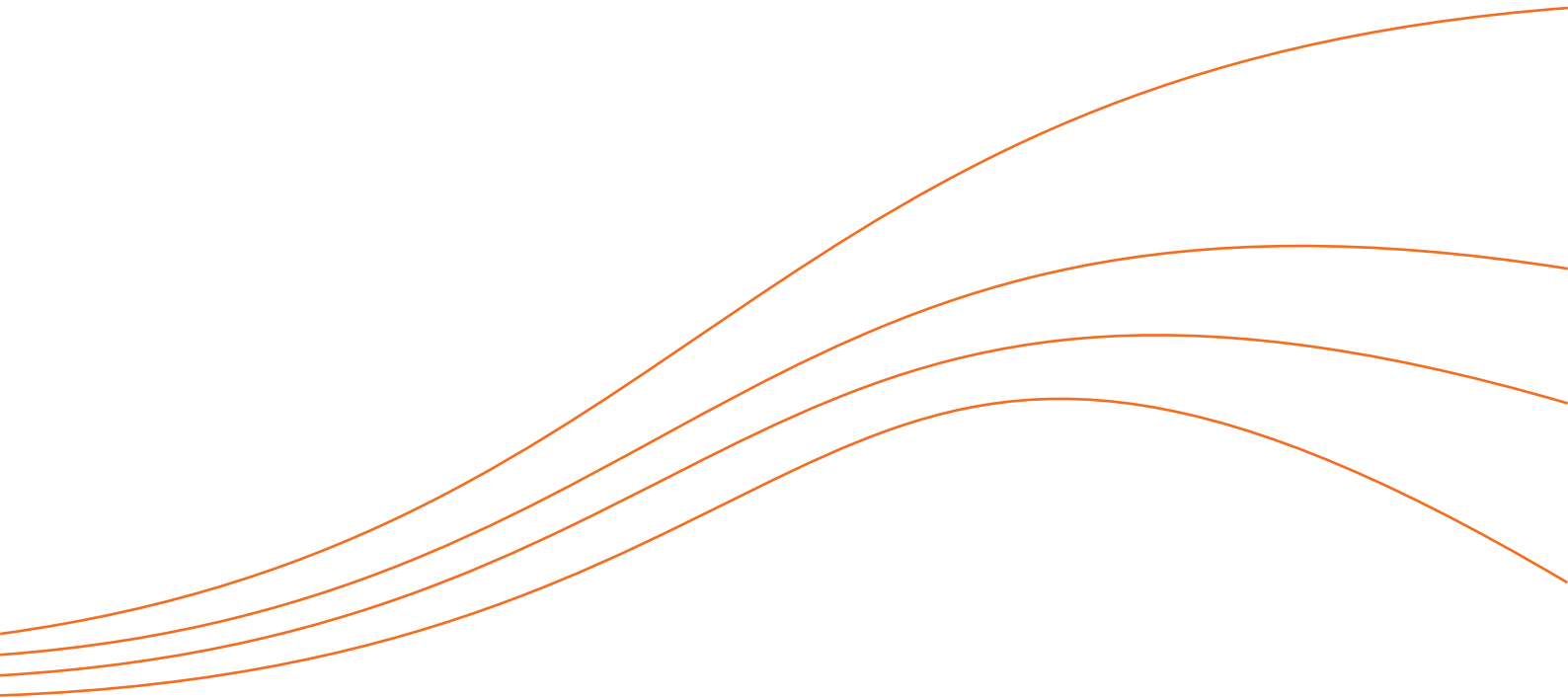
1	INTRODUÇÃO	39
1.1	A indústria siderúrgica	41
1.1.1	Produção de aço: Brasil, usos, aplicações e perfil energético	41
1.1.2	Produção de aço no Estado de São Paulo	44
1.2	Processos de produção de aço	45
1.2.1	Descrição sucinta dos principais processos e fluxos em uma usina integrada	47
1.2.2	Descrição sucinta do processo em uma usina semi-integrada	52
1.3	Emissões de gases de efeito estufa no setor do aço	54
2	MÉTODOS	55
2.1	Etapas de desenvolvimento do estudo	56
2.2	Estimativas de emissões	56
2.3	Curva de custo marginal de abatimento de emissões de carbono	57
2.4	Preço de equilíbrio de carbono (Break-Even Carbon Price)	58
2.5	Gráfico de cunhas de redução (Wedge Graph)	58
3	DADOS	59
3.1	Dados gerais	60
3.1.1	Fatores de emissão	60
3.1.2	Preço da energia	62
3.1.3	Custo de implantação das tecnologias	62
3.1.4	Taxa de desconto	62
3.1.5	Taxa de atratividade (Benchmark-TIR)	63
3.1.6	Taxa de câmbio	63
3.1.7	Produção de aço	63

3.1.8	Cenário de desativação temporária do alto-forno da USIMINAS . . .	64
3.2	Cenário de referência.	66
3.2.1	Tecnologias empregadas no cenário de referência	66
3.2.2	Consumo de energia elétrica no cenário de referência	66
3.2.3	Consumo de energia térmica cenário de referência	67
3.2.4	Custos de investimento.	67
3.2.5	Custos de operação – Forno Azbe	68
3.3	Cenário de baixo carbono.	69
3.3.1	Tecnologias empregadas no cenário de baixo carbono	70
3.3.2	Consumo de energia elétrica no cenário de baixo carbono	71
3.3.3	Consumo de energia térmica no cenário de baixo carbono	72
3.3.4	Cenário de penetração das tecnologias	72
3.3.5	Tecnologia de baixo carbono – Top Gas Recycling BlastFurnace (TGRBF)	72
3.3.6	Tecnologia de baixo carbono – Forno elétrico a arco com corrente contínua	75
3.3.7	Tecnologia de baixo carbono – Sistema de pré-aquecimento de sucata com alimentação contínua do forno a arco elétrico (Sistema Consteel)	77
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1	Comparação dos cenários de referência e de baixo carbono	80
4.1.1	Consumo energético	80
4.1.2	Emissões pelo consumo de energia elétrica	81
4.1.3	Emissões geradas pelo processo na rota integrada	81
4.2	Emissões evitadas em gráfico de cunha (<i>Wedge Graph</i>).	82
4.3	Curva de custo marginal de abatimento (MAC).	82
4.4	Preço de equilíbrio de carbono (<i>Break-Even Carbon Price</i>).	84
4.5	Cenário de desligamento do alto-forno.	84

4.6	Recomendações para políticas de meio ambiente.	86
5	CONCLUSÃO.	89
6	REFERÊNCIAS	93
	APÊNDICE - PREMISSAS	101



Introdução



O Brasil instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei 12.187 de 2009 (BRASIL, 2009), que define o compromisso nacional voluntário de adoção de ações de mitigação com vistas a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020. Segundo o Decreto 7.390 de 2010 (BRASIL, 2010), que regulamenta a PNMC, as emissões de GEE projetadas para 2020 foram estimadas em 3,2 Giga toneladas de carbono equivalente (GtCO_2e). Desta forma, a redução correspondente aos percentuais estabelecidos encontra-se entre 1,2 GtCO_2e e 1,3 GtCO_2e , respectivamente, para o ano meta em questão. Em 2015, durante a vigésima primeira Conferência das Partes (COP 21) da Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas (UNFCCC), foi assinado o Acordo de Paris. O Acordo, já em vigor, estabeleceu que cada país publicasse no site da UNFCCC a sua contribuição para a redução das emissões de GEE, ou seja, a apresentação de uma meta nacional voluntária (NDC – *Nationally Determined Contribution*). Em sua NDC, o governo brasileiro se comprometeu em reduzir 37% de suas emissões até 2025, tendo como base o ano de 2005, e uma meta adicional de 43% para o ano de 2030 (BRASIL, 2015). Estes valores representam respectivamente uma redução anual de 0,777 GtCO_2e e 0,903 GtCO_2e .

Com o objetivo de acompanhar o cumprimento do compromisso nacional para a redução das emissões até o ano de 2020, foi estabelecido pelo Decreto 7.390 de 2010 (BRASIL, 2010), que estabelece que serão publicadas, a partir de 2012, estimativas anuais de emissões de GEE no Brasil em formato apropriado para facilitar o entendimento, por parte dos segmentos interessados da sociedade, de cada um dos setores e subsetores inventariados. A responsabilidade da elaboração dessas estimativas, bem como do

aprimoramento da metodologia de cálculo da projeção de emissões, é do grupo de trabalho coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

O Estado de São Paulo, por meio da Lei Estadual 13.798 de 2009 (SÃO PAULO, 2009), instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC) cuja regulamentação parcial se deu por meio do Decreto 55.947 de 2010 (SÃO PAULO, 2010). Em 2011 foi publicado o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Este estudo mostrou que as emissões do estado, em decorrência das atividades desenvolvidas, se concentram no Setor de Energia, com 57,3% da emissão, incluindo o uso de energia pelas indústrias. O Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos contribui com 14,7%.

Neste contexto, o subsetor de produção metalúrgica no estado, em 2005 emitiu 9.175 GgCO_2/ano (ou 9.467 $\text{GgCO}_2\text{e}/\text{ano}$) englobando as emissões da produção siderúrgica e da produção do alumínio, contribuindo com 34,2% das emissões de GEE no Setor de Processos Industriais (CETESB, 2013).

O objetivo deste estudo foi avaliar os possíveis 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 cenário de baixo carbono (CBC), considerando emissões de GEE de processo e de consumo de energia.

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 proporcionadas ao longo do período analisado por cada opção tecnológica foram consolidadas em um gráfico de cunha (*Wedge Graph*).

1.1 A INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

Nesta seção é fornecido um panorama da indústria e do mercado de siderurgia no mundo, no Brasil e em São Paulo, incluindo o detalhamento de suas etapas de produção e das emissões históricas relacionadas.

1.1.1 Produção de aço: Brasil, usos, aplicações e perfil energético

A produção mundial de aço bruto atingiu um novo recorde em 2013, apoiada por forte desempenho na China e em outros países asiáticos que minimizou contrações na Europa e Estados Unidos. A produção global de aço bruto subiu 3,5% em 2013, o que gerou um volume de mais de 1,64 bilhão de toneladas, com a maior parte deste crescimento sendo observado na Ásia (WSA, 2013).

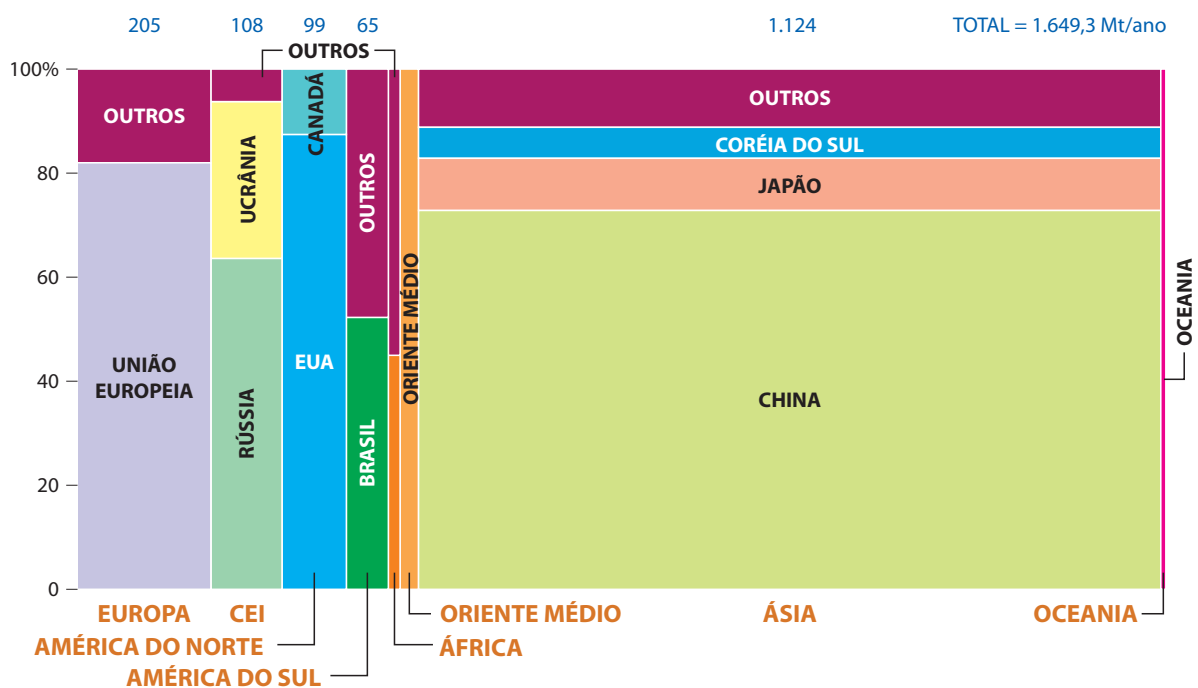
A Ásia como um todo teve crescimento de 6% na produção de aço bruto em 2013 e a China voltou a confirmar o título de maior produtor

do mundo, com um salto de 7,5%, o que representou um total de 821 milhões de toneladas. O Japão foi o segundo maior produtor de aço, com um aumento de 3,1%, com um volume total de 110,5 milhões de toneladas no ano passado. O resultado marca o primeiro crescimento na produção japonesa de aço em três anos desde 2012.

Segundo a *World Steel Association* (WSA), entidade que representa 85% da produção mundial de aço, o nível de utilização da capacidade nos 65 países acompanhados foi de 74,2% em dezembro de 2013, avançando sobre os 72% registrados no ano anterior (WSA, 2013). O Gráfico 1 apresenta o mercado mundial de aço, com a produção por país e por região.

O Brasil terminou 2013 como o nono maior produtor de aço do mundo, com volume de 34,2 milhões de toneladas produzidas. No ranking mundial, o país ficou à frente da Ucrânia, com produção de 32,8 milhões de toneladas, e pouco atrás da Turquia, que produziu 34,7 milhões de toneladas (WSA, 2013).

Gráfico 1 – Produção mundial de aço bruto por país e região



Fonte: WSA (2013).

Mesmo assim, a participação do Brasil no volume produtivo corresponde só a 2,1% do total produzido mundialmente conforme o Gráfico 2 (WSA, 2013).

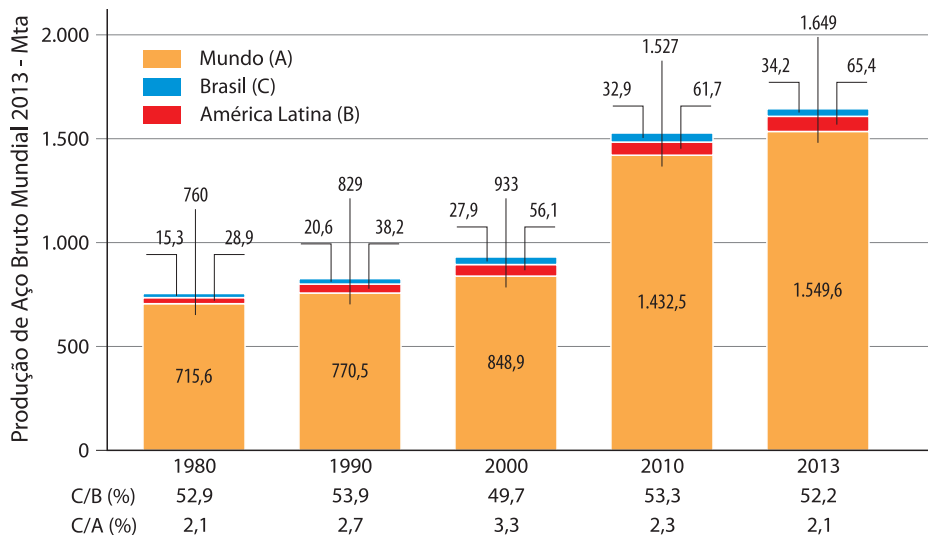
Apesar da baixa representatividade global, como se observa no Gráfico 3, o Brasil é o maior produtor na América Latina, com 52,2% da produção total, seguido pelo México (27,8%) e Argentina (7,9%). O Gráfico 3 informa o *market share* dos países produtores de aço na América Latina em 2013.

O parque industrial brasileiro é composto de 27 usinas, pertencentes a nove grupos empresariais, e 93,6% da produção é centralizada na Região Sudeste.

Os volumes de produção no ano de 2013 por grupo econômico são apresentados no Gráfico 4. Observa-se que 4 grupos econômicos foram responsáveis por 70% da produção de aço bruto no ano de 2013.

Os aços são classificados em semiacabados ou acabados (laminados). Os semiacabados

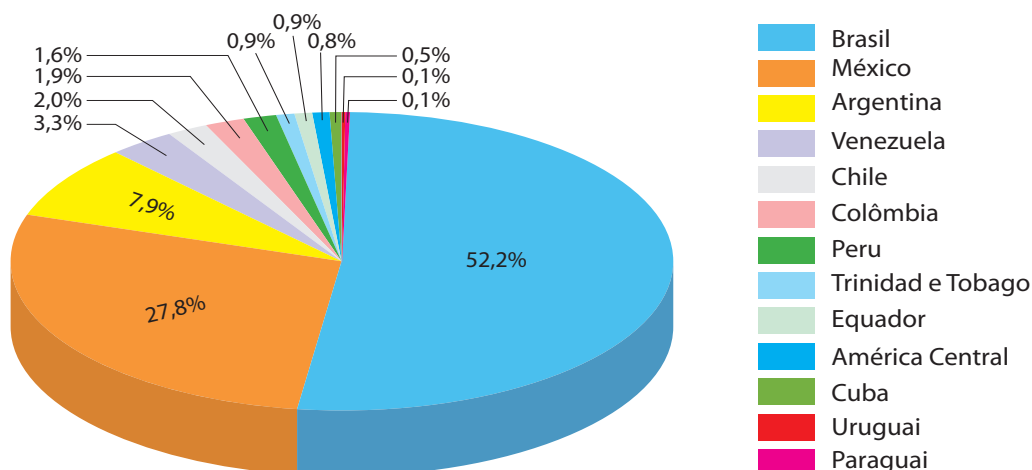
Gráfico 2 – Participação relativa da América Latina e Brasil na produção mundial de aço



Fonte: WSA (2013) e IABr (2013).

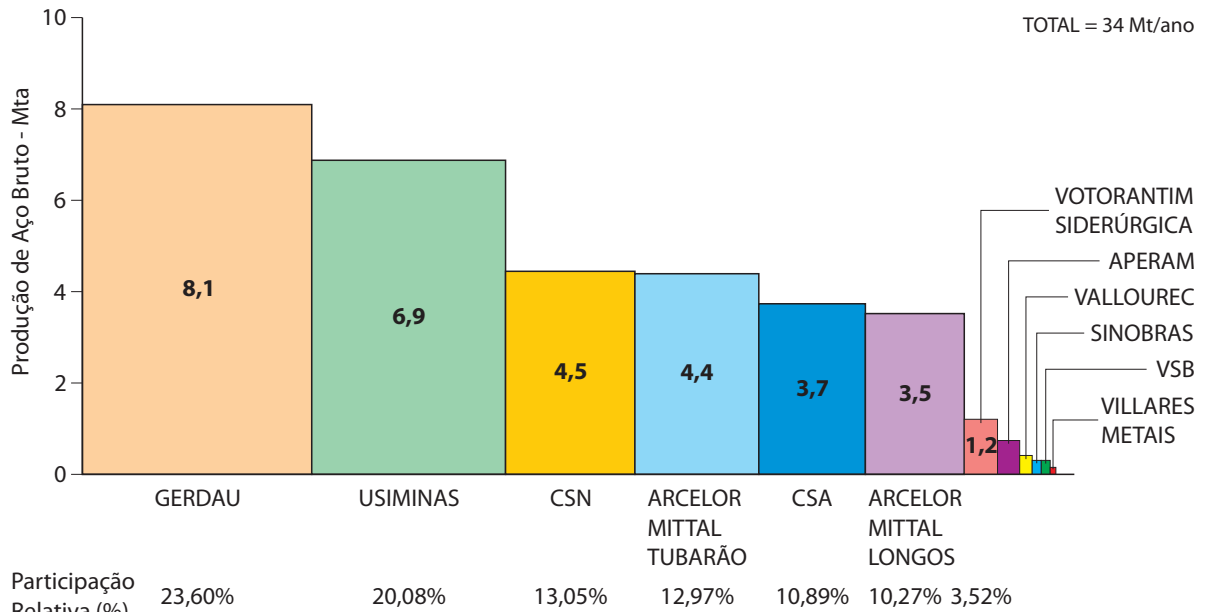
Nota: "C/A" e "C/B" representam a produção do Brasil em relação à produção mundial e em relação à América Latina, respectivamente.

Gráfico 3 – Participação relativa da América Latina e Brasil na produção mundial de aço



Fonte: WSA (2013) e IABr (2013).

Gráfico 4 – Produção de aço bruto por empresa no ano de 2013 e participação relativa de mercado



Fonte: IABr (2014).

(placas, blocos e tarugos) são consumidos diretamente pelas empresas siderúrgicas para produzir os laminados e são demandados, em menor intensidade, por fabricantes inseridos na cadeia metal-mecânica (DE PAULA, 2012).

Os laminados são utilizados diretamente por consumidores finais, nos mais diferentes usos e se dividem em quatro segmentos principais: laminados planos ao carbono, laminados

planos especiais/ligados, laminados longos ao carbono e laminados especiais/ligados. Os laminados longos, de acordo com sua denominação, se diferenciam por sua conformação física, com um acentuado predomínio da dimensão comprimento sobre as demais, como largura e espessura (PINHO, 1993 apud DE PAULA, 2012). O tipo de produto produzido por cada grupo econômico é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Unidades produtoras de aço no Brasil por segmento de mercado

	Planos especiais	Planos carbono	Longos carbono	Longos especiais	Tubos sem costura
Aperam					
CSN					
USIMINAS					
ArcelorMittal					
Votorantim					
Sinobras					
Gerdau					
Cisam					
Villares Metal					
V&M do Brasil					

Fonte: De Paula (2012).

Atual

Futuro

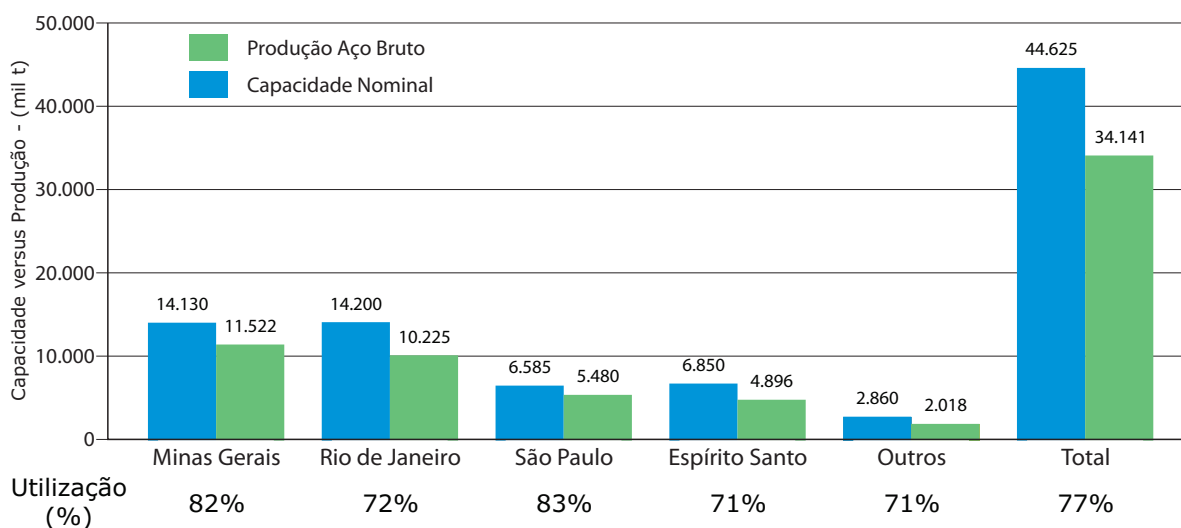
1.1.2 Produção de aço no Estado de São Paulo

A capacidade nominal instalada por estado *versus* a produção realizada no ano de 2013 pode ser vista no Gráfico 5, que também apresenta o grau de utilização da capacidade instalada por estado. No cômputo geral, a indústria

siderúrgica teve uma ociosidade de 23% no ano de 2013.

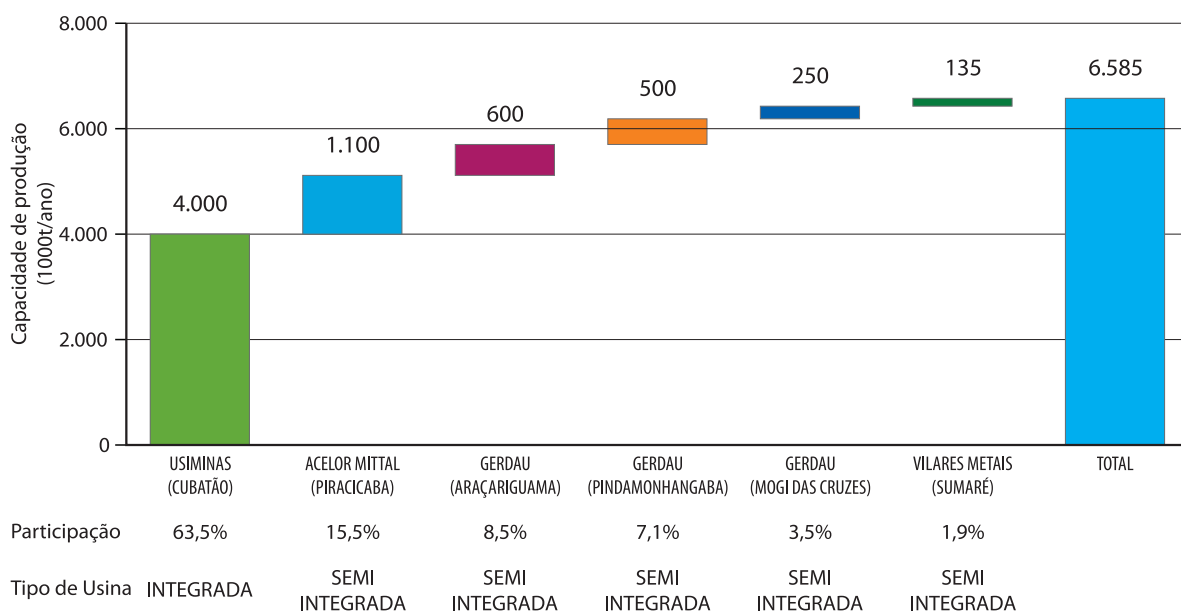
No Gráfico 6, a seguir, a produção de aço no Estado de São Paulo corresponde a 16 % da produção total brasileira no ano de 2014. O estado possui 6 unidades produtivas: cinco que utilizam fornos elétricos a arco (FEA) e uma usina integrada (com alto-forno).

Gráfico 5 – Produção nominal de aço bruto e ociosidade implícita em 2013 por estado



Fonte: IABr (2014).

Gráfico 6 – Produção nominal de aço no Estado de São Paulo por empresa em 2013



Fonte: IABr (2014).

No final de 2015 mais uma unidade com forno elétrico entrou em operação. Trata-se de uma empresa com uma unidade de aços longos na cidade de Pindamonhangaba (RIBEIRO, 2016).

