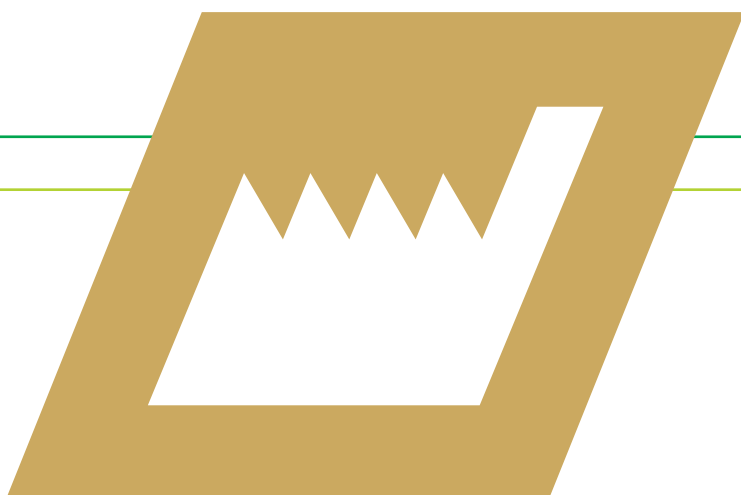




*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*



MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE FERRO-GUSA E AÇO



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



RÉGIS RATHMANN
(ORGANIZADOR)

***MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES
DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR
DE FERRO-GUSA E AÇO***

Brasília
Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
ONU Meio Ambiente
2017

M689 Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de ferro-gusa e aço / organizador Régis Rathmann. -- Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017.

166 p.: il. - (Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil)

ISBN: 978-85-88063-45-7

1. Mudanças Climáticas. 2. Emissão de gases. 3. Ferro-gusa - Produção. 4. Aço - Produção. I. Rathmann, Régis. II. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. III. ONU Meio Ambiente. IV. Série.

CDU 551.583

Ficha catalográfica elaborada por: Lorena Nelza F. Silva - CRB-1/2474

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Esplanada dos Ministérios, Bloco E
CEP: 70.067-900 - Brasília - DF
Tel.: +55 (61) 2033-7500
www.mcti.gov.br

ONU Meio Ambiente - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

Casa da ONU - Complexo Sérgio Vieira de Mello
Setor de Embaixadas Norte, Quadra 802, Conjunto C, Lote 17
CEP 70800-400 - Brasília/DF
Tel.: +55 (61) 3038-9233
web.unep.org/regions/brazil

República Federativa do Brasil

Presidente da República

Michel Temer

Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Gilberto Kassab

Secretário Executivo

Elton Santa Fé Zacarias

Secretário de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento

Jailson Bittencourt de Andrade

Diretor do Departamento de Políticas e Programas de Ciências

Sávio Túlio Oselieri Raeder

Coordenador-Geral do Clima

Márcio Rojas da Cruz

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – ONU Meio Ambiente

Diretor Executivo da ONU Meio Ambiente

Erik Solheim

Diretor Regional da ONU Meio Ambiente para América Latina e Caribe

Leo Heileman

Representante da ONU Meio Ambiente no Brasil

Denise Hamú

EQUIPE TÉCNICA DO MCTIC

Coordenador-Geral do Clima

Márcio Rojas da Cruz

Diretor Nacional do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil

Ricardo Vieira Araujo

Coordenador do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil

Antônio Marcos Mendonça

Coordenador Técnico do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil

Régis Rathmann

EQUIPE TÉCNICA

Andréa Nascimento de Araújo

Lidiane Rocha de Oliveira Melo

Marcela Cristina Rosas Aboim Raposo

Moema Vieira Gomes Corrêa (Diretora Nacional do Projeto até outubro de 2016)

Rodrigo Henrique Macedo Braga

Sonia Regina Mudrovitsch de Bittencourt

Susanna Erica Busch

EQUIPE ADMINISTRATIVA

Ana Carolina Pinheiro da Silva

Andréa Roberta dos Santos Campos

Maria do Socorro da Silva Lima

Ricardo Morão Alves da Costa

EQUIPE TÉCNICA DA ONU MEIO AMBIENTE

Francine Costa Vaurof

Patricia Taboada

Guilherme Sattamini

Maria Claudia Cambraia

AUTOR

Raphael Guimarães Duarte Pinto

Revisão

Anna Cristina de Araújo Rodrigues

Projeto Gráfico

Capitular Design Editorial

Editoração

Phábrica de Produções: Alecsander Coelho e

Paulo Ciola (direção de arte); Ércio Ribeiro, Icaro

Bockmann, Kauê Rodrigues, Marcelo Macedo e

Rodrigo Alves (diagramação)


The image features a large, abstract composition of geometric shapes in shades of gold and brown. A large, solid brown shape occupies the right and bottom portions of the frame. In the upper left, there is a smaller, gold-colored shape with a jagged, sawtooth-like top edge. Another gold shape, resembling a trapezoid, is positioned in the upper right. At the bottom right, a light brown trapezoidal shape is partially visible. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on geometric forms and a warm color palette.

Sumário

INTRODUÇÃO	20
PARTE I - CARACTERIZAÇÃO E MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS	24
1 INFORMAÇÕES GERAIS DO SETOR.....	26
1.1 SETOR EM ÂMBITO MUNDIAL E NACIONAL.....	26
1.2 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR	32
2 DESAGREGAÇÃO SETORIAL	38
2.1 DESAGREGAÇÕES DO SETOR DE AÇO	38
2.1.1 Separação por rotas de produção.....	38
2.1.2 Separação por localização geográfica	41
2.1.3 Separação por produtos	43
2.1.4 Quadro-resumo	44
2.2 DESAGREGAÇÃO DO SETOR DE FERRO	46
3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E AÇO.....	50
3.1 TRATAMENTO OU PREPARAÇÃO DE MATERIAIS	51
3.1.1 Processo de produção de coque.....	51
3.1.2 Processo de sinterização.....	52
3.2 PRODUÇÃO DE FERRO	53
3.2.1 Alto-forno	53
3.2.2 Fusão redutora.....	54
3.2.3 Redução direta	55

3.3	PRODUÇÃO DE AÇO	56
3.3.1	Conversores a oxigênio (<i>basic oxygen furnace</i> – BOF)	56
3.3.2	Fornos elétricos a arco.....	56
3.3.3	Lingotamento contínuo.....	58
3.4	MANUFATURA DO AÇO	59
3.4.1	Laminação a quente	59
3.4.2	Laminação a frio e acabamento	60
3.5	RESUMO DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS POR ROTA.....	61
4	MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA O SETOR DE FERRO-GUSA E AÇO	64
4.1	TRATAMENTO OU PREPARAÇÃO DE MATERIAIS	64
4.1.1	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COQUE.....	64
4.1.2	Processo de sinterização.....	67
4.2	PRODUÇÃO DE FERRO	68
4.2.1	Alto-forno	68
4.2.2	Fusão redutora.....	70
4.2.3	Redução direta.....	72
4.3	PRODUÇÃO DE AÇO	73
4.3.1	Conversores a oxigênio (<i>basic oxygen furnace</i> – BOF)	73
4.3.2	Fornos elétricos a arco.....	74
4.3.3	Recuperação de calor nas fornalhas de ar quente	76
4.4	MANUFATURA DO AÇO	77
4.4.1	Castrip.....	77
4.5	QUADRO-RESUMO DAS MTD	77
	PARTE II - CENÁRIOS DE REFERÊNCIA, BAIXO CARBONO E BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO.....	82
5	CENÁRIO DE REFERÊNCIA	84
5.1	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E PREMISSAS	84
5.1.1	Fluxo de matéria e consumo específicos de energia dos processos por tipo de usinas	89
5.2	PROJEÇÕES DE PRODUÇÃO, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE.....	92

6 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO.....	100
6.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E PREMISSAS	100
6.2 PROJEÇÕES DE PRODUÇÃO, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE.....	102
6.3 CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO DO CENÁRIO DE BAIXO CARBONO.....	105
6.3.1 Metodologia	105
6.3.2 Premissas	106
6.3.3 Resultados.....	109
7 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO.....	114
7.1 TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA O SETOR DE FERRO-GUSA E AÇO	114
7.1.1 Reforma dos gases de coqueria	114
7.1.2 Altos-fornos com reciclagem dos gases (TGR) sem e com captura de carbono.....	115
7.1.3 Novos processos de fusão redutora	116
7.1.4 Processo Ulcored	117
7.1.5 Processos Ulcowin and Ulcolysis	118
7.1.6 Recuperação de calor residual do forno elétrico a arco	118
7.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E PREMISSAS.....	118
7.3 PROJEÇÕES DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE	120
PARTE III - SUBSÍDIOS À FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA A ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO	124
8 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS DA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO	126
9 SÍNTESE DE EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS COM POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO	130
10 INSTRUMENTOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA ADOÇÃO DO CENÁRIO DE BAIXO CARBONO	136
CONSIDERAÇÕES FINAIS	156
REFERÊNCIAS.....	160



Listas de figuras,
tabelas, quadros,
siglas e acrônimos

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção da Siderurgia Mundial e Brasileira de Aço Bruto – milhões de toneladas	27
Tabela 2 – Estimativa Setorial das Emissões de CO ₂ no Ano de 2007 – mil toneladas.....	28
Tabela 3 – Produção Nacional de Aço Bruto por Empresa – mil toneladas.....	29
Tabela 4 – Capacidade Instalada das Siderúrgicas Brasileiras em 2012	29
Tabela 5 – Distribuição Regional de Produção de Aço Bruto em 2012	30
Tabela 6 – Produção de Ferro-gusa por Usinas Independentes no Brasil (toneladas)	32
Tabela 7 – Consumo por Fontes de Energia do Setor de Ferro e Aço Brasileiro entre 2007 e 2016	33
Tabela 8 – Produção Brasileira de Aço Bruto em 2012	39
Tabela 9 – Produção de Aço Bruto por Processo de Aciaria em 2012	40
Tabela 10 – Fornos Elétricos a Arco Instalados no Brasil em 2008.....	41
Tabela 11 – Distribuição por Estado da Produção de Aço Bruto em 2012.....	42
Tabela 12 – Produção Nacional de Semiacabados para Vendas	43
Tabela 13 – Produção Nacional de Laminados	44
Tabela 14 – Evolução da Produção de Ferro-gusa no Brasil por Rota e Combustível	47
Tabela 15 – Evolução da Produção Independente de Ferro-gusa no Brasil por Região ou Estado	47

Tabela 16 – Intensidade Energética do Processo de Coqueificação (GJ/tonelada métrica de aço)	52
Tabela 17 – Intensidade Energética do Processo de Sinterização.....	53
Tabela 18 – Intensidade Energética do Alto-forno	54
Tabela 19 – Intensidade Energética do Processo de Fusão Redutora	55
Tabela 20 – Intensidade Energética do Processo de Redução Direta (GJ/tonelada métrica de aço)	55
Tabela 21 – Intensidade Energética do Conversor a Oxigênio (GJ/tonelada métrica de aço)	56
Tabela 22 – Intensidade Energética do FEA Operando com 60% Ferro- esponja e 40% de Sucata (GJ/tonelada métrica de aço).....	58
Tabela 23 – Intensidade Energética do FEA Operando com 100% de Sucata (GJ/tonelada métrica de aço)	58
Tabela 24 – Intensidade Energética no Processo de Lingotamento Contínuo (GJ/tonelada métrica de aço).....	59
Tabela 25 – Intensidade Energética no Processo de Laminação a Quente Dividido por Produto	60
Tabela 26 – Intensidade Energética no Processo de Laminação a Frio (GJ/tonelada métrica de aço).....	61
Tabela 27 – Intensidade Energética no Processo de Acabamento (GJ/tonelada métrica de aço).....	61
Tabela 28 – Consumos Energéticos Específicos das Rotas de Produção Analisadas (GJ/tonelada métrica de aço).....	62
Tabela 29 – Informações Técnicas das MTD para a Rota de Alto-forno	78
Tabela 30 – Informações Técnicas das MTD para a Rota de Altos-fornos Elétricos a Arco.....	79
Tabela 31 – Taxas de Crescimento do PIB Aplicadas para a Projeção da Produção de Ferro e Aço	84
Tabela 32 – Fatores de Emissão de CO ₂	86

Tabela 33 – Fatores de Emissão de CO ₂ do SIN.....	87
Tabela 34 – Matriz de Fluxo de Materiais (kg de material/t produto).....	89
Tabela 35 – Consumos Energéticos Específicos dos Processos (GJ/t de aço bruto).....	90
Tabela 36 – Consumos Energéticos Específicos dos Processos (GJ/t de aço bruto).....	91
Tabela 37 – Consumos Energéticos dos Processos (GJ/t de aço bruto).....	91
Tabela 38 – Projeção da Produção de Aço no Brasil por Rota	93
Tabela 39 – Projeção da Produção de Ferro-gusa no Brasil até 2050	93
Tabela 40 – Penetração das Tecnologias Consideradas	101
Tabela 41 – Intensidades Energéticas das Rotas Siderúrgicas	107
Tabela 42 – Fatores de Emissão Considerados no Processo de Produção de Ferro-gusa e Aço	107
Tabela 43 – Emissão de CO ₂ por GJ Consumido em Cada Rota da Siderurgia Nacional	107
Tabela 44 – Preços de Combustíveis Considerados e Sua Conversão para Conteúdo Energético	108
Tabela 45 – Dados de Entrada Utilizados para o Cálculo dos Custos Marginais de Abatimento das MTD	109
Tabela 46 – Potenciais e Custos Marginais de Abatimento com Taxa de Desconto de 15% ao ano	110
Tabela 47 – Penetração Máxima das Tecnologias nas Suas Rotas de Produção	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da Produção de Aço no Mundo	26
Figura 2 – Taxa de Utilização da Capacidade da Indústria Siderúrgica Brasileira	30
Figura 3 – Consumo de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço Brasileiro entre 2000 e 2016.....	33
Figura 4 – Estrutura de Consumo de Energia no Setor de Ferro-gusa e Aço Brasileiro.....	34
Figura 5 – Intensidade Energética Média na Siderurgia Mundial entre 2005 e 2012.....	35
Figura 6 – Fluxograma de Processos de Usinas Integradas	38
Figura 7 – Fluxograma de Processos de Usinas Semi-integradas	39
Figura 8 – Distribuição Regional da Produção de Aço Brasileira.....	42
Figura 9 – Evolução da Produção Brasileira de Ferro-gusa por Rota Tecnológica	46
Figura 10 – Distribuição da Produção Independente de Ferro-gusa no Brasil em 2013	48
Figura 11 – Etapas da Produção de Ferro e Aço	50
Figura 12 – Emissões de CO ₂ em uma Típica Usina Integrada	51
Figura 13 – Esquema de Forno de Arco Elétrico.....	57
Figura 14 – Processo de Lingotamento do Aço	58
Figura 15 – Processo de Laminação a Quente.....	60
Figura 16 – Produção Brasileira de Aço entre 2010 e 2050.....	92
Figura 17 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário REF (2010-2050).....	94
Figura 18 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço (2013-2050)	95
Figura 19 – Demanda de Energia das Usinas Integradas com Coqueria	95

Figura 20 – Demanda de Energia das Usinas Integradas sem Coqueria	96
Figura 21 – Demanda de Energia das Usinas com Aciaria Elétrica	96
Figura 22 – Emissões de CO ₂ no Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário REF (2010-2050)	97
Figura 23 – Projeção da Produção de Aço por Rota no Cenário BC.....	102
Figura 24 – Projeção da Produção de Ferro-gusa no Cenário BC.....	103
Figura 25 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC (2010-2050)	103
Figura 26 – Emissões de CO ₂ no Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC (2010-2050).....	104
Figura 27 – Comparação das Emissões dos Cenários BC e REF	105
Figura 28 – Curva de Custos Marginais de Abatimentos Considerando uma Taxa de Desconto de 15% ao ano.....	111
Figura 29 – Esquema do Processo de Recuperação dos Gases de Topo do Alto-forno	115
Figura 30 – Sistema Hisarna	116
Figura 31 – Forno Hisarna em Instalação.....	117
Figura 32 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC+I (2010-2050)	120
Figura 33 – Consumo de Energia – Comparação entre os Cenários.....	121
Figura 34 – Emissões de CO ₂ para o Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC+I (2010-2050).....	121
Figura 35 – Comparação das Emissões de GEE entre os Cenários REF, BC e BC+I.....	122
Figura 36 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria	131