1.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE AÇO

Existem duas rotas tecnológicas predominantes na indústria siderúrgica mundial: usinas integradas a coque e usinas semi-integradas.

Nas usinas integradas a coque (Figura 1), as áreas de transformações do minério de ferro e do aço encontram-se presentes em uma única unidade industrial. Assim, partindo-se do minério de ferro, ou de seus produtos, sinter e pelota, coque e fundentes, obtém-se o ferro gusa que, posteriormente, é convertido em aço. Após a transformação mecânica ou laminação, o aço é comercializado no mercado sob a forma de produtos planos ou chapas e bobinas e longos ou vergalhões, barras e perfis. Assim, uma

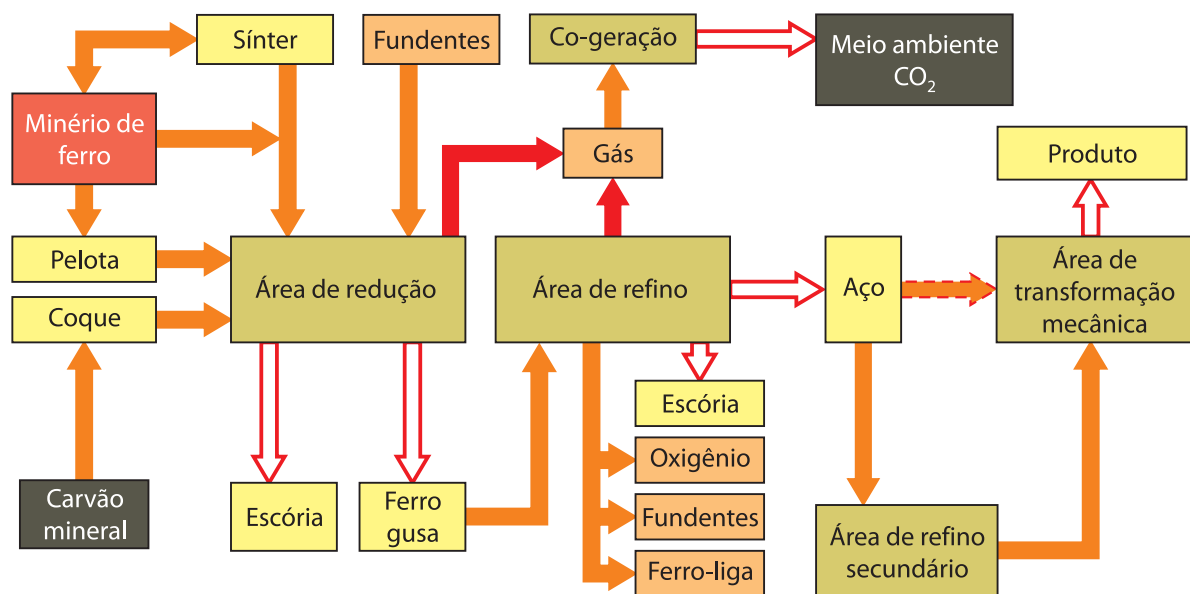
usina integrada a coque é, tipicamente, composta de três etapas:

- redução, cujo objetivo é a fabricação do ferro gusa;
- refino, produção e resfriamento do aço;
- transformação mecânica, produtos siderúrgicos destinados à comercialização.

As usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução (Figura 2). Portanto, trata-se de um processo mais compacto, razão pela qual elas são usualmente chamadas de *mini-mills*. As aciarias são alimentadas principalmente com sucata ferrosa e, em menor intensidade, por ferro gusa e pré-reduzidos (ferro diretamente reduzido), e ferro briquetado a quente, *hot briquetted iron* (HBI). Resumidamente, a usina semi-integrada consiste das áreas de refino e de transformação mecânica.

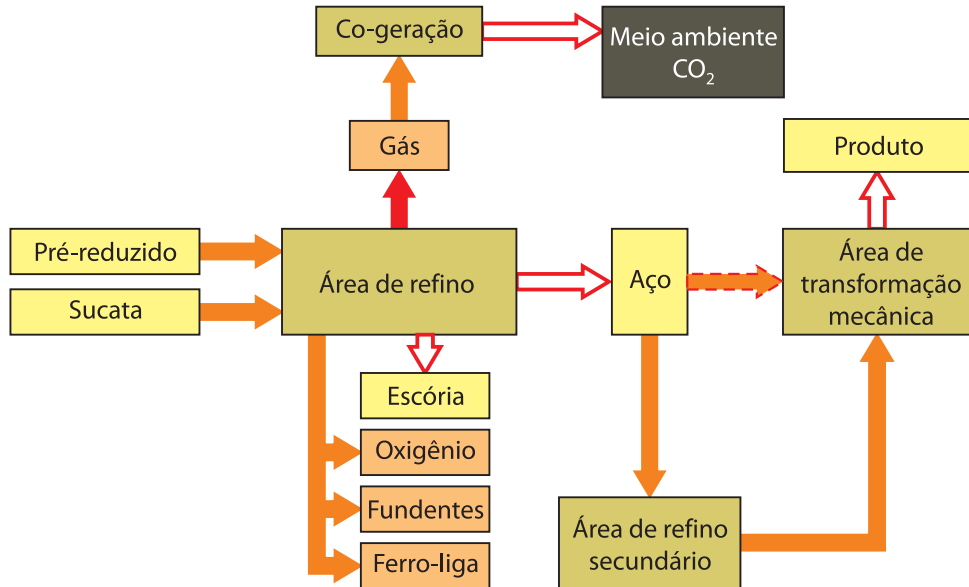
No contexto nacional, o parque siderúrgico é bastante diversificado, no que tange às configurações produtivas, possuindo os seguintes tipos de usinas: integrada a coque, semi-integrada, integrada à redução direta, integrada a carvão

Figura 1 – Diagrama esquemático de usina integrada a coque



Fonte: CGEE (2010).

Figura 2 – Diagrama esquemático de uma usina semi-integrada



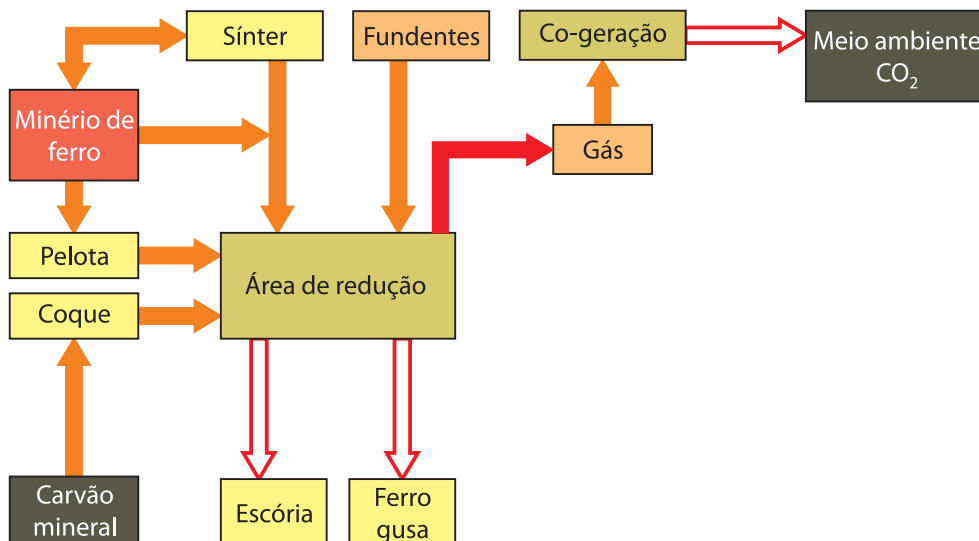
Fonte: CGEE (2010).

vegetal e produtor independente de ferro gusa à base de alto-forno a carvão vegetal.

No caso do Brasil, a única usina integrada à redução direta que era operada pela Gerdau (USIBA) encerrou a sua produção em função do custo do gás natural. A aciaria parou a produção em outubro de 2014 (LANDIM, 2014).

Ressalte-se que o uso do carvão vegetal como redutor ao invés do carvão mineral, é uma peculiaridade da siderurgia brasileira. A utilização dessa matéria-prima, oriunda de florestas plantadas e manejadas de forma adequada, reduz as emissões específicas de GEE da produção de aço, por apresentarem um balanço neutro de emissões. A Figura 3 apresenta a configuração

Figura 3 – Diagrama esquemático de produção independente de ferro gusa



Fonte: CGEE (2010).

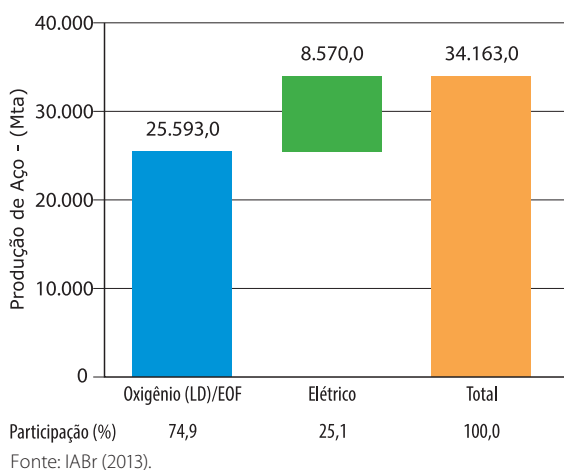
esquemática do produtor independente de ferro gusa, o “guseiro”. Ele não fabrica aço, mas apenas o ferro gusa, em grande parte direcionada ao mercado externo. O volume remanescente no mercado interno é praticamente absorvido pelos produtores de aço que se utilizam da rota semi-integrada. Nessa rota a carga metálica é composta de ferro gusa e sucata. Tipicamente se utiliza de 30% de ferro gusa na carga metálica, que pode chegar até a 50% em função da não disponibilidade de sucata.

No Brasil, de acordo com o Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE, 2008), há uma tendência à predominância no processo de produção siderúrgica pela rota integrada por dois motivos: há uma disponibilidade grande de minério de ferro de boa qualidade; e pelo fato da geração de sucata de obsolescência não ser um fator limitador para a produção por meio da rota integrada.

Ciclos econômicos com baixo crescimento geram menos consumo de produtos industrializados que consomem aço. Isto por sua vez, afeta a geração e disponibilidade de sucata para uso na indústria.

O Gráfico 7 apresenta a produção de aço bruto no Brasil via aciaria a oxigênio e via aciaria elétrica.

Gráfico 7 – Produção de aço bruto no Brasil por rota tecnológica



Nos demais países a distribuição da produção entre a rota integrada e semi-integrada é bastante semelhante à do Brasil.

1.2.1 Descrição sucinta dos principais processos e fluxos em uma usina integrada

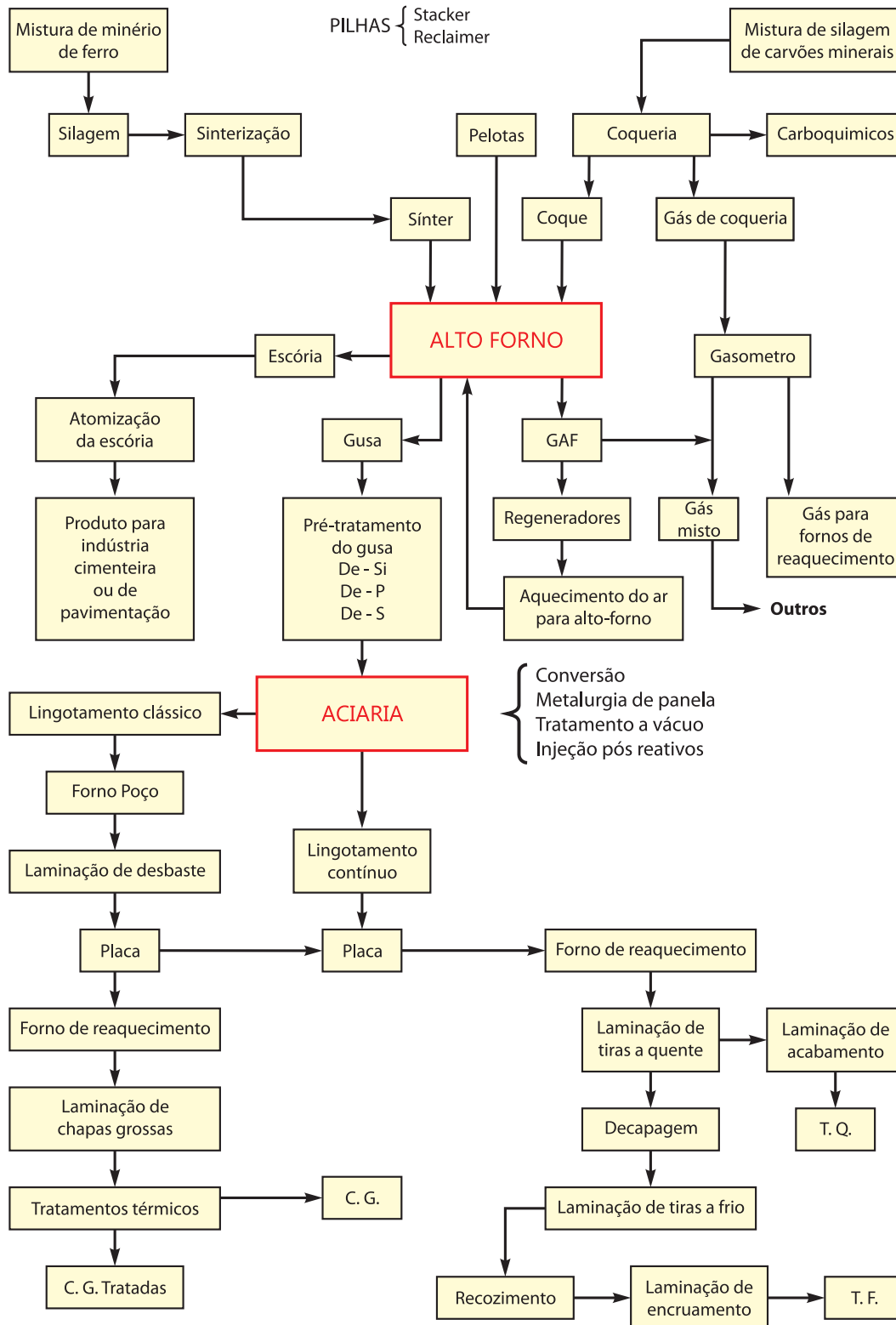
Em uma usina siderúrgica integrada, os principais fluxos dos processos e principais produtos siderúrgicos a partir das matérias primas podem ser representados pelo fluxograma da Figura 4.

Nas usinas siderúrgicas integradas a coque, o processo siderúrgico começa fora da usina com a seleção, compra e transporte das matérias primas, tais como: minérios de ferro, carvões minerais, fundentes e insumos básicos, tais como, combustíveis líquidos, refratários, etc. A descrição nos próximos parágrafos segue o fluxograma da Figura 4 a partir do minério de ferro e carvão mineral, este último, sendo considerado o item mais dispendioso.

O primeiro passo é dispor os minérios de ferro e os carvões minerais em pilhas no pátio, junto dos sistemas de transporte, que acabam sendo espalhados por todo setor primário da usina. Após isso, inicia-se o processo siderúrgico, de forma a otimizar as misturas de minérios de ferro, como também a dos carvões minerais, objetivando um menor custo com a melhor qualidade possível. Essa fase é realizada através da formação de pilhas com os minérios e os carvões dispostos em camadas horizontais em suas pilhas respectivas, com o auxílio de um “*stacker*” (empilhadeira). Nessas pilhas são armazenados materiais para alimentar a linha de produção por aproximadamente 15 dias (ABM, [2003?]).

Após a pilha estar concluída, e com o objetivo de não haver segregação na mesma pilha, o material desta é recuperado por cortes transversais, utilizando o “*reclaimer*” (empilhadeira recuperadora), que envia esse material para a síntese, no caso de minérios ou para a coqueria

Figura 4 – Fluxograma dos processos siderúrgicos de usina integrada a coque



Fonte: ABM ([2003?]).

no caso dos carvões minerais. Os processos a seguir envolvem: sinterização, coqueificação, silagem, redução do minério de ferro, aciaria, lingotamento contínuo e laminação (ABM, [2003?]).

A sinterização é um processo que tem por objetivo aglomerar os finos de minério de ferro, que possuem alto teor de ferro, afim de que possam ser utilizados na carga no alto-forno. O processo de sinterização é descrito resumidamente a seguir.

1.2.1.1 Sinterização

Processo de aglomeração dos minérios de ferro onde 40% da granulometria é inferior a 0,150 mm. O processo é feito em uma máquina de esteira rolante onde se deposita o minério de ferro e finos de coque ou carvão, formando camadas de 700 mm de altura por 2000 mm de largura, a qual é aquecida por uma frente de combustão que percorre da superfície até o fundo da camada ocasionando uma ligação incipiente que produzirá a união entre as partículas de minério de ferro resultando no sinter (ABM, [2003?]).

O carvão mineral *in natura* é a principal fonte de energia na siderurgia. O carvão mineral necessita passar por um processo onde se extraem os materiais voláteis do mesmo. Este processo é realizado em fornos, num processo que é conhecido como coqueificação.

1.2.1.2 Coqueificação

A mistura de carvões é enviada à coqueria onde a mesma sofrerá o processo de coqueificação, resultando no “coque”. Como subprodutos obtêm-se substâncias carboquímicas que são purificadas e vendidas (importante para baixar o custo dos carvões), e o *coke oven gas* (gás de coqueria) que é utilizado na usina como combustível para complementar o balanço térmico da usina (ABM, [2003?]).

1.2.1.3 Silagem

Tanto o sinter como o coque, são enviados para silos que têm sistemas dosadores, importantes na formulação da carga usada no processo de produção do gusa, que é o produto resultante da redução do minério de ferro (ABM, [2003?]).

1.2.1.4 Redução do minério de ferro

O processo a ser analisado nesse documento é o processo clássico, redução em alto-forno.

O alto-forno é um reator cilíndrico vertical que trabalha a contra corrente, ou seja, a carga a ser reduzida carbotermicamente entra pelo topo do mesmo e os gases redutores sobem da base para o topo do forno. Esse forno tem dimensões da ordem de 10 a 14 m de diâmetro por 60 a 70 m de altura. Esse equipamento necessita de alguns equipamentos auxiliares, tais como: regeneradores de 3 a 4 por alto-forno que tem por objetivo recuperar o calor latente dos gases que saem do topo do alto-forno, aquecendo o ar que vai ser injetado no próprio alto-forno (turbo-soprador). O turbo soprador é uma turbina multi-estágio capaz de ter alta vazão a pressões elevadas (cerca de 6 kg/cm²), sistema de limpeza de gases, muito importante para evitar o entupimento das tubulações devido à quantidade elevada de particulados nos gases que saem do alto-forno (ABM, [2003?]).

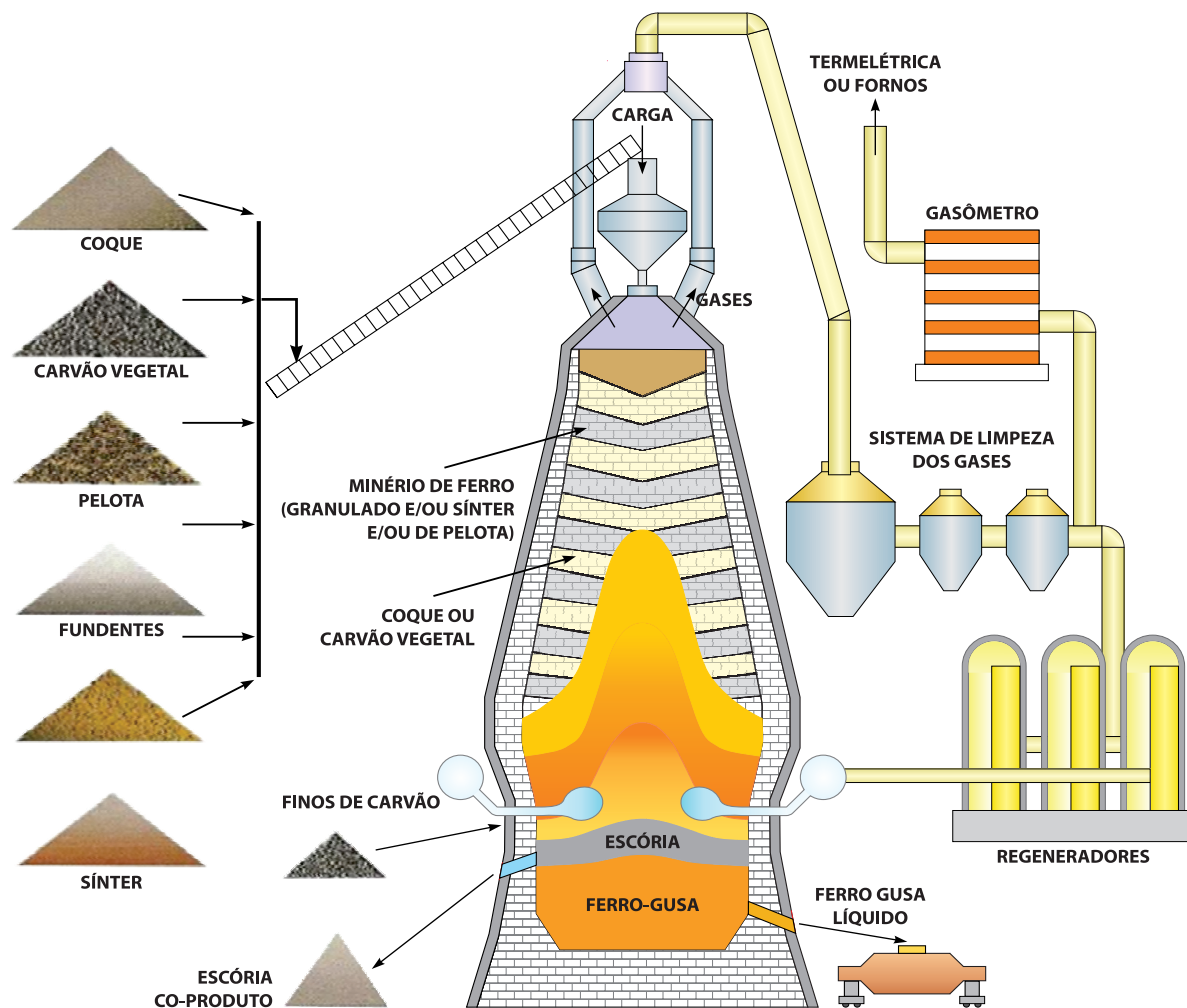
Resumindo, o alto-forno é um equipamento que recebe sinter de minério de ferro, coque e ar aquecido, produzindo o ferro gusa, sistema líquido que contém essencialmente ferro metálico e aproximadamente 4% a 5% de carbono em solução a uma temperatura próxima a 1500°C; escória, ou sistema oxidado líquido que contém os minerais de ganga (impurezas) do minério de ferro e o gás que sai pelo topo do alto-forno. O produto do alto-forno é o ferro gusa.

O gusa, antes de ir para a aciaria sofre um beneficiamento de dessiliciação, desfosforação e

dessulfuração para minimizar, respectivamente, a presença de Silício, Fósforo e Enxofre, e com isso facilitar o processo de produção de aços com maior nível de qualidade. A escória sofre um processo de atomização com água, obtendo-se como produto escória particulada, que é vendida para a indústria cimenteira. O gás de alto-forno que sai no topo, após livrar-se do material particulado, é injetado nos regeneradores, como combustível, para aquecer o ar que é injetado no alto-forno (ABM, [2003?]).

Apesar de o alto-forno ser o processo clássico de redução do minério de ferro, como já foi citado, constitui-se no processo mais usado nas usinas siderúrgicas do mundo. Atualmente existe uma série de processos emergentes, que dentro do contexto das novas *mini-mills*¹ poderiam ter vantagens sobre o alto-forno.

Figura 5 – Esquema simplificado de um alto-forno mostrando os principais insumos e equipamentos



Fonte: RIZZO (2009).

1. A denominação *mini-mill* deve-se à rota tecnológica, uma combinação de aciaria a forno elétrico a arco e processos compactos como o lingotamento contínuo e caracterizam-se pela rota tecnológica semi-integrada (ANDRADE; CUNHA; GANDRA, 2000).

1.2.1.5 Aciaria

Setor da usina siderúrgica onde é refinado o gusa, obtendo-se o aço. O processo consagrado, atualmente, é a conversão do gusa no conversor *Linz Donawitz* (LD), no qual o gusa é oxidado, controladamente, por um fluxo de oxigênio lançado diretamente à superfície do banho através de uma lança, por onde o fluxo de oxigênio atinge velocidade ultrassônica. Atualmente, é nas aciarias que se encontram os processos mais flexíveis para se conseguir os aços com qualidades desejadas, sendo que, para que isso aconteça, as aciarias foram aprimorando tecnologias de metalurgia de panela como: injeção de pós-reativos; forno Ruhrstahl Heraeus (RH), para tratamento do aço a vácuo; etc. Todas essas tecnologias objetivam: minimizar inclusões, homogeneizar o aço, descarburar o aço até teores de partes por milhão (ppm), em resumo, conseguir o aço com alto nível de limpeza (ABM, [2003?]).

1.2.1.6 Lingotamento contínuo

O processo de lingotamento contínuo dos aços e suas ligas é considerado a última etapa para se trabalhar com metal ainda no estado líquido. Tem como missão solidificar o aço, logicamente numa forma desejável, para que se possa utilizá-lo nas etapas seguintes do processo de transformação.

Até o último quarto de século, o método tradicional de se converter aço líquido em sólido mudou dramaticamente. O método tradicional era o de vaziar o aço líquido em moldes individuais onde eram resfriados, resultando nos lingotes, que seriam, por sua vez, aquecidos e laminados na forma de placas, *blooms* ou perfis (ABM, [2003?]).

No Brasil, atualmente, esta prática é adotada em quase 100% das usinas instaladas, restando ainda alguns poucos fabricantes que, por alguma

razão especial, adotam a prática antiga ou processo convencional. Este é um processo que possui muitas vantagens, sendo as mais importantes, a melhoria nos rendimentos, a redução do consumo de energia e a redução da força de trabalho humana, reduzindo assim significativamente o custo de produção. No caso da siderurgia o produto do lingotamento são placas (ABM, [2003?]).

A placa é um produto intermediário que pode ser vendido tanto no mercado nacional, como no internacional. É a matéria prima para duas classes de produtos comerciais: chapa grossa (chapa com espessura superior a 6,0 mm) e chapas finas que podem ser a quente e a frio. A mesma, após o reaquecimento em forno de placa, é encaminhada ao laminador de chapas grossas, onde sofre o processo de deformação chegando às dimensões requeridas. O próximo passo pode ser o tratamento térmico, ou seja, normalização, recozimento ou têmpera, chegando-se ao produto final chapa grossa tratada termicamente ou, então, chapa grossa sem tratamento térmico (ABM, [2003?]).

1.2.1.7 Laminação

A laminação é um processo de conformação que essencialmente consiste na passagem de um corpo sólido (peça) entre dois cilindros (ferramentas) que giram à mesma velocidade periférica, mas em sentidos contrários. Desta forma, tendo o corpo da peça inicial uma dimensão maior do que a distância entre as superfícies laterais dos cilindros, ele sofre uma deformação plástica na passagem entre os cilindros que resulta na redução de sua secção transversal e no aumento do seu comprimento e largura. Para se obter, então, uma determinada dimensão ou espessura do corpo, deve-se submeter a peça a sucessivos descolamentos através dos cilindros, com as distâncias entre eles decrescentes (ABM, [2003?]).

O processo de laminação pode ser conduzido a frio ou a quente, dependendo das dimensões e da estrutura do material da peça especificada para o início e fim do processamento.

Laminação a quente — a peça inicial é comumente um lingote fundido obtido de lingotamento convencional, ou uma placa ou tarugo processado previamente em lingotamento contínuo; a peça intermediária e final assume, após diversos passes pelos cilindros laminadores, as formas de perfis diversos (produtos não planos) ou de placas e chapas (produtos planos). A temperatura de trabalho se situa acima da temperatura de recristalização do metal da peça, a fim de reduzir a resistência à deformação plástica em cada passagem e permitir a recuperação da estrutura do metal, evitando o encruamento para os passes subsequentes. A laminação a quente, portanto, comumente se aplica em operações iniciais (operações de desbaste), onde são necessárias grandes reduções de secções transversais (ABM, [2003?]).

Laminação a frio — a peça inicial para o processamento, neste caso, é um produto semiacabado ou chapa, previamente laminado a quente. Como a temperatura de trabalho ou temperatura ambiente, situa-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça apresenta uma maior resistência à deformação e um aumento dessa resistência com a deformação ou encruamento, não permitindo, dessa forma, intensidades elevadas de redução de secção transversal. Um tratamento térmico de recozimento, entre uma e outra sequência de passes, pode se tornar necessário em função do programa de redução

estabelecido e das propriedades características do produto final. A laminação a frio é aplicada, portanto, para as operações finais (operações de acabamento), quando as especificações do produto indicam a necessidade de acabamento superficial superior, obtido com cilindros mais lisos e na ausência de aquecimento, o que evita a formação de cascas de óxidos, e de estrutura do metal encruada com ou sem recozimento final (ABM, [2003?]).

1.2.2 Descrição sucinta do processo em uma usina semi-integrada

A produção de aço via aciaria elétrica, iniciou-se nos anos 40 e tornou-se cada vez mais popular. Inicialmente a rota semi-integrada era principalmente empregada para a produção de produtos longos, devido ao maior teor de resíduos na sucata carregada e a outras características, tais como longo tempo “*tap to tap*”, menor porte de corrida, etc. O desenvolvimento tecnológico fez com que o FEA, em um período relativamente curto, tornasse-se uma unidade de fusão em larga escala, rápida e econômica, para o qual o advento da tecnologia de lingotamento em placas finas abriu o mercado de produtos planos. Com a disponibilidade de se substituir a sucata de aço por ferro diretamente reduzido, chamado HBI em sua forma briquetada, viabilizou-se a rota no FEA, mesmo para produtos planos de alta qualidade e desta maneira, tornou-se um desafio real a rota pelo processo de produção de aço por Forno Básico de Oxigênio (*Basic Oxygen Furnace – BOF*) (ABM, [2003?]).

O aço produzido no FEA oferece várias vantagens quando se compara com a rota do processo integrado. Há uma tendência no crescimento desta alternativa da produção e aço (ABM, [2003?]). Alguns aspectos importantes da rota semi-integrada, *vis-à-vis* a rota integrada são:

- a) Maior quantidade de sucata pode ser reciclada em FEA, que é muito importante quando se leva em conta o excedente em sucata;
- b) A emissão de dióxido de carbono (CO₂) é quatro vezes menor, mesmo quando se carrega 30% do metal quente;
- c) Quantidades elevadas de *Direct Reduced Iron* (DRI) ou gusa, e outros substitutos de sucata, somente podem ser consumidos no FEA;
- d) Dependendo do preço da energia elétrica e devido aos custos de investimentos menores, o aço poderá ser produzido mais economicamente;
- e) Custos de investimento (*Capital Expenditure* – CAPEX) e de despesas com a operação (*Operational Expenses* – OPEX) são muito menores do que o da rota integrada.

Originariamente o FEA era simplesmente uma unidade de fusão para reciclar sucata de aço. Hoje devido a numerosas modificações, ele está se tornando um reator elétrico e químico combinado.

Um dos fatores que mais influencia o desempenho do forno elétrico a arco é o tipo de carga metálica (sucata e gusa) com a qual é alimentado e a maneira como ela está distribuída em seu interior. A sucata pesada e de grandes dimensões pode causar obstrução ao fechamento da abóbada, danos ao refratário e aos painéis refrigerados, e o tombamento de uma peça pesada durante o período de fusão pode causar a quebra de eletrodos (ABM, [2003?]).

O uso de sucata leve conduz a um rendimento metálico mais baixo, como sua densidade é baixa, carrega-se normalmente um número maior de cestões, resultando em diversas aberturas da abóbada e maior perda de energia. Os cestões podem ser de fundo bipartido ou tipo casca de laranja (ABM, [2003?]).

O processo de fusão da carga metálica, sucata e gusa, se inicia quando o forno é ligado iniciando a perfuração da carga. Abre-se um arco entre os eletrodos e a carga metálica, furando a carga metálica até o fundo, formando então a primeira poça de aço líquido. Continuamente essa poça de aço é aumentada até que toda a carga metálica seja derretida. Ainda com alguma sucata dentro do forno, faz-se o segundo carregamento e dá-se prosseguimento ao térmico da fusão. Quando a sucata estiver toda derretida com temperatura do aço líquido por volta de 1570°C, inicia-se o período de refino. Conhece-se por refino ao trabalho com aço líquido onde se objetiva a limpeza do aço em termos de inclusões e acerto de composição química. Essa etapa é acompanhada pela elevação de temperatura no forno e formação de escórias que ajudam a proteger o forno contra a radiação térmica. Essas escórias também colaboram na limpeza do aço (ABM, [2003?]).

Após essa etapa, vaza-se o aço líquido para a panela, equipamento cilíndrico com revestimento refratário para receber o aço líquido. Uma vez que o aço líquido esteja na panela, faz-se os ajustes finos de composição química e envia-se o aço líquido para o lingotamento. Em seguida o aço líquido é lingotado na forma de lingotes para ser posteriormente laminados na forma de barras e bobinas (ABM, [2003?]).

1.3 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO SETOR DO AÇO

No que tange às principais questões ambientais enfrentadas pela indústria siderúrgica mundial e brasileira, as mais frequentes apontadas pela própria indústria são: poluição atmosférica, incluindo emissão de GEE, geração de resíduos, e impactos nos recursos hídricos (DE PAULA, 2012).

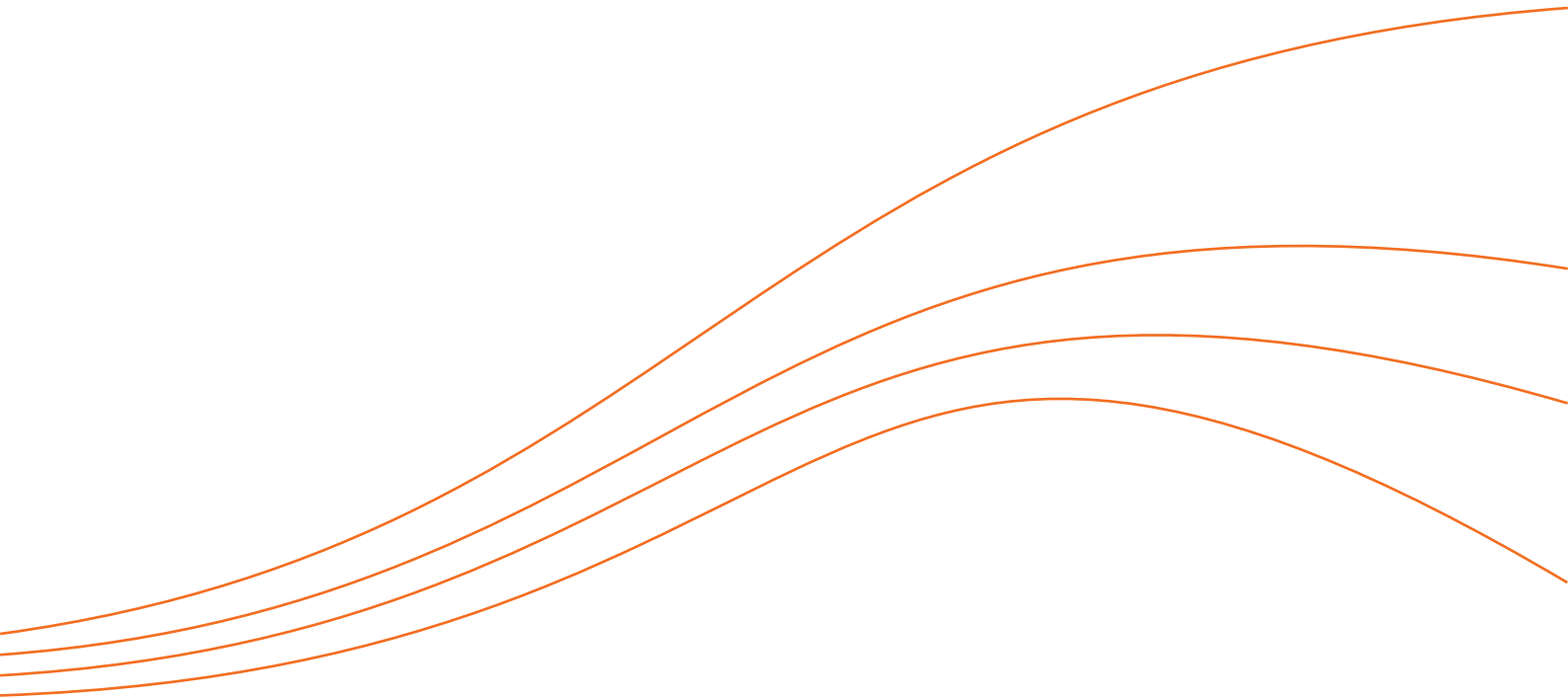
As emissões atmosféricas continuam sendo o maior impacto ambiental no processo siderúrgico. Elas estão correlacionadas diretamente com a energia e a conservação de recursos, pois as emissões significam perda de materiais e energia que poderiam estar sendo aproveitados de outra forma. Como no processo siderúrgico ainda não é possível evitar a geração de emissões atmosféricas, essas devem ser mitigadas, de forma a minimizar seus impactos ao ambiente. A taxa de geração de CO₂ situa-se, atualmente, numa faixa de 1.510 a 1.950 kg/t de aço bruto

nas usinas integradas a coque e de 450 a 600 kg/t de aço bruto nas usinas semi-integradas (CGEE, 2010).

Uma das características marcantes da siderurgia é ser intensiva em matéria-prima, energia, capital e demanda em relação a itens ambientais. Em relação à energia em particular, é importante destacar que o consumo específico varia consideravelmente conforme a rota tecnológica empregada. A usina integrada a coque, com alto-forno a coque e aciaria LD, necessita de 17–19 GJ/t. No caso de usina semi-integrada, cujo processo se inicia no forno elétrico a arco, o padrão típico de consumo é de 8 a 10 GJ/t. As etapas de matérias-primas e redução das usinas integradas a coque respondem por 80%–85% do total da energia consumida neste tipo de configuração produtiva. Para as usinas semi-integradas, 70%–75% da energia total são despendidas nas fases de matérias-primas e refino (aciaria) (CGEE 2010).



Métodos



Os métodos a seguir se referem aos utilizados para as estimativas de GEE e para a geração das informações financeiras.

2.1 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Primeiramente, realizaram-se as etapas de estabelecimento das informações base para o desenvolvimento como a coleta e projeção de dados necessários como os de produção e consumo. Na etapa inicial, definiram-se as tecnologias potencialmente empregáveis em cada setor, considerando potencial de emissão, potencial de mitigação consumo energético e custos ou receitas associados.

Do ponto de vista metodológico, fez-se uso de três fontes principais de informações: (i) fontes bibliográficas de estudos relacionados a este tema, principalmente BIRAT (2010), SANTOS *et al.* (2013), USEPA (2012) e de Paula (2012), USEPA (2012) também das informações do autor e colaboradores deste estudo, sobre a indústria no que se refere às informações desagregadas por empresa, estado produtor e tecnologias empregadas na produção primária do aço e seus produtos; (ii) informações fornecidas pelo

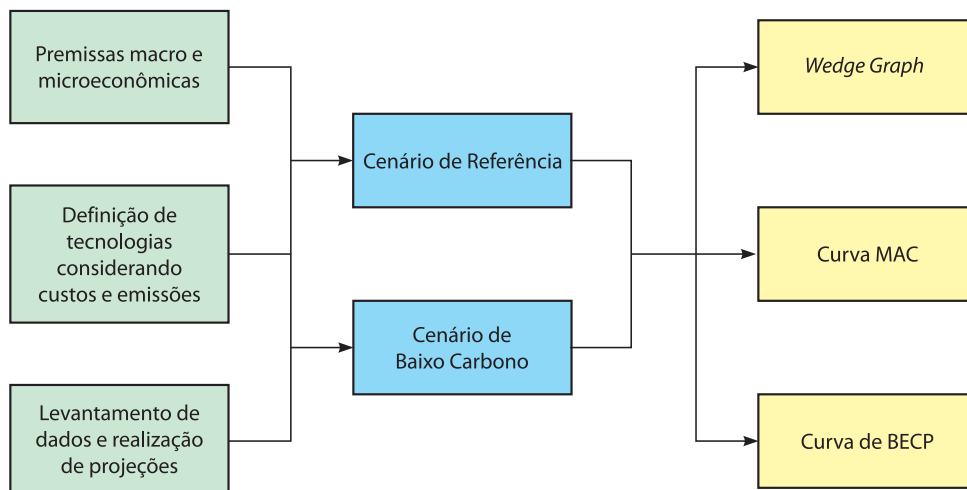
Instituto Aço Brasil (IABr) (IABr, 2014) quanto às estatísticas agregadas do setor nos últimos anos e publicadas nos seus anuários, bem como as iniciativas relacionados à sustentabilidade do setor através dos relatórios de sustentabilidade publicados anualmente; e (iii) entrevistas com empresas e organizações representativas do setor, assim como especialistas no tema.

A fim de subsidiar a análise, foram coletados dados referentes a inventários específicos da indústria, disponibilizadas por organizações tais como a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM) e Centro de Gestão de Estudos Estratégicos (CGEE) e Secretaria de Energia do Estado de São Paulo.

2.2 ESTIMATIVAS DE EMISSÕES

As estimativas de emissões de GEE foram realizadas empregando-se o método apresentado no guia do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel for Climate Change – IPCC Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National*

Figura 6 – Etapas do desenvolvimento do estudo



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

Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2000) Essas estimativas consideraram dados de atividade, como produção ou energia consumida e o respectivo fator de emissão (FE).

2.3 CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO DE EMISSÕES DE CARBONO

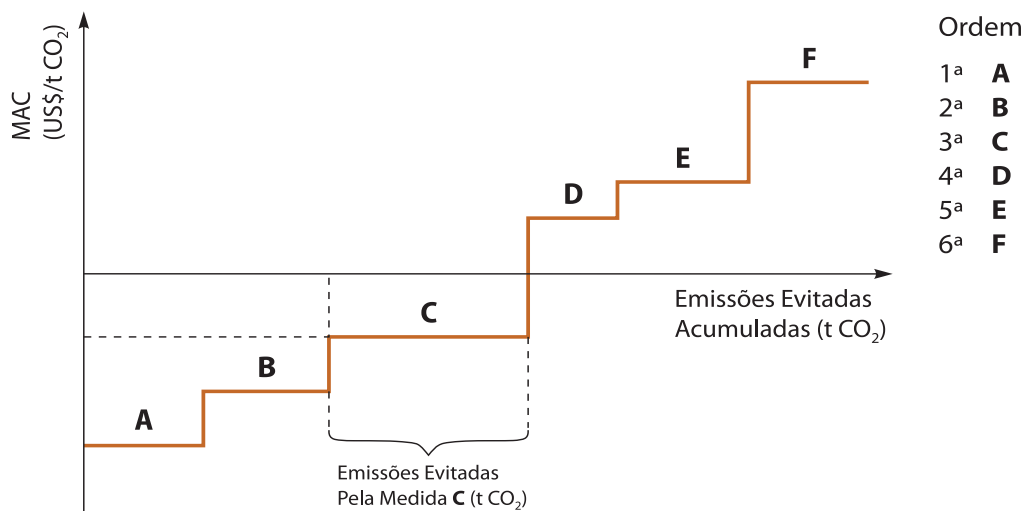
Para a construção das curvas de MAC e BECP empregou-se a MACTool. De acordo com o Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP, 2016), trata-se de uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que permite avaliar o investimento necessário para um crescimento de baixo carbono, podendo ser utilizada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

A Curva MAC é uma representação gráfica que apresenta cada uma das tecnologias de baixo carbono, representadas por “degraus”, em

ordem crescente de custo. O eixo das abscissas (x) apresenta a emissão evitada no período de análise em dióxido de carbono equivalente² (CO₂e), e o eixo das ordenadas (y) apresenta o MAC em custo por tonelada de CO₂ evitada (US\$/tCO₂). A área de cada “degrau” da curva reflete o custo total da referente à tecnologia se todo o seu potencial de redução for atingido, como exemplifica o Gráfico 8.

Para a determinação dos MAC e construção desta curva, os custos e benefícios do cenário de referência (CR) são subtraídos, ano a ano, do cenário de baixo carbono (CBC) durante todo o período analisado. A seguir, utilizando uma taxa de desconto social, única para todos os setores, é calculado o valor presente líquido (VPL) dos custos e benefícios incrementais anuais para determinar a média ponderada por emissão evitada. Esta média é denominada MAC (GOUVELLO *et al.*, 2010).

Gráfico 8 – Esquemática de uma curva MAC



Fonte: Elaboração própria (2017).

2. No caso do setor de siderurgia, alvo deste estudo, não se trabalhou com CO₂e, pois não foram considerados outros GEE além do CO₂.

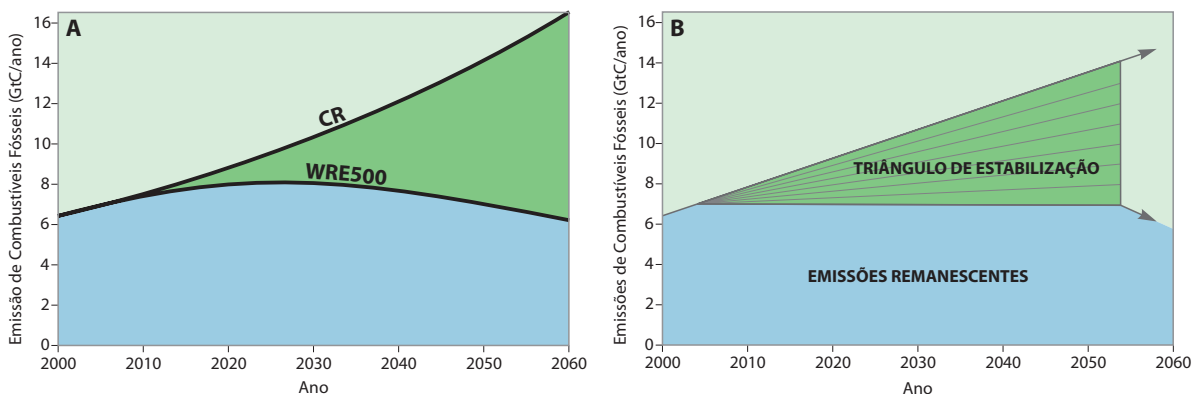
2.4 PREÇO DE EQUILÍBRIO DE CARBONO (BREAK-EVEN CARBON PRICE)

O BECP indica o incentivo econômico que os agentes econômicos da indústria necessitariam para que a medida de mitigação estudada se torne atraente. O cálculo do BECP é feito a partir de uma taxa de atratividade (*BenchMark-TIR*), que é uma taxa específica estabelecida pelo investidor com base em suas metas de retorno. Por fim, o valor resultante é o preço que deve atingir a tonelada de carbono evitada em um mercado de carbono, de forma que, ao considerar a receita da venda dos créditos de carbono, a implantação da tecnologia proporcione uma taxa interna de retorno (TIR) equivalente ao *BenchMark-TIR*, o que torna a tecnologia atraente para o investidor (GOUVELLO *et al.*, 2010). A representação gráfica da curva de BECP é basicamente a mesma da curva MAC, excetuando-se a variável do eixo y, onde está o valor de BECP ao invés do valor de MAC.

2.5 GRÁFICO DE CUNHAS DE REDUÇÃO (WEDGE GRAPH)

A curva com as cunhas de mitigação de GEE (*Wedge Graph*) indica a contribuição quantitativa da redução de GEE por cada tecnologia do cenário de baixo carbono (CBC) considerada no estudo ao longo do período de 2014 a 2030. Como é visível na Figura 7A, o limite superior apresenta as emissões totais do cenário de referência (CR), enquanto que o limite inferior representa as emissões residuais do CBC. A diferença entre eles consiste na emissão evitada, que na Figura 7B está discriminada por tecnologia, cada uma formando uma cunha (fatia) de mitigação. Com esta informação é possível visualizar a contribuição de cada tecnologia, e, eventualmente, até servir como ferramenta para priorizar a implantação de tecnologias específicas de mitigação.

Figura 7 – Esquematização de um *Wedge Graph*

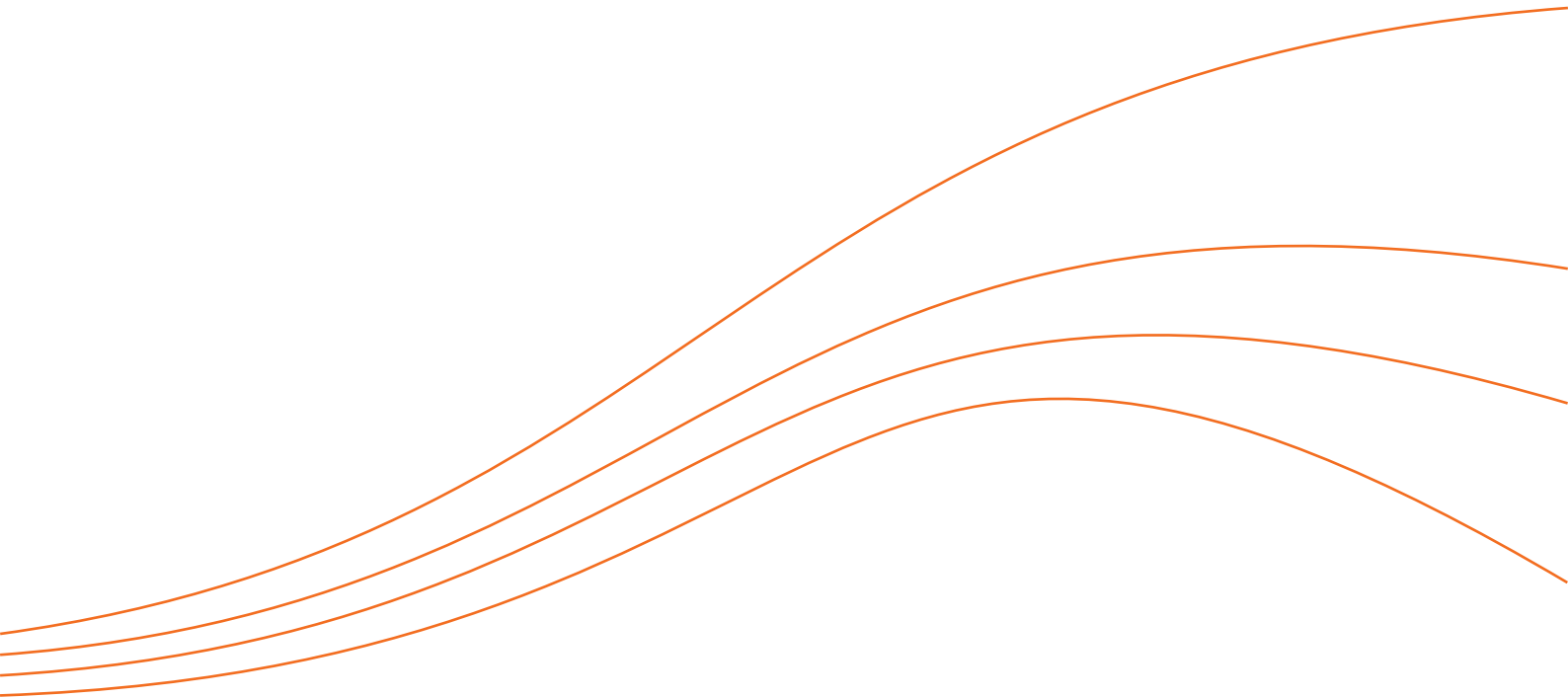


Fonte: Pacala e Socolow (2004).

Nota: WRE500 = modelo de emissões que condiz com o limite de 500ppm de CO₂ na atmosfera.



Dados



Os dados a seguir se referem aos utilizados para as estimativas das emissões de GEE e para a geração das informações financeiras.

3.1 DADOS GERAIS

Nesta seção e no Apêndice são apresentadas as premissas adotadas para o desenvolvimento do estudo.

3.1.1 Fatores de emissão

Neste item são apresentados os fatores de emissão (FE) das emissões inerentes ao processo de produção, ao consumo de energia elétrica e ao consumo de combustíveis (energia térmica).

A Tabela 2 e a Tabela 3 sintetizam os Fatores de Emissão (FE) para a rota integrada e semi-integrada no CR, respectivamente.

Tabela 2 – Fatores de emissão para rota integrada

Tipo	FE
	(tCO ₂ /t _{aço})
Processo	1,46
Combustíveis	0,42
Energia elétrica	0,01
TOTAL	1,89

Fonte: USEPA (2009), EPE (2009), Gomez (2006a).

Em relação ao FE nas tecnologias de baixo carbono, a captura e recirculação do gás de topo (TGRBF-MDEA) permitem uma mitigação de carbono de até 60% (EUROPEAN COMMISSION, 2014). Após análise, optou-se por utilizar neste estudo um valor de 55% (0,795 tCO₂/t_{aço}) para redução das emissões de processo, o que representa 42% nas emissões totais do BOF. O FE total se reduz para 1,09 tCO₂/t_{aço} com a introdução desta tecnologia. Em relação à tecnologia CC a redução no FE ocorre para a eletricidade,

Tabela 3 – Fatores de emissão para rota semi-integrada

Tipo	FE considerando inventário (1)	FE considerando MDL
	(tCO ₂ /t _{aço})	
Processo	0,08	0,08
Combustíveis	0,32	0,32
Energia elétrica (2)	0,07	0,29
TOTAL	0,47	0,69

Fonte: USEPA (2009), EPE (2009), Gomez (2006a).

- (1) A emissão pela ótica do inventário está sendo apresentada para esclarecer a emissão real da rota semi-integrada, entretanto o valor efetivamente utilizado nas análises para esta rota foi sempre o relativo ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).
- (2) Os valores indicados não incluem a emissão devido às perdas de eletricidade na rede elétrica, visto que as mesmas variam ao longo do período e visto o formato da apresentação no relatório, cabe ressaltar que, apesar disto, às perdas na rede foram incluídas na análise.

sendo o valor final de 0,28 tCO₂/t_{aço}. Por último, na tecnologia de pré-aquecimento, a redução também ocorre para a eletricidade, tendo como valor estimado 0,27 tCO₂/t_{aço}.