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Usinas Siderúrgicas Brasileiras – Produtos, Localização e Tipo	31
Quadro 2 – Quadro-resumo com as Principais Informações sobre as Unidades Siderúrgicas do Brasil.....	45
Quadro 3 – Quadro-resumo com as Principais Informações sobre as Unidades Siderúrgicas do Brasil.....	88
Quadro 4 – MTD Consideradas no Cenário de Baixo Carbono	101
Quadro 5 – Tecnologias de Ruptura Avaliadas e Suas Características Principais.....	119
Quadro 6 – Quadro-resumo de Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono.....	141

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABDI - Agência Nacional de Desenvolvimento Industrial
AFOLU - Agricultura, florestas e outros usos do solo
APP - Asia-Pacific Partnership for Clean Development and Climate
BACEN - Banco Central do Brasil
BEN - Balanço Energético Nacional
BFG - Gás de alto-forno
BID - Banco Interamericano de Desenvolvimento
BLT - *Bell less top*
BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BOF - *Basic oxygen furnace*
CAL - Custo anual líquido
CAPEX - Custo de capital
CENÁRIO BC - Cenário de baixo carbono
CENÁRIO BC+I - Cenário de baixo carbono com inovação
CENÁRIO REF - Cenário de referência
CH₄ - Metano
CNPJ - Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica
CMA - Custo marginal de abatimento
CNI - Confederação Nacional da Indústria
CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO₂ - Dióxido de carbono
CO₂e - Dióxido de carbono equivalente
COP15 - 15ª Conferência das Partes - Copenhague
COP21 - 21ª Conferência das Partes - Paris
CPF - Cadastro de Pessoas Físicas
CSN - Companhia Siderúrgica Nacional
CT&I - Ciência, tecnologia e inovação

CTCN – Climate Technology Centre Network
CTPin – Comissão Técnica do Plano Indústria
DoD – Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América
DOF – Documento de Origem Florestal
DRI – *Direct reduced iron*
EAF – *Electric arc furnace*
EMBRAPII – Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FEA – Fornos elétricos a arco
FGV – Fundação Getulio Vargas
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
GCF – Green Climate Fund
GEE – Gás de efeito estufa
GEF – Global Environment Facility
GLP – Gás liquefeito de petróleo
HFC – Hidrofluorcarboneto
IABr – Instituto Aço Brasil
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEA – International Energy Agency
IIP – Institute for Industrial Productivity
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
LCS – *Laser contouring system*
MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MDL – Mecanismo de desenvolvimento limpo

MF – Ministério da Fazenda
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério de Minas e Energia
MP – Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão
MRV – Sistema de monitoramento, relato e verificação
MTD – Melhores tecnologias disponíveis
N₂O – Óxido nitroso
NDC – Contribuição Nacionalmente Determinada
O&M – Operação e manutenção
ORC – Ciclos Rankine orgânicos
P&D – Pesquisa e desenvolvimento
PD&D – Pesquisa, desenvolvimento e demonstração
PFC – Compostos perfluorados
PIB – Produto interno bruto
PNE 2050 – Plano Nacional de Energia 2050
PNEf – Plano Nacional de Eficiência Energética
PNMC – Plano Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RD – Redução direta
SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SF₆ – Hexafluoreto de enxofre
SIN – Sistema Interligado Nacional
SIRENE – Sistema de Registro Nacional de Emissões
tep – Tonelada equivalente de petróleo
TRL – *Technology readiness levels*
ULCOS – Ultra-Low Carbon Dioxide Steelmaking
UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América
VSD – *Drives de velocidade variável*

The image features a large, abstract composition of geometric shapes in shades of gold and brown. A prominent shape is a large, irregular polygon that occupies the right and bottom portions of the frame. In the upper left, there is a smaller, jagged shape resembling a sawtooth or a stylized mountain range. At the bottom right, a trapezoidal shape is partially visible. The overall aesthetic is clean and modern, with a focus on solid colors and sharp lines.

Introdução

INTRODUÇÃO

A questão das mudanças climáticas tem sido, cada vez mais, um entrave ao desenvolvimento sustentável. O Brasil, nesse contexto, tem se posicionado de maneira ativa nas negociações climáticas globais, propondo metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Segundo o World Bank (2016), o país desempenhou papel fundamental na formulação do quadro climático para a 21ª Conferência das Partes (COP21), que culminou com o Acordo de Paris. Na ocasião, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com possível esforço para chegar à redução de 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030.¹ Essa meta é considerada absoluta, pois estabelece um teto de emissões, diferentemente do ocorrido na COP15, em Copenhague, no ano de 2009, quando o Brasil assumiu uma meta voluntária relativa, de redução de suas emissões em relação a uma projeção para o ano de 2020.

As emissões são referentes à totalidade das emissões nacionais, incluindo CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC e SF₆, já estimados no inventário nacional. O percentual de redução das emissões será aplicado às emissões do ano-base de 2005, com os gases sendo convertidos a CO₂e, usando-se a métrica GWP-100 do AR5.² Para a estimativa dos gases, serão utilizadas as metodologias do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) para inventários nacionais. Faz-se menção explícita à possibilidade de utilização das remoções, ou seja, retirada de CO₂ da atmosfera pelas florestas manejadas, na composição das emissões nacionais. Esse método é exatamente o que se utiliza desde a Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), contendo o Segundo Inventário Nacional de GEE.

Avaliando-se os setores da economia brasileira, no que concerne às emissões de GEE, a maior parcela das emissões líquidas estimadas de CO₂e, segundo o GWP-100 do AR5, é proveniente do setor agropecuário e uso e mudança do uso da terra e florestas (Afolu), correspondendo a aproximadamente 61% das emissões totais no ano de 2010 (MCTI, 2015). Em segundo lugar, vem o setor de energia, com 27%, e, em seguida, processos industriais, com cerca de 7% das emissões totais de CO₂ nesse ano. Porém, ao considerar exclusivamente as emissões relacionadas com a consumo de energia, o setor industrial passaria a ser responsável por cerca de 1/3 das emissões totais (HENRIQUES JR., 2010; MCTI, 2016). Nesse contexto, o setor industrial tem papel relevante para a mitigação de

1 De acordo com a Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTI, 2010).

2 Métrica de conversão para dióxido de carbono equivalente do 5º relatório de avaliação do IPCC (MCTI, 2015).

emissões de GEE (HENRIQUES JR., 2010; BORBA et al., 2012; CNI, 2012; RATHMANN, 2012), o que justifica a implementação de política pública nesse sentido, qual seja, o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação, comumente chamado de Plano Indústria (FGV/EAESP, 2015).

Apesar da ambição, os esforços de mitigação e potenciais contribuições setoriais não foram detalhados setorialmente e sequer sua viabilidade técnico-econômica foi avaliada na Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil ao Acordo de Paris. Nesse contexto, o projeto “Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil”, financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (Global Environment Facility – GEF) e implementado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), pode contribuir significativamente, na medida em que objetiva ajudar o governo brasileiro a reforçar sua capacidade técnica de apoiar a implementação de ações de mitigação de emissões de GEE em setores-chave da economia.

No âmbito do setor de ferro-gusa e aço, o objetivo é identificar as possibilidades de mitigação de emissões de GEE. Adicionalmente, serão avaliados barreiras, cobenefícios e potenciais efeitos adversos à adoção das atividades de baixo carbono para, partindo disso, serem propostos instrumentos de política pública capazes de viabilizá-las.

Para responder a esse objetivo, o presente trabalho é dividido em três partes, além de seções introdutória e considerações finais. A primeira parte trata da caracterização setorial, com foco nos processos produtivos e no consumo de energia, e da descrição das melhores tecnologias disponíveis (MTD) para o setor, visando, direta ou indiretamente, à mitigação de emissões de GEE. Na segunda parte, serão apresentados os cenários de referência (REF), baixo carbono (BC) e baixo carbono com inovação (BC+I). A terceira parte tratará de barreiras, cobenefícios e instrumentos de políticas públicas para a adoção dos cenários de baixo carbono pelo setor de ferro-gusa e aço.

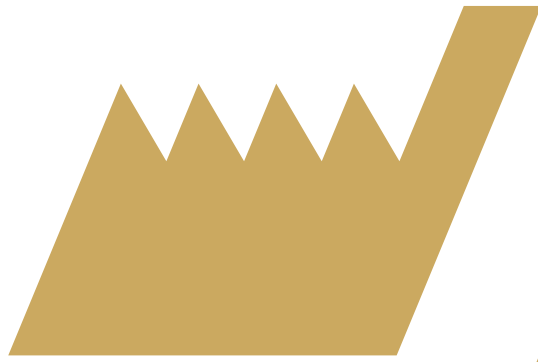
Semelhantemente aos estudos de De Gouvello (2010) e La Rovere et al. (2016), este relatório considera uma avaliação setorial, por meio da construção de cenários de emissões de GEE, que tem como limitação a inobservância de possíveis efeitos de não aditividade dos potenciais de mitigação do sistema energético (MCTIC, 2017), que abrange os diferentes segmentos industriais. De fato, a avaliação setorial é relevante, sobretudo, para realizar o mapeamento das MTD, visando à mitigação setorial de emissões de GEE, para, partindo disso, constituir uma base de dados para a modelagem dos setores industriais em cenários integrados de abatimento de emissões do sistema energético e do setor de agricultura, florestas e outros usos do solo (Afolu). Deve-se enfatizar que resultarão desses cenários integrados estimativas robustas dos potenciais e custos de abatimento desses setores, as quais serão reportadas no relatório do projeto intitulado “Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono”. Portanto, o reporte de projeções de emissões e custos marginais de abatimento neste estudo setorial objetiva, meramente, a comparação com os resultados oriundos da integração dos cenários por meio dos modelos MSB8000, Otimizagro e Efes, de modo a enfatizar a importância dessa metodologia.



Caracterização e melhores tecnologias disponíveis

Parte
1





Informações gerais do setor

Capítulo

1

1 INFORMAÇÕES GERAIS DO SETOR

1.1 SETOR EM ÂMBITO MUNDIAL E NACIONAL

Em 2013, mais de 1,6 bilhão de toneladas de aço foram produzidas no mundo, sendo 47% desse aço utilizados na China. Estima-se que o crescimento da produção de aço se manterá particularmente em regiões em desenvolvimento, como América Latina, Ásia, África e no subcontinente indiano. Espera-se que, nessas regiões, mais de 60% do aço serão utilizados para a ampliação da infraestrutura. A Figura 1 mostra a evolução da produção de aço no mundo entre os anos 2000 e 2013.

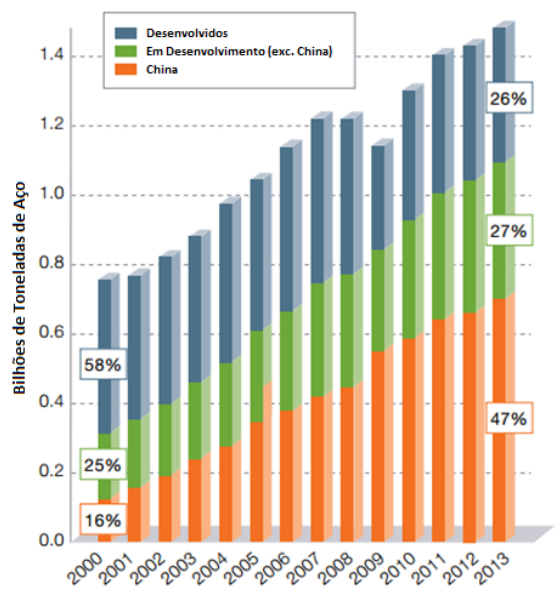


Figura 1 – Evolução da Produção de Aço no Mundo

Fonte: WORLD STEEL ASSOCIATION, 2014

A estimativa de produção média de dióxido de carbono (CO_2) pelo setor de ferro e aço mundial é de 1,8 tonelada por cada tonelada de aço produzida, valor que, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), representa 6,7% do total das emissões de CO_2 no mundo (IEA, 2016). Estima-se ainda que 75% das emissões de CO_2 oriundas da fabricação de aço são provenientes da produção de ferro-gusa no alto-forno durante o processo de redução. O percentual restante é resultado do transporte de matérias-primas, geração de energia elétrica e calor (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2014).³

3 Segundo o Instituto Aço Brasil (2017), as estimativas desconsideram empresas chinesas e grande parte do setor na Índia.

Em 2012, o Brasil foi o nono maior produtor mundial de aço bruto,⁴ com produção de 2,2% do aço bruto mundial. Por sua vez, os países da América Latina foram responsáveis por 52,5% da produção total (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013). A Tabela 1 mostra um comparativo da produção de aço bruto no Brasil com o mundo entre 1970 e 2012.

Tabela 1 – Produção da Siderurgia Mundial e Brasileira de Aço Bruto – milhões de toneladas

Produção de Aço Bruto	1970	1980	1990	2000	2010	2012
Mundial (A)	595,4	715,6	770,5	848,9	1.431,4	1.547,4
América Latina (B)	13,2	28,9	38,2	56,1	61,7	65,7
Brasil (C)	5,4	15,3	20,6	27,9	32,9	34,5
C/A (%)	0,9	2,1	2,7	3,3	2,3	2,2
C/B (%)	40,9	52,9	53,9	49,7	53,3	52,5
Posição relativa do Brasil no mundo	18º	10º	9º	8º	9º	9º

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

A indústria do aço foi responsável por 4,8% do valor total da produção econômica nacional (CNI, 2012). Mesmo atendendo principalmente a demanda interna, o excedente produtivo representa um volume importante das exportações brasileiras, tendo, em 2012, a balança comercial do setor apresentado saldo de US\$ 3,78 bilhões (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013).

Dentre os segmentos industriais brasileiros, o setor siderúrgico é o maior responsável por emissões de GEE provenientes do consumo energético (excluindo processos industriais), representando, em 2007, cerca de 40% das emissões totais da indústria brasileira (HENRIQUES JR., 2010), conforme explicitado na Tabela 2.

Os produtos do setor são bem diversificados. Abrangem desde produtos intermediários (sinter e ferro-gusa) a produtos acabados de maior valor, como placas, lingotes, bobinas, chapas, barras, tarugos e outros laminados.

4 Aço bruto, de acordo com o Instituto Aço Brasil (2013), corresponde à produção de aço em lingotes, produtos de lingotamento contínuo e aço para a fundição.

Tabela 2 – Estimativa Setorial das Emissões de CO₂ no Ano de 2007 – mil toneladas

Setor	Gás Natural	Carvão Mineral	Lenha	Derivados de Petróleo	Carvão Vegetal ¹	Total	Participação
Indústria	20.113,9	47.714,2	11.590,0	50.774,0	12.815,7	143.007,8	100,0
Cimento	39,8	514,8	-	7.119,8	504,8	8.179,1	5,7
Ferro-gusa/aço	2.738,7	41.233,0	-	2.375,2	10.857,1	57.204,0	40,0
Ferroligas	4,7	448,7	197,8	619,9	1.400,6	2.671,7	1,9
Mineração/pelotização	633,8	2.898,4	-	3.469,7	-	7.001,9	4,9
Não ferrosos	1,246,5	1.149,3	-	5.687,4	20,5	8.103,7	5,7
Química	5.137,7	236,9	20,4	9.255,4	7,7	14.658,1	10,2
Alimentos/bebidas	1.293,3	163,1	3.804,5	1.703,6	-	6.964,5	4,9
Têxtil	764,0	-	38,4	377,6	-	1.180,7	0,8
Papel/celulose	1.321,4	330,2	-	1.662,4	-	3.314,0	2,3
Cerâmica	2.235,8	170,9	6.026,4	1.767,6	-	10.200,7	7,1
Outras	2.523,5	568,9	1.502,6	2.720,4	25,0	7.340,4	5,1
Refino de petróleo	2.174,0	-	-	14.015,0	-	16.189,0	11,3
Participação (%)	14,0	33,4	8,1	35,5	9,0	100,0	-

1 O autor pressupõe emissões associadas à origem do carvão vegetal. Neste estudo, por outro lado, define-se que as emissões do carvão vegetal são nulas, cabendo ao setor de agricultura, florestas e outros usos do solo mensurar, a partir da origem da lenha, possíveis emissões desse energético.

Fonte: Elaboração própria a partir de HENRIQUES JR., 2010

O Instituto Aço Brasil (2013) listou 11 companhias produtoras de aço no país, com capacidade instalada de aproximadamente 48 milhões de toneladas/ano, divididas num total de 29 usinas – 14 integradas e 15 semi-integradas (CNI, 2012). A Tabela 3 mostra a produção de aço bruto nacional dividido entre as empresas atuantes no mercado, e a Tabela 4 mostra a capacidade instalada das empresas atuantes no setor.