3.1.1.1 Processo

Como referência para os FE de processo para a siderurgia, utilizou-se os dados definidos no Tier 1 do documento publicado pelo IPCC (MARKS, 2006). O Tier³ é o método básico, frequentemente utilizando valores padrões recomendados pelo IPCC juntamente com o dado de atividade, no caso, produção, do objeto de estudo. Os FE adotados foram de 1,46 tCO₂/t_{aço} e 0,08 tCO₂/t_{aço} respectivamente para a rota integrada e para a rota semi-integrada no CR.

3.1.1.2 Energia Elétrica

Para as emissões relacionadas à energia elétrica, foi utilizado o fator médio anual de emissão do MCTI para 2014 de 0,1355 tCO₂/MWh para a rota integrada. Para o caso específico de soluções de baixo carbono (BC) na área de economia

3. Grau de rigor.

elétrica, na rota semi-integrada, o fator utilizado foi a média dos anos de 2013 e 2014, de 0,5884 tCO₂/MWh, valor adotado para projetos de MDL (BRASIL, [2016?]). O fator de MDL reflete a redução das emissões devido ao desligamento de uma usina termoeletrica.

O consumo de energia elétrica foi baseado no estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2009) sobre energia no setor siderúrgico. De acordo com este estudo, o consumo de energia elétrica na rota integrada é de 106 kWh/t_{aço} enquanto a rota semi-integrada consome 500kWh/t_{aço}. O consumo baixo das usinas integradas se deve, em parte, à cogeração de eletricidade a partir de gases gerados pelo processo de produção. Portanto, a emissão final de eletricidade por tonelada de aço, para a rota integrada e semi-integrada são, respectivamente, 0,0144 tCO₂/t_{aço} e 0,2942 tCO₂/t_{aço}, sem considerar as perdas de eletricidade na rede.

Para a determinação dos cenários de emissões no caso da eletricidade, além do FE e consumo específico, também foi necessário incluir a parcela de perdas da eletricidade na rede de transmissão e distribuição. Estes fatores foram fornecidos pela coordenação técnica do estudo e se apresentam na Tabela 4.

Tabela 4 – Fatores de perda de eletricidade na rede

Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Perdas (%)	17,00	16,85	16,70	16,55	16,4	16,26	16,12	15,98	15,84
Ano	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
Perdas (%)	15,70	15,56	15,42	15,28	15,14	15,00	14,86	14,72	—

Fonte: Pacca et al. (2017).

3.1.1.3 Combustíveis

Para emissões de combustível relacionadas a diversos processos e unidades, como fornos de têmpera, fornos Panela, poços de imersão, caldeiras, fornos de processo entre outros, foi utilizado o estudo da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (*United States Environmental Protection Agency – USEPA*).

O combustível primário utilizado na rota semi-integrada foi o gás natural, consumindo 5,70 GJ/t_{aço}⁴ e gerando 0,32 tCO₂/t_{aço}. Já para rotas integradas, os gases gerados no processo também podem ser utilizados, como gases de coqueria e de alto-forno, gerando 0,42 tCO₂/t_{aço} como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Discretização dos combustíveis utilizados na rota integrada

Combustível	Energia	FE dos combustíveis	FE final da energia
	%	(tCO ₂ /GJ)	(tCO ₂ /t _{aço})
Gás natural	51	0,0561	0,10
Gás de coqueria	14	0,0447	0,02
Gás de alto-forno	34	0,2600	0,30
TOTAL	—	—	0,42

Fonte: USEPA (2009).

4. Estimado pelo autor com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

3.1.2 Preço da energia

A indústria siderúrgica utiliza uma gama de combustíveis já mencionados nos itens anteriores, mais a energia elétrica. Para efeitos deste estudo, no objetivo de calcular os custos de energia na rota semi-integrada, utilizaram-se os preços da eletricidade presentes na Tabela 6. Estes preços se baseiam nos custos de geração de eletricidade por uma usina a gás natural mais a porcentagem referente aos impostos. Mais detalhes sobre as fontes dos preços e método de cálculo para obtenção dos preços são apresentados no Estudo de Baixo Carbono para o Setor Industrial no Estado de São Paulo de 2014 a 2030 (PACCA, *et al.*, 2017).

Os demais custos de energia, tanto na rota integrada como na rota semi-integrada, estão embutidos nos custos de OPEX.

Tabela 6 – Preço da eletricidade

Ano	Eletricidade
	(US\$/kWh)
2014	0,25
2015	0,25
2016	0,25
2017	0,24
2018	0,24
2019	0,23
2020	0,23
2021	0,24
2022	0,24
2023	0,24
2024	0,25
2025	0,25
2026	0,26
2027	0,26
2028	0,27
2029	0,27
2030	0,27

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

Nota: Projeção de preços realizada pela coordenação técnica do Estudo.

3.1.3 Custo de implantação das tecnologias

Uma vez que as tecnologias do CBC são incrementais, foi considerado como CAPEX apenas a implantação da tecnologia, ou seja, a diferença entre uma planta de referência e uma planta com a tecnologia BC. Entretanto, foi necessário considerar um custo adicional por conta da adaptação da usina já existente. Para tal, foi utilizado o fator de implantação de 1,6 para integrada e 1,4 para semi-integrada, de acordo com Equação 1.

Equação 1 – Estimativa de custos de implementação

$$\text{custo} = (\text{capex}_{\text{CBC}} - \text{capex}_{\text{CR}}) \times R$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

- Custo** = custo total de implementação da tecnologia.
CAPEX_{CBC} = custo de investimento para a implantação de uma planta já com a tecnologia de baixo carbono.
CAPEX_{CR} = custo de investimento da planta de referência.
R = fator de implantação da tecnologia de baixo carbono em uma usina já construída (estimativa do autor).

Considerando o volume total de investimento, é comum que o mesmo seja realizado em etapas, portanto, o CAPEX para as tecnologias de BC para rota integrada foi dividido em 5 anos de acordo com a Tabela 7. Para a rota semi-integrada, por ser de magnitude menor, o CAPEX foi aplicado em sua totalidade no ano de implementação.

3.1.4 Taxa de desconto

A taxa de desconto social utilizada nos cálculos foi definida em 8% a.a. (ao ano) pela coordenação técnica do projeto. Ela foi utilizada para calcular o custo marginal de abatimento, em dólares por tonelada de CO₂ evitada (US\$/tCO₂)

Tabela 7 – Distribuição do custo de investimento para implementação da tecnologia na rota integrada

Ano	CAPEX
-3	10%
-2	35%
-1	30%
0	20%
1	5%

Fonte: Elaboração própria (2017) baseado em Santos *et al.* (2013).
Nota: O ano zero foi considerado o ano de implantação da tecnologia.

pelos medidas do CBC que compõem a curva MAC e tal valor foi aplicado a todos os setores componentes deste estudo.

3.1.5 Taxa de atratividade (Benchmark-TIR)

A taxa de atratividade foi definida em 15% a.a.. Ela foi utilizada no cálculo do BECP e foi um valor específico para o setor de siderurgia.

3.1.6 Taxa de câmbio

Para as conversões entre real e dólar, a cotação utilizada foi comum para todos os setores do estudo, fornecida pela coordenação técnica. Trata-se do valor médio de venda da moeda no ano de 2013, apresentado no Balanço Energético Nacional (BEN), correspondente a R\$2,16 /US\$ (EPE, 2014).

Todos os resultados econômicos do estudo foram apresentados em dólares (US\$).

3.1.7 Produção de aço

Neste item são apresentadas as premissas adotadas e a projeção da produção de aço no Estado de São Paulo, do ano de 2014 ao ano de 2030.

3.1.7.1 Fator de marcha

O fator de marcha utilizado para o cálculo da capacidade instalada real foi de 95%. O fator de marcha significa a razão entre a produção real e a capacidade de produção nominal de uma planta. Com este fator foi possível determinar a produção real de uma planta.

3.1.7.2 Capacidade Instalada

No ano de 2013, o estado possuía uma capacidade instalada nominal para produção de aço da ordem de 6.585 milhões de toneladas por ano correspondendo a 16% da capacidade nacional; no ano de 2013 a produção nominal foi de 4,8 milhões de toneladas correspondendo a 14% da produção nacional que foi de 34,2 milhões de toneladas (IABr, 2015).

Em 2011 a empresa GV do Brasil Indústria e Comércio de Aço, pertencente ao grupo mexicano SIMEC anunciou um investimento de US\$ 500 milhões para a construção de uma usina siderúrgica semi-integrada com uma capacidade nominal de 700.000t/ano. A usina iniciou a sua operação em Dezembro de 2015.

A capacidade instalada no ano de 2013, que ainda não inclui a parte correspondente à SIMEC, é apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Capacidade instalada de aço no Estado de São Paulo em 2013

Empresa	Tipo	Capacidade nominal
		(1.000 t/ano)
USIMINAS (Cubatão)	Integrada	4.500
Arcelor Mittal (Piracicaba)	Semi-integrada	1.100
Gerdau (Aracariguama)	Semi-integrada	600
Gerdau (Pindamonhangaba)	Semi-integrada	500
Gerdau (Mogi das Cruzes)	Semi-integrada	250
Vilares Metals (Sumaré)	Semi-integrada	135
TOTAL	—	6.585

Fonte: Elaboração própria (2017) baseado em IABr (2015).

Na Tabela 9 estão incluídas as expansões, já ocorridas no momento deste estudo e as previstas para o futuro, e o ano em que as mesmas adicionam capacidade ao mercado.

Tabela 9 – Expansões das plantas de aço previstas em São Paulo até 2030

Empresa	Ano	Produção
		(kt/ano)
SIMEC (Pindamonhangaba) – nova unidade industrial	2015	350
	2020	350
Expansão prevista em outra unidade no Estado de SP	2020	500
Total	—	1.200

Fonte: Elaboração própria (2017) baseado em IABr (2013).

3.1.7.3 Produção Física

A demanda futura de produtos siderúrgicos foi realizada através da análise de uma série histórica onde se estabeleceu a correlação entre o consumo de produtos siderúrgicos com o crescimento do PIB do Brasil. Historicamente, há uma correlação positiva entre o crescimento do PIB e o consumo aparente de aço no país. Para o presente estudo e construção da curva MAC, foi adotado que o crescimento da indústria do aço ocorre em um múltiplo de 1,5 vez o PIB baseado em dados históricos (MCM, 2006; BCG, 2004).

Devido à falta de informação mais detalhada da produção de cada planta, as produções foram determinadas por meio da fração de suas capacidades nominais de produção em 2013 (Gráfico 6) com relação à capacidade total do estado.

A projeção da produção de aço foi realizada por planta, isto foi feito para facilitar a análise da curva MAC e evitar dupla contagem entre as medidas de BC. Ressalta-se que neste relatório está sendo apresentada apenas a projeção por rota de aço e total, pois os dados para cada planta não representam valores reais de produção.

Quando ocorre expansão da capacidade instalada de uma usina em determinado ano, foi utilizada a premissa de que sua produção será a produção do ano anterior acrescida de 60% do valor expandido no mesmo ano.

Na Tabela 10 são apresentadas as estimativas de produção de aço no estado de 2014 a 2030 de acordo com as premissas feitas na seção quanto às taxas de crescimento da indústria.

O Gráfico 9 apresenta a produção de aço por rota.

3.1.8 Cenário de desativação temporária do alto-forno da USIMINAS

O alto-forno da planta da USIMINAS localizada em Cubatão foi desativado em meados de outubro/novembro de 2015 (USIMINAS, 2015), devido a uma retração forte de demanda de aço no mercado interno, aliado ao fato de que em 2015 (WSA, 2016), ficou evidente o excesso de oferta mundial de aço. Em função destes fatores, a unidade da USIMINAS em Cubatão irá operar apenas o setor de laminação durante os próximos anos. Neste período as placas de aço bruto para laminação serão importadas da planta da USIMINAS de Ipatinga (MG), ou eventualmente do mercado externo. Por conta disto, foi realizado um cenário alternativo de emissões e de Curva MAC para a desativação do único alto-forno existente no estado.

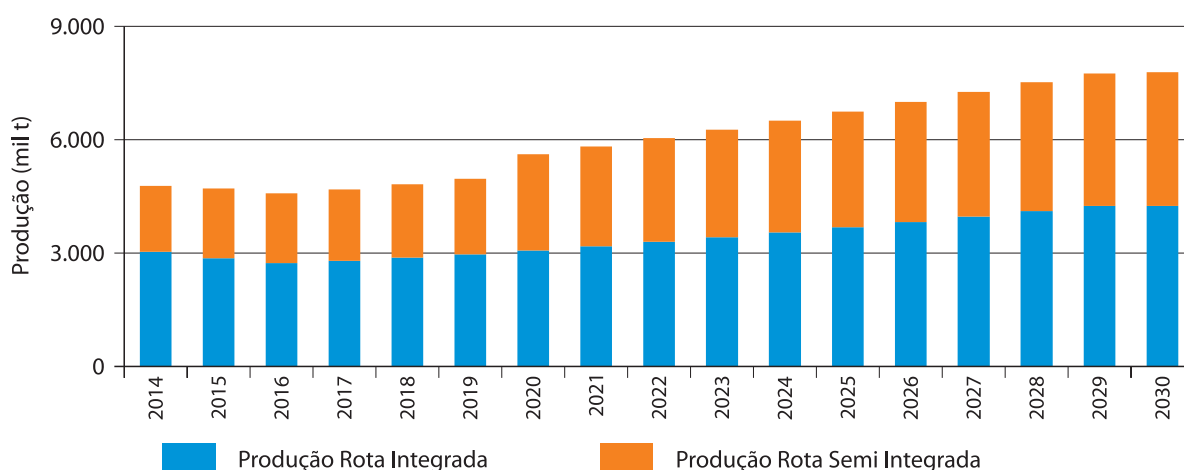
É provável que o alto-forno da unidade na Baixada Santista possa ser reativado em 2022 em função do aumento de demanda de aço no mercado interno. Uma das possibilidades consideradas neste estudo exploratório, é que o alto-forno possa vir a sofrer um *retrofit*, desde que economicamente viável, a ser definido pela empresa, afim de já poder vir a adotar a tecnologia do CBC identificada neste estudo, adequando-se a tecnologia do ativo existente para uma unidade com baixa emissão de GEE. Este cenário

Tabela 10 – Projeção de produção de aço bruto no Estado de São Paulo

Ano	PIB projeção	Taxa de crescimento da produção siderúrgica	Produção usina integrada	Produção usina semi-integrada	Produção total de aço bruto SP
	(%)		(1.000 t/ano)		
2014	—	—	3.048	1.752	4.800
2015	-3,8	-5,70	2.874	1.862	4.736
2016	-3,0	-4,50	2.745	1.858	4.603
2017	1,5	2,25	2.807	1.900	4.706
2018	2,0	3,00	2.891	1.957	4.847
2019	2,0	3,00	2.978	2.015	4.993
2020	2,3	3,45	3.080	2.564	5.644
2021	2,5	3,75	3.196	2.660	5.856
2022	2,5	3,75	3.316	2.760	6.076
2023	2,5	3,75	3.440	2.863	6.303
2024	2,5	3,75	3.569	2.971	6.540
2025	2,5	3,751	3.703	3.082	6.785
2026	2,5	3,75	3.842	3.198	7.039
2027	2,5	3,75	3.986	3.318	7.303
2028	2,5	3,75	4.135	3.429	7.565
2029	2,5	3,75	4.275	3.526	7.801
2030	2,5	3,75	4.275	3.560	7.835

Fonte: Elaboração própria (2017) baseada em IABr (2013), MCM (2006), BCG (2004).
Em OLIVEIRA, SOLERRO (2014) encontram-se estimativas convergentes de produção de aço até 2021.

Gráfico 9 – Projeção de produção de aço bruto no Estado de São Paulo



Fonte: Elaboração própria (2017) com base na Tabela 8.

foi uma inferência do autor, uma vez que não há nenhuma manifestação neste sentido por este grupo econômico ou quanto à adoção desta tecnologia, permitindo que neste estudo se avalie qual será o impacto na redução de GEE entre o CR e o de CBC.

Para o presente estudo foi adotado que a USIMINAS não encerrou as atividades em todo o período.

3.2 CENÁRIO DE REFERÊNCIA

Neste estudo, foram construídos um cenário de referência (CR) e um cenário de baixo carbono (CBC), onde foram consideradas as medidas de mitigação.

O CR representa um cenário tendencial de continuidade do estado atual da indústria e o marco em relação ao qual uma mudança é medida. No caso do CR elaborado para este estudo, o mesmo corresponde a uma projeção em que o contexto se mantém em todos os aspectos dos CBC, exceto pela inclusão de tecnologias de mitigação de GEE.

3.2.1 Tecnologias empregadas no cenário de referência

Como já mencionado, existem duas rotas tecnológicas para produção de aço, com algumas possíveis variações ou combinações entre elas: as usinas integradas, com redução, refino e laminação; e as usinas semi-integradas, com forno elétrico a arco, refino e laminação. A diferença básica entre estes dois tipos de rotas está na matéria prima utilizada na produção do aço. Na rota integrada predomina o minério de ferro, com uma pequena quantidade de sucata de aço, enquanto que a rota semi-integrada usa principalmente sucata ou ferro gusa obtido através de produtores independentes.

Nas usinas integradas a coque, as áreas de transformações do minério de ferro do aço

encontram-se presentes em uma única unidade industrial. Assim, partindo-se do minério de ferro ou de seus produtos, sinter pelota, coque fundentes, chega-se ao ferro gusa que, posteriormente, é convertido em aço. Após transformação mecânica ou laminação, o aço é comercializado no mercado sob a forma de produtos planos ou chapas bobinas, longos ou vergalhões, barras perfis. Assim, uma usina integrada a coque é, tipicamente, composta de três etapas:

- a) Redução, cujo objetivo é a fabricação do ferro gusa;
- b) Refino, produção e resfriamento do aço;
- c) Transformação mecânica, no caso em estudo, é a produção de placas.

As usinas semi-integradas não possuem a etapa de redução, ou alto-forno. Portanto, trata-se de um processo mais compacto, razão pela qual elas são usualmente chamadas de *mini-mills*. As aciarias são alimentadas principalmente com sucata ferrosa, em menor intensidade, por ferro gusa. Resumidamente, a usina semi-integrada consiste das áreas de refino de transformação mecânica.

No estudo, foi possível adotar uma vida útil destas tecnologias mínima de 20 anos (tanto para a rota integrada como semi-integrada), mas é usual que a vida útil se estenda entre 30 a 40 anos, pois trata-se de investimentos que são capital intensivos, no qual seus operadores mantém os ativos em boas condições operacionais através de manutenções e *retrofits* periódicos afim de estender a vida útil destes ativos, ou modernização dos equipamentos já ultrapassados, bem como possibilitar que sejam competitivos em termos do custo total de produção (HANAOKA *et al.*, 2015).

3.2.2 Consumo de energia elétrica no cenário de referência

A cada tonelada de aço produzido na rota integrada e semi-integrada são consumidos respectivamente 106 kWh e 500 kWh (EPE, 2009).

A Tabela 11 apresenta as estimativas do consumo de energia elétrica para ambas as rotas. Para as estimativas de emissões de GEE foi considerado o FE da eletricidade e também as perdas de eletricidade na rede elétrica, uma vez que as emissões de GEE estão diretamente relacionadas, não à energia consumida pela indústria, mas à energia gerada nas usinas elétricas para o *grid*.

Tabela 11 – Projeção do consumo de energia elétrica no cenário de referência

Ano	Consumo energia elétrica	
	Rota integrada	Rota semi-integrada
	(MWh)	
2014	323.088	876.000
2015	304.672	931.068
2016	290.962	928.895
2017	297.508	949.795
2018	306.434	978.289
2019	315.627	1.007.638
2020	326.516	1.281.995
2021	338.760	1.330.070
2022	351.464	1.379.948
2023	364.643	1.431.696
2024	378.318	1.485.384
2025	392.505	1.541.086
2026	407.223	1.598.877
2027	422.494	1.658.835
2028	438.338	1.714.642
2029	453.150	1.763.139
2030	453.150	1.780.181

Fonte: Elaboração própria (2017) baseada em EPE (2009) e Tabela 10.

3.2.3 Consumo de energia térmica cenário de referência

O consumo de energia térmica por tonelada de aço⁵ foi de 3,35 GJ e 5,70 GJ, respectivamente para a rota integrada e semi-integrada. Na Tabela 12 é apresentado o consumo de energia térmica da produção de aço no CR por rota.

Tabela 12 – Projeção do consumo de energia térmica no cenário de referência

Ano	Consumo combustível	
	Rota integrada	Rota semi-integrada
	(TJ)	
2014	10.219	9.994
2015	9.637	10.622
2016	9.203	10.597
2017	9.410	10.835
2018	9.692	11.161
2019	9.983	11.495
2020	10.327	14.625
2021	10.715	15.174
2022	11.117	15.743
2023	11.533	16.333
2024	11.966	16.946
2025	12.415	17.581
2026	12.880	18.240
2027	13.363	18.924
2028	13.864	19.561
2029	14.333	20.114
2030	14.333	20.309

Fonte: Elaboração própria (2017) baseada em USEPA (2009) e Tabela 10.

3.2.4 Custos de investimento

Para a rota integrada, a estimativa do CAPEX foi feita com base na implantação de uma unidade industrial que produz bobinas laminadas a quente com uma capacidade anual de 4 milhões de toneladas ano, cujo detalhamento apresenta-se na Tabela 13. Estes dados foram extraídos de um estudo de referência elaborado pelo programa de pesquisa e desenvolvimento do *International Energy Agency – Greenhouse Gases R&D Programme* (IEA-GHG) elaborado em 2013 onde se faz um comparativo de CAPEX e OPEX de uma planta convencional versus uma planta com a Tecnologia de Alto-Forno a Oxigênio com Turbina de Recuperação dos Gases de Topo do Alto-Forno (*Top Gas Recycling BlastFurnace – TGR-BF*) com absorção química do CO₂ através do

5. Estimado pelo autor com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Tabela 13 – Estimativa do custo de investimento para a planta de referência: rota integrada

Unidade	Seção da planta	Custo
Equipamentos – principais processos (milhões US\$)		
100	Produção de coque	400
200	Produção de sinter	220
300 & 400	Dessulfurização do gusa de alto-forno	622
500 & 600	Cadinho forno LD	459
700	Laminador contínuo de placas	195
800 & 900	Fornos de reaquecimento unidade de laminação	450
1000	Produção de cal	16
1100	High Purity O ₂ Production (ASU)	130
1200	Planta de energia	280
2000	Planta de produção de vapor	—
3000	Low Purity O ₂ Production (ASU)	—
Equipamentos – movimentação de Materiais Peças de Reposição (milhões US\$)		
Movimentação de matérias primas		128
Peças de reposição		116
Equipamentos – auxiliares, utilidades		350
Terraplanagem, construção projeto de engenharia (milhões US\$)		
Despesas pré-operacionais		21
Terraplanagem, desenvolvimento do site tratamento de resíduos		144
Prédios infraestrutura		196
Projeto de engenharia		201
CUSTO FINAL		
Custo total de instalação – usina siderúrgica (US\$ milhões)		3.928
Contingência em 5% do custo total de instalação da planta		196,4
Custo total do investimento sem CAPEX recorrente (US\$ milhões)		4.124
CAPEX recorrente – reforma do alto-forno a cada 15 anos		232
Custo do investimento unitário – sem CAPEX recorrente (US\$/t)		1.031

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2013).

solvente Metildietanolamina (MDEA) Piperazina (SANTOS *et al.*, 2013).

No CR propriamente dito, não existe cenário de CAPEX para rota integrada, já que não é previsto construção de uma nova usina. O CAPEX apresentado na Tabela 13, de US\$ 1.031 por tonelada de aço, foi utilizado para determinar o CAPEX no CBC de forma incremental, conforme a Equação 1.

As aciarias são alimentadas principalmente com sucata ferrosa, em menor intensidade, por ferro gusa. Resumidamente, a usina semi-integrada consiste das áreas de refino de transformação mecânica.

A estimativa dos custos de implantação de uma unidade industrial que produz vergalhões fio máquina com uma capacidade anual de 1 milhão de toneladas por ano através de rota semi-integrada com a utilização de FEA Laminador são apresentados na Tabela 14. Estes dados foram extraídos de um estudo de referência de uma unidade indústria deste porte instalado no ano de 2010 no Brasil pela Votorantim Siderurgia.

Através da Tabela 14, conclui-se que o CAPEX total por tonelada de aço para uma usina semi-integrada no CR é de US\$ 576/t_{aço}. Este valor foi utilizado para determinar o cenário de CAPEX no CR por conta das implantações previstas na Tabela 9, bem como determinar o cenário de CAPEX no CBC de modo incremental, conforme a Equação 1.

3.2.5 Custos de operação – Forno Azbe

O OPEX para a rota integrada foi extraído do mesmo estudo de referência (SANTOS *et al.*, 2013).

Através da Tabela 15, conclui-se que o OPEX total por tonelada de aço para uma usina integrada no CR foi de US\$ 324/t_{aço}. Este valor foi multiplicado pela produção anual da rota integrada, apresentada na Tabela 10, para determinar os custos anuais no CR.

Tabela 14 – Estimativa dos custos de investimento para a planta de referência: rota semi-integrada

Secção da planta	Custo
Equipamentos – principais processos (milhões US\$)	
Aciaria elétrica – pátio de sucata; aciaria elétrica; pátio de tarugos; pátio de escória despoejamento	160
Laminação	130
Expedição laminação	24
Downstream da laminação	40
Equipamentos – movimentação de materiais peças de reposição (milhões US\$)	
Movimentação de matérias primas	12
Peças de reposição	45
Equipamentos – auxiliares, utilidades (milhões US\$)	
Subestação elétrica	36
Central ar comprimido	1
Central de gases do ar	1
Central de gás natural	0
Utilidades gerais	10
Estações de tratamento de águas e esgoto	38
Terraplanagem, construção projeto de engenharia (milhões US\$)	
Despesas pré-operacionais	3
Terraplanagem, desenvolvimento do site tratamento de resíduos	6
Prédios infraestrutura	23
Projeto de engenharia	22
CUSTO FINAL	
Custo total de instalação – usina siderúrgica (milhões US\$)	549
Contingência 5% do custo total de instalação da planta	27
Custo total do investimento (US\$ milhões)	576
Custo do investimento unitário – sem CAPEX recorrente (US\$/t)	576

Fonte: Elaboração própria (2017). Estimado pelo autor com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

Para a rota semi-integrada, os dados de OPEX foram extraídos de um estudo de referência de uma usina de produção de vergalhões fio máquina da Votorantim Siderurgia e estão apresentados na Tabela 16.

Através da Tabela 16, conclui-se que o OPEX total por tonelada de aço para uma usina semi-integrada no CR foi de US\$ 362/t_{aço}. Este valor foi multiplicado pela produção anual

Tabela 15 – Estimativa dos custos de operação e manutenção para a planta de referência: rota integrada

Itens de custo	Custo (US\$)
OPEX – custo fixo	
Custo anual de manutenção	141.996
Custo de mão de obra direta	204.581
Custo de mão de obra indireta	76.140
OPEX – custo variável	
Combustíveis & redutores	0
Minério de ferro (finos, lumps pellets)	492.054
Compra de sucata ferro ligas	218.228
Fluxantes	44.650
Consumíveis & outros itens	49.781
Outras despesas serviços	
Despesas com serviços diversos	50.398
Outras despesas (incluindo despesas ambientais recorrentes)	11.849
OPEX – outros custos	
Processamento da escória	3.578
Transporte interno movimentação de materiais	0,268
Disposição aterro	4.335
CUSTO FINAL	
Custo anual de OPEX (US\$/ano)	1.297.590
Custo anual de OPEX (US\$/tbq)	324

Fonte: Santos *et al.* (2013).

Nota: tbq – tonelada de bobina quente.

da rota semi-integrada, apresentada na Tabela 10, para determinar os custos anuais no CR.

3.3 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

O CBC considerou medidas para reduzir as emissões de GEE em relação ao CR. Visando a redução de emissões de GEE, a indústria siderúrgica pode atuar principalmente no processo, no consumo de combustível e no uso de energia elétrica.

Tabela 16 – Custo de operação e manutenção para a planta de referência: rota semi-integrada

Itens de custo	Custo
OPEX – custo fixo (milhões US\$)	
Custo anual de manutenção	59
Custo de mão de obra direta	73
Custo de mão de obra indireta	18
OPEX – custo variável (milhões US\$)	
Compra de sucata ferro ligas	155
Fluxantes	8
Consumíveis & outros itens	9
Outras despesas serviços (milhões US\$)	
Despesas com serviços diversos/vendas	34
OPEX – outros custos (milhões US\$)	
Processamento da escória	3
Transporte interno movimentação de materiais	2
Disposição aterro	1
CUSTO TOTAL	
Custo anual de OPEX (US\$ milhões/ano)	362
Custo anual de OPEX (US\$/tvergalhão/fio máquina)	362

Fonte: Elaboração própria (2017). Estimado pelo autor com base em informações primárias e protegidas por confidencialidade.

3.3.1 Tecnologias empregadas no cenário de baixo carbono

Para o CBC, foram consideradas três possibilidades tecnológicas: para a rota integrada, (i) o *Top Gas Recycling* (TGRBF); e para a rota semi-integrada, (ii) o FEA com corrente contínua; e (iii) o sistema de pré-aquecimento e alimentação contínua da sucata.

A área de siderurgia é bastante profícua na análise e elaboração de estudos relacionados à melhoria de eficiência de processo redução de energia. O critério adotado para a escolha das tecnologias possíveis de serem implantadas visando à redução das emissões de GEE no estado foi o de facilidade e custo baixo de sua implantação. Neste sentido, as tecnologias escolhidas possuem um caráter de evolução incremental, ou seja, não substituem a tecnologia existente. Atualmente há vários estudos relacionados à redução do minério de ferro em processos que não

utilizam o alto-forno convencional, mas consideram a substituição da tecnologia existente.

No caso das tecnologias relacionadas à rota semi-integrada, existem as que estão relacionadas ao picotamento e ao pré-aquecimento da sucata. Estas tecnologias, a princípio, além de trazerem benefícios relacionados à redução de emissões de GEE, também podem trazer ganhos econômicos na produção. Em ambas as tecnologias mencionados, o período de retorno do investimento (*pay-back*) pode ser inferior a 2 anos. A tecnologia da rota semi-integrada, que está relacionada ao uso de um forno elétrico de corrente contínua, apresenta um investimento significativo, além de exigir um *retrofit* substancial na unidade.

No caso da rota integrada, uma redução representativa das emissões de GEE no processo produtivo passa necessariamente pelo alto-forno, já que mais de 60% das emissões são geradas nesta etapa de produção. A tecnologia sugerida foi o alto-forno a Oxigênio com Turbina de Recuperação dos Gases de Topo (*Top Gas Recycling BlastFurnace* – TGRBF). Esta tecnologia captura os gases de exaustão do alto-forno e segrega o CO₂ do monóxido de carbono (CO). O CO é reinjetado no forno com oxigênio reduzindo o consumo de coque. O CO₂ capturado é separado por um processo de absorção química com o uso do solvente Metildietanolamina/Piperazina (MDEA/PZ). O CO₂ capturado deverá ainda ser transportado e disposto em um reservatório geológico. É importante frisar que as emissões evitadas por captura e recirculação do gás de topo (*Top Gas Recycling* – TGR) dependem de uma destinação adequada para o CO₂. Este estudo comparativo foi realizado por Hooey *et al.* (2013).

Na Tabela 17, há uma descrição sucinta das tecnologias que estão sendo avaliadas neste estudo, que têm por objetivo reduzir as emissões de GEE, do processo ou energia, sendo que todas

Tabela 17 – Tecnologias de BC avaliadas

Rota tecnológica	Tecnologia escolhida	Tipo de tecnologia	Impacto alcançado com a tecnologia para a mitigação de GEE	Benefício esperado na mitigação das emissões de GEE
Semi-integrada	Pré-aquecimento da sucata e alimentação contínua do forno elétrico (sistema Consteel)	Incremental	Redução no consumo de eletricidade	Redução de 38kWh/t de aço produzido
	FEA com transformador de corrente contínua	Incremental	Redução no consumo de eletricidade	Redução de 5% que corresponde a 25kWh/t
Integrada	Top Gas Recycling BlastFurnace (TGRBF) – Projeto ULCOS (Ultra Low CO ₂ Steelmaking) e absorção química do CO ₂ pela Metildietanolamina Piperazina (MDEA)	Incremental	Captura de CO ₂ através de absorção química e reaproveitamento de gases (CO) no alto-forno	CO ₂ capturado 236,7 tCO ₂ /t _{aço}

Fonte: Elaboração própria (2017) baseado em Santos *et al.* (2013), USEPA (2012).

elas estão relacionadas à melhoria da eficiência energética.

O critério adotado para a escolha das tecnologias de BC sugeridas foi o de facilidade no que se refere a: acesso à tecnologia, rapidez na implantação e baixo custo de implantação⁶ (menor custo de investimento). Neste sentido as tecnologias escolhidas possuem um caráter de evolução incremental e não de substituição da tecnologia existente. Atualmente há vários estudos relacionados à redução do minério de ferro em processos que não utilizam o alto-forno convencional, mas tratam da substituição da tecnologia predominante baseada em alto-forno.

Foi adotada uma vida útil para estas Tecnologias de BC mínima de 20 anos (tanto para a rota integrada como semi-integrada). Porém é usual que a vida útil se estenda até 30 ou 40 anos, pois em investimentos que são capital intensivos seus operadores mantêm os ativos em boas condições operacionais por meio de manutenções e

retrofits periódicos, afim de estender a vida útil destes ativos, bem como possibilitar que sejam competitivos em termos do custo unitário de produção (HANAOKA *et al.*, 2015).

3.3.2 Consumo de energia elétrica no cenário de baixo carbono

Este consumo foi estimado considerando a projeção de produção de aço para cada rota, apresentada na Tabela 10, e a utilização de tecnologias de BC conforme cenário de penetração na Tabela 19. A Tabela 18 apresenta as estimativas do consumo de energia elétrica. Para as estimativas de emissões de GEE foi considerado o FE da eletricidade e também as perdas de eletricidade na rede elétrica, uma vez que as emissões de GEE estão diretamente relacionadas, não à energia consumida pela indústria, mas à energia gerada nas usinas elétricas para a rede.

6. Considerando os parágrafos anteriores pode-se perceber que a referida tecnologia para rota integrada não é acessível ainda (potencial de disponibilização no Brasil, prevista para 2030). Também não apresenta cenário de rápida implantação, uma vez que devem ser considerados os recursos e o tempo necessários em função das necessidades de adaptação em equipamentos, instalação/adaptação de tubulações, desmobilização/preparo de áreas próximas ao alto-forno e principalmente, estudos e projetos construtivos das reformas de modo a contemplar as condições de segurança operacional do equipamento principal (alto-forno). Em relação a afirmação sobre o baixo custo de implantação, este também talvez não se concretize. O valor apresentado no estudo para as modificações na rota integrada é de US\$ 1.204 Milhões (CAPEX), o que talvez não se caracterize como baixo custo. O custo é equivalente a 29% da implantação de uma nova usina de referência, de capacidade de 4 milhões de toneladas. Esta nota é uma contribuição da consulta pública.

A partir da Tabela 18, observa-se que para a rota integrada não há redução no consumo de eletricidade no CBC em relação ao CR, uma vez que a tecnologia de BC empregada não visa tal redução. Já para a rota semi-integrada observa-se redução de consumo a partir do ano de 2017 com a penetração das tecnologias do CBC, totalizando 1.287 GWh poupados no período de 2014 a 2030.

Tabela 18 – Projeção do consumo de energia no cenário de baixo carbono

Ano	Consumo de energia elétrica	
	Rota integrada	Rota semi-integrada
	(MWh)	
2014	323.088	876.000
2015	304.672	931.068
2016	290.962	928.895
2017	297.508	932.889
2018	306.434	960.875
2019	315.627	989.702
2020	326.516	1.221.965
2021	338.760	1.267.789
2022	351.464	1.293.834
2023	364.643	1.342.353
2024	378.318	1.392.691
2025	392.505	1.422.321
2026	407.223	1.475.658
2027	422.494	1.514.663
2028	438.338	1.565.383
2029	453.150	1.609.263
2030	453.150	1.625.432

Fonte: elaboração própria (2017).

3.3.3 Consumo de energia térmica no cenário de baixo carbono

O consumo de energia térmica no CBC se mantém em relação ao CR (Tabela 12), uma vez que nenhuma das tecnologias BC adotadas implica em redução neste consumo⁷.

3.3.4 Cenário de penetração das tecnologias

Nas Tabela 19 e Tabela 20 são apresentados os cenários de penetração das tecnologias para o CBC. A Tabela 19 apresenta a penetração das tecnologias de baixo carbono em cada planta no estado.

Por sua vez, a Tabela 20 apresenta o cenário de penetração por tecnologia em termos percentuais, considerando a relação da capacidade instalada em cada rota. Observa-se que, para a rota integrada, como se trata apenas de uma usina, a tecnologia de BC atinge 100% de sua penetração. Já na rota semi-integrada, hipoteticamente 100% das plantas contariam com ao menos uma ou duas tecnologias BC implantadas, isto ocorre porque em uma das usinas, o estudo exploratório contempla a implantação de ambas as tecnologias estudadas.

3.3.5 Tecnologia de baixo carbono – Top Gas Recycling BlastFurnace (TGRBF)

Esta tecnologia tem sido avaliada pelo programa europeu *Ultra Low CO₂ Steelmaking (ULCOS)* e já foi testada experimentalmente no alto-forno experimental em Luleå, na Suécia. O *Experimental Blast Furnace* foi modificado com a adição de uma planta de separação de gás baseada na tecnologia *Vacuum Pressure Swing Adsorption* (adsorção por balanço de pressão a vácuo) e esta

7. O emprego do TGR proporciona um aproveitamento energético, sendo o mesmo incorporado nas estimativas.

Tabela 19 – Cenário exploratório de penetração discretizadas em plantas no Estado de São Paulo, no período de 2014 a 2030

Ano	EMPRESA 1 ⁽¹⁾	EMPRESA 2	EMPRESA 3	EMPRESA 4	EMPRESA 5	EMPRESA 6	EMPRESA 7
2014							
2015							
2016							
2017			Pré-aquecimento de sucata				
2018							
2019							
2020		Pré-aquecimento de sucata			Pré-aquecimento de sucata		
2021							
2022				FEA com transformador de corrente contínua		Pré-aquecimento de sucata	
2023							
2024							
2025	TGR-MDEA	FEA com transformador de corrente contínua					
2026							
2027							FEA com transformador de corrente contínua
2028							
2029							
2030							

Fonte: Elaboração própria (2017).

(1) considerando que a tabela 19 é meramente exemplificativa, não há necessidade de constar nomes de empresas, portanto esses nomes foram trocados por uma designação genérica.

Tabela 20 – Cenário prospectivo quanto a penetração em relação à capacidade instalada das plantas no Estado de São Paulo

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

Fonte: Elaboração própria (2017).

unidade foi construída próximo ao alto-forno (*BlastFurnace* – BF). Os testes indicaram que é possível uma economia de CO₂ de 24%, com a aplicação da captura, é possível capturar 60% das emissões (EUROPEAN COMMISSION, 2014).

Este tipo de processo pode ser acoplado ao alto-forno convencional, utilizando ar para a queima, pelo alto-forno a Oxigênio (*Oxygen BlastFurnace* – OBF), que utiliza oxigênio para a queima, o que faz com que o gás de topo se concentre mais em CO₂, permitindo uma captura mais eficiente (HOOEY *et al.*, 2013, YANMAZ; KAYA, 2012). A seguir, há o *stripping* (extração) do CO₂ do gás de topo, resultando em uma corrente rica de CO (reductor), que pode ser reinjetada no alto-forno, reduzindo seu consumo de coque em até 30% (HOOEY *et al.*, 2013; KURAMOCHI *et al.*, 2012).

O TGRBF demandaria dez anos de pesquisa para se tornar comercialmente disponível (BIRAT, 2010). O tamanho das inovações é tal que parece pouco provável que esta tecnologia

possa estar disponível no ritmo assumido, ainda mais se tratando de um setor capital-intensivo. Deste modo, foi razoável considerar que esta alternativa estaria disponível no Brasil no mínimo em 2025, mais provavelmente em 2030, com *retrofit* de plantas existentes.

3.3.5.1 Custos de investimento – Top Gas Recycling BlastFurnace

Para uma usina integrada com capacidade de produzir anualmente 4 milhões de toneladas de bobinas quentes por ano, o CAPEX é da ordem de US\$ 4,87 bilhões, representando um investimento equivalente por tonelada de aço produzido de US\$ 1.219/t_{aço} (SANTOS *et al.*, 2013).

A Tabela 21 apresenta o CAPEX para planta TGRBF de absorção do CO₂ com MDEA.

Através da Tabela 21, conclui-se que o CAPEX total por tonelada de aço por ano para uma usina integrada no CBC foi de US\$ 1.219/t_{aço}, este valor foi utilizado na modelagem do CBC conforme Equação 1.

3.3.5.2 Estimativa dos Custos de investimento para uma planta com Top Gas Recycling BlastFurnace com absorção CO₂ através de MDEA

Conforme apresentado na Tabela 22, o OPEX estimado conforme o elaborado em um estudo de referência para a redução dos GEE pelo IEA-GHG para uma usina integrada com capacidade de produzir anualmente 4 milhões de toneladas de bobinas quentes por ano.

Através da Tabela 21, conclui-se que OPEX total por tonelada de aço para uma usina integrada no CBC foi de US\$ 330/t_{aço}.

Tabela 21 – Estimativa dos custos de investimento para uma planta com Top Gas Recycling BlastFurnace com absorção CO₂ através de MDEA

Unidade	Seção da planta	Custo
Equipamentos – principais processos (milhões US\$)		
100	Produção de coque	310
200	Produção de sínter	220
300 & 400	Desulfurização do gusa de alto-forno	610
500 & 600	Cadinho forno LD	459
700	Laminador contínuo de placas	195
800 & 900	Fornos de reaquecimento unidade de laminação	450
1000	Produção de cal	16
1100	High Purity O ₂ Production (ASU)	94
1200	Planta de energia	362
2000	Planta de produção de vapor	90
3000	Low Purity O ₂ Production (ASU)	134
Equipamentos – movimentação de materiais peças de reposição (milhões US\$)		
Movimentação de matérias primas		128
Peças de reposição		114
Equipamentos – auxiliares, utilidades		350
Terraplanagem, construção projeto de engenharia (milhões US\$)		
Despesas pré-operacionais		21
Terraplanagem, desenvolvimento do site tratamento de resíduos		144
Prédios infraestrutura		196
Projeto de engenharia		201
CUSTO FINAL		
Custo total de instalação – usina siderúrgica (US\$ milhões)		4.094
Contingência @ 5% do custo total de instalação da planta		205
Captura de CO₂ planta de compressão		578
Custo total do investimento – sem CAPEX recorrente (US\$ milhões)		4.877
CAPEX recorrente – reforma do alto-forno a cada 15 anos		232
Custo do investimento unitário – sem CAPEX recorrente (US\$/t)		1.219

Fonte: adaptado de Santos *et al.* (2013).

Tabela 22 – Custo de operação e manutenção para uma planta com *Top Gas Recycling BlastFurnace* com absorção CO₂ através de MDEA

Itens de custo	Custo
OPEX – custo fixo (milhões US\$)	
Custo anual de manutenção	163
Custo de mão de obra direta	205
Custo de mão de obra indireta	76
OPEX – custo variável (milhões US\$)	
Combustíveis & redutores	562
Minério de ferro (finos, <i>lumps pellets</i>)	492
Compra de sucata ferro ligas	218
Fluxantes	40
Consumíveis & outros itens	57
Outras despesas serviços (milhões US\$)	
Despesas com serviços diversos	48
Outras despesas (incluindo despesas ambientais recorrentes)	11
OPEX – outros custos (milhões US\$)	
Processamento da escória	4
Transporte interno movimentação de materiais	0,0003
Disposição aterro	5
CUSTO FINAL	
Custo anual de OPEX (milhões US\$/ano)	1.320
Custo anual de OPEX (US\$/tbq)	330

Fonte: Adaptado de Santos *et al.*(2013).

3.3.6 Tecnologia de baixo carbono – Forno elétrico a arco com corrente contínua

A energia consumida pelo forno elétrico a arco para fusão da carga é composta de energia elétrica mais uma parcela de energia química. A energia elétrica é introduzida através dos eletrodos pela formação do arco elétrico, como consequência da passagem de corrente quando estes são aproximados da carga. A energia química é gerada pela reação exotérmica de oxidação de alguns elementos presentes no processo, carregados junto à carga metálica,

ou então, injetados como finos ou oxigênio (MATSUURA, 2008).

O arco de corrente contínua é mais estável do que o arco de corrente alternada. Quando um forno de corrente alternada é operado, o arco é cíclico, sendo assim inevitável o contato entre os três eletrodos e a carga do metal. Quando isso ocorre, o curto circuito de três fases causa maiores aumentos na energia instantânea retirada da rede elétrica, induzindo flutuação de voltagem *flicker*.

Com a corrente contínua, a magnitude da corrente do arco é limitada até o valor estabelecido pelos reguladores de resistores, as variações de tensão do suprimento são menos significativas. A Figura 8 demonstra a diferença entre um forno de corrente contínua e um de corrente alternada.

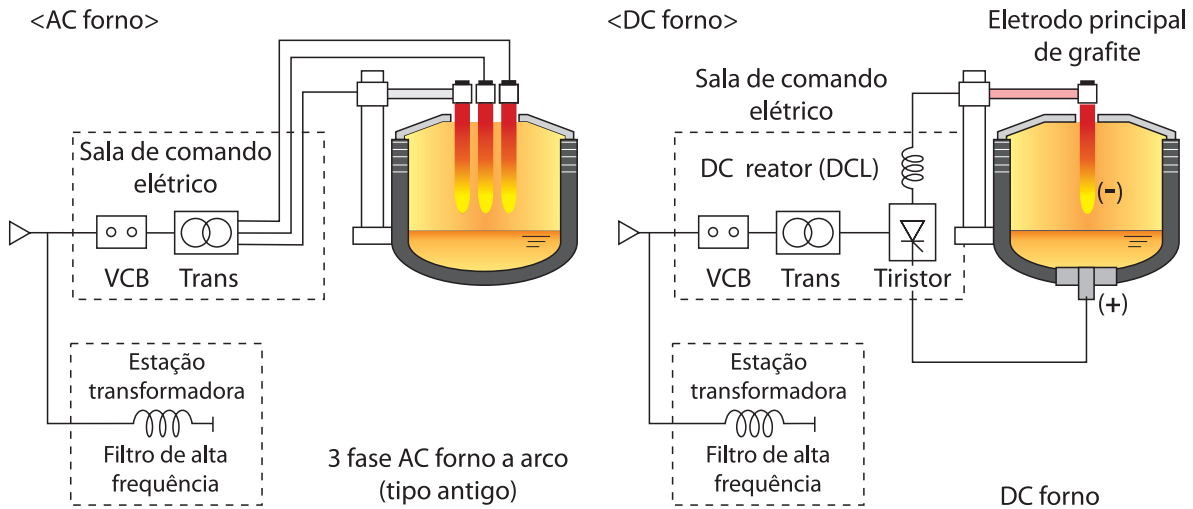
No FEA de corrente alternada, o arco do eletrodo é localizado resultando em pontos quentes e fusão irregular da sucata. Em FEA de corrente contínua, a irradiação do arco é uniforme em todas as direções e produz-se uma fusão igualmente distribuída ao redor de um único eletrodo.

As principais vantagens do FEA corrente contínua em relação aos de corrente alternada são:

- Redução no consumo de energia.
- Redução no consumo de refratário.
- Redução do efeito *flicker*.

O forno elétrico com corrente contínua gera uma redução de 25kWh/t_{aço} (USEPA, 2012), o que equivale à 0,015 tCO₂/t_{aço}, totalizando uma redução de 2% das emissões do CR, desconsiderando as perdas de eletricidade na rede.

Figura 8 – Diagrama de um forno elétrico a arco com corrente alternada (esquerda) e com corrente contínua (direita)



Fonte: NEDO (2008).

3.3.6.1 Custos de investimento – Forno Elétrico a Arco com Corrente Contínua

Os investimentos estimados para uma planta com um forno elétrico de corrente contínua para uma produção anual de 1 milhão de toneladas por ano são da ordem de US\$ 584 milhões. O *pay back* estimado para este investimento é da ordem de 0,7 anos (USEPA, 2012, p. 33). Os custos detalhados apresentam-se na Tabela 23.

Conclui-se que o custo de uma planta no CBC é 8 US\$/t_{aço} mais cara que no CR, preço devido justamente à implantação do transformador de corrente contínua.

3.3.6.2 Custos de operação – Forno Elétrico a Arco com Corrente Contínua

O OPEX adotado para uma planta com um forno elétrico de corrente contínua foi o mesmo de uma planta de referência, US\$ 362/t_{aço}. Apesar de não reduzir o OPEX em relação à planta de referência, traria uma redução de custos de energia da ordem de 3,0 US\$/t_{aço} (USEPA, 2012). Ressalta-se que este último valor não foi utilizado na análise, pois foram empregados os preços específicos da eletricidade para determinar o custo de eletricidade evitado com a tecnologia.

Tabela 23 – Custo de investimento para uma planta com fornos de corrente contínua

Secção da planta	Custo
Equipamentos – principais processos (milhões US\$)	
Aciaria elétrica – pátio de sucata; aciaria elétrica; pátio de tarugos; pátio de escória despoeiramento	160
Laminação	130
Expedição laminação	24
Downstream da laminação	40
Equipamentos – movimentação de materiais peças de reposição (milhões US\$)	
Movimentação de matérias primas	12
Peças de reposição	45
Equipamentos – auxiliares, utilidades (milhões US\$)	
Subestação elétrica	36
Central ar comprimido	1
Central de gases do ar	1
Central de gás natural	0
Utilidades gerais	10
Estações de tratamento de águas e esgoto	38
Terraplanagem, construção projeto de engenharia (milhões US\$)	
Despesas pré-operacionais	3
Terraplanagem, desenvolvimento do site tratamento de resíduos	6
Prédios infraestrutura	23
Projeto de engenharia	22
Tecnologia de baixo carbono (milhões US\$)	
Investimento em um transformador corrente contínua	8
CUSTO FINAL	
Custo total de instalação – usina siderúrgica (US\$ milhões)	549
Contingência (5% do custo total de instalação da planta)	27
Custo total do investimento (US\$ milhões)	584
Custo do investimento unitário – sem CAPEX recorrente (US\$/t)	584

Fonte: Elaboração própria (2017) baseada em USEPA (2012).

3.3.7 Tecnologia de baixo carbono – Sistema de pré-aquecimento de sucata com alimentação contínua do forno a arco elétrico (Sistema Consteel)

O sistema *Consteel* elimina o processo de carregamento tradicional através de cestões, uma vez que o carregamento de sucata é feito de forma contínua. Este sistema é composto basicamente de duas seções: uma de carregamento, outra de pré-aquecimento. O carregamento da sucata é feito em esteiras que estão dentro do túnel do sistema de despoeiramento. Os gases de exaustão do FEA passam pelo túnel de pré-aquecimento a uma temperatura regular acima de 900 °C e pré-aquecem a carga de sucata até uma temperatura na superfície superior a 600 °C, com uma temperatura média na faixa de 300 °C a 400 °C, dependendo do tipo da sucata (MEMOLI; FERRI; FREITAS, 2009).

Neste processo o forno irá operar com a abóbada fechada, sem a necessidade de utilizar carregamento com cestões. Um transportador de conexão curto retrátil, chamado “carro de conexão”, transfere a sucata pré-aquecida para o banho no forno.

Como o túnel de pré-aquecimento possui uma seção transversal maior que a de um duto de exaustão normal, a velocidade dos gases de exaustão na seção do túnel são muito menores que a velocidade em um FEA convencional. Isso significa que as partículas de pó maiores se depositam na parte inferior do túnel e são arrasadas pela sucata de volta ao forno. Desta forma, cerca de 20% a 30% do pó total produzido no FEA é reciclado, resultando em uma considerável redução de custos ambientais. A abóbada do FEA permanece fechada durante todo o tempo para reduzir perdas de energia e redução nas emissões de outros gases poluentes (MEMOLI; FERRI; FREITAS, 2009).

O forno com pré-aquecimento gera uma redução de 30–60 kWh/t_{aço} (USEPA, 2012). Foi adotado uma redução média de 45 kWh/t_{aço}, o que implica em uma redução do FE de eletricidade de 0,026 tCO₂/t_{aço}, totalizando uma redução de 4% das emissões do CR, desconsiderando as perdas de eletricidade na rede.

3.3.7.1 Custos de investimento – Sistema Consteel

Os investimentos estimados para uma planta com uma produção anual de 1.000.000t_{aço}/ano são da ordem de US\$ 573 milhões. O *pay back* estimado para este investimento é da ordem de 1,3 anos (USEPA, 2012, p. 34). Os custos detalhados se apresentam na Tabela 24.

Conclui-se que o custo de uma planta no CBC é 7 US\$/t_{aço} mais cara que no CR, preço devido justamente à implantação do forno com pré aquecimento e alimentação contínua da sucata.

3.3.7.2 Custos de operação – Sistema Consteel

O OPEX adotado para uma planta com um forno elétrico de corrente contínua foi o mesmo de uma planta de referência, US\$ 362/t_{aço}. Apesar de não reduzir o OPEX em relação à planta de referência, traria uma redução de custos de energia da ordem de 3,0 a 6,0 US\$/t_{aço} (USEPA, 2012). Ressalta-se que estes últimos valores não foram utilizados na análise, pois foram empregados os preços específicos da eletricidade para determinar o custo de eletricidade evitado com a tecnologia.