Tabela 3 – Produção Nacional de Aço Bruto por Empresa – mil toneladas

Empresa	2008	2009	2010	2011	2012	% em 2012
Aperam	770	607	771	739	728	2,1%
ArcelorMittal Aços Longos	3.502	3.171	3.394	3.538	3.423	9,9%
ArcelorMittal Tubarão	6.177	5.334	5.956	5.405	4.390	12,7%
CSA	-	-	478	3.147	3.510	10,2%
CSN	4.985	4.375	4.902	4.874	4.874	14,1%
Gerdau	8.711	6.105	8.177	8.777	8.181	23,7%
Sinobras	42	181	239	243	319	0,9%
Usiminas	8.022	5.637	7.298	6.698	7.157	20,7%
V&M do Brasil	655	387	573	537	511	1,5%
VSB	-	-	-	39	192	0,6%
Villares Metals	140	92	119	137	121	0,4%
Votorantim Siderurgia	712	617	1.041	1.086	1.145	3,3%
Total	33.716	26.506	32.948	35.220	34.524	100,0%

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

Tabela 4 – Capacidade Instalada das Siderúrgicas Brasileiras em 2012

Empresa	Capacidade (mil toneladas)
Aperam	870
ArcelorMittal Aços Longos	3.970
ArcelorMittal Tubarão/Vega	7.740
Grupo CSN	5.750
Gerdau Açominas + Aços Longos	9.970
Gerdau Aços Especiais + Aços Villares	1.425
Grupo Usiminas	9.454
V&M do Brasil	700
Villares Metals	100
Votorantim Siderurgia	1.790
Sinobras	300
ThyssenKrupp CSA	5.200
VSB	1.050
Total	48.319

Fonte: MDIC, 2014

Percebe-se a grande participação da Gerdau, responsável por 23,7% da produção do ano de 2012, seguida pelo grupo ArcelorMittal, que totaliza 22,6% da produção, e Usiminas, com 20,7%.

Deve-se considerar que, desde 2005, a indústria siderúrgica brasileira não opera com utilização da capacidade superior a 85%. Em 2012, atingiu a taxa de utilização média de 73%, conforme mostrado na Figura 2.

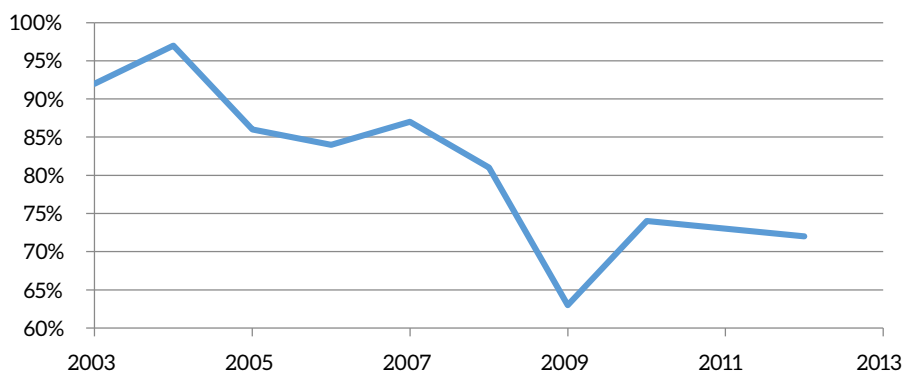


Figura 2 – Taxa de Utilização da Capacidade da Indústria Siderúrgica Brasileira

A distribuição regional da produção de aço no Brasil evidencia grande concentração no Sudeste, que somou 94% da produção no ano de 2012. Minas Gerais é o principal estado produtor, com 34,1% da produção nacional naquele ano.

Tabela 5 – Distribuição Regional de Produção de Aço Bruto em 2012

Estado	Produção (mil TONELADAS)	Participação (%)
Minas Gerais	11.780	34,1
Rio de Janeiro	10.261	29,7
São Paulo	5.607	16,3
Espírito Santo	4.809	13,9
Rio Grande do Sul	776	2,3
Pará	319	0,9
Paraná	314	0,9
Bahia	287	0,8
Pernambuco	228	0,7
Ceará	143	0,4
Brasil	34.524	100

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

No Quadro 1, são apresentadas as unidades siderúrgicas do Brasil, divididas de acordo com o tipo de usina e o produto gerado.

Quadro 1 – Usinas Siderúrgicas Brasileiras – Produtos, Localização e Tipo

Tipo de Usina	Produto	Usina e Localização
Usinas integradas	Laminados planos	Aperam South America (Timóteo/MG)
		ArcelorMittal Tubarão (Tubarão/ES)*
		CSN (Volta Redonda/RJ)*
		Usiminas (Ipatinga/MG)*
		Usiminas (Cubatão/SP)*
	ThussenKrupp CSA (Rio de Janeiro/RJ)	
	Laminados longos	ArcelorMittal Aços Longos (João Monlevade/MG)
		ArcelorMittal Aços Longos (Juiz de Fora/MG)
		Gerdau Açominas (Ouro Branco/MG)*
		Gerdau Aços Longos (Barão de Cocais/MG)
		Gerdau Aços Longos (Divinópolis/MG)
		Gerdau Aços Longos Usiba (Simões Filho/BA) ⁵
		Sinobras (Marabá/PA)
		V&M do Brasil (Belo Horizonte/MG)
VSB (Jeceaba/MG)		
Usinas semi-integradas	Aços longos	Votorantim Siderurgia (Barra Mansa/RJ)
		Votorantim Siderurgia (Resende/RJ)
		ArcelorMittal Aços Longos (Grande Vitória/ES)
		ArcelorMittal Aços Longos (Piracicaba/SP)
		Gerdau Aços Longos Aço Norte (Recife/PE)
		Gerdau Aços Longos (Maracanau/CE)
		Gerdau Aços Longos (Rio de Janeiro/RJ)
		Gerdau Aços Longos (Guaíra/PR)
		Gerdau Aços Longos (São Paulo/SP)
		Gerdau Aços Longos (Rio Grande/RS)
		Gerdau Aços Especiais (Piratini/RS)
		Gerdau Aços Especiais (Pindamonhangaba/SP)
		Gerdau Aços Especiais (Mogi das Cruzes/SP)
Villares Metals (Sumaré/SP)		

* Unidades 100% integradas, ou seja, utilizam coque próprio.

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

O ferro-gusa é uma *commodity* utilizada em aciarias, servindo basicamente para produção de aço e fundições. Consiste em uma liga ferro-carbono gerada a partir do processo de redução do minério de ferro, utilizando coque ou carvão vegetal como elemento redutor.

As usinas integradas são responsáveis por produzir a maior parte do ferro-gusa nacional, atingindo, em 2013, um total de 26.206.700 toneladas de ferro-gusa, valor que representa 83% da produção total brasileira (SINDIFER, 2013). Existem no país cinco estados produtores de ferro-gusa: Minas Gerais, Maranhão e Pará (Carajás), Espírito Santo e Mato Grosso do Sul.

5 A unidade da Gerdau Usiba utiliza processo de redução direta (DRI) para produção de ferro-espoja. É o único caso no cenário nacional.

No caso das usinas independentes, foram contabilizadas 81 unidades no mercado brasileiro em 2007 (SINDIFER, 2009), com capacidade de produção de cerca de 14,2 milhões de toneladas de ferro-gusa por ano, distribuídas em 41 municípios, sendo 62 delas localizadas no estado de Minas Gerais. A produção dessas empresas, entre 2000 e 2013, está detalhada na Tabela 6.

Tabela 6 – Produção de Ferro-gusa por Usinas Independentes no Brasil (toneladas)

Ano	Produção (toneladas)								
	MG	%	Carajás ⁶	%	ES	%	MS	%	Total
2000	4.039.932	65,7	1.652.000	27	372.925	6,1	80.520	1,3	6.145.377
2001	4.005.548	61,5	2.021.500	31	387.185	5,9	96.000	1,5	6.510.233
2002	4.043.163	59,8	2.245.000	33	375.727	5,6	96.000	1,4	6.759.890
2003	5.193.060	64,1	2.364.500	29	450.304	5,5	96.000	1,2	8.103.864
2004	6.302.964	62,5	3.102.750	30,7	499.358	5	180.000	1,8	10.085.170
2005	5.797.999	59,3	3.228.287	33	505.795	5,2	241.653	2,5	9.773.832
2006	5.353.664	56,5	3.452.400	36,5	376.755	4	282.800	3	9.465.716
2007	5.042.637	52,4	3.927.800	40,8	350.521	3,6	307.100	3,2	9.628.058
2008	4.303.302	50,3	3.543.718	41,4	280.865	3,3	424.500	5	8.552.385
2009	2.380.600	54	1.710.000	38,8	-	1,4	253.500	5,8	4.344.100
2010	2.904.187	57,8	1.661.333	33	198.700	4	263.167	5,2	5.027.387
2011	2.998.000	51,5	2.019.004	34,7	357.000	6,1	450.000	7,7	5.824.004
2012	2.738.437	49,4	2.058.146	37,1	260.227	4,7	491.241	8,8	5.548.051
2013	2.924.957	54,6	1.763.104	33	195.988	3,7	468.025	8,7	5.352.074

Fonte: Elaboração própria a partir de SINDIFER, 2013

O Brasil é o principal produtor de ferro-gusa utilizando carvão vegetal do mundo. Estima-se que cerca de 2,9 milhões de toneladas de ferro-gusa foram produzidos a partir de carvão vegetal em 2013 (SINDIFER, 2013), o que representa cerca de 54% do ferro-gusa produzido em usinas de produtores independentes, ou cerca de 9% da produção total de ferro-gusa no Brasil. A parcela restante da produção de ferro-gusa por produtores independentes (46%) foi obtida a partir do coque.

1.2 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DO SETOR

De acordo com as informações do Balanço de Energia Nacional – BEN (EPE, 2017), a energia consumida pela indústria de ferro e aço no Brasil, em 2016, foi de 15,0 milhões de tep, valor equivalente a 17,8% da demanda final do setor industrial naquele ano. Verifica-se queda em relação ao ano de 2015, porém ainda mantendo um patamar de consumo de energia superior ao atingido em 2009, após a crise internacional.

6 Aqui se incluem os estados do Maranhão e do Pará.

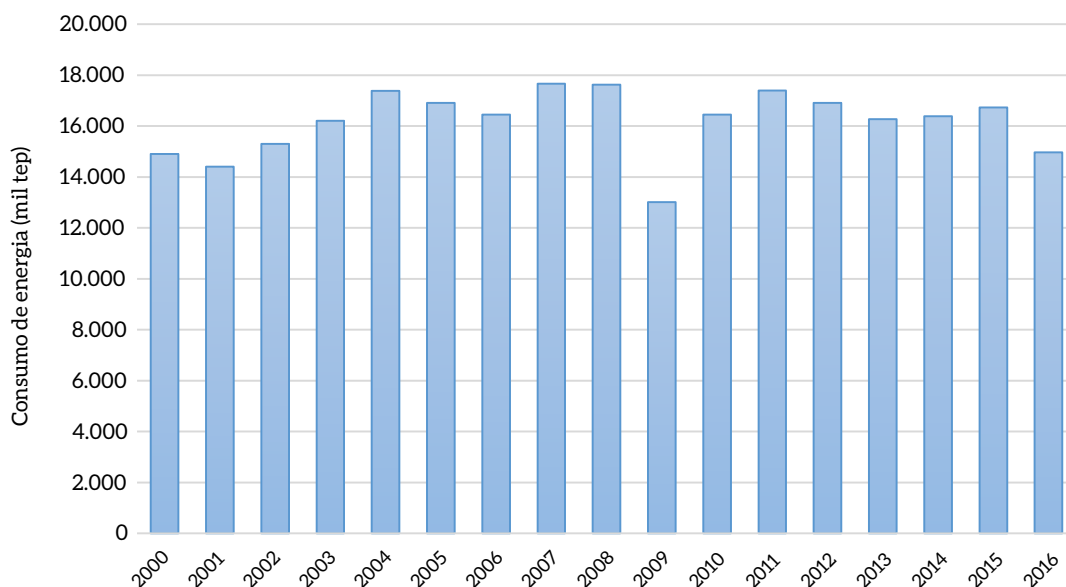


Figura 3 – Consumo de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço Brasileiro entre 2000 e 2016

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

Do total consumido de energia em 2016, 44,9% são representados pelo consumo de coque de carvão mineral, enquanto 16,6% são relativos ao uso de carvão vegetal. O uso de carvão mineral representa 12,9% do total do consumo de energia (Tabela 7).

Tabela 7 – Consumo por Fontes de Energia do Setor de Ferro e Aço Brasileiro entre 2007 e 2016

Fontes	Consumo de Energia (mil tep)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	1.214	1.158	695	897	997	1.067	1.020	1.036	1.223	1.012
Carvão mineral	1.939	2.052	1.578	1.772	1.924	1.854	1.808	2.053	2.124	1.935
Óleo diesel	14	14	14	15	35	38	37	35	29	25
Óleo combustível	145	142	114	168	29	29	40	35	2	2
GLP	88	97	90	71	26	20	19	26	25	59
Gás de coqueria	1.039	1.065	1.011	1.250	1.288	1.237	1.200	1.200	1.148	1.114
Coque de carvão mineral	6.320	6.289	4.969	7.153	7.750	7.495	7.309	7.237	7.441	6.728
Eletricidade	1.579	1.602	1.281	1.613	1.714	1.696	1.691	1.671	1.609	1.484
Carvão vegetal	4.775	4.679	2.724	3.372	3.492	3.338	3.021	2.962	2.988	2.490
Outras fontes secundárias de petróleo	551	528	531	134	145	139	129	133	135	119
TOTAL	17.664	17.627	13.008	16.445	17.401	16.914	16.274	16.387	16.725	14.969

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

Na Figura 4, é mostrada a evolução do consumo por fontes de energia no setor de ferro e aço de 1973 até 2016 e a participação percentual dos principais insumos energéticos.

A quantidade de carvão mineral empregada na indústria siderúrgica cresce a partir dos anos 1990, devido à substituição parcial de coque por carvão pulverizado injetado nos altos-fornos (CNI, 2010). A participação de gás natural cresce lentamente, enquanto a utilização de óleo combustível é reduzida.

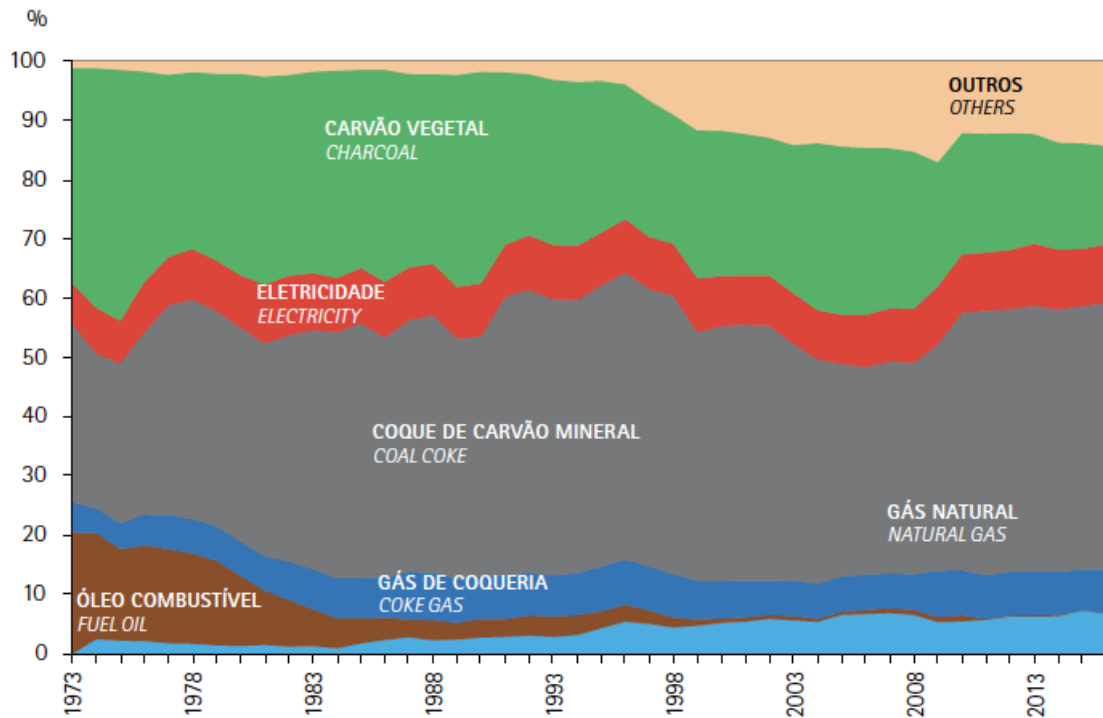


Figura 4 – Estrutura de Consumo de Energia no Setor de Ferro-gusa e Aço Brasileiro

Fonte: EPE, 2017

O valor total de energia consumida descrito no BEN inclui a energia necessária para a produção de ferro e aço no país, considerando as etapas envolvidas na cadeia de produção dessa indústria (preparação do material, fabricação de ferro, fabricação de aço e manufatura do aço).