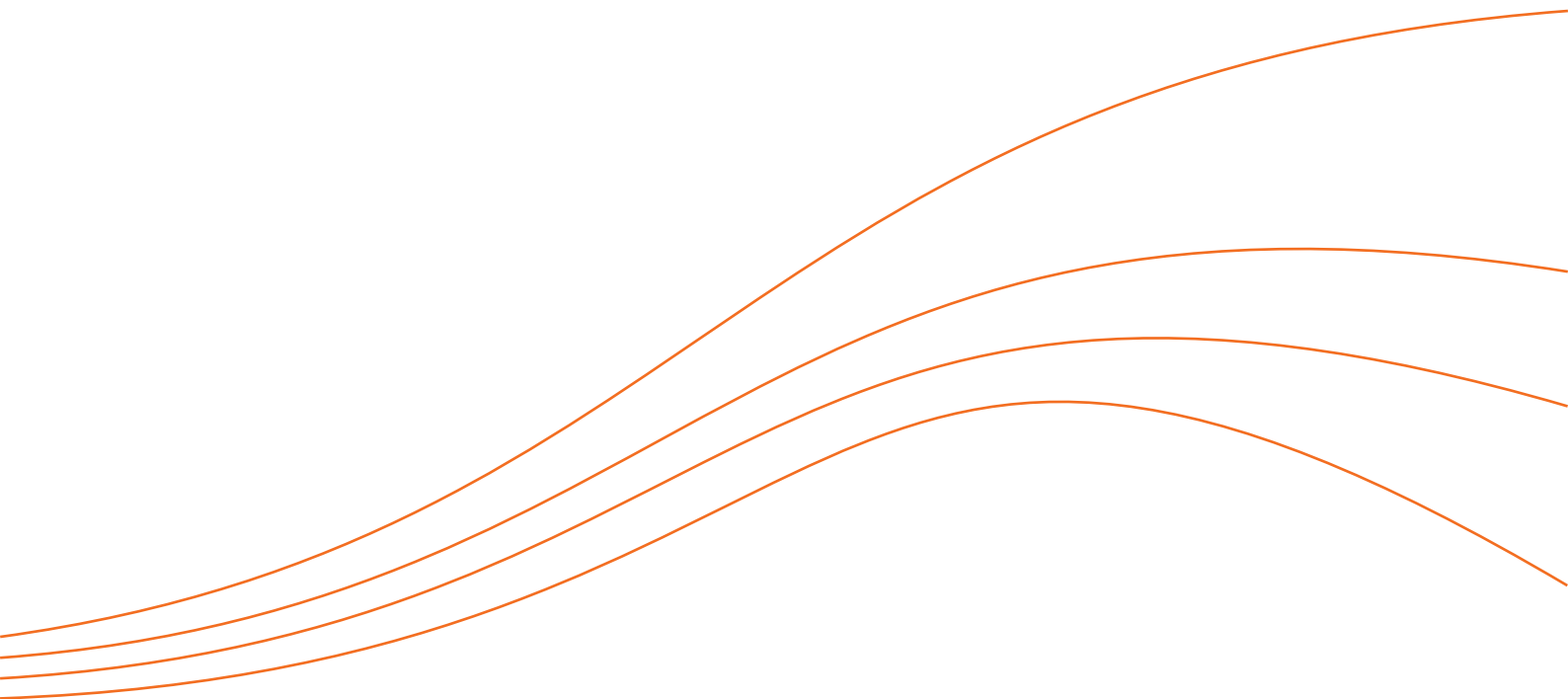
Tabela 24 – Custo de investimento para uma planta com forno com pré-aquecimento e alimentação contínua

Secção da planta	Custo
Equipamentos - principais processos (milhões US\$)	
Aciaria elétrica – pátio de sucata; aciaria elétrica; pátio de tarugos; pátio de escória despoejamento	160
Laminação	130
Expedição laminação	24
Downsternam da laminação	40
Equipamentos – movimentação de materiais peças de reposição (milhões US\$)	
Movimentação de matérias primas	12
Peças de reposição	45
Equipamentos – auxiliares, utilidades (milhões US\$)	
Subestação elétrica	36
Central ar comprimido	1
Central de gases do ar	1
Central de gás natural	0
Utilidades gerais	10
Estações de tratamento de águas e esgoto	38
Terraplanagem, construção projeto de engenharia (milhões US\$)	
Despesas pré-operacionais	3
Terraplanagem, desenvolvimento do site tratamento de resíduos	6
Prédios Infraestrutura	23
Projeto de engenharia	22
Tecnologia de baixo carbono (milhões US\$)	
Investimento em um forno com sistema Consteel	7
CUSTO FINAL	
Custo total de instalação – usina siderúrgica (US\$ milhões)	549
Contingência (5% do custo total de instalação da planta)	27
Custo total do investimento (US\$ milhões)	583
Custo do investimento unitário – sem CAPEX recorrente (US\$/t)	583

Fonte: Elaboração própria (2016) baseada em USEPA (2012).



Resultados e discussão



Neste capítulo, serão apresentados os resultados do cenário de redução das emissões (*Wedge Graph*), da curva MAC e da curva de BECP geradas na MACTool.

A partir da aplicação das tecnologias do CBC, é possível alcançar uma redução de 20,1 milhões de toneladas de CO₂, 14% em relação às emissões do CR na indústria siderúrgica até o ano de 2030. Esta redução tem participação predominante da tecnologia TGR com 95,7% do total das emissões evitadas, apesar de este só ser introduzido no CBC no ano de 2025 no cenário de funcionamento contínuo do alto-forno.

Neste estudo, a indústria de aço foi analisada através de suas duas rotas tecnológicas, integrada e semi-integrada, sendo que em ambas existem os três tipos de emissão: processo, energia elétrica e energia térmica. Na rota integrada é predominante a emissão de processo, enquanto que na rota semi-integrada existe uma maior participação das emissões de energia elétrica. As tecnologias de BC avaliadas no estudo

atuam sobre as emissões predominantes de cada rota, mantendo inalteradas as demais emissões⁸.

Em relação aos resultados econômicos, a tecnologia TGR apresenta MAC e BECP positivos, enquanto que as duas tecnologias de BC para o FEA apresentaram custos negativos (economia positiva). Os determinantes destes resultados serão aprofundados nos subitens 4.3 e 4.4.

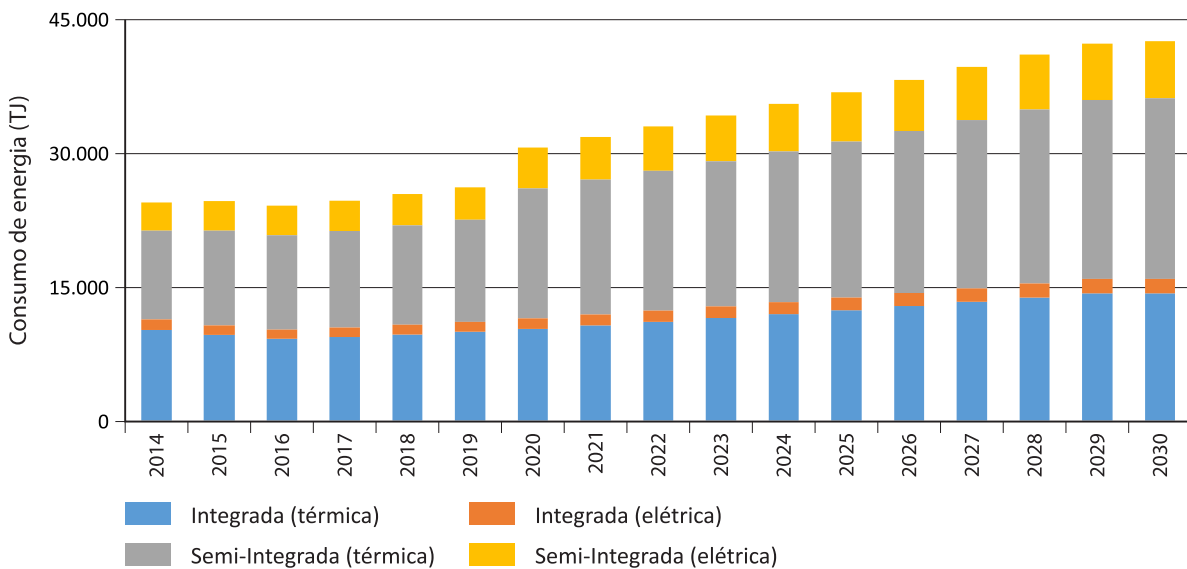
4.1 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS DE REFERÊNCIA E DE BAIXO CARBONO

Este item apresenta a comparação dos cenários de consumo de energia na indústria siderúrgica, a emissão de energia elétrica na rota semi-integrada e a emissão de processo na rota integrada.

4.1.1 Consumo energético

O Gráfico 10 apresenta o consumo por tipo de energia e por rota de aço. Observa-se que, apesar da participação da energia elétrica ser maior

Gráfico 10 – Consumo de energia no cenário de referência 2014–2030



Fonte: Elaboração própria (2017).

8. Faz-se uma ressalva à tecnologia TGR pois esta também gera uma economia energética por reciclagem de gases.

na rota semi-integrada quando comparada à integrada, em termos absolutos, a participação da energia térmica é predominante e se reflete diretamente sobre o cenário de emissão. As tecnologias de BC na rota semi-integrada tiveram como alvo o consumo de energia elétrica, que representa basicamente 15% do consumo total de energia no período.

4.1.2 Emissões pelo consumo de energia elétrica

A Tabela 25 mostra a comparação entre o consumo e as respectivas emissões da energia elétrica no CR e no CBC da rota semi-integrada.

Considerando que, juntas, as tecnologias de BC para a rota semi-integrada possuem uma capacidade de redução de 70 kWh/t_{aço}, no

Tabela 25 – Consumo de GEE decorrente do uso de energia elétrica projetada entre os cenários de referência e baixo carbono na rota semi-integrada

Ano	Rota semi-integrada CR		Rota semi-integrada CBC	
	Consumo	Emissão	Consumo	Emissão
	(GWh)	(tCO ₂)	(GWh)	(tCO ₂)
2014	876	603	876	603
2015	931	640	931	640
2016	929	638	929	638
2017	950	651	933	640
2018	978	670	961	658
2019	1.008	689	990	677
2020	1.282	876	1.222	835
2021	1.330	908	1.268	865
2022	1.380	941	1.294	882
2023	1.432	975	1.342	914
2024	1.485	1.010	1.393	947
2025	1.541	1.047	1.422	966
2026	1.599	1.085	1.476	1.001
2027	1.659	1.124	1.515	1.026
2028	1.715	1.160	1.565	1.059
2029	1.763	1.192	1.609	1.088
2030	1.780	1.202	1.625	1.097

Fonte: Elaboração própria (2017).

período de 2014 a 2030 ocorre uma redução de cerca de 1.287 GWh do CR para o CBC, o que resulta em uma redução de 873.000tCO₂ emitidas por esta rota.

4.1.3 Emissões geradas pelo processo na rota integrada

A Tabela 26 apresenta as emissões do CR e CBC geradas pelo processo de aço na rota integrada, considerando que, a partir de 2025, a tecnologia de BC, o TGR, reduz 55% das emissões do CR.

Com a implantação do TGR, as emissões de processo caem significativamente a partir de 2025, totalizando uma redução de 23% no CBC em relação ao CR.

Tabela 26 – Comparação das emissões projetadas de GEE decorrentes de processo entre os cenários de referência e baixo carbono na rota integrada

Ano	Rota integrada	
	CR	CBC
	(tCO ₂)	
2014	4.450.080	4.450.080
2015	4.196.425	4.196.425
2016	4.007.586	4.007.586
2017	4.097.757	4.097.757
2018	4.220.690	4.220.690
2019	4.347.310	4.347.310
2020	4.497.293	4.497.293
2021	4.665.941	4.665.941
2022	4.840.914	4.840.914
2023	5.022.448	5.022.448
2024	5.210.790	5.210.790
2025	5.406.195	2.432.788
2026	5.608.927	2.524.017
2027	5.819.262	2.618.668
2028	6.037.484	2.716.868
2029	6.241.500	2.808.675
2030	6.241.500	2.808.675

Fonte: Elaboração própria (2017).

4.2 EMISSÕES EVITADAS EM GRÁFICO DE CUNHA (WEDGE GRAPH)

A Tabela 27 e o Gráfico 11 apresentam as estimativas de emissões evitadas no cenário BC no período de 2014 a 2030.

A tecnologia TGR, na rota integrada, representa uma redução de 13,4% das emissões totais de CO₂ no CR de 2014 a 2030, causando o maior impacto no CBC. Isto se deve à alta capacidade de captura da tecnologia e ao volume de emissões que a rota integrada representa no total.

As medidas referentes à rota semi-integrada possuem uma participação consideravelmente menor, apesar de implantadas mais cedo, formando uma tênue linha no *Wedge Graph* (Gráfico 11). O principal motivo para este resultado foi a pequena capacidade destas tecnologias em reduzir o consumo de eletricidade, mesmo que tenha sido utilizado o FE de eletricidade para MDL, que é mais alto que a média da geração

elétrica nacional. Juntando estas duas tecnologias, em todo o período (2014–2030) a eletricidade poupada não chega a 1,5 milhão de MWh, isto incluindo as perdas da rede de transmissão e distribuição.

4.3 CURVA DE CUSTO MARGINAL DE ABATIMENTO (MAC)

A Tabela 28 apresenta resultados das oportunidades de mitigação relativas ao processo e ao consumo de eletricidade.

O Gráfico 12 apresenta a curva MAC para o setor de siderurgia.

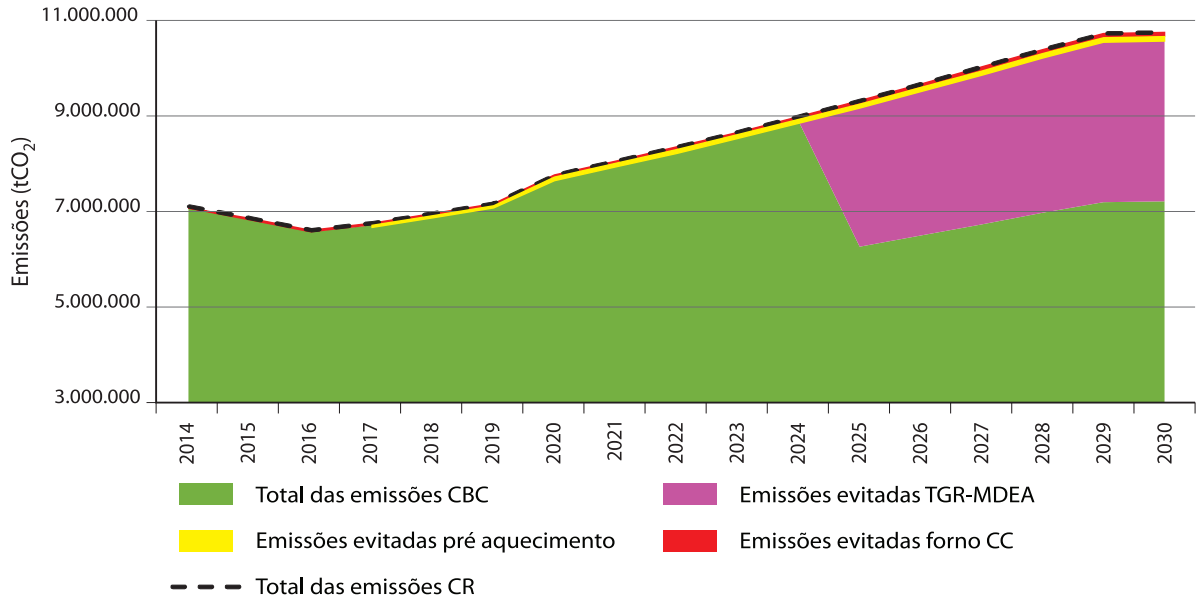
Apesar de seu impacto em relação à diminuição das emissões de CO₂ ser baixo, ambas as soluções referentes à rota semi-integrada são economicamente atrativas, pois apresentam valores negativos de MAC. Isto se justifica pela economia no consumo de eletricidade, que reduz os custos de energia no CBC, cobrindo o CAPEX

Tabela 27 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono

Ano	TGR-MDEA	FEA com pré-aquecimento e alimentação contínua	FEA com corrente contínua	Total das emissões do CBC	Total das emissões do CR
2014	0	0	0	7.078.116	7.078.116
2015	0	0	0	6.830.127	6.830.127
2016	0	0	0	6.581.044	6.581.044
2017	0	11.594	0	6.716.685	6.728.279
2018	0	11.927	0	6.917.337	6.929.264
2019	0	12.270	0	7.124.042	7.136.312
2020	0	41.016	0	7.696.018	7.737.034
2021	0	42.502	0	7.983.575	8.026.077
2022	0	47.086	11.609	8.267.223	8.325.918
2023	0	48.793	12.030	8.576.138	8.636.961
2024	0	50.561	12.466	8.896.596	8.959.623
2025	2.946.246	52.394	28.264	6.267.437	9.294.340
2026	3.056.730	54.292	29.288	6.501.250	9.641.560
2027	3.171.357	56.260	41.414	6.732.721	10.001.752
2028	3.290.283	58.299	42.699	6.974.670	10.365.951
2029	3.401.467	60.209	43.787	7.195.373	10.700.835
2030	3.401.467	60.166	44.291	7.218.595	10.724.520

Fonte: Elaboração própria (2017).

Gráfico 11 – Emissões evitadas pelas tecnologias de baixo carbono



Fonte: Elaboração própria (2017).

Tabela 28 – Custo marginal de abatimento e potencial de emissões evitadas

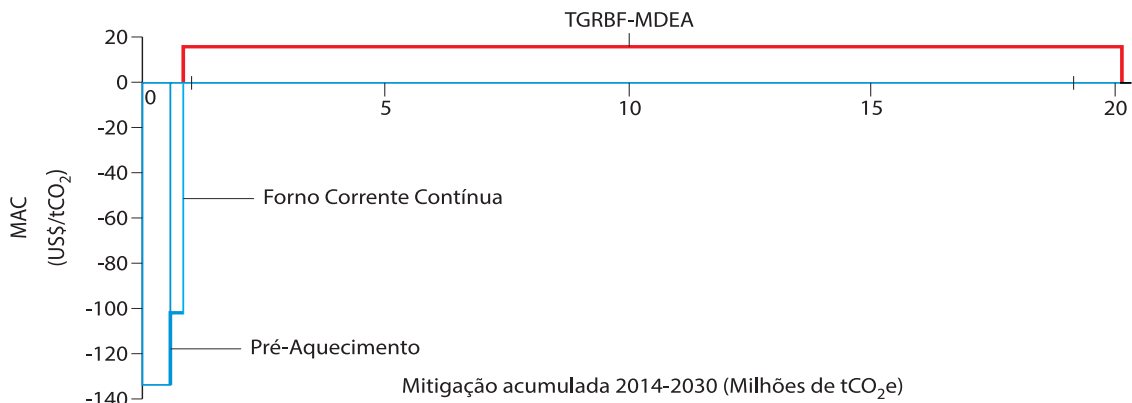
Setor	Atividade	Custo de abatimento	Emissões evitadas 2014–2030
		(US\$/tCO ₂)	(MtCO ₂)
Energia elétrica	Pré-aquecimento	-134	0,61
	Forno corrente contínua	-102	0,27
Processo	TGRBF-MDEA	16	19,27

Fonte: Elaboração própria (2017).

das tecnologias de BC, aliado ao fato de que não há aumento de OPEX do CR para o CBC.

A tecnologia TGRBF-MDEA apresentou MAC positivo, apesar disto o valor de 16 US\$/tCO₂ é relativamente baixo por conta da alta quantia de CO₂ evitado. Isto quer dizer que, se a capacidade de redução por esta tecnologia fosse menor, o custo-benefício aumentaria, tornando a tecnologia mais cara. Contudo, vale a pena ressaltar que os custos do armazenamento geológico do carbono não são considerados nesta análise.

Gráfico 12 – Curva de custo marginal de abatimento para o setor de siderurgia



Fonte: Elaboração própria (2017).

Somente considerando a implantação das tecnologias da rota semi-integrada, gera-se uma economia de 109 milhões de dólares no período de análise em relação ao CR, apesar da mitigação de CO₂ ser relativamente pequena em relação ao potencial total, como já explanado, os fornos representam apenas 4,3% deste potencial. Ao incluir o TGRBF-MDEA para se alcançar o potencial total de 20,15 milhões de tCO₂, os custos totais tornam-se positivos, subindo para 199 milhões de dólares.

4.4 PREÇO DE EQUILÍBRIO DE CARBONO (*BREAK-EVEN CARBON PRICE*)

A Tabela 29 apresenta o BECP para cada oportunidade de mitigação. O Gráfico 13 mostra a curva de BECP e o potencial de mitigação para cada medida considerada, o mesmo valor da curva MAC.

A partir dos resultados, conclui-se que as medidas da rota semi-integrada (pré-aquecimento e corrente contínua) mantêm preços de equilíbrio negativo. Apenas o TGRBF-MDEA não resulta na taxa interna de retorno esperada, por isso seria necessário vender cada tonelada de carbono por US\$ 95/t para

Tabela 29 – Break-Even Carbon Price

Setor	Atividade	Break-Even Carbon Price (BECP)	Emissões evitadas 2014-2030
		(US\$/tCO ₂)	(MtCO ₂)
Energia elétrica	Pré-aquecimento	-288	0,61
	Forno corrente contínua	-229	0,27
Processo	TGRBF-MDEA	95	19,27

Fonte: Elaboração própria (2017).

que a tecnologia se torne atrativa, considerando uma taxa de atratividade de 15%.

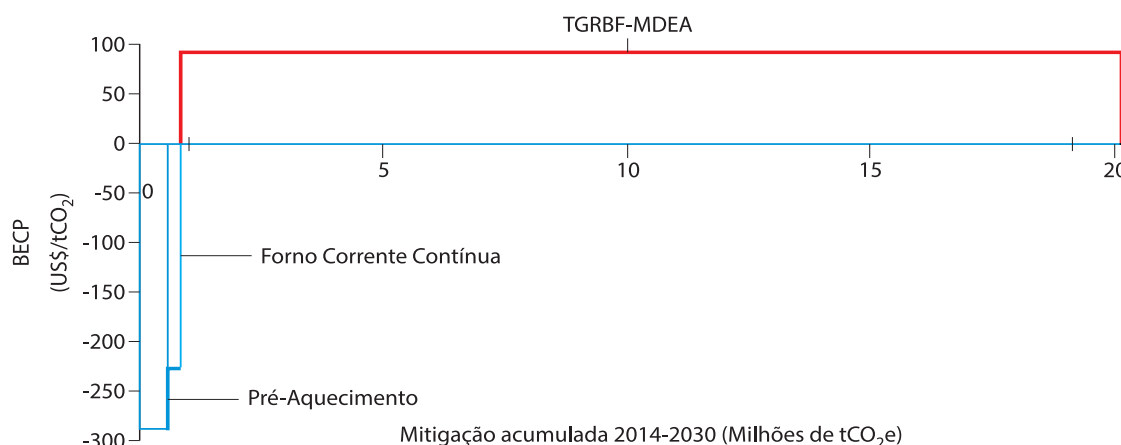
O Gráfico 13 apresenta a curva de BECP para o setor de siderurgia.

Para o BECP, a ordem das medidas em relação ao custo não foi alterada quando comparadas com o MAC. No entanto, a ordem de grandeza dos valores aumentou, em decorrência da taxa de atratividade ser maior do que a taxa de desconto.

4.5 CENÁRIO DE DESLIGAMENTO DO ALTO-FORNO

Foi realizada uma análise adicional no estudo onde foi estabelecido como hipótese a desativação do alto-forno que se encontra instalado na Baixada Santista no período de 2016 a 2021,

Gráfico 13 – Curva de Break-Even Carbon Price para o setor de siderurgia



Fonte: Elaboração própria (2017).

com reativação a partir de 2022. Sendo assim no CBC, a hipótese formulada neste estudo exploratório é tecnologia TGRBF MDEA, que poderia vir a ser implantada a partir da reativação do forno.

Neste cenário, o alto-forno localizado na Baixada Santista é desligado, mas o processo de laminação continua ativo, portanto sua emissão é reduzida. Para cada tonelada de aço foi estimado a utilização de 402 kWh de energia elétrica (EPE, 2009) e utilização de gás natural para os diversos processos de aquecimento, totalizando 3,9 GJ. A Tabela 30 apresenta os FE e a emissão total para o desligamento do alto-forno.

Tabela 30 – Fatores de emissão para rota integrada no cenário de fechamento do alto-forno instalado na Baixada Santista

Tipo	FE
	(tCO ₂ /t _{aço})
Combustíveis	0,221
Energia elétrica	0,054
Total	0,275

Fonte: USEPA (2009), EPE (2009), Marks (2006).

Somente a desativação do alto-forno em relação ao CR originalmente proposto geraria uma redução total de 28,7 milhões de tCO₂, 20% das emissões projetadas para o CR normal. Juntamente com o TGRBF-MDEA, o CBC permitiria uma redução adicional de 28,3 milhões, totalizando 57 milhões de tCO₂ no período, o que representa 39,7% da emissão total do setor siderúrgico entre 2014 a 2030, considerando o CR normal.

A Tabela 31 apresenta os valores base do *wedge graph*, destacando o período de desativação do alto-forno.

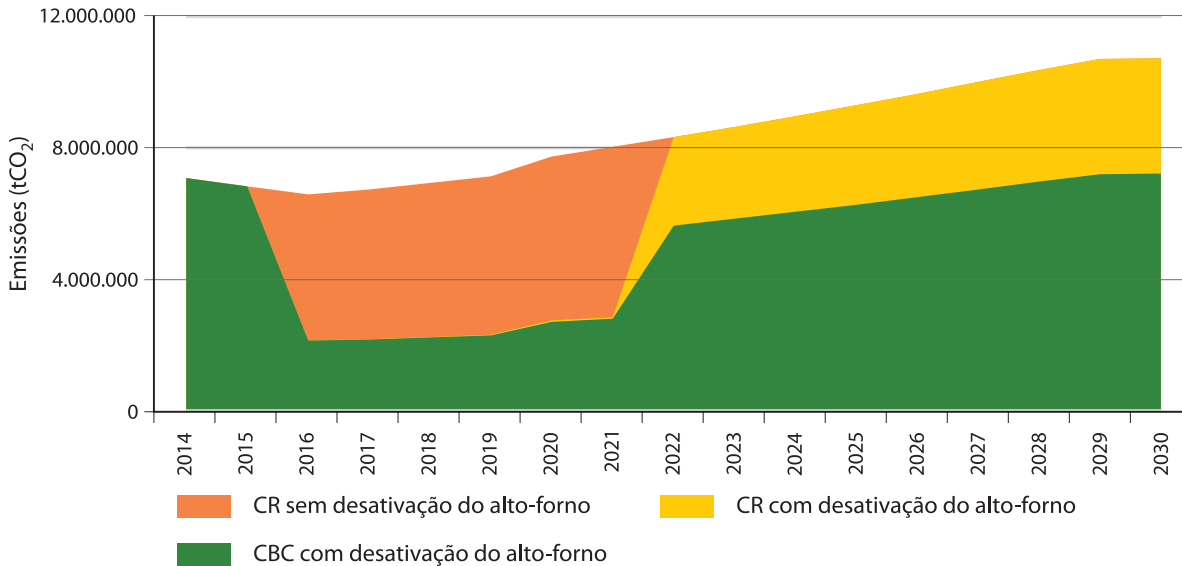
O Gráfico 14 apresenta as emissões evitadas comparando o CR do cenário sem desativação e o CR e CBC do cenário com desativação do alto-forno.