A produção de sinter é realizada na própria planta, entretanto o processo de pelletização é feito na indústria de mineração. Assim, deve-se ter em mente que no BEN a pelletização está contabilizada no setor de mineração, que é avaliado em outro relatório do projeto.

Os produtores independentes de ferro-gusa no Brasil são inúmeros, muitos deles com altos-fornos de pequena capacidade e sem que órgãos governamentais e associações setoriais tenham informações técnicas detalhadas de seus processos de produção. O Instituto Brasileiro de Siderurgia utiliza o valor de 25,4 GJ/tonelada para estimar o consumo específico de energia dos produtores independentes de ferro-gusa (CNI, 2010).

Em 2012, os produtores independentes de ferro-gusa foram responsáveis pela produção de 5,5 milhões de toneladas, das quais somente 2,5 milhões foram destinadas ao mercado interno brasileiro (SINDIFER, 2013) e 3 milhões de toneladas foram exportadas. Assim, pode-se estimar que o consumo energético dos produtores independentes para produzir ferro-gusa destinado ao mercado exterior foi de aproximadamente 76,8 PJ.

Dessa forma, ao subtrair 76,8 PJ dos 703 PJ, obtém-se uma estimativa da energia total consumida em 2012 para produção de aço no Brasil equivalente a 626,2 PJ. Sabendo que a produção brasileira de aço bruto foi de 34.524 milhões de toneladas (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013), obtém-se o consumo específico médio de 18,13 GJ/tonelada de aço bruto.

Esse resultado mostra elevado grau de eficiência do setor siderúrgico nacional, estando abaixo da média da siderurgia mundial segundo valores da World Steel Association (2014), como mostrado na Figura 5. A boa qualidade do minério de ferro brasileiro pode ser citada como fator que favorece essa condição (CNI, 2010).

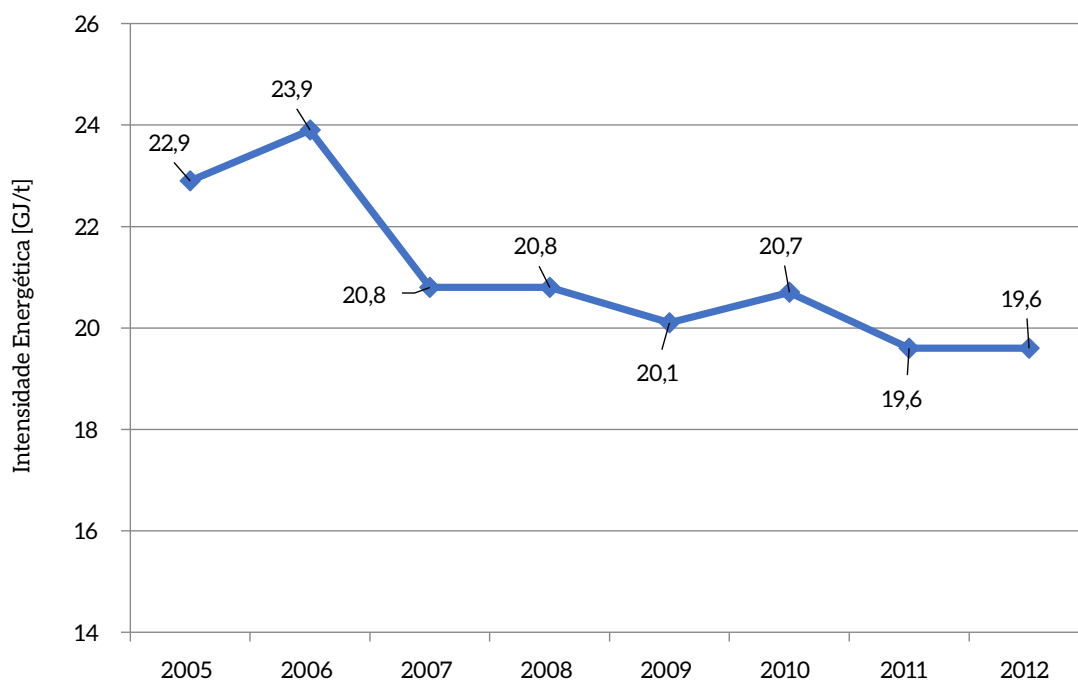
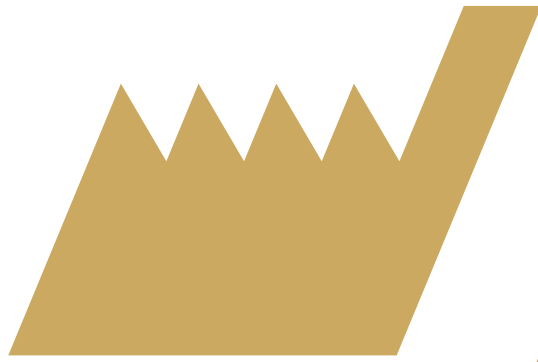


Figura 5 – Intensidade Energética Média na Siderurgia Mundial entre 2005 e 2012

Fonte: Elaboração própria a partir de WORLD STEEL ASSOCIATION, 2014



Desagregação setorial

Capítulo

2

2 DESAGREGAÇÃO SETORIAL

2.1 DESAGREGAÇÕES DO SETOR DE AÇO

2.1.1 SEPARAÇÃO POR ROTAS DE PRODUÇÃO

A produção de aço via rota integrada representa a maior parte da produção mundial de aço e consiste basicamente na redução de óxido de ferro a ferro-gusa e posterior refino para redução do teor de carbono, transformando o produto em aço. Nessa rota, os principais insumos são minério de ferro, carvão, calcário e sucata ferrosa. A Figura 6 mostra os principais processos de usinas integradas.

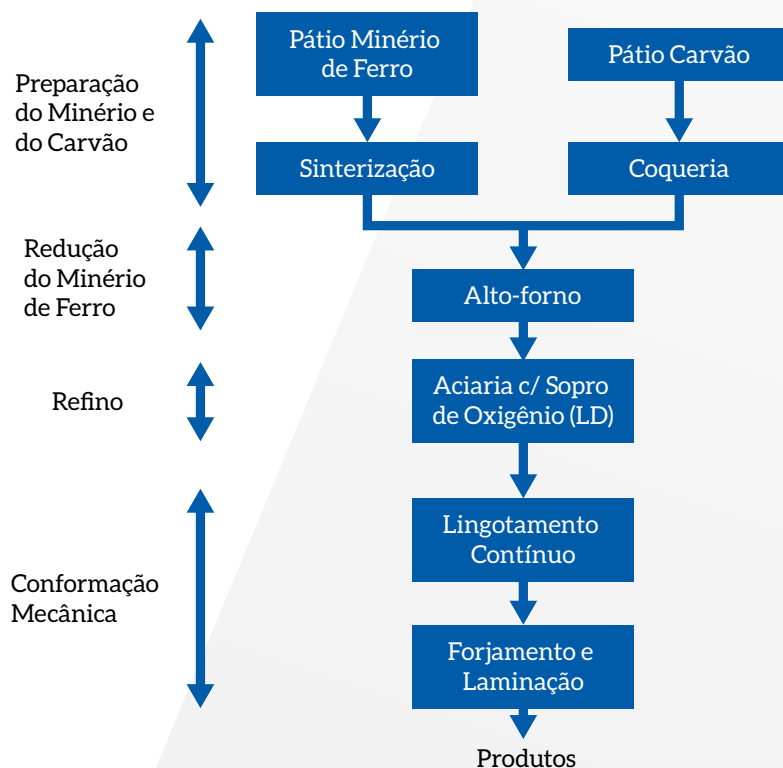


Figura 6 – Fluxograma de Processos de Usinas Integradas

Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2010

A produção via rota semi-integrada não tem a etapa de redução e normalmente é obtida por meio da reciclagem do aço em fornos elétrico a arco (EAF ou FEA), tendo como principais insumos sucata e eletricidade. Esse tipo de rota depende diretamente da disponibilidade de sucata, que está correlacionada com o consumo de aço de cada país. A Figura 7 ilustra os processos realizados nas usinas semi-integradas.

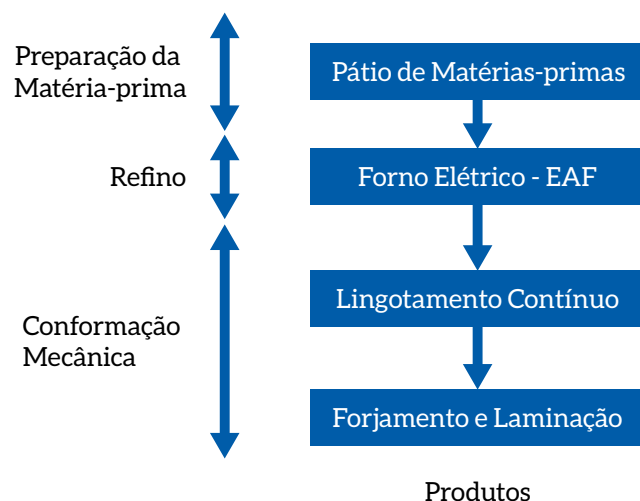


Figura 7 - Fluxograma de Processos de Usinas Semi-integradas

Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL, 2010

De acordo com o anuário estatístico do Instituto Aço Brasil, a participação das usinas integradas e semi-integradas na produção do aço brasileiro, em 2012, foi de 81% e 19%, respectivamente. A Tabela 8 detalha a produção por cada rota no ano de 2012.

Tabela 8 - Produção Brasileira de Aço Bruto em 2012

Configuração Técnica das Usinas	Produção de Aço Bruto (mil toneladas)
Integradas	28.152
Semi-integradas	6.372
Total	34.524

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

Paralelamente, ainda existe a possibilidade de utilizar ferro-esponja, ou *direct reduced iron* (DRI), obtido pelo processo de redução direta, em que o minério de ferro é transformado em ferro metálico. Nesse processo, o minério de ferro não passa pelo estado líquido, como ocorre com o ferro-gusa, o que dá ao ferro-esponja algumas desvantagens, como redução do rendimento. Entretanto, diversos avanços vêm sendo conquistados nos processos que utilizam ferro-esponja. No Brasil, sua aplicação ainda é pouco significativa e foi empregada em apenas uma unidade.

Também é necessário classificar as usinas siderúrgicas de acordo com o processo de aciaria utilizado na fábrica (Tabela 9). Comparando-se a Tabela 8 e a Tabela 9, fica evidente que a participação de usinas integradas não é idêntica à utilização do processo LD a oxigênio para produção de aço. Ou seja, essa discrepância indica que existem fornos elétricos a arco instalados em usinas integradas. Portanto, foi necessário analisar as usinas que utilizam fornos elétricos a arco instalados e verificar se parte delas está classificada como usina integrada.

Tabela 9 – Produção de Aço Bruto por Processo de Aciaria em 2012

Processo de Aciaria	Produção (mil toneladas)	Participação (%)
Oxigênio (LD)/BOF	25.962	75,2
Elétrico	8.094	23,4
EOF	468	1,4
Total	34.524	100,0

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

Em 2008, a capacidade instalada total do Brasil era de 11,8 milhões de toneladas de aço por ano em fornos elétricos a arco, distribuídos entre seis grupos de empresas: Gerdau, ArcelorMittal, Votorantim, Sinobras, CSN e Villares Metals (CGEE, 2008). A Tabela 10 mostra os fornos elétricos a arco instalado no Brasil em 2008, sua localização e sua capacidade nominal de produção (CGEE, 2008). Nessa tabela, foram destacadas as unidades classificadas pelo Instituto Aço Brasil como usinas integradas: Gerdau (antiga Usiba); ArcelorMittal Inox do Brasil (Aperam); Sinobras Marabá; CSN.

Dessa forma, pode-se confirmar que existem fornos elétricos a arco instalados nessas usinas integradas, indicando que parte de sua produção é proveniente de uma configuração diferente daquela em que a usina foi classificada.

Tabela 10 – Fornos Elétricos a Arco Instalados no Brasil em 2008

Grupo	Unidade ou localização	Capacidade nominal (mil t/ano)
Gerdau	Cearense	140
Gerdau	Açonorte	350
Gerdau	Usiba	600
Gerdau	Cosigua	1.100
Gerdau	Pindamonhangaba	800
Gerdau	Vilares Mogi	500
Gerdau	São Paulo	900
Gerdau	Guaíra	500
Gerdau	Rio-grandense	500
Gerdau	Piratini	500
ArcelorMittal	Juiz de Fora	1.100
ArcelorMittal	Cariacica	600
ArcelorMittal	Piracicaba	1.100
ArcelorMittal	Inox do Brasil (Asperam)	400
Votorantim	Barra Mansa	700
Votorantim	Rezende	1.000
Sinobras	Marabá	400
CSN	Volta Redonda	500
Villares Metals	Sumaré	120

Fonte: Elaboração própria a partir de CGEE, 2008

2.1.2 SEPARAÇÃO POR LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

Os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo concentram a maior parte da produção de aço bruto no país, atingindo cerca de 80% da produção nacional, conforme a Tabela 11.

Tabela 11 – Distribuição por Estado da Produção de Aço Bruto em 2012

Estado	Produção (mil toneladas)	Participação (%)
Minas Gerais	11.780	34,1
Rio de Janeiro	10.261	29,7
São Paulo	5.607	16,3
Espírito Santo	4.809	13,9
Rio Grande do Sul	776	2,3
Pará	319	0,9
Paraná	314	0,9
Bahia	287	0,8
Pernambuco	228	0,7
Ceará	143	0,4
Brasil	34.524	100

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

A distribuição regional da produção de aço no Brasil evidencia grande concentração no Sudeste, conforme Figura 8.

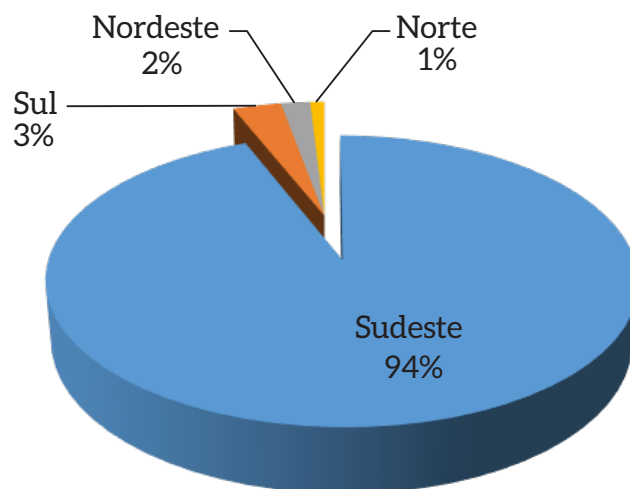


Figura 8 – Distribuição Regional da Produção de Aço Brasileira

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

2.1.3 SEPARAÇÃO POR PRODUTOS

O Instituto Aço Brasil separa a produção de aço em dois tipos básicos: aço carbono e aço ligado (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013). Em 2012, o Brasil produziu 29,7 milhões de toneladas de aço carbono, representando 86% da produção nacional, enquanto a quantidade de aço ligado produzida foi de 4,8 milhões de toneladas.

Os produtos finais do setor de aço são diversificados, como placas, lingotes, bobinas, chapas, barras, tarugos e outros laminados denominados semiacabados. Em 2012, a produção de semiacabados foi de aproximadamente 7,5 milhões de toneladas (Tabela 12), enquanto a produção de laminados sem acabamento foi de 25,7 milhões de toneladas (Tabela 13).

Tabela 12 – Produção Nacional de Semiacabados para Vendas

Produtos/Empresas	Produção ao ano (mil toneladas)		
	2010	2011	2012
Placas	4.995	6.750	6.237
ArcelorMittal Tubarão	2.560	1.628	804
CSA	435	3168	3.437
CSN	54	34	-
Gerdau	1.179	1.212	1.097
Usiminas	767	708	899
Lingotes, blocos e tarugos	1.339	1.301	1.233
ArcelorMittal Aços Longos	10	-	-
Gerdau	1.257	1.283	1.214
Sinobras	2	1	-
V&M	0	8	1
Votorantim Siderurgia	70	9	18
TOTAL	6.334	8.051	7.470

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

Tabela 13 – Produção Nacional de Laminados

Produtos/Empresas	Produção ao ano (mil toneladas)		
	2010	2011	2012
Produtos Planos	15.212	14.265	14.897
Aços Carbono	14.614	13.682	13.347
Aperam	79	73	73
ArcelorMittal Tubarão	3.620	3.510	3.430
CSN	4.653	4.665	4.704
Usiminas	6.262	5.434	6.140
Aços Ligados	598	583	550
Aperam	598	583	550
Produtos Longos	10.238	10.975	10.799
Aço Carbono	9.391	10.116	10.059
ArcelorMittal Aços Longos	3.300	3.411	3.404
Gerdau	4.648	5.140	4.889
Sinobras	238	237	287
V&M	283	266	245
VSB	-	17	144
Villares Metals	6	8	7
Votorantim Siderurgia	916	1.037	1.084
Aços Ligados	847	859	740
Gerdau	578	586	473
V&M	201	200	203
Villares Metals	68	73	64
TOTAL	25.450	25.240	25.696

Fonte: Elaboração própria a partir de INSTITUTO AÇO BRASIL, 2013

2.1.4 QUADRO-RESUMO

O Quadro 2 concentra as principais informações descritas nesta seção, listando todas as unidades produtoras de aço do país, classificadas de acordo com rota, produto, tipo de aciaria, localização e capacidade instalada.

Quadro 2 – Quadro-resumo com as Principais Informações sobre as Unidades Siderúrgicas do Brasil

Tipo de Usina	Produto	Estado	Unidade	Cidade	Aciaria	Produção de Coque	Capacidade Anual Instalada (mil toneladas)
Usinas integradas	Laminados planos	MG	Aperam South America	Timóteo	Oxigênio (LD)/BOF e Elétrica	Não	870
			Usiminas Ipatinga	Ipatinga	Oxigênio (LD)/BOF	Sim	5.000
		RJ	CSN	Volta Redonda	Oxigênio (LD)/BOF e Elétrica	Sim	5.750
			ThussenKrupp CSA	Rio de Janeiro	Oxigênio (LD)/BOF	Sim	5.200
		ES	ArcelorMittal Tubarão (CST)	Vitória	Oxigênio (LD)/BOF	Sim	7.500
		SP	Usiminas Cubatão	Cubatão	Oxigênio (LD)/BOF	Sim	4.500
	Laminados longos	MG	ArcelorMittal Aços Longos	João Monlevade	Oxigênio (LD)/BOF	Não	1.150
			Gerdau Açominas	Ouro Branco	Oxigênio (LD)/BOF	Sim	4.500
			Gerdau Aços Longos	Barão de Cocais	Oxigênio (LD)/BOF	Não	600
			Gerdau Aços Longos	Divinópolis	Oxigênio (LD)/BOF	Não	150
			V&M do Brasil	Belo Horizonte	Oxigênio (LD)/BOF	Não	700
			VSB	Jeceaba	Oxigênio (LD)/BOF	Não	1.050
		BA	Gerdau Aços Longos Usiba	Simões Filho	EOF	Não	600
		PA	Sinobras	Marabá	Oxigênio (LD)/BOF e Elétrica	Não	400
Usinas Semi-integradas	Laminados longos	SP	ArcelorMittal Aços Longos	Piracicaba	Elétrico	Não	1.100
			Gerdau Aços Especiais	Pindamonhangaba	Elétrico	Não	800
			Gerdau Aços Especiais	Mogi das Cruzes	Elétrico	Não	500
			Gerdau Aços Longos	São Paulo	Elétrico	Não	1.100
			Villares Metals	Sumaré	Elétrico	Não	120
		RJ	Gerdau Aços Longos Cosigua	Rio de Janeiro	Elétrico	Não	1.400
			Votorantim Siderurgia	Barra Mansa	Elétrico	Não	700
			Votorantim Siderurgia	Resende	Elétrico	Não	1.000
		RS	Gerdau Aços Especiais	Piratini	Elétrico	Não	500
			Gerdau Aços Longos Rio-grandense	Sapuçaia	Elétrico	Não	500
		ES	ArcelorMittal Aços Longos	Cariacica	Elétrico	Não	600
		MG	ArcelorMittal Aços Longos	Juiz de Fora	Elétrico	Não	1.100
		CE	Gerdau Aços Longos	Maracanau	Elétrico	Não	140
		PR	Gerdau Aços Longos	Guaira	Elétrico	Não	500
PE	Gerdau Aços Longos Aço Norte	Recife	Elétrico	Não	350		

2.2 DESAGREGAÇÃO DO SETOR DE FERRO

A produção de ferro no Brasil resulta em dois produtos finais: ferro-gusa e ferro-esponja. A produção de ferro-esponja para aciaria esteve limitada, até meados de 2012, a uma única unidade, que utilizava o processo DRI, sendo, portanto, muito pequena se comparada à produção nacional de ferro-gusa.

Os produtores de ferro no país podem ser divididos entre produtores independentes ou usinas integradas. Os produtores independentes de ferro-gusa empregam um processo produtivo mais simples, em que o produto é obtido pela redução do minério de ferro em altos-fornos (BF), utilizando coque metalúrgico ou carvão vegetal. Dado o fato de que as plantas independentes tendem a apresentar menor porte, o uso de carvão vegetal como agente redutor é mais frequente (MME, 2009).

As usinas integradas são responsáveis por produzir a maior parte do ferro-gusa nacional, atingindo, em 2013, um total de 26,2 milhões de toneladas, valor que representa 83% da produção total brasileira (SINDIFER, 2013). Cerca de 24% (aproximadamente 7,6 milhões de toneladas) da produção brasileira de ferro-gusa são provenientes do uso de carvão vegetal substituindo o coque. A produção de aço via rota integrada utilizando carvão vegetal é um diferencial brasileiro em relação aos demais países. Porém, a substituição da produção via rota integrada a coque por carvão vegetal é inviável por uma questão de economia de escala e competitividade com os *players* mundiais. Os altos-fornos de grande porte não usam carvão vegetal devido às características desse material (muito friável), o que compromete o processo (CNI, 2012). A Figura 9 mostra a evolução da produção de ferro-gusa no país, separada de acordo com o tipo de produção.

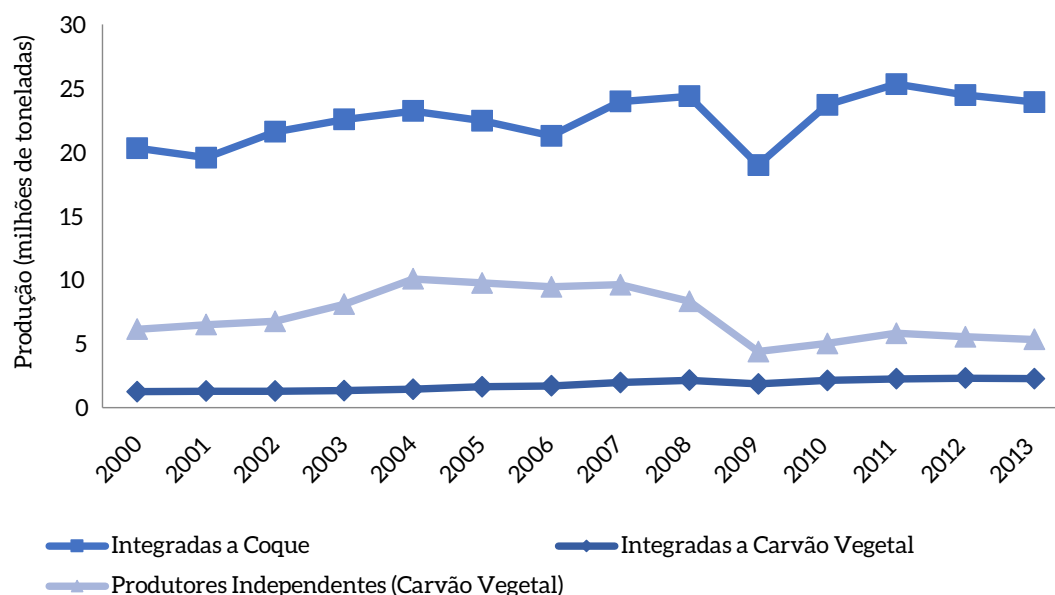


Figura 9 – Evolução da Produção Brasileira de Ferro-gusa por Rota Tecnológica

Fonte: Elaboração própria a partir de SINDIFER, 2013

O Brasil é o principal produtor de ferro-gusa utilizando carvão vegetal do mundo. Em 2013, cerca de 5,3 milhões de toneladas de ferro-gusa foram produzidos por produtores independentes a partir de carvão vegetal (SINDIFER, 2013).

Tabela 14 – Evolução da Produção de Ferro-gusa no Brasil por Rota e Combustível

Ano	Produção (toneladas)						
	Usinas Integradas				Produtores Independentes		TOTAL
	Coque	Carvão Vegetal	Total	% da Produção	Carvão Vegetal	% da Produção	
2003	22.564.026	1.346.753	23.910.779	74,7	8.103.864	25,3	32.014.643
2004	23.225.888	1.449.705	24.675.593	71,0	10.085.072	29,0	34.760.665
2005	22.460.688	1.649.889	24.110.577	71,2	9.773.225	28,8	33.883.802
2006	21.275.851	1.709.072	22.984.923	70,9	9.466.619	29,1	32.451.542
2007	23.962.642	1.980.150	25.942.792	73,0	9.628.059	27,0	35.570.851
2008	24.380.975	2.148.466	26.529.441	76,1	8.341.967	23,9	34.871.408
2009	18.995.360	1.867.000	20.862.360	82,6	4.404.100	17,4	25.266.460
2010	23.702.000	2.135.360	25.837.360	83,7	5.027.388	16,3	30.864.748
2011	25.334.200	2.256.500	27.590.700	82,6	5.824.004	17,4	33.414.704
2012	24.482.000	2.318.790	26.800.790	82,8	5.548.051	17,2	32.348.841
2013	23.923.456	2.283.244	26.206.700	83,0	5.352.074	16,9	31.558.774

Fonte: Elaboração própria a partir de SINDIFER, 2013

Tabela 15 – Evolução da Produção Independente de Ferro-gusa no Brasil por Região ou Estado

Ano	Produção (toneladas)								
	MG	%	Carajás	%	ES	%	MS	%	Total
2003	5.193.060	64,1	2.364.500	29	450.304	5,5	96.000	1,2	8.103.864
2004	6.302.964	62,5	3.102.750	30,7	499.358	5	180.000	1,8	10.085.170
2005	5.797.999	59,3	3.228.287	33	505.795	5,2	241.653	2,5	9.773.832

Ano	Produção (toneladas)								
	MG	%	Carajás	%	ES	%	MS	%	Total
2006	5.353.664	56,5	3.452.400	36,5	376.755	4	282.800	3	9.465.716
2007	5.042.637	52,4	3.927.800	40,8	350.521	3,6	307.100	3,2	9.628.058
2008	4.303.302	50,3	3.543.718	41,4	280.865	3,3	424.500	5	8.552.385
2009	2.380.600	54	1.710.000	38,8	-	1,4	253.500	5,8	4.344.100
2010	2.904.187	57,8	1.661.333	33	198.700	4	263.167	5,2	5.027.387
2011	2.998.000	51,5	2.019.004	34,7	357.000	6,1	450.000	7,7	5.824.004
2012	2.738.437	49,4	2.058.146	37,1	260.227	4,7	491.241	8,8	5.548.051
2013	2.924.957	54,6	1.763.104	33	195.988	3,7	468.025	8,7	5.352.074

Fonte: Elaboração própria a partir de SINDIFER, 2013

A Figura 10 mostra a distribuição regional da produção independente de ferro-gusa no Brasil.

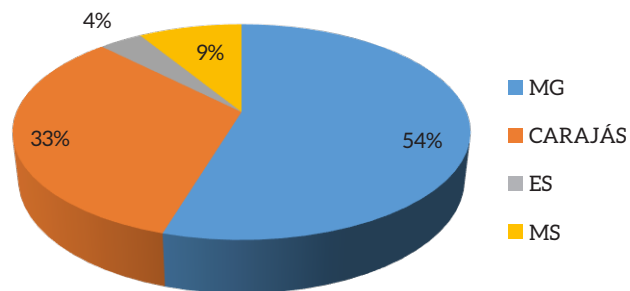
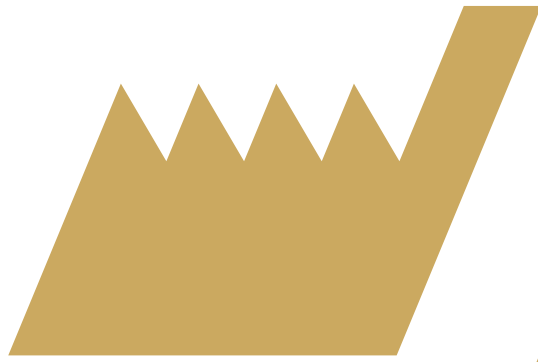


Figura 10 - Distribuição da Produção Independente de Ferro-gusa no Brasil em 2013

Fonte: Elaboração própria a partir de SINDIFER, 2013



Processos de produção de ferro-gusa e aço

Capítulo

3

3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE FERRO-GUSA E AÇO

O processo de fabricação de ferro e aço inclui quatro partes distintas: preparação do material, fabricação do ferro, fabricação do aço e manufatura do aço (UBIETO, 2012).



Figura 11 – Etapas da Produção de Ferro e Aço

Fonte: UBIETO, 2012

Nesta seção, cada etapa de produção será analisada com mais detalhes e subdividida de acordo com o tipo de rota possível.

Para evidenciar os diferentes processos de produção de ferro e aço no mundo, foram consideradas quatro rotas de produção que englobam as diferentes tecnologias existentes, que são:

- Redução em alto-forno e produção de aço via conversor a oxigênio (AF+CO) – rota integrada;
- Fusão redutora e produção de aço via conversor a oxigênio (FR+CO) – rota integrada;
- Redução direta e produção de aço via forno elétrico a arco (RD+FEA) – rota integrada;
- Produção de aço via sucata utilizando forno elétrico a arco (sucata + FEA) – rota semi-integrada.

É importante ressaltar que a intensidade de emissões de carbono na indústria de ferro e aço depende consideravelmente da rota utilizada: 400 kgCO₂/tonelada de aço produzido a partir de sucata em fornos elétricos a arco; 1.700 a 1.800 kgCO₂/tonelada de aço produzido em rotas integradas com altos-fornos e conversores a oxigênio; e podendo atingir 2.500 kgCO₂/tonelada de aço produzido em rotas que utilizam carvão para o processo de redução direta (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2014).

A Figura 12 mostra estimativa das emissões de dióxido de carbono nos diferentes processos envolvidos na produção de aço em uma usina integrada.

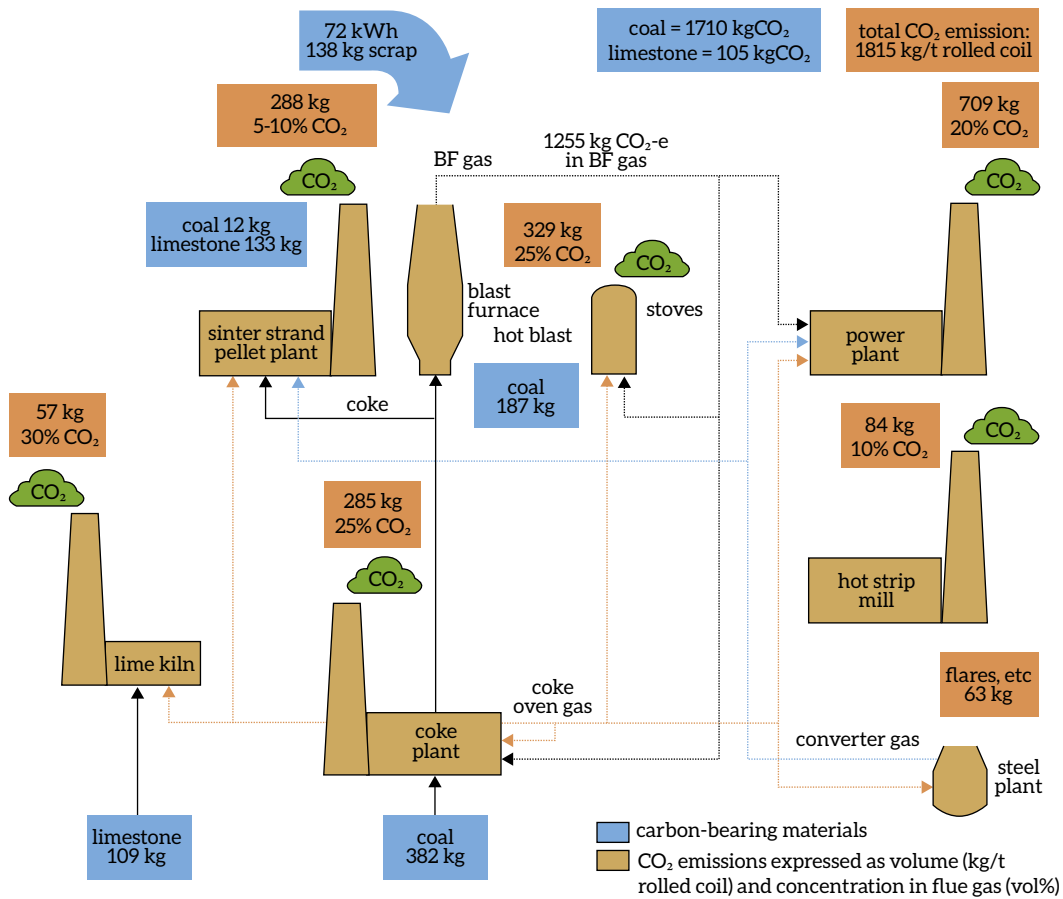


Figura 12 - Emissões de CO₂ em uma Típica Usina Integrada

Fonte: WORLD STEEL ASSOCIATION, 2014

A seguir, são descritas as diferentes etapas e os processos produtivos aplicados no setor de ferro-gusa e aço.