Em relação ao custo de abatimento, a tecnologia TGRBF-MDEA neste cenário apresenta um MAC de 18 US\$/tCO₂, 2 dólares mais cara que a mesma no cenário normal. Uma das explicações para este resultado é o fato da implantação ocorrer mais cedo, o que aumenta o custo total em termos de valor presente líquido dentro do período analítico.

Tabela 31 – Comparação dos cenários de emissão com e sem desativação do alto-forno 2014–2030

Ano	CR (sem desativação do alto-forno)	CR (com desativação do alto-forno)	CBC (com desativação do alto-forno)
	(GgCO ₂)		
2014	7.078	7.078	7.078
2015	6.830	6.830	6.830
2016	6.581	2.133	2.133
2017	6.728	2.180	2.168
2018	6.929	2.244	2.232
2019	7.136	2.311	2.298
2020	7.737	2.745	2.704
2021	8.026	2.847	2.804
2022	8.326	8.326	5.629
2023	8.637	8.637	5.839
2024	8.960	8.960	6.057
2025	9.294	9.294	6.267
2026	9.642	9.642	6.501
2027	10.002	10.002	6.733
2028	10.366	10.366	6.975
2029	10.701	10.701	7.195
2030	10.725	10.725	7.219

Fonte: Elaboração própria (2017).

Gráfico 14 – Comparação dos cenários de emissão com e sem desativação do alto-forno 2014–2030

Fonte: Elaboração própria (2017).

Por outro lado, o BECP de 81 US\$/tCO₂ apresenta-se menor do que seria no cenário normal. Um dos motivos é que a quantidade de CO₂ evitada neste caso é superior ao valor do cenário normal, e como ela é considerada uma receita na análise de BECP, o custo por tonelada de CO₂ acaba diminuindo.

Apesar da modelagem realizada, no momento de realização deste estudo, a data de retorno do alto-forno permaneceu incerta. Uma das possibilidades seria que ele retornasse em 2017, neste caso, a diferença entre o cenário principal e alternativo seria mínima. Se o alto-forno permanecesse desativado, considerando sua capacidade máxima de produção, seriam evitados anualmente 6,9 milhões de tCO₂, o que totalizaria 104 milhões de tCO₂ em um período de 15 anos, até o final de 2030.

4.6 RECOMENDAÇÕES PARA POLÍTICAS DE MEIO AMBIENTE

Na experiência brasileira, deve-se mencionar o “Plano Indústria”, coordenado pelo Ministério de

Desenvolvimento, Indústria Comércio Exterior (MDIC) (BRASIL, [2010?]). Em 2012, foram analisadas as indústrias de alumínio, cimento, papel celulose, química. Em 2013, foram contempladas as indústrias de ferro gusa aço, cal, vidro. Em conjunto, eles foram responsáveis, em 2005, por quase 90% das emissões diretas de GEE da indústria de transformação e por mais da metade das emissões derivadas da queima de combustíveis fósseis na indústria. Posteriormente, se procederá à incorporação progressiva de todos os demais setores da indústria de transformação até 2020.

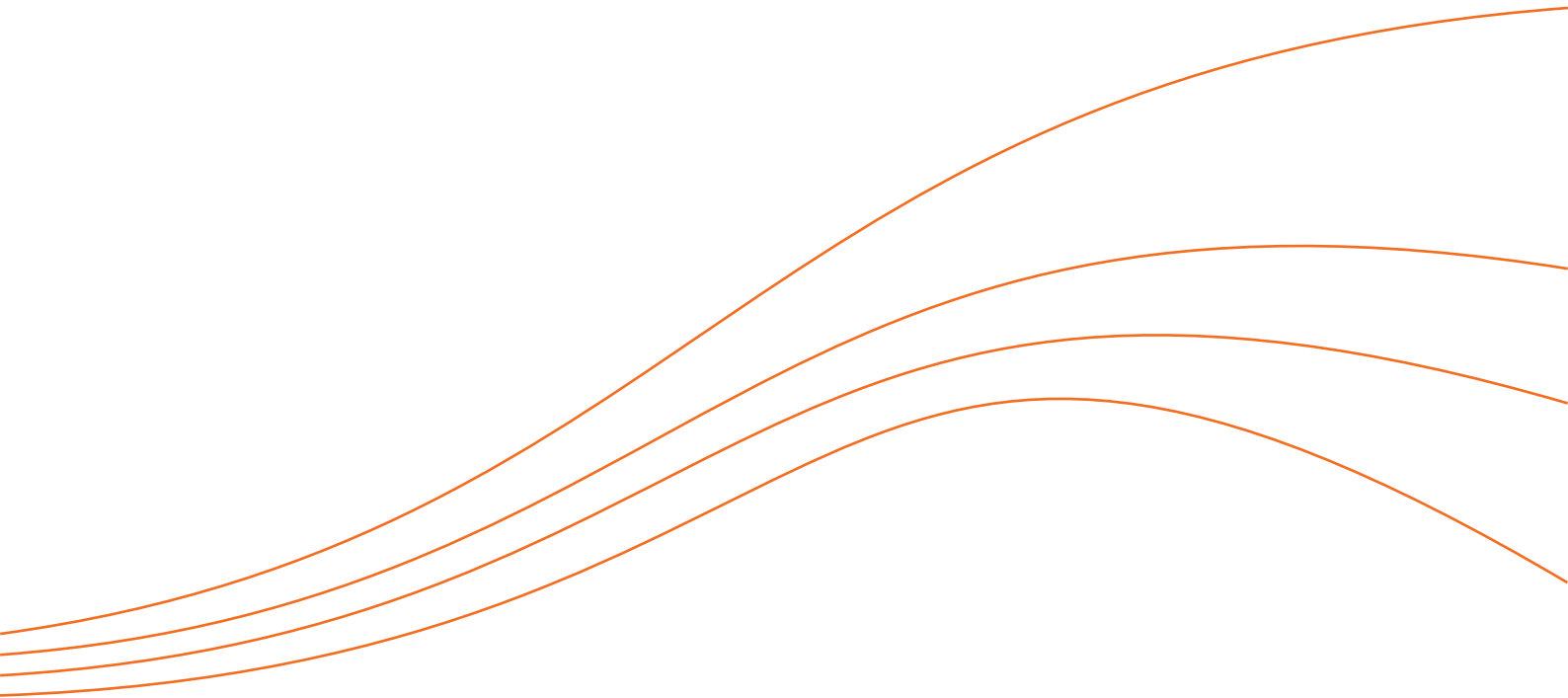
O ‘Plano Indústria’ adota como referência a meta de redução das emissões de processos industriais e uso de energia de 5% em relação ao cenário de referência projetado para 2020. Assim, trata-se de um programa baseado na emissão específica de CO₂ não da emissão absoluta de CO₂, que tenderia a ser mais restritivo para a expansão da produção industrial brasileira. O plano de ação contempla as seguintes medidas (COMIN, 2012):

a) fomentar a gestão de carbono na indústria:

- garantir a realização de inventários de emissões pelas grandes empresas, e apoiar levantamentos simplificados padronizados para pequenas médias empresas;
 - desenvolver política metrológica de mensuração de emissões de processos industriais;
 - criar banco de dados de FE;
 - capacitar técnicos para a coleta de dados de emissão das plantas.
- b) Promover o aumento da reciclagem o aproveitamento de coprodutos:
- avaliar as barreiras regulatórias propor alterações no marco regulatório;
 - estabelecer tratamento tributário diferenciado.
- c) Promover a eficiência energética a cogeração na indústria:
- criar selo de eficiência energética para bens de capital;
 - implantar as ações do Plano Nacional de Eficiência Energética relativas ao setor industrial;
- promover pesquisa e desenvolvimento (P&D) em eficiência energética dos processos industriais.
- d) Facilitar o desenvolvimento a disseminação de tecnologias de BC:
- criar banco de dados de tecnologias de BC;
 - criar sistema expresso (*fast-track*) para concessão de patentes de tecnologias de BC;
 - facilitar a transferência de tecnologias de BC.
- e) Manter a eficiência em carbono:
- estabelecer requisitos de eficiência energética de emissões na concessão de financiamento para novos investimentos;
 - estabelecer taxas de juros diferenciadas com base na eficiência em emissões.
- Estas medidas, se levadas a cabo, já correspondem a um bom cardápio de ações concretas para adequar a indústria, em geral, a siderurgia, em particular, ao paradigma da economia de baixo carbono, além das tecnologias exploradas neste trabalho.



Conclusão



As emissões de gases de efeito estufa pelo seu potencial de impacto nas mudanças globais do clima, estão correlacionadas diretamente com a energia e a conservação de recursos, pois as emissões significam perda de matéria e energia, que poderiam ser reduzidas. Como no processo de produção do aço ainda não é possível eliminar a geração de GEE, estas devem ser mitigadas, de forma a minimizar seus potenciais impactos à mudança do clima. A taxa de emissão de CO₂ situa-se, atualmente, entre 1.510 a 1.950 kg/taço bruto nas usinas integradas a coque e 450 a 600 kg/taço bruto nas usinas semi-integradas (CGEE, 2010).

A siderurgia usa o coque para geração de energia, no caso de usinas integradas, e como agente redutor do minério de ferro. Posteriormente, uma fração deste carbono, presente no coque é incorporada aos produtos e a outra parte após a combustão é emitida na forma de CO₂. O processo de produção de ferro gusa (coqueria, sinterização alto-forno) é a etapa que mais consome energia em usinas integradas, em grande medida devido ao uso do coque como agente redutor na transformação do minério de ferro em ferro gusa. No processo siderúrgico as outras fontes de carbono, além do carvão e coque, podem ser óleo diesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural. As usinas semi-integradas não têm a etapa de redução, conseqüentemente, consomem carbono basicamente para fins de ajustes metalúrgicos energéticos (IABr, 2010b).

No âmbito mundial e no Brasil, os agentes mais críticos nas discussões setoriais acerca de alterações do clima têm sido os governos, as associações empresariais e as entidades técnico-científicas. No caso dos governos, as regulações sobre mudança climática são bastante distintas entre os países (GUTIERREZ, 2010 apud DE PAULA, 2012). Dentre os esquemas mais restritivos impostos até agora, se destacam os adotados na União Europeia e Austrália.

No âmbito de cada região ou país, observam-se o envolvimento de instituições empresariais ou mesmo de companhias siderúrgicas. As principais iniciativas visando ao desenvolvimento de inovações radicais para a diminuição das emissões de CO₂ na siderurgia (BASSOM, 2012 apud DE PAULA, 2012) estão sendo levados a cabo através dos seguintes projetos e ou iniciativas:

- a) União Europeia (projeto ULCOS);
- b) Japão (Projeto COURSE 50, coordenado pelo *Japan Iron and Steel Federation – JISF*);
- c) Estados Unidos (esforço coordenado pelo *American Iron and Steel Institute – AISI*);
- d) Coreia do Sul (iniciativa da Posco);
- e) Austrália (esforço da *BlueScope OneSteel* coordenação da *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation – CSIRO*);
- f) Taiwan (iniciativa da *China Steel*).

A siderurgia brasileira não possui escala econômica, nem tampouco capacitação tecnológica, para levar a cabo projetos cooperativos da abrangência do ULCOS (União Europeia) COURSE 50 (Japão), embora possa vir a participar de projetos cooperativos internacionais, se estes vierem a ser desenvolvidos. Além disso, cerca de 60% de sua capacidade encontra-se em poder de empresas estrangeiras, que tendem a privilegiar o desenvolvimento tecnológico em seus países de origem.

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

necessárias algumas décadas para a completa eliminação dos altos-fornos (DE PAULA, 2012). Por outro lado, a interrupção do alto-forno na Baixada Santista seria uma oportunidade para se cogitar a introdução de uma tecnologia mais sustentável.

Contudo, a siderurgia tem se mostrado como uma indústria com poucas inovações radicais, sendo que as principais estratégias empresariais, como fusões, aquisições, internacionalização produtiva, não são motivadas por aspectos tecnológicos ou ambientais. Apesar disso, a tecnologia de Captura e Armazenagem de Carbono (*Carbon Capture and Storage* – CCS), que representa uma alternativa para sequestrar o CO₂ gerado no alto-forno, tende a apresentar uma difusão maior a partir de 2030 uma vez que os estudos confirmem a sua viabilidade técnico-econômica, e poderá ser incorporado tanto nos processos emergentes de produção de ferro primário, quanto nos altos-fornos (em construção em reforma). Nesse sentido, o alto-forno tende a manter sua hegemonia em termos de processo de fabricação de ferro primário, até porque a tecnologia CCS tende a otimizar o seu desempenho energético e ambiental (DE PAULA, 2012).

Outro aspecto importante relacionado a investimentos e inovação na indústria é a conjuntura estrutural econômica, seja a do Brasil ou a do mundo, pois ambas estão inter-relacionadas. No Brasil, a conjuntura adversa da indústria do aço se iniciou com a crise econômica de 2008. Antes desta data, a indústria siderúrgica possuía planos ambiciosos de crescimento. Na época haviam expansões confirmadas que totalizavam 13,9 milhões de toneladas ano, o que levaria a capacidade instalada no Brasil no ano de 2015 para 49,8 milhões de t/ano. Neste mesmo período, haviam investimentos não confirmados que somavam mais 26 milhões de toneladas ano, o que poderia levar a capacidade instalada no Brasil para mais de 70 milhões de t/ano até 2020.

Atualmente, o Brasil tem uma capacidade instalada em 2014 de 48,8 Mt/ano para uma produção de 33,9 Mt/ano 2014 um consumo aparente interno de 25,6 Mt/ano exportações totalizando 9,78 Mt/ano (IABR, 2014).

A situação da indústria siderúrgica foi agravada pelas importações diretas indiretas de aço, na sua maioria, provenientes da China. As importações no ano de 2015 deverão atingir 4,0 milhões de toneladas, representando alta de 0,8% comparativamente a 2014. As exportações de produtos siderúrgicos da China deverão atingir 100 milhões de toneladas este ano, o que corresponde a quatro vezes o consumo de aço no Brasil (IABR, 2015).

No mundo, o maior problema enfrentado pela indústria do aço é o excesso de capacidade de produção da ordem de 719 milhões de toneladas, que tem pressionado, globalmente, preços e margens. A maior parte deste excedente de capacidade encontra-se na China, país que conta, principalmente, com subsídios governamentais que propiciam vantagens de custos indevidos.

O 32º Informativo do IABR comenta que a indústria brasileira do aço vive a pior crise da sua história. No acumulado 2014-2015, 29.740 colaboradores foram demitidos. Os indicadores refletem a convergência de fatores conjunturais e estruturais que já levaram o setor a paralisar ou desativar 74 unidades de produção, sendo quatro altos-fornos.

A exportação seria um caminho para melhorar o grau de utilização de capacidade instalada em 2016, da ordem de 60%, mas o setor convive com excedentes de capacidade internacional que ultrapassam 700 milhões de toneladas e levam a práticas desleais de comércio com preços depreciados. Com a queda dos preços internacionais do aço, o resultado do faturamento das exportações em dólares de 2015 foi 3,3% menor, o que significa que o aumento em volume das exportações não trouxe ganhos ao setor em receita (IABR, 2015a).

Estes fatores estruturais conjunturais citados anteriormente fazem com que os investidores priorizem a competitividade e a sobrevivência. Os planos e iniciativas relacionados à mitigação dos GEE, neste contexto, passam a ter menor relevância para a indústria, apesar de estarem na pauta que é relatada através do Relatório de Sustentabilidade, publicado anualmente pelo IABr (2012).

As premissas adotadas para a indústria até 2030 foram definidas com relação a: volumes de produção física, custos dos insumos (matérias primas e energia), os FE, custos de CAPEX e OPEX para cada uma das rotas tecnológicas, tanto para o CR como para o CBC.

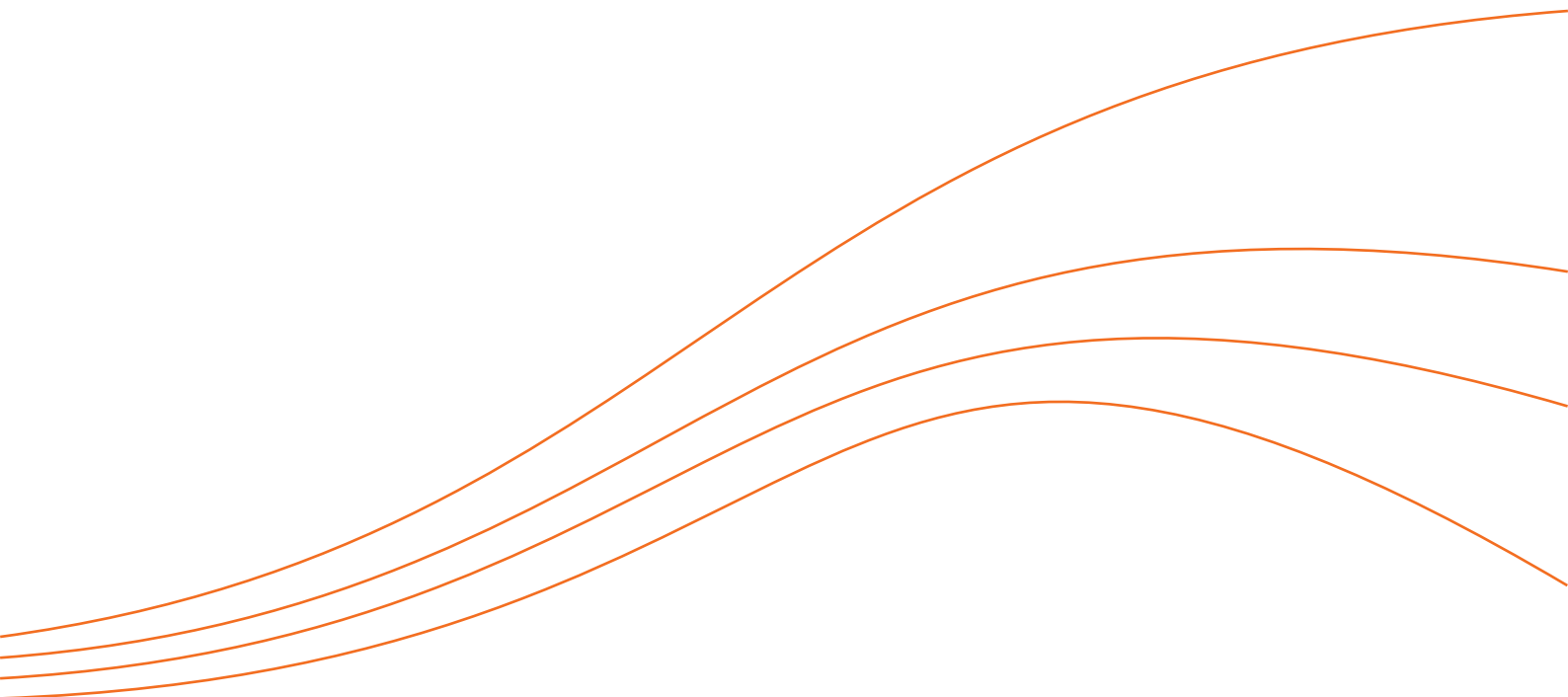
Na análise das tecnologias sugeridas para o CBC, as maiores emissões evitadas são as que estão relacionadas ao processo de redução do minério de ferro pelo alto-forno. A tecnologia TGRBF-MDEA no cenário normal da indústria, representa uma redução de 19 milhões de tCO₂ até 2030, ou seja, 13,4% das emissões do

CR da indústria siderúrgica. Enquanto que os fornos da rota semi-integrada reduzem apenas 873 mil tCO₂, o que equivale a menos de 1% das emissões do CR.

A partir dos resultados apresentados na curva MAC, estima-se, dentro das premissas adotadas neste estudo exploratório, que, para atingir o potencial total de mitigação avaliado, serão gastos US\$ 199 milhões até o ano de 2030. Sobre a curva BECP, estima-se, dentro das premissas adotadas neste estudo exploratório que as tecnologias na rota semi-integrada trazem um retorno acima de 15% (*Benchmark-TIR*), portanto são investimentos atrativos. Todavia, se considerarmos o cenário em que o alto-forno permanece desativado até o final do período, 15 anos, seriam evitados aproximadamente 104 MtCO₂. Neste cenário, a tecnologia TGRBF-MDEA apresenta valores distintos de MAC e BECP.



Referências



- ABM. **Siderurgia para não-siderurgistas**. São Paulo: ABM, [2003?]. 1 recurso didático do curso. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABfVgAL/abm-siderurgia-nao-siderurgistas#>>. Acesso em: abr. 2017.
- ABREU, G. C. **Redução das emissões de gases de efeito estufa através do processo de fabricação do sínter**. 2011. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia, UNESP, Guaratinguetá, SP, 2011. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/106434/abreu_gc_dr_guara.pdf?sequence=1>. Acesso em: abr. 2017.
- ANDRADE, M.L., CUNHA, L.M., GANDRA, G. (2000a), “A ascensão das mini-mills no cenário siderúrgico mundial”. In: **BNDES Setorial n.12**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Rio de Janeiro, pp. 51–76.
- BCG. **Mercado de aços longos e opções de crescimento para VM**. Boston Consulting Group. São Paulo, 2004.
- BIRAT, J.P. **Steel sectoral report: contribution to the UNIDO roadmap on CCS: fifth draft. Version 5**. Amsterdam: UNIDO, 2010. Draft — provisory and confidential. Disponível em: <https://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Energy_and_Climate_Change/Energy_Efficiency/CCS/Steel_sectoral_%20report.pdf>. Acesso em: abr. 2017.
- BNDES. **Manual da TJLP: Taxa de Juros de Longo Prazo**. Rio de Janeiro, 2011. 6 p. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/tjlp.pdf>. Acesso em: set. 2016.
- BNDES. **Taxa de Juros de Longo Prazo – TJLP: evolução (% a.a)**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Ferramentas_e_Normas/Custos_Financeiros/Taxa_de_Juros_de_Longo_Prazo_TJLP/>. Acesso em: set. 2016.
- BRASIL. **Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010**. Regulamenta os arts. 6, 11 e 12 da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, e dá outras providências. Com alterações posteriores. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7390.htm>. Acesso em: abr. 2017.
- BRASIL. **Federative Republic of Brazil – INDC**. Submetido à UNFCCC em 28 de setembro de 2015. Disponível em: <<http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. Com mensagem de veto. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/112187.htm>. Acesso em: abr. 2017.
- BRASIL. MCTI. **Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil**. Brasília, DF, [2016?]. Disponível em: <http://www.mcti.gov.br/index.php/content/view/72764/Fatores_de_Emissao_de_CO_

sub_2_sub__pela_geracao_de_energia_eletrica_no_Sistema_Interligado_Nacional_do_Brasil.html>. Acesso em: abr. 2017.

BRASIL. MDIC. **Plano Setorial de Reduções de Emissão na Indústria (Plano Indústria)**: introdução. Brasília, [2010?]. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/acoes-e-programas-3/mudanca-do-clima/plano-industria/introducao>>. Acesso em: abr. 2017.

BRASIL. MME. EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2023**. Brasília, DF, 2014. 434 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023.pdf>>. Acesso em: set. 2016.

CETESB. **1º Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo**. 2.ed. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://inventariogeosp.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/01/Primeiro_Inventario_GEE_WEB_Segunda-Edicao-v1.pdf>. Acesso em: set. 2016.

CETESB. **Emissões no setor de processos industriais e uso de produtos 1990 a 2008**: relatório de referência. São Paulo, 2013. 318 p. (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>. Acesso em: set. 2016.

CETESB. **Inventário das emissões de CO₂ por queima de combustíveis no estado de São Paulo, 1990 a 2008: abordagem de referência (top down)**. São Paulo, 2010. (1º relatório de referência do Estado de São

Paulo de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa, período de 1990 a 2008). Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/30/2014/04/referencia.pdf>>. Acesso em: set. 2016.

CGEE. **Estudo prospectivo do setor siderúrgico**. Panorama do setor siderúrgico: 2008. Brasília Centro de gestão e estudos estratégicos 2008, 32p.

CGEE. **Siderurgia no Brasil 2010–2025**: subsídios para tomada de decisão. Brasília: CGEE, 2010. 112p. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/publicacoes/documentos_tecnicos.php>. Acesso em: ago. 2015.

COMIN, A. Plano indústria. In: **Congresso Internacional do Alumínio**, 5., 2012, São Paulo. São Paulo: ABAL, 2012.

DE PAULA, G. M. Siderurgia. In: TONETO JR., Rudinei; PINHO, Marcelo (Org.). **Economia de baixo carbono**: impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a economia brasileira. Ribeirão Preto: FUNPEC, 2015. p. 153–182. Disponível em: <http://www.sef.usp.br/wp-content/uploads/sites/33/2015/07/Economia_de_Baixo_Carbono.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

EIA. Electricity market module. In: **Assumptions to the annual energy outlook 2015**. Washington, DC, 2015. Section 7, p. 102–127. Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/assumptions/pdf/electricity.pdf>>. Acesso em: set. 2016.

EPE. **Balanço energético nacional**: ano base 2013 = **Brazilian energy balance**: year 2013. Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: set. 2016.

- EPE. **Nota técnica DEA 02/09:** caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro. Rio de Janeiro, 2009. (Série Estudos de Energia). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20090430_2.pdf>. Acesso em: set. 2016.
- EUROPEAN COMMISSION. **ULCOS Top Gas Recycling BlastFurnace Process (ULCOS TGRBF)**. Brussels, 2014. (EUR 26414). Disponível em: <http://bookshop.europa.eu/bg/ulcos-top-gas-recycling-blast-furnace-process-ulcos-tgrbf--pbKINA26414/downloads/KI-NA-26414-EN-N/KINA26414ENN_002.pdf;pgid=y8dIS7GUWMdSR0EAlMEUUsWb0000sKPM7Kup;sid=BhWJ01WbYxSJ8wapFvMXdDe-AcaPABj4GGc=?FileName=KINA26414ENN_002.pdf&SKU=KINA26414ENN_PDF&CatalogueNumber=KI-NA-26414-EN-N.>>. Acesso em: abr. 2017.
- GOMEZ, D. R. *et al.* Stationary combustion. In: IPCC. **2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories**. Hayama, JP: IPCC: IGES, 2006a. v. 2: Energy, chap. 2. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf>. Acesso em: abr. 2017.
- GOUVELLO, C. de *et al.* **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Washington, DC: Banco Mundial: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento, 2010. 280 p. Disponível em: <http://siteresources.worldbank.org/BRAZILINPOREXTN/Resources/3817166-1276778791019/Relatorio_Principal_integra_Portugues.pdf>. Acesso em: set. 2016.
- HANAOKA, T. **AIM Enduse Model Manual**. Asia-Pacific Integrated Model, Interim Report. 2015. 151 p. Disponível em: <http://www-iam.nies.go.jp/aim/data_tools/enduse_model/aim_enduse_manual.pdf>. Acesso em: abr. 2017.
- HOOEY, L. *et al.* Techno-economic study of an integrated steelworks quipped with oxygen blastfurnace and CO₂ capture. **Energy Procedia**. v. 3, p. 7139–7151, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213008941>>. Acesso em: fev. 2017.
- IABr. Indústria brasileira do aço enfrenta sua pior crise: carta do 26º Congresso Brasileiro do Aço. **Aço Brasil Informa**, Rio de Janeiro, ed. 29, jul. 2015. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/siderurgiaemfoco/Aco_Brasil_Informa_Jul15_web.pdf>. Acesso em: abr. 2017.
- IABr. Indústria do aço deve demitir mais 11.332 no 1º semestre. **Aço Brasil Informa**, Rio de Janeiro, ed. 32, mar. 2016. 7 p. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/siderurgiaemfoco/Aco_Brasil_Informa_MAR%2016.pdf>. Acesso em: abr. 2017.
- IABr. **Mercado brasileiro do aço: análise setorial regional**. Rio de Janeiro, 2014.
- IABr. **Relatório de sustentabilidade 2012**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf>. Acesso em: abr. 2017.
- IABr. **Relatório de sustentabilidade 2013**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/sustentabilidade/downloads/>>

relatorio_sustentabilidade_2013v3.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

IABr. Vendas de aço no Brasil devem cair mais de 16% em 2015. 31º Informativo do IABr. Dez. 2015a. 5 p. Arquivo pdf. Disponível em: NEDO. **Global warming countermeasures: japanese technologies for energy savings/ GHG emissions reduction.** Rev. ed. Kanagawa, JP, 2008. 357 p. Disponível em: <http://ietd.iipnetwork.org/sites/ietp/files/Japanese%20Technologies%20for%20Energy%20Saving.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

IPCC. Emission scenarios: summary for policymakers. Geneva, 2000. (Special Report). Disponível em: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.php?idp=0>. Acesso em: set. 2016.