3.1 TRATAMENTO OU PREPARAÇÃO DE MATERIAIS

Em usinas integradas a coque, a produção de aço é iniciada com o processo de produção de coque e preparação do minério de ferro.

3.1.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COQUE

O coque consiste de um material poroso com alto teor de carbono. Sua produção é etapa de grande importância em usinas integradas que utilizam a rota altos-fornos e conversores a oxigênio, agindo como agente redutor, fonte de energia térmica e fornecendo suporte físico à carga no interior do alto-forno.

Em altos-fornos modernos, são necessários entre 460 kg a 480 kg totais de reagente por tonelada de metal produzida. A média global é de 500 kg/tonelada de metal. Entretanto, já existem altos-fornos modernos com injeção suplementar de combustível em que o consumo de coque chega a atingir 300 kg/tonelada de metal (IIP, 2014a).

O processo de coqueamento é uma destilação seca, dividida nas seguintes etapas:

- Mistura do carvão e pulverização;
- Aquecimento pelos fornos de coque a até 1.100°C na ausência de ar, fazendo a carbonização do carvão e transformando-o em uma massa porosa chamada coque;
- Os gases produzidos são coletados e serão usados como combustível para o forno de coque e em diferentes etapas do processo de fabricação de aço;
- O coque recebe apagamento pela água antes do seu transporte até o alto-forno.

Estima-se que a produção de uma tonelada de coque necessita de entre 1,25 a 1,65 tonelada de carvão, gerando entre 300 m³ a 600 m³ de gás de coqueria, resultando em um conteúdo energético de 6 a 8 GJ/tonelada de coque.

No processo de aquecimento do carvão pelos fornos de coque, estima-se que, para cada tonelada de carvão, entre 3,5 e 5 GJ (WORRELL et al., 2008) de energia são utilizados e 1,6 tonelada de carvão (*coking coal*) é usada. A produção de coque representa cerca de 10% da demanda de energia de uma usina que utiliza a rota alto-forno e conversor a oxigênio (WORRELL et al., 2008). Dessa forma, as características do carvão utilizado são muito importantes para a determinação da produção. Em média, a cada 1% a menos no teor de cinzas do carvão, a demanda de coque é reduzida em 2%.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2013), a intensidade energética do processo de coqueificação pode ser subdividida de acordo com os insumos mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 – Intensidade Energética do Processo de Coqueificação (GJ/tonelada métrica de aço)

Coqueificação – Rota AF + CO	
Combustível	0,6
Vapor	0,1
Eletricidade	0,1
TOTAL	0,8

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008; EPE, 2013

No processo de produção de coque, os níveis de emissão de CO₂ estão entre o patamar de 860 a 1.610 kg CO₂/tonelada de coque (EIPPCB, 2013).

3.1.2 PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

A sinterização tem como finalidade processar a matéria-prima fina em um sínter de minério de ferro de granulação mais grossa, pronto para ser colocado no alto-forno. O desempenho de altos-fornos modernos é aumentado mediante essa preparação do minério de ferro.

No processo de sinterização, um composto de minério de ferro, contendo materiais como escória de aciaria e pequenas partículas de coque (*coke breeze*), é depositado em uma grande grelha de deslocamento. O coque da mistura entra em combustão pela ação de queimadores de gás de coque, gás de alto-forno ou gás natural. À medida que a grelha se desloca, ocorre a sucção de ar do topo da mistura, permitindo a combustão de toda a camada, completando a sinterização. Durante esse processo, as temperaturas no forno atingem valores entre 1.300°C a 1.500°C. No final do processo, o material é resfriado pelo ar e o sinter é finalizado.

A Tabela 17 detalha a intensidade energética do processo de sinterização, utilizado na rota alto-forno e conversor a oxigênio.

Tabela 17 – Intensidade Energética do Processo de Sinterização

Sinterização	
Combustível	2,0
Vapor	-0,2
Eletricidade	0,2
TOTAL	1,9

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

Os níveis atuais de emissão do processo de sinterização estão entre o patamar de 161,5 a 368 kg CO₂/tonelada de sinter (EIPPCB, 2013).

3.2 PRODUÇÃO DE FERRO

3.2.1 ALTO-FORNO

No alto-forno, o oxigênio presente no minério de ferro é removido para converter os *pellets* ou sinters em metal quente (*hot metal*). Esse processo de redução ocorre no interior refratário dos altos-fornos a temperaturas que variam em torno de 2.200°C na área mais quente, e o ponto de fusão do ferro é 1.535°C. O alto-forno é alimentado continuamente pelo topo com ferro, coque e alguns aditivos. Quando o ferro é reduzido e fundido, ele é coletado pelo fundo do alto-forno.

Os materiais reduzidos (oxigênio e carbono) são combinados na forma gasosa: monóxido e dióxido de carbono. Esse gás de alto-forno é descartado através de uma tubulação para uma planta de reciclagem do gás. A presença de CO nesse gás o converte em um bom combustível, que pode ser usado no próprio alto-forno em processos de produção do aço ou para gerar energia elétrica e calor.

Os sopradores de ar e os fornos de aquecimento de ar são elementos importantes do alto-forno. O primeiro é responsável por garantir o fluxo de ar à pressão de 3 a 5 bar, enquanto o segundo aumenta a temperatura do ar para 900°C-1.350°C.

Minério de ferro, coque e cal (responsável por remover impurezas da mistura) são introduzidos no topo do alto-forno, enquanto ar comprimido em alta temperatura é injetado pela parte inferior do forno. Agentes redutores auxiliares (carvão, gás natural e outros) também podem ser injetados na parte superior do forno.

Na parte inferior do forno, o coque é gaseificado e o monóxido de carbono resultante realiza a redução do óxido de ferro à medida que ascende pelo alto-forno. O ferro fundido escorre para a parte inferior e é coletado no fundo do alto-forno. Impurezas são removidas pela adição de CaO, formando uma escória que flutua sobre o ferro fundido.

Os gases quentes que deixam o alto-forno ainda apresentam pressão mais alta que a atmosférica (2 a 3 bar) e baixo poder calorífico (~ 3 MJ/Nm³). Esse gás é produzido a uma taxa de 1.300 a 2.200 Nm³/tonelada de ferro-gusa, podendo ser utilizado como combustível (WORRELL et al., 2010).

A energia mínima utilizada em um alto-forno é de 10,4 GJ/t (IIP, 2014b). Entretanto, a média de energia primária total dos altos-fornos é de 11,6 GJ/t somadas a mais 1,8 GJ/t devido aos fornos de aquecimento de ar (WORRELL et al., 2010), atingindo um total de 13,4 GJ/t.

No estudo da EPE, os valores listados retirados de Worrell et al. (2008) para intensidade energética de altos-fornos totalizam 12,2 GJ/t, segregados conforme mostrado na Tabela 18.

Tabela 18 – Intensidade Energética do Alto-forno

Alto-forno (GJ/tonelada métrica de aço)	
Combustível	11,4
Vapor	0,4
Eletricidade	0,1
Oxigênio	0,2
TOTAL	12,2

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

3.2.2 FUSÃO REDUTORA

O processo de fusão redutora é utilizado para gerar ferro-gusa sem a necessidade de produção de coque, fazendo uso da gaseificação do carvão para redução do minério de ferro e reduzindo o Fe₂CO₃ via agentes redutores CO e H₂. Após a redução do minério de ferro, um conversor a oxigênio é utilizado para produzir o aço.

O processo de fusão redutora mais difundido no mundo é o Corex, operando na África do Sul, Coreia do Sul, Índia e China. O processo Corex faz uso de aglomerados de minério de ferro pré-reduzido, que é fundido e gera excesso de gás. Os valores de intensidade energética dos processos de fusão redutora são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 – Intensidade Energética do Processo de Fusão Redutora

Fusão Redutora (GJ/tonelada métrica de aço)	
Combustível	15,9
Eletricidade	0,3
Oxigênio	1,2
TOTAL	17,3

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

3.2.3 REDUÇÃO DIRETA

O processo de redução direta (RD) produz o chamado ferro-esponja e se mostra como rota alternativa. No processo de redução direta, o minério de ferro é reduzido no estado sólido (sem a formação de ferro fundido) e pode ser transformado em aço pelo processo de forno elétrico a arco.

Nos mercados do Oriente Médio, parte da América do Sul, Índia e México, as usinas operando em rotas de redução direta são mais comuns. Esse processo se mostra como opção atrativa devido aos menores custos de investimento de capital e sua capacidade de se ajustar às matérias-primas da região. Dessa forma, a produção de aço por essa rota tem se expandido rapidamente nos últimos 30 anos. Entretanto, a menor escala da aplicação se mostra como a principal barreira da tecnologia (IIP, 2014c).

Uma vez que não existe fusão no processo RD, os elementos contaminantes no minério de ferro precisam ser separados na aciaria, ou seja, no FEA. Assim, o consumo de eletricidade do FEA que utiliza ferro-esponja é maior.

Os principais combustíveis utilizados mundialmente em usinas de RD são o carvão e o gás natural, este sendo opção em 90% delas.

O consumo de energia em usinas de RD com gás natural é contabilizado em 10,4 GJ/tonelada de ferro-esponja (IIP, 2014c). Os valores apresentados pela EPE totalizam 11,7 GJ/tonelada, sendo, portanto um pouco superiores, conforme mostrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Intensidade Energética do Processo de Redução Direta (GJ/tonelada métrica de aço)

Redução Direta (GJ/tonelada métrica de aço)	
Combustível	12,9
Eletricidade	-1,2
TOTAL	11,7

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

3.3 PRODUÇÃO DE AÇO

3.3.1 CONVERSORES A OXIGÊNIO (BASIC OXYGEN FURNACE – BOF)

O ferro proveniente do alto-forno contém entre 4% e 4,5% de carbono, enxofre e alguns aditivos. O aço final demanda menores quantidades de carbono (<1,5%) e baixíssimas quantidades de enxofre e outros aditivos (<0,02%) (UBIETO, 2012).

Primeiramente, o enxofre é removido em um processo de dessulfurização. Após essa etapa, o metal quente é transportado para o conversor a oxigênio, recipiente refratário onde oxigênio puro é injetado.

Em termos energéticos, o conversor de oxigênio é mais uma fonte que um sumidouro de energia. Isso ocorre devido à grande liberação energética nos gases resultantes das reações exotérmicas no forno. Portanto, a operação do conversor a oxigênio pode transformá-lo em produtor de energia caso a energia sensível e química que deixa o forno for recuperada e utilizada. Os consumos energéticos são detalhados na Tabela 21.

Estima-se que 50 Nm³ de oxigênio, produzido em outra unidade, são necessários para cada tonelada de aço líquido. Como as reações que ocorrem no conversor a oxigênio são altamente exotérmicas, as temperaturas no forno atingem usualmente de 1.600°C a 1.650°C.

Tabela 21 – Intensidade Energética do Conversor a Oxigênio (GJ/tonelada métrica de aço)

Conversor a Oxigênio – Rota AF + CO e rota FR + CO	
Combustível	-0,7
Vapor	-0,2
Eletricidade	0,1
Oxigênio	0,4
SUBTOTAL	-0,4
Eletricidade para refino do aço	0,1
TOTAL	-0,3

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

Estima-se que as emissões de CO₂ do processo de aciaria utilizando conversores a oxigênio variam entre 22,6 a 174 kgCO₂/tonelada de aço líquido (EIPPCB, 2013).

3.3.2 FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

Fornos elétricos a arco (FEA) são utilizados para a produção de aço carbono e ligas de aço, principalmente via reciclagem de sucata. No FEA, sucata e/ou unidades manufaturadas de ferro (como ferro-gusa, ferro-esponja e carboneto de ferro) são derretidos e convertidos em aço de alta qualidade através de arcos elétricos de alta potência formados entre um catodo e dois ou três anodos (WORRELL et al., 2010). Cerca de 80% de toda a matéria-prima utilizada em fornos elétricos a arco são provenientes de sucata (WORRELL et al., 2008).

O forno consiste de uma carcaça coberta com eletrodos de grafite que vão até o fundo. Os eletrodos são responsáveis por formar um arco elétrico que vai fornecer calor para derreter o metal, como mostrado na Figura 13.

O consumo teórico de energia dos FEA para derreter sucata e superaquecê-la a temperaturas necessárias é de aproximadamente 350 a 370 kWh/tonelada de aço. Na prática, a quantidade de energia necessária depende muito da mistura de insumos injetada no forno. Fatores como a composição de matérias-primas e práticas operacionais (como preaquecimento da sucata) podem influenciar muito o balanço do energético do equipamento.

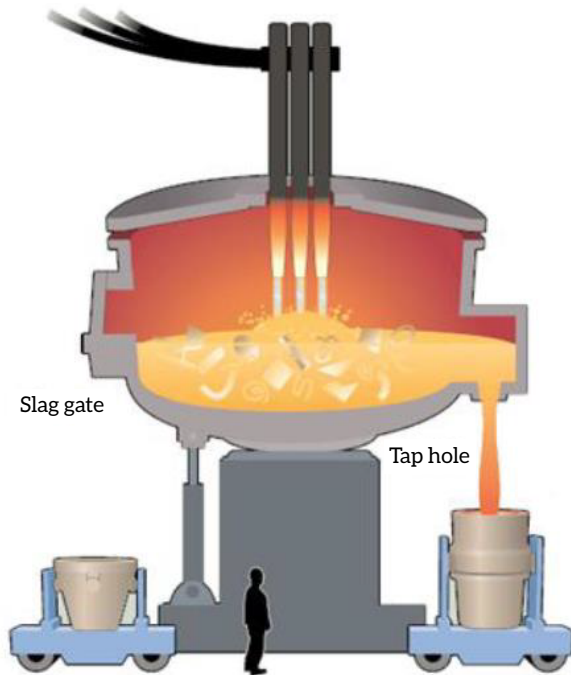


Figura 13 - Esquema de Forno de Arco Elétrico

Fonte: UBIETO, 2012

De acordo com o reportado pela IEA (2010), o consumo de FEA no mundo varia entre 300 a 550 kWh/tonelada de aço (IIP, 2014d).

Quando uma carga metálica composta por 60% de ferro-esponja e 40% de sucata de alta qualidade é inserida em um FEA, estima-se que o consumo de energia do forno é de 530 kWh/tonelada de aço, existindo consumo adicional de 65 kWh/tonelada de aço líquido utilizado para limpeza do gás e refino.

O preaquecimento da sucata pode reduzir o consumo em cerca de 40 kWh/tonelada de aço líquido, gerando valor de consumo médio de 555 kWh/tonelada. Os valores médios de consumo são detalhados em GJ/t na Tabela 22.

Tabela 22 – Intensidade Energética do FEA Operando com 60% Ferro-esponja e 40% de Sucata (GJ/tonelada métrica de aço)

Forno Elétrico – Redução Direta	
Combustível	0,6
Eletricidade	1,7
Oxigênio	0,3
TOTAL	2,6

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

Cabe frisar que a configuração com uma carga metálica de 100% de sucata apresenta intensidade energética menor, conforme mostra a Tabela 23.

Tabela 23 – Intensidade Energética do FEA Operando com 100% de Sucata (GJ/tonelada métrica de aço)

Forno Elétrico – Sucata (GJ/tonelada métrica de aço)	
Combustível	0,6
Eletricidade	1,5
Oxigênio	0,3
TOTAL	2,4

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

Estima-se que as emissões de CO₂ do processo de aciaria utilizando FEA variam entre 72 e 180 kgCO₂/tonelada de aço líquido (EIPPCB, 2013).

3.3.3 LINGOTAMENTO CONTÍNUO

Após a produção do aço, este deve ser convertido por questões logísticas em placas, tarugos etc., de forma a destinar o produto de acordo com o mercado onde será comercializado. O aço fundido é moldado de acordo com as necessidades de cada fábrica (Figura 14).