KURAMOCHI, T. *et al.* Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 1, p. 87–112, feb. 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Takeshi_Kuramochi/publication/251576085_Comparative_assessment_of_CO2_capture_technologies_for_carbon-intensive_industrial_processes._Progress_in_Energy_Combustion_38_87-112/links/54cf13420cf24601c092c63c.pdf?inViewer=true&disableCoverPage=true&origin=publication_detail>. Acesso em: abr. 2017.

LANDIM, R. Fraco desempenho nas vendas faz Gerdau parar produção em 5 unidades. **Folha de S. Paulo**, São Paulo, 18 dez. 2014. Disponível em: <http://www1.folha.uol.com.br/

mercado/2014/12/1564097-gerdau-para-a-producao-em-5-unidades.shtml>. Acesso em: abr. 2017.

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

MATSUURA, H. *et al.* Development of a decarburization and slag formation model for electric arc furnace. **ISIJ International**, v. 48, n. 9, p. 1197–1205, 2008. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/48/9/48_9_1197/_pdf>. Acesso em: abr. 2017.

MCM. Consumo de Aços Longos: modelos de projeção VM. MCM Consultores Associados. Março 2006.

MEMOLI, F.; FERRI, M. B.; FREITAS, J. V. Aumento das plantas Consteel® no mundo: flexibilidade para carga contínua de gusa líquido sucata no forno elétrico a Arco agora na siderurgia brasileira. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 54–60, jul.-set. 2009. Disponível em: <http://tecnologiamm.com.br/files/v6n1/v6n1a10.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

OLIVEIRA, F.N., SOLERRO, L.P.V. (2014), **Consumo de Aço no Brasil: um modelo baseado na técnica da intensidade do uso.** Trabalhos para discussão nº358, Banco Central do Brasil, Brasília, 2014, pp. 1-66.

Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/pec/wps/port/TD358.pdf>>. Acesso em: fev.2018.

PACALA, S.; SOCOLOW, R. Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*, Washington, DC, v. 305, n. 5686, p. 968–972, aug. 2004. Special section: Toward a hydrogen economy: review. DOI: 10.1126/science.1100103. Disponível em: <http://fire.pppl.gov/energy_socolow_081304.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

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.

RIBEIRO, I. SIMEC mantém projeções de vendas apesar de mercado interno fraco. **Valor Econômico**, 9 set. 2016. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/empresas/4703817/simec-mantem-projecoes-de-vendas-apesar-de-mercado-interno-fraco>>. Acesso em: abr. 2017.

RIZZO. **Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno**. ABM. 2009. 278p.

SANTOS, S. *et al.* **Techno-Economic evaluation of deploying economic evaluation of deploying CO₂ capture in an integrated steel mill**. [S.L.: s.n., 2013?]. 54 slides, color. PDF. Presented on Clean Coal Technology Conference, Thessaloniki, Greece, may 2013. Disponível em: <http://ieaghg.org/docs/General_Docs/IEAGHG_Presentations/S._Santos_May_CCT_Conference_IS_Presentation_-_Final_Version.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 55.947, de 24 de junho de 2010**. Regulamenta a Lei nº 13.798, de 9 de novembro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Mudanças Climáticas. 2010. Com alterações posteriores. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/norma/?id=159791>>. Acesso em: abr. 2017.

SÃO PAULO (Estado). Lei Estadual n.13.798, de 9 de novembro de 2009. Institui a Política Estadual de Mudanças Climáticas. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**, Poder Executivo, São Paulo, v. 119, n. 209, 10 nov. 2009. Seção 1, p. 1–4. Disponível em: <<http://dobuscadireta.imprensaoficial.com.br/default.aspx?DataPublicacao=20091110&Caderno=DOE-I&NumeroPagina=1>>. Acesso em: abr. 2017.

SCHLÖMER, S. *et al.* Annex III: technology-specific cost and performance parameters. In: IPCC. *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by O. Edenhofer *et al.* New York: Cambridge University Press, 2014. Annex 3, p. 1329–1356. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf>. Acesso em: set. 2016.

SICETEL. **Siderurgia. Recuperação da demanda brasileira de aço continua desoladora**: BTG Pactual. São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://sicetel.org.br/sicetel2014/?p=12436>>. Acesso em: jan. 2017.

USEPA. **Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel**

industry. North Caroline, US, 2012. 78 p. Disponível em: <<https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/ironsteel.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

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

USIMINAS. Usiminas reestrutura configuração produtiva. [Santa Luzia], 2015. Disponível em: <<http://www.usiminas.com/solucoes/usiminas-reestrutura-configuracao-produtiva-para-ganhar-competitividade/>>. Acesso em: abr. 2017.

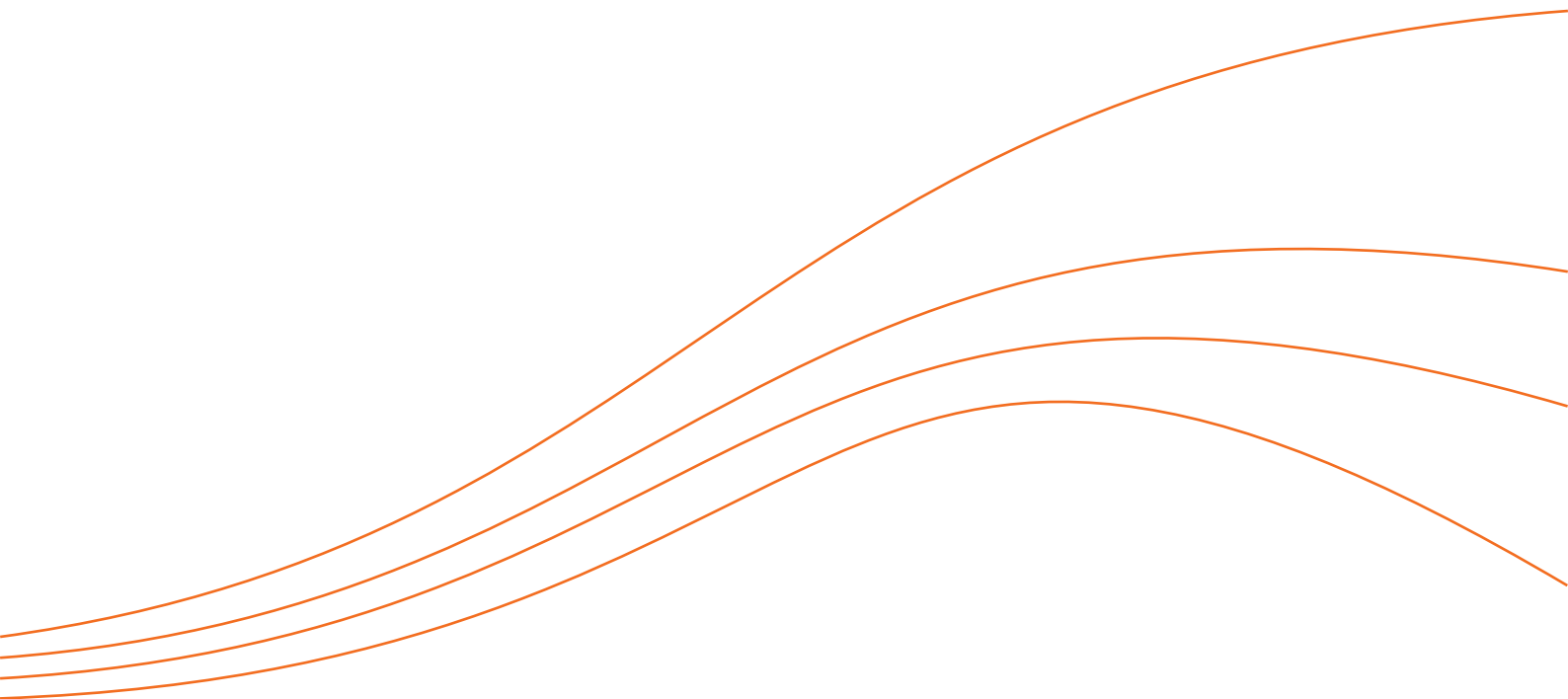
WSA. Sustainable steel: policy and indicators 2013. Brussels, 2013. 12 p. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/zh/dam/jcr:9f571742-dac6-4704-ba09-dc2740016b7b/Sustainable+steel%253A+Policy+and+indicators+2013.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

WSA. World steel in figures 2016. Brussels, 2016. 17 p. Disponível em: <<https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:1568363d-f735-4c2c-a1da-e5172d8341dd/World+Steel+in+Figures+2016.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

YANMAZ, M.; KAYA, A. Ultra-low carbon dioxide (co2) steelmaking. In: INTERNATIONAL IRON & STEEL SYMPOSIUM – IDCS, 2012, Karabük, Turkey. **Proceedings** ... Karabük: Karabük University, 2012. p. 41–54. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.452.6950&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: abr. 2017.



Apêndice - Premissas



FATOR DE EMISSÃO DA ELETRICIDADE PARA PROJETOS DE MDL

Para as medidas que proporcionam redução de emissões através da eficiência elétrica ou que, através de cogeração, possibilitam a introdução de energia no *grid*, considerou-se o FE de MDL, uma vez que, de acordo com o MCTI (BRASIL [2016?]), trata-se de um algoritmo amplamente utilizado para quantificar contribuições futuras em termos de redução de emissões de CO₂ em relação a um CR.

Dentre as fontes fósseis, que são mais intensivas em emissão de carbono, utilizadas na geração entregue ao sistema interligado nacional, observa-se que a participação do carvão mineral e do óleo combustível era respectivamente 2,6% e 4,4% em 2013 (EPE, 2014). Estas fontes podem ser substituídas por fontes renováveis na geração de eletricidade.

A média dos anos de 2013 e 2014 dos fatores de emissão para MDL é equivalente a 0,5884 tCO₂/MWh, este valor foi inserido na MACTool para os anos de 2014 a 2030. A ferramenta calcula a emissão da eletricidade conforme a Equação 2, incluindo o fator de perdas na rede elétrica (Gráfico 15) conforme Equação 3.

Equação 2 – Estimativa da emissão de GEE

$$\text{Emissão GEE} = \text{dado de atividade} \times \text{fator de emissão}$$

Fonte: IPCC (2000).

Considerando que o FE do gás natural é 0,2 tCO₂/MWh (0,0558 tCO₂/GJ), o FE do MDL adotado implica em uma eficiência de aproximadamente 34% para a tecnologia de conversão da energia térmica provinda do gás natural em eletricidade.

Dependendo do combustível utilizado pelas novas termelétricas, o FE do MDL pode au-

mentar, contudo está sendo utilizando um valor fixo (0,5884 tCO₂/MWh) ao longo do período.

ELETRICIDADE – PERDAS NA REDE ELÉTRICA

As perdas de energia elétrica por transmissão são representadas por um valor médio que é uma importante premissa da MACTool para todos os cálculos que envolvem emissão de CO₂ por variação no consumo de energia elétrica. Devido a estas perdas de energia, a emissão evitada de CO₂ por kWh consumido é em realidade maior do que a emissão média dos geradores, pois de acordo com a Equação 3, a emissão real é dada pela emissão do consumo acrescida da porcentagem perdida na rede ou de outras formas.

Equação 3 – Energia elétrica real gerada mediante perdas de eletricidade na rede

$$\text{Energia gerada} = \text{Energia consumida} \times (1 + \text{perdas})$$

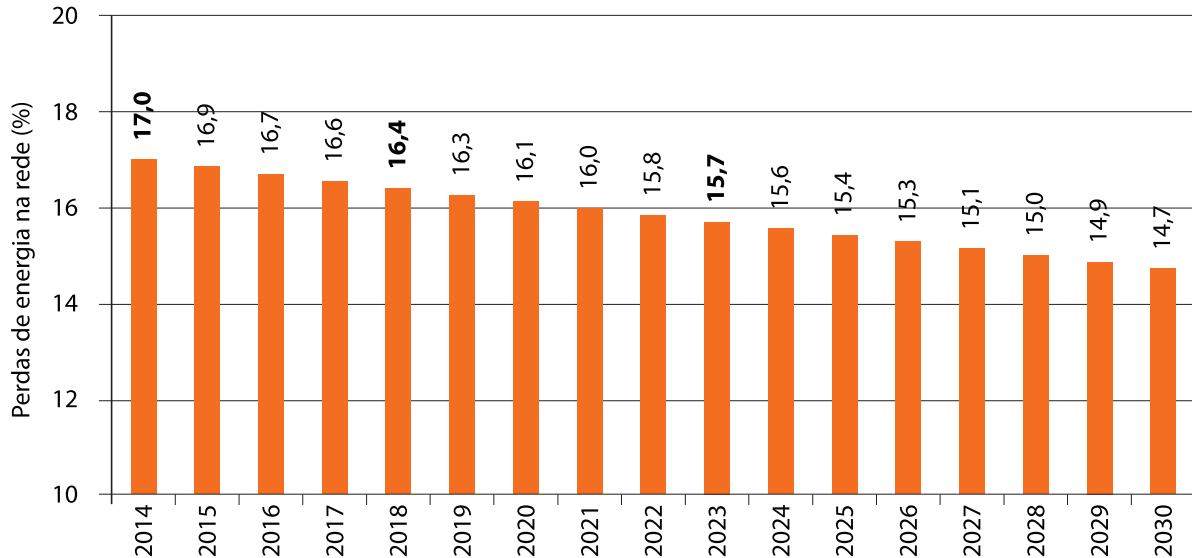
Fonte: Elaboração própria.

Onde

Energia gerada	= quantidade de energia gerada considerando as perdas	[kWh]
Energia consumida	= quantidade de energia consumida	[kWh]
Perdas	= porcentagem de energia perdida na rede	[%]

Os dados de perda de energia para a Região Sudeste e Centro Oeste foram retirados do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2023 (BRASIL, 2014). Constam valores apenas para os anos de 2014, 2018 e 2023. Portanto, foi realizada a interpolação linear dos valores de perda para os anos intermediários. Os valores interpolados encontram-se no Gráfico 15, juntamente com os valores retirados do PDE 2023 em negrito, eles foram adicionados à MACTool.

Gráfico 15 – Perdas de energia para a Região Sudeste de 2013 a 2030



Fonte: Elaboração própria com base em BRASIL (2014).
Nota: Os anos de 2014, 2018 e 2023 são dados. Os demais são projeções.

PREMISSAS ADOTADAS PARA O CÁLCULO DO CUSTO DA GERAÇÃO POR MEIO DE UMA USINA TERMELÉTRICA

Os valores da energia elétrica neste caso foram calculados pela ferramenta MACTool, que calcula a receita (venda da eletricidade) segundo as variáveis de custo utilizadas: *Actual Investment Flow per MWh* (Fluxo de investimento atual por MWh), *levelized investment per MWh* (Investimento anualizado por MWh), *O&M per MWh* (Operação e manutenção por MWh), *Fossil Fuel cost per MWh* (Custo de combustível fóssil por MWh).

Fluxo de investimento atual por MWh

O investimento atual por MWh foi calculado com base no documento *Electricity Market Module* do *Energy Information Administration* (EIA, 2015). Para a composição do custo de investimento, utilizou-se o valor de 924 US\$/kW referente a uma turbina de combustão convencional, sendo este o valor empregado na Equação 4.

Equação 4 – Custo de investimento por MWh

$$CAPEX_{MWh} = \frac{CAPEX \times 1.000}{8760 \times FC}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

- CAPEX = investimento US\$ 924/kw (EIA, 2015, p. 97)
CAPEX_{MWh}: Investimento por MW
- 1.000 = conversão de kW para MW
- 8760 = horas em um ano [h/ano]
- FC = fator de capacidade 42% (SCHLÖMER, 2014)

Após a aplicação da Equação 4, obteve-se um investimento de 250 US\$/MWh, valor atribuído ao ano de 2014. Este valor não foi utilizado pela MACTool no cálculo dos preços da eletricidade, mas foi utilizado para obter o valor anualizado, como descrito na Equação 5.

Investimento anualizado por MWh

O investimento anualizado por MWh foi calculado a partir do valor de 924 US\$/kW, utilizando a Equação 5.

Equação 5 – Custo de investimento anualizado por MWh

$$CAPEX_{MWh} = \frac{CAPEX \times FRC \times 1.000}{E}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

$CAPEX_{MWh}$	= investimento anualizado	[MWh]
$CAPEX$	= investimento = US\$ 924/kW (EIA, 2015, p. 97)	
FRC	= fator de recuperação de capital = 8,88%	
1.000	= conversão de kW para MW	
E	= energia gerada em um ano pela turbina = 3700	[kWh]

O resultado da Equação 5 foi o investimento anualizado correspondente a 22,18 US\$/MWh. Esse valor foi inserido para todos os anos de 2014 a 2030.

Operação e manutenção por MWh

Os custos de operação e manutenção por MWh foram calculados a partir dos valores fornecidos pelo EIA (2015), utilizando a Equação 6.

Equação 6 – Custo de operação e manutenção por MWh

$$O\&M_{MWh} = O\&M_{var} + \left(\frac{O\&M_{fix} \times 1.000 \times FC}{8760} \right)$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

$O\&M_{MWh}$	= custo de operação e manutenção total por MWh
$O\&M_{var}$	= custo de operação e manutenção variável = 15,45 US\$/MWh (EIA, 2015, p. 97)
$O\&M_{fix}$	= custo de operação e manutenção fixo = 7,34 US\$/kW (EIA, 2015, p. 97)
1.000	= conversão de kW para MW
FC	= fator de capacidade = 42% (SCHLÖMER, 2014)
8760	= horas em um ano.

Empregando-se a Equação 6 obteve-se o custo de O&M de 15,80 US\$/MWh, empregado em todos os anos do período de 2014 a 2030.

Custo do combustível fóssil por MWh

O custo de combustível por MWh foi calculado com base nos preços do gás natural, de acordo com a Equação 7.

Equação 7 – Cálculo dos custos do combustível por MWh

$$CE_{MWh} = \frac{P_{ano}}{F \times E}$$

Fonte: Elaboração própria (2017).

Onde:

CE_{MWh}	= Custo de energia por MWh
P_{ano}	= Preço do gás natural no ano em questão [US\$/tep]
F	= Fator de conversão tep → MWh = 11,63 (adaptado de EPE, 2014)
E	= Eficiência da turbina = 34%

Por fim, os valores resultantes da Equação 5 a Equação 7, que foram inseridos ano a ano na MACTool, são apresentados na Tabela 32.

PREÇOS DA ENERGIA ELÉTRICA PARA O CONSUMIDOR FINAL

Os preços da energia elétrica para o consumidor final, ou seja, a indústria, foram projetados a partir dos preços da geração, adicionando uma porcentagem relativa aos impostos e a taxa de transmissão tanto nos preços de leilão quanto nos preços de uma usina termelétrica. No caso dos preços baseados na termelétrica, esta porcentagem foi introduzida diretamente na ferramenta MACTool, em cada tecnologia referente a conservação ou geração de eletricidade. No caso do preço dos leilões, esta porcentagem foi adicionada fora da ferramenta, no montante que compõe os custos de energia das demais tecnologias que não estão relacionadas à conservação ou geração de eletricidade. O cálculo da referida porcentagem foi realizado a partir

Tabela 32 – Custos associados à produção de energia elétrica (Power Baseline)

Ano	Investimento anualizado	Operação e manutenção	Custo de energia
	(US\$/MWh)		
2014	22,18	15,80	165,38
2015	22,18	15,80	162,49
2016	22,18	15,80	159,60
2017	22,18	15,80	156,72
2018	22,18	15,80	153,83
2019	22,18	15,80	150,94
2020	22,18	15,80	148,05
2021	22,18	15,80	151,85
2022	22,18	15,80	155,66
2023	22,18	15,80	159,47
2024	22,18	15,80	163,28
2025	22,18	15,80	167,09
2026	22,18	15,80	170,15
2027	22,18	15,80	173,22
2028	22,18	15,80	176,28
2029	22,18	15,80	179,35
2030	22,18	15,80	182,42

Fonte: Elaboração própria (2017) com base na Equação 3 a Equação 6.

dos dados fornecidos⁹ pela Superintendência de Gestão Tarifária (SGT) da ANEEL, onde foram apresentados os dados mensais para as concessionárias de eletricidade do Estado de São Paulo. Os mesmos estão apresentados no

Quadro 1. Tomando os dados da referência classificados como “industrial” de cada concessionária, foi aplicada a Equação 8 que estabelece o cálculo da porcentagem dos impostos sobre o custo de geração da eletricidade.

A Equação 8 foi aplicada para obter os valores mensais para cada concessionária e, em seguida, foi realizada a média dos valores para todas as concessionárias no ano de 2013, que é o ano base deste estudo. O resultado médio de

Quadro 1 – Concessionárias de energia elétrica do Estado de São Paulo

Concessionárias de energia elétrica (SP)
Bandeirante – Bandeirante Energia S/A
CNEE – Companhia Nacional de Energia Elétrica
CPFL Leste Paulista – Companhia Leste Paulista de Energia
CPFL – Piratininga – Companhia Piratininga de Força e Luz
EDEVP – Empresa de Distribuição de Energia Vale Paranapanema S/A
Elektro – Elektro Eletricidade e Serviços S/A
Caiuá-D – Caiuá Distribuição de Energia S/A
CPFL Jaguarí – Companhia Jaguarí de Energia
CPFL Sul Paulista – Companhia Sul Paulista de Energia
CPFL-Paulista – Companhia Paulista de Força e Luz
EEB – Empresa Elétrica Bragantina S/A
Eletropaulo – Eletropaulo Metropolitana Eletricidade de São Paulo S/A

Fonte: Elaboração própria (2017) com base nos dados fornecidos pela SGT ANEEL.

Equação 8 – Cálculo da porcentagem mensal referente aos impostos da eletricidade

$$I_e = \frac{ReceitaEnergia - ReceitaDemanda}{ReceitaEnergia - ReceitaDemanda - PisPasepCofins - ICMS} - 1$$

Fonte: Elaboração própria (2017) com base nos dados fornecidos pela SGT ANEEL.

Onde:

I_e	= porcentagem de imposto sobre a eletricidade	
Receita energia	= receita total arrecadada pela concessionária	(R\$)
Receita demanda	= ônus adicionado por determinada indústria exceder a demanda estabelecida	(R\$)
PIS PASEP Cofins e ICMS	= impostos governamentais	(R\$)

9. Dados não publicados disponibilizados pela Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética da ANEEL.

24% indica o valor que é acrescido de impostos ao preço da geração da energia elétrica. Os preços finais de compra e venda da eletricidade são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 – Projeção dos preços de compra e venda da eletricidade (MACTool)

Ano	Usina a gás natural	
	Preço de geração	Preço para o consumidor final
	(US\$/MWh)	
2014	203,37	252,32
2015	200,48	248,73
2016	197,59	245,15
2017	194,70	241,56
2018	191,81	237,98
2019	188,92	234,39
2020	186,03	230,81
2021	189,84	235,53
2022	193,65	240,25
2023	197,46	244,98
2024	201,26	249,70
2025	205,07	254,43
2026	208,14	258,23
2027	211,21	262,04
2028	214,27	265,84
2029	217,34	269,64
2030	220,40	273,45

Fonte: Elaboração Própria com base na análise MACTool.

TAXA DE DESCONTO

A taxa de desconto adotada no projeto para o cálculo do MAC foi de 8% ao ano. Este é o mesmo valor adotado no estudo do Banco Mundial, que também utilizou a MACTool (GOUVELLO *et al.*, 2010), pois é o que geralmente corresponde ao custo dos empréstimos adotado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) para o financiamento de projetos.

Também chamada de “taxa de desconto social”, esta taxa é única para todas as medidas de BC, que difere no caso do *break-even carbon price*,

onde aplicamos a taxa de atratividade específica para cada medida.

TAXA DE JUROS DE LONGO PRAZO (TJLP)

A TJLP foi instituída pela Medida Provisória nº 684, de 31/10/1994 e publicada no Diário Oficial da União em 03/1994, sendo definida como o custo básico dos financiamentos concedidos pelo BNDES. Algumas alterações ocorreram através da Medida Provisória nº 1.790, de 29/12/98 e da Medida Provisória nº 1.921, de 30/09/1999, posteriormente convertidas na Lei nº 10.183, de 12/02/2001 (BNDES, 2016).

A TJLP apresentada pelo BNDES (2011) tem período de vigência de um trimestre, sendo expressa em termos anuais, e é calculada a partir dos seguintes parâmetros:

- a meta de inflação, calculada proporcionalmente para os doze meses seguintes ao primeiro mês de vigência da taxa, baseada nas metas anuais fixadas pelo Conselho Monetário Nacional (CMN);
- o prêmio de risco, que incorpora uma taxa de juro real internacional e um componente de risco Brasil numa perspectiva de médio e longo prazo.

De acordo com o BNDES (2011) a TJLP é aplicada:

- i) aos contratos passivos do BNDES junto ao Fundo de Amparo ao Trabalhador (FAT); Fundo de Participação PIS-PASEP; e ao Fundo de Marinha Mercante (FMM);
- ii) aos contratos ativos do BNDES, com os recursos dos mesmos fundos do item i);
- iii) à remuneração das contas dos participantes do Fundo de Participação PIS-PASEP;
- iv) outros casos, a critério do Conselho Monetário Nacional (CMN).

Porém, a de acordo com a metodologia de cálculo em relação aos contratos do BNDES atrelados à TJLP incidem também um *spread* básico (que varia de acordo com o estabelecido nas Políticas Operacionais do Sistema BNDES) e um *spread* de risco (que varia de acordo com a classificação de risco do cliente).

Considerando as médias anuais do valor de TJLP para o período de 2006 a 2016, sendo este último até o primeiro semestre, foi obtido um valor médio de 6,19% (BNDES, 2016) e considerando que deve haver a incidência do *spread* básico e do *spread* de risco, estimou-se para emprego no estudo uma taxa de 8% a.a..

Agenda 2030:



Apoio técnico:



Realização:



**GOVERNO DO ESTADO
DE SÃO PAULO**
Secretaria do Meio Ambiente