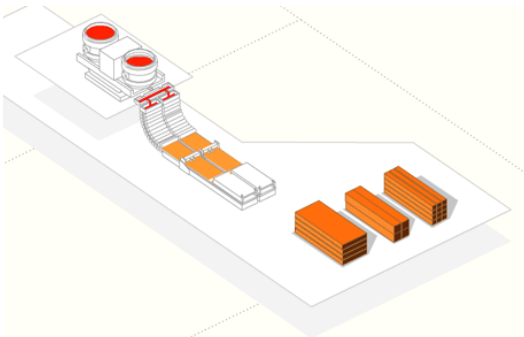


Figura 14 – Processo de Lingotamento do Aço

Fonte: IIP, 2014d

A intensidade energética do lingotamento contínuo é a mesma, independentemente da rota utilizada para a fabricação do aço, estando na ordem de 0,06 a 0,1 GJ/tonelada de aço produzida, como mostrado na Tabela 24.

Tabela 24 – Intensidade Energética no Processo de Lingotamento Contínuo (GJ/tonelada métrica de aço)

Lingotamento Contínuo – Todas as Rotas	
Combustível	0,03
Eletricidade	0,03
TOTAL	0,06

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

3.4 MANUFATURA DO AÇO

O processo de laminação é responsável pelo acabamento dos produtos siderúrgicos intermediários, dando-lhes a forma final desejada.

A maioria das placas produzidas é aquecida em fornos de reaquecimento e enrolada em sua forma final em unidades designadas a essa função. Enquanto alguns produtos, como barras de reforço e chapas de aço, necessitam apenas de laminação a quente, outros precisam passar também pela laminação a frio.

Como é de se esperar, as forças necessárias para realizar a laminação a frio são maiores e necessitam de maiores quantidades de energia para o processo de conformação, enquanto a laminação a quente é realizada mais rapidamente e com forças consideravelmente menores. Entretanto, os custos energéticos para aquecer o metal até sua temperatura eutética são altos.

3.4.1 LAMINAÇÃO A QUENTE

O processo de laminação a quente consiste no reaquecimento dos produtos fundidos e uma deformação/conformação posterior.

Fornos de reaquecimento de tarugo aquecem as placas até 1.250°C, utilizando combustíveis como fonte primária de energia. O processo de deformação é feito pelas laminadoras, que reduzem a espessura do material e aumentam seu comprimento. A Figura 15 mostra um esquema do processo.

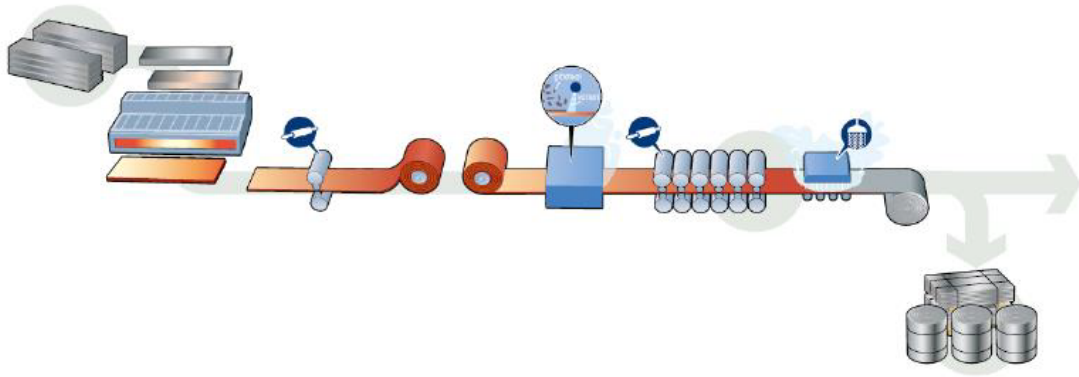


Figura 15 – Processo de Laminação a Quente

Fonte: UBIETO, 2012

O consumo energético médio estimado para o processo de laminação a quente varia de acordo com o tipo de produto. A Tabela 25 mostra a divisão do consumo de energia por tipo produzido.

Tabela 25 – Intensidade Energética no Processo de Laminação a Quente Dividido por Produto

Produto	Insumo (GJ/tonelada métrica de aço)	
Planos	Combustível	1,3
	Vapor	0,02
	Eletricidade	0,3
	TOTAL	1,6
Longos	Combustível	1,6
	Eletricidade	0,3
	TOTAL	1,8
Arame	Combustível	1,7
	Eletricidade	0,4
	TOTAL	2,1

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

3.4.2 LAMINAÇÃO A FRIO E ACABAMENTO

Laminação a frio é um nome que engloba diferentes processos de laminação que podem ser aplicados aos produtos da laminação a quente anterior. A Tabela 26 mostra o consumo estimado de energia do processo de laminação a frio.

Tabela 26 – Intensidade Energética no Processo de Laminação a Frio (GJ/tonelada métrica de aço)

Laminação a Frio – Rota AF + CO e rota FR + CO	
Combustível	0,06
Vapor	0,03
Eletricidade	0,3
TOTAL	0,4

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

A Tabela 27 mostra o consumo estimado no processo de acabamento final do aço.

Tabela 27 – Intensidade Energética no Processo de Acabamento (GJ/tonelada métrica de aço)

Laminação a Frio – Rota AF + CO e rota FR + CO	
Combustível	0,7
Vapor	0,3
Eletricidade	0,1
TOTAL	1,1

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

3.5 RESUMO DOS CONSUMOS ESPECÍFICOS POR ROTA


Dado o detalhamento do consumo específico de energia de cada etapa no processo de produção de ferro e aço, é possível agregar os processos de acordo com as rotas previamente estabelecidas, buscando a comparação do consumo energético de cada rota, bem como melhor compreensão sobre quais processos estão presentes em cada rota (Tabela 28).

Para o processo de laminação a quente, considerou-se o consumo energético para a produção de barras em todas as rotas.

Tabela 28 – Consumos Energéticos Específicos das Rotas de Produção Analisadas (GJ/tonelada métrica de aço)

Etapa	Processo	Alto-forno + Conversor a Oxigênio	Fusão Redutora + Conversor a Oxigênio	Redução Direta + FEA	Sucata + FEA
Preparação de materiais	Sinterização	1,9	-	1,9	-
	Pelotização	-	-	-	-
	Coqueificação	0,8	-	-	-
Fabricação de ferro	Alto-forno	12,2	-	-	-
	Fusão redutora	-	17,3	-	-
	Redução direta	-	-	11,7	-
Fabricação de aço	Conversor a oxigênio	-0,4	-0,4	-	-
	Forno elétrico	-	-	2,5	2,4
	Refino	0,1	0,1	-	-
Manufatura do aço	Longo contínuo	0,1	0,1	0,1	0,1
	Laminação a quente	1,8	1,8	1,8	1,8
	Laminação a frio e acabamento	1,5	1,5	-	-
Total		18,0	20,4	18,0	4,3

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2008

A stylized graphic in a golden-brown color. It features a jagged, sawtooth-like shape on the left, resembling a factory skyline or a series of hills. To its right is a large, solid trapezoidal shape that tapers towards the top right, suggesting a large industrial building or a hillside. The background is white.

Melhores tecnologias disponíveis para o setor de ferro-gusa e aço

Capítulo

4

4. MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS PARA O SETOR DE FERRO-GUSA E AÇO

Na presente seção, são brevemente descritas as MTD capazes de propiciar o aumento da eficiência energética durante o processo de produção de ferro e aço. Foram considerados os seguintes documentos para mapeamento das MTD: i) estudo da Environmental Protection Agency (USEPA, 2012); ii) relatório de melhores tecnologias na indústria siderúrgica do European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB, 2013); iii) estudo da Asia-Pacific Partnership on Clean Development and Climate (APP, 2010).

Para seleção das MTD, utilizou-se o conceito de nível de prontidão tecnológica entre 7 e 9 (TRL – *technology readiness levels*), que abrange tecnologias demonstradas em ambiente operacional (nível 7), comprovadas e economicamente viáveis para serem implantadas (nível 8) ou implantadas na indústria (nível 9) (IPPC, 2008; APP, 2010; DoD, 2011; USEPA, 2012; EIPPCB, 2013).⁷

A seguir, são descritas as MTD para o setor de ferro-gusa e aço, classificadas por etapa de produção.

4.1 TRATAMENTO OU PREPARAÇÃO DE MATERIAIS

4.1.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COQUE

4.1.1.1 APAGAMENTO DO COQUE A SECO (COKE DRY QUENCHING)

O apagamento de coque a seco (USEPA, 2012) é uma solução alternativa ao procedimento tradicional de resfriamento molhado de coque. Esse processo reduz as emissões de partículas e recupera o calor sensível do coque. O coque quente é resfriado por um gás inerte em câmaras refratárias especialmente desenvolvidas. Além disso, parte do calor retirado do coque pode ser recuperada para a produção de vapor.

A aplicação da tecnologia é condicionada à configuração (*layout*) das plantas. O processo é utilizado como tecnologia de controle de emissões, com aplicações no Brasil, na Finlândia, na Alemanha, no Japão e em Taiwan.

⁷ As soluções de captura de carbono não serão avaliadas neste relatório, visto que fazem parte de documento exclusivo do projeto intitulado "Opções transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa – Captura, transporte e armazenamento de carbono".

Características principais:

- Energia recuperada para produção de aproximadamente 400-500 kg de vapor por tonelada de coque (equivalente a 0,8-1,2 GJ/tonelada de coque);
- Custo de construção de 50 US\$/tonelada de coque (planta construída na Alemanha). O custo de *retrofit* varia de 70 a 90 US\$/GJ economizado;
- Redução de emissões de CO₂ de aproximadamente 0,2 toneladas de CO₂/tonelada de coque produzido;
- Tecnologia em estágio comercial.

4.1.1.2 CONTROLE DA UMIDADE DE CARVÃO

O controle da mistura (umidade) de carvão (APP, 2010) utiliza calor residual dos gases do forno de coque para secar o carvão usado na produção de coque. O aquecimento do carvão reduz o consumo de energia dos fornos de coque.

Características principais:

- Economia de combustível de 0,3 GJ/tonelada de coque;
- Custo estimado de 21,9 US\$/tonelada de aço bruto (usina japonesa);
- Incremento da produção de coque em até 10%;
- Redução do tempo de operação do forno;
- Tecnologia em estágio comercial.

4.1.1.3 AUTOMATIZAÇÃO E CONTROLE DO FORNO DE COQUE

A automatização e o controle do processo de produção do coque (USEPA, 2012), comumente aplicáveis em plantas novas, consistem na utilização de sistemas de controle dedicados e cálculos baseados na operação de cada fornalha que aumentam a eficiência do processo.

Características principais:

- Menor consumo de energia do forno, aproximadamente de 0,17 GJ/tonelada de coque;
- Produção de coque de melhor qualidade;
- Redução das emissões em cerca de 3,8 kg de CO₂ por tonelada de coque;
- Custo estimado em 0,38 US\$/tonelada de coque produzida;
- Tecnologia comercial.

4.1.1.4 FORNOS PARA RECUPERAÇÃO DE CALOR DO COQUE PRODUZIDO (HEAT RECOVERY COKE BATTERY)

Na produção de coque com recuperação de calor, todos os compostos voláteis do carvão são queimados dentro do forno de maneira a fornecer o calor necessário ao processo de produção do coque.

O forno horizontal opera com pressão negativa, em que ar de combustão primária é introduzido através de entradas nas portas do forno. Ar secundário é injetado no forno para completar o processo de combustão no fundo do forno, garantindo a equalização da combustão em todo o forno. Devido às temperaturas atingidas, os hidrocarbonetos tóxicos são incinerados dentro do forno. Os gases quentes são direcionados a uma chaminé para a recuperação de calor em uma caldeira de recuperação de calor, onde vapor de alta pressão é produzido para produção de potência. Finalmente, o gás de exaustão resfriado é limpo em um sistema de dessulfurização, sendo posteriormente descarregado na atmosfera.

Características principais (USEPA, 2012):

- Baixo custo de investimento em plantas que não têm cogeração;
- Baixa emissão de particulado do forno;
- Produção de energia elétrica de aproximadamente 630-700 kWh/tonelada de coque;
- Melhor qualidade do coque;
- Necessita de espaço considerável;
- Custo estimado em 365 US\$/tonelada de coque produzido para a instalação do forno, unidade de gerenciamento do coque e unidade de geração de energia.

A tecnologia tem disponibilidade comercial e está em operação em uma unidade com capacidade de produção de 450.000 toneladas/ano de coque que produz 200 toneladas/hora de vapor, localizada em Haverhill/Ohio. Outro exemplo nos EUA é uma fábrica em Granite Cyte/Illinois, com capacidade de 590.000 toneladas/ano de coque, gerando 225 toneladas/hora de vapor superaquecido (USEPA, 2012).

4.1.1.5 ESTABILIZAÇÃO DO COQUE RESFRIADO (*COKE STABILIZATION QUENCHING*)

A estabilização do coque resfriado é uma tecnologia de apagamento de coque utilizada na Alemanha desde 2007 (USEPA, 2012). Nesse caso, o coque quente é resfriado por água em sua parte superior e inferior, com altas taxas de arrefecimento.

Características principais:

- Redução do consumo de coque em até 2%;
- Tecnologia em estágio comercial;
- Redução das emissões de CO₂.

4.1.1.6 FORNOS SCOPE 21 – SUPER COKE OVEN FOR PRODUCTIVITY AND ENVIRONMENTAL ENHANCEMENT

O Scope 21 (APP, 2010) foi desenvolvido a partir de um programa nacional japonês com duração de dez anos, substituindo os fornos de coque convencionais por um novo processo que busca aumentar a produtividade, diminuir os impactos ambientais e aumentar a eficiência energética dos fornos. Os três subprocessos do Scope 21 são: rápido preaquecimento da carga de carvão, rápida carbonização e aquecimento do coque carbonizado a temperaturas médias.

Características principais:

- Aumento da qualidade do coque;
- Redução do período de coqueificação de 17,5 horas para 7,4 horas;
- Aumento da produtividade de carvões mais pobres;
- Aumento da produtividade total em 2,4 vezes;
- Redução de NO_x em 30%;
- Nenhuma produção de fumaça e de partículas;
- Consumo de energia reduzido em 21%;
- Custo de produção de coque reduzido em 18% e custo de construção reduzido em 16%;
- Redução das emissões em 400.000 toneladas de CO₂ por ano em uma planta com capacidade de produção de um milhão de toneladas de coque por ano;
- Em operação no Forno Comercial #1 da Oita Iron Mill of Nippon Steel Corporation/Japão.

4.1.2 PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

4.1.2.1 RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL

Nas plantas de sinterização, é possível capturar calor do resfriamento do sinter para utilização no preaquecimento do ar de combustão e para geração de vapor para o acionamento de turbinas de geração de eletricidade (USEPA, 2012).

Plantas na Holanda e no Japão já usam a tecnologia e obtêm:

- Redução das emissões de SO_x e NO_x;
- Custo de investimento de aproximadamente 3 US\$/tonelada de sinter;
- Economia de energia de 47 kJ/tonelada de sinter.

4.1.2.2 CONTROLE DE EMISSÕES DE PARTÍCULAS

Consiste na utilização de precipitadores eletrostáticos para captura de particulados. Características principais (USEPA, 2012):

- Redução de poeira na exaustão de 3.000 mg/m³ para 50 mg/m³;
- Possibilidade de instalação em plantas em operação;
- Aumento do consumo de energia em 0,003 GJ/tonelada de sinter;
- Em aplicação comercial na unidade industrial da Kashima Steel Works, no Japão.

4.2 PRODUÇÃO DE FERRO

4.2.1 ALTO-FORNO

4.2.1.1 TOP PRESSURE RECOVERY TURBINE (TRT)

As turbinas TRT consistem de um sistema de produção de potência baseado na conversão da energia física da alta pressão dos gases de topo dos altos-fornos em eletricidade através de uma turbina de expansão (APP, 2010).

Características principais:

- Geração de eletricidade de aproximadamente 40-60 kWh/tonelada de ferro-gusa;
- Disponível comercialmente, e em aplicação em inúmeras plantas industriais, como é o caso da Sumitomo Metals (Kokura) Ltd./Japão;
- Investimentos típicos de 20 a 28 US\$/tonelada para um caso em que a geração foi de 30 kWh/tonelada de metal quente.

4.2.1.2 INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO

A injeção de carvão pulverizado substituiu parte do coque utilizado como combustível nas reações químicas, reduzindo a produção de coque e economizando energia, sendo uma prática atualmente aplicada na siderurgia. A injeção de combustível necessita de energia para a injeção de oxigênio, carvão e eletricidade, além de equipamentos para moer o carvão. O carvão substitui o coque, entretanto o coque ainda é usado como matéria de suporte nos altos-fornos. Dessa forma, a injeção máxima de carvão depende da geometria do forno e impacta a qualidade do ferro produzido (USEPA, 2012).

Características principais:

- Redução nas emissões dos fornos de coque;
- Aumento do custo de injeção de oxigênio e manutenção do alto-forno e do sistema de moagem do carvão e redução dos custos de aquisição de coque, o que gera economia líquida nos custos de operação e manutenção estimada em 15 US\$/tonelada (podendo atingir até 33 US\$/t) e resulta na redução líquida de 4,6% do custo de produção do metal quente;
- Investimentos no equipamento de moagem do carvão são estimados em 50-55 US\$/tonelada de carvão injetado;
- Aumento da produtividade.

4.2.1.3 RECUPERAÇÃO DE CALOR NO ALTO-FORNO

Sistemas de recuperação, como os fornos de aquecimento de ar, e sistemas de preaquecimento do gás de alto-forno são utilizados para aquecer o ar de combustão dos altos-fornos (EIPPCB, 2013). Os gases quentes de escape, a aproximadamente 250°C, ainda podem ser utilizados para o preaquecimento de fornos. Trata-se de uma atividade em aplicação no setor.

Características principais dos fornos de aquecimento de ar (*hot blast stoves*) (USEPA, 2012):

- Economia energética variando entre 89-85 MJ/tonelada de metal quente;
- Altos custos e extremamente dependente do tamanho do alto-forno. Estima-se custo de 18-20 US\$/GJ economizado que equivale a 1,4 US\$/tonelada de metal quente.
- Fornos de aquecimento de ar eficientes podem operar sem utilizar gás natural como combustível, poupando energia.

Características principais dos fornos de preaquecimento dos gases de alto-forno (*BFG preheating system*) (USEPA, 2012):

- Recuperação de energia proveniente de fontes de média e baixa temperatura;
- Redução de 426 kJ/kWh no *input* de combustível, gerando aumento da eficiência térmica de 3,3%;
- *Payback* estimado de apenas 1,5 ano.

4.2.1.4 AUMENTO DA TEMPERATURA DO AR QUENTE

Sistemas de carga de altos-fornos antigos e novos estão sendo substituídos e equipados com o sistema de carga *Paul Wurth Bell Less Top* (BLT). Nesse tipo de sistema, os materiais injetados no alto-forno, como coque e sinter, são analisados antes da injeção, o que garante a distribuição correta dos materiais e aumenta a taxa de coqueificação e a produtividade (APP, 2010).

Características principais:

- Aumento da eficiência dos combustíveis;
- Redução das emissões;
- Aumento de produtividade;
- Aumento da taxa de coqueificação.

4.2.1.5 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

A otimização dos sistemas de controle de altos-fornos é obtida por meio de sistemas especializadas que utilizam diversos modelos do processo, responsáveis por observar o alto-forno de maneira contínua, realizando cálculos, diagnósticos, verificação de distúrbios e ações corretivas na operação, como modificação da taxa de agentes redutores e mudanças na distribuição de carga (USEPA, 2012). Dependendo da tecnologia do fornecedor, o sistema especialista pode ser executado no modo aviso (sem atuação) ou em *loop* fechado (atuando a partir da resposta).

Características principais:

- Menor uso de combustível;
- Maior produtividade;
- Redução da variação da qualidade do metal produzido;
- Redução dos distúrbios.

4.2.1.6 UTE AVANÇADAS PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE EM USINAS INTEGRADAS

As unidades de cogeração modernas são baseadas em turbinas a gás, utilizando um ciclo Cheng ou STIG (com injeção de vapor na turbina a gás), ou um ciclo combinado integrando uma turbina a gás com o ciclo vapor. A última opção pode ser usada para repotencializar turbinas a vapor já existentes. Além disso, turbinas a gás especialmente adaptadas podem estar aptas a queimar os gases de processo de baixo poder calorífico da siderúrgica (gases de coqueria, alto-forno e BOF) com eficiências de até 45% (atingindo 33% se contabilizadas as demandas de energia do compressor) (APP, 2010).

A fabricante de turbinas Mitsubishi desenvolveu unidades que podem operar com gases de processo de siderúrgicas, sendo aplicadas na Kawasaki Chiba Works, no Japão, e na Tata Iron and Steel Company, na Holanda. Podem-se destacar as seguintes características (APP, 2010):

- Aumento da geração de eletricidade em 1,1 GJ/tonelada de aço;
- Investimentos da ordem de 1.090 US\$/kW e 14,5 US\$/tonelada de aço.

4.2.2 FUSÃO REDUTORA

As tecnologias de fusão redutora apresentam vantagens, como o fato de alguns processos nessa rota não serem capazes de utilizar o minério de ferro fino e, por outro lado, serem mais flexíveis em relação ao tipo de carvão utilizado, além de não necessitar de coque. Entretanto, algumas desvantagens também devem ser destacadas, dado que o consumo de potência em fusões redutoras tende a ser maior do que quando comparado com o processo de alto-forno, porém o gás de exaustão pode ser utilizado como fonte de energia, gerando grande impacto na eficiência total do processo. Estudos indicam que, no futuro, a fusão redutora pode atingir eficiência de 5% a 30% superior aos processos de alto-forno (IEA, 2010).

A seguir, são descritas algumas MTD que podem ser aplicadas à rota DRI.

4.2.2.1 NOVOS PROCESSOS DE FUSÃO REDUTORA (SMELTING REDUCTION)

Processos de fusão redutora, como Aumelt, Ausiron, Hismelt, CCF, Dios e Corex, consistem na pré-redução do minério de ferro por gases provenientes de um banho quente (*hot bath*). O ferro pré-reduzido é fundido no banho quente, e o excesso de gás produzido é utilizado para a produção de potência elétrica, produção de DRI ou como gás combustível. Dessa forma, a fusão redutora elimina a necessidade do uso de coque e sinter, e processos em desenvolvimento ainda buscam eliminar a necessidade de preparação do minério de ferro.

Características principais (USEPA, 2012):

- Baixo custo de investimento e operação:
 - » 5% a 35% abaixo do custo de produção da rota convencional (alto-forno);
 - » Uso direto de minério de ferro e carvão térmico;
 - » Sem coqueria, sinterização e pátios de mistura;
 - » Forno único com recuperação direta da energia residual.

- Baixo impacto ambiental:
 - » A não utilização de fornos de coque e sinterização reduz as emissões de CO₂, SO₂ e NOx. Não produz dioxinas, furanos, alcatrão e fenóis;
 - » Reciclagem da poeira e escória de aciaria, utilizando a energia do carvão de maneira mais eficiente.
- Alta qualidade do produto;
- Grande flexibilidade de matérias-primas, podendo utilizar resíduos de outras usinas e minérios com alto teor de fósforo.

4.2.2.2 PROCESSO COREX

O processo Corex é dividido em duas etapas de redução direta: i) gaseificador de fundição (*melter-gasifier*), responsável por derreter o DRI e gasificar o carvão; e ii) forno de cuba DRI (*DRI shaft furnace*) montado acima do gaseificador de fundição, responsável por reduzir o minério granulado ou *pellets* em DRI utilizando o gás redutor proveniente do gaseificador de fundição (APP, 2010).

Características principais:

- Não necessita de fornos de coque e sistemas de aglomeração;
- Ganhos ambientais significativos quando comparado com rotas integradas:
 - » Emissões de CO₂ por tonelada de metal quente são reduzidas em aproximadamente 20%;
 - » Redução de NOx por tonelada de metal quente de aproximadamente 30%.
- Consumo de combustível pode ser reduzido pela circulação de gás de topo do forno de cuba no próprio forno;
- Reação de redução, fusão e remoção da escória são realizadas em apenas dez minutos;
- Tecnologia em aplicação comercial.

4.2.2.3 PROCESSO FINEX

O processo Finex consiste em uma fusão redutora multiestágio, composta por um gaseificador de fundição (*melter-gasifier*) e uma sequência de leitos fluidizados responsáveis por reduzir o minério de ferro em DRI. Visando à ótima eficiência energética do processo, os seguintes auxiliares devem ser utilizados: i) remoção de CO₂ nos gases de topo do forno e recirculação do gás para as câmaras de leito fluidizado; ii) cogeração, utilizando o gás exportado devido ao seu alto poder calorífico; iii) injeção de carvão pulverizado para melhorar o rendimento do gaseificador de fundição.

Características principais (APP, 2010):

- Não necessita de peletização, sinterização ou aglomeração de matéria-prima;
- Permite o uso de concentrados finos;
- Benefícios ambientais quando comparado com usinas integradas;
- Permite a utilização de carvão de baixa qualidade;
- Em operação comercial, por exemplo, na unidade Posco Pohang Work, na Coreia do Sul.

4.2.3 REDUÇÃO DIRETA

O ferro é produzido por meio da redução de *pellets* de minério de ferro abaixo do ponto de fusão do ferro. Isso pode ser obtido pela utilização de gás natural (processo Midrex) ou carvão (processo Fastmelt) como agentes redutores. O DRI produzido é utilizado principalmente como *input* de alta qualidade em plantas de fornos elétricos a arco (APP, 2010).

As emissões de CO₂ em processos como Midrex e Hyl estão na ordem de 0,6 tonelada de CO₂ por tonelada de ferro reduzido produzido.

Características principais:

- Sem necessidade do pré-tratamento da matéria-prima;
- Elimina o forno de coque;
- Baixos custos de investimento e de operação.

E, no processo Fastmelt:

- Reação de redução a maiores velocidades e menores temperaturas;
- Redução do uso de combustível;
- Baixas perdas de calor;
- Redução de emissões;
- Consumo de energia é de 12,3 GJ/tonelada de metal quente;
- Redução de emissão de CO₂ estimada em 1.241 kgCO₂/tonelada de metal quente.

Outro processo que pode ser citado é o ITmk3, que utiliza uma fornalha rotativa semelhante à do processo Fastmelt. Nesse processo, minério de ferro de baixa qualidade e carvão são utilizados para produzir pepitas de ferro (97% de teor de ferro). A diferença para o processo Fastmelt está na última zona da fornalha rotativa, em que a temperatura é elevada, fundindo o minério de ferro e permitindo que ele se separe facilmente das impurezas. Como resultado, obtém-se uma pepita de ferro contendo basicamente ferro e carbono, praticamente livre de oxigênio e escória (USEPA, 2012).

Características principais:

- Baixos custos de investimento e operação;
- Alta confiabilidade operacional;
- 30% de economia de energia quando comparada com usinas integradas;
- 10% de economia de energia quando comparada com FEA tradicionais;
- Não necessita de fornos de coque e sistemas de aglomeração;
- Redução das emissões em até 40%;
- Reação de redução, fusão e remoção da escória são realizadas em apenas dez minutos.

4.3 PRODUÇÃO DE AÇO

4.3.1 CONVERSORES A OXIGÊNIO (BASIC OXYGEN FURNACE – BOF)

4.3.1.1 OTIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PELA COMBINAÇÃO DOS GASES DO CONVERSOR A OXIGÊNIO E A RECUPERAÇÃO DE CALOR SENSÍVEL

Combinar o gás do conversor de oxigênio e a recuperação de calor sensível é a maneira mais eficiente de economizar energia nessa etapa do processo, transformando o BOF em um produtor líquido de energia. Por meio da redução da quantidade de ar no conversor, o monóxido de carbono não é convertido em dióxido (APP, 2010).

O calor sensível do gás de exaustão é primeiramente recuperado em uma caldeira de recuperação, produzindo vapor de alta pressão.

Características principais:

- Economia energética variando entre 535 e 916 MJ/tonelada de aço, dependendo da maneira como o calor é recuperado, o que pode representar economia de energia primária de 136%;
- Redução nas emissões de CO₂ de 12,55 kg/tonelada de aço bruto;
- Investimento de 20 US\$/tonelada de aço bruto e incremento dos custos operacionais.
- Trata-se de tecnologia já testada em ambiente operacional (APP, 2010).

4.3.1.2 AUTOMATIZAÇÃO E CONTROLE DO CONVERSOR A OXIGÊNIO

A inclusão de sistema de automação e controle do processo do conversor a oxigênio pode produzir ganhos significativos (USEPA, 2012).

Características principais:

- Aumento da produtividade e qualidade do produto;
- Redução dos custos de mão de obra.

4.3.1.3 SISTEMAS DE CONTORNO A LASER (LASER CONTOURING SYSTEM – LCS)

Os sistemas LCS permitem rápidas medições das paredes do vaso e da espessura inferior na fornalha de aço, fornecendo informações detalhadas da altura do banho e permitindo a otimização do processo (APP, 2010).

Características principais:

- Redução do uso de energia por meio das medições obtidas e otimização do processo;
- Redução do custo de manutenção do BOF;

- LCS – painéis: aumento da vida do equipamento em 5% e economia de 0,04 US\$/tonelada de aço produzida;
- LCS – conversores: redução do tempo de operação em 15 minutos por dia, o que aumenta a produtividade dos fornos.
- Tecnologia madura e em aplicação, por exemplo, na unidade da Nucor Steel Corp., em Berkeley/EUA.

4.3.1.4 DRIVES DE VELOCIDADE VARIÁVEL (VSD) NO BOF

O processo de operação dos BOF é realizado em bateladas, o que leva a grandes variações nos volumes de gases exaustos. Logo, a instalação de *drivers* de velocidade variável nos motores elétricos pode reduzir o consumo de eletricidade do processo. Existem dados de aplicações em fábricas onde reduções de até 20% foram atingidas (0,82 kWh/tonelada), com investimento de aproximadamente 0,28 US\$/tonelada de aço (APP, 2010). Ademais, ganhos devido à redução do custo de manutenção dos sistemas de ventilação são esperados.

4.3.2 FORNOS ELÉTRICOS A ARCO

A demanda de energia teórica para o derretimento da sucata e seu superaquecimento em fornos elétricos a arco é da ordem de 350 a 370 kWh/tonelada de aço. Na prática, a energia demandada é diretamente dependente do *mix* do produto, a qualidade da matéria-prima local e das características de operação dos fornos. De acordo com IIP (2014d), o uso de eletricidade nos EAF se situa entre 300 e 550 kWh/tonelada.

4.3.2.1 SISTEMA DE CONTROLE AVANÇADO (VIA REDES NEURAIS)

O sistema de controle avançado do processo utilizando *software* de redes neurais e lógica *fuzzy* permite a redução do consumo de energia elétrica (APP, 2010).

Características principais:

- Redução de 30 kWh/tonelada de aço;
- Aumento da produtividade do forno entre 9% e 12%;
- Redução do consumo dos eletrodos em 25%;
- Custos de investimento de 0,95 US\$/tonelada de aço;
- Redução nos custos de manutenção em 1 US\$/tonelada de aço;
- Em operação comercial, por exemplo, na unidade da Ternium Hylsa, em Monterrey/México.

4.3.2.2 QUEIMADORES OXY-FUEL

O uso de queimadores *oxy-fuel* em FEA permite a redução do consumo de energia devido aos seguintes aspectos: i) redução do tempo de aquecimento, economizando de 2 a 3 kWh/tonelada/minuto de espera; ii) aumento da transferência de calor durante o processo de refino do aço; iii) facilidade de formação de espuma na escória, aumentando a eficiência do uso de oxigênio e injeção de carbono.

Muito cuidado deve ser dado à utilização de queimadores a oxigênio, de forma a não aumentar o consumo de energia total do forno e emissões de GEE.

Características principais (APP, 2010):

- Economia de energia de 0,14 GJ/tonelada de aço bruto;
- Custo de investimento de 4,8 US\$/tonelada de aço bruto;
- Redução do tempo de *tap-to-tap* do forno em aproximadamente 6%, gerando reduções anuais de 4 US\$/tonelada de aço bruto;
- Tecnologia madura, amplamente difundida.

4.3.2.3 PREAQUECIMENTO DA SUCATA

O preaquecimento da sucata pode reduzir o consumo de eletricidade dos fornos elétricos a arco. Inúmeros sistemas vêm sendo desenvolvidos e aplicados em ambiente operacional nos EUA e na Europa para otimizar essa tecnologia, dentre os quais se destacam: Consteel tunnel-type preheater, Fuchs Finger Shaft, Fuchs Twin Shaft e Post Combustion Shaft Furnace (Simetal) (USEPA, 2012).

Todos os sistemas são desenvolvidos para serem utilizados em usinas novas ou já existentes.

Características principais do Consteel:

- Aumento da produtividade em 33%;
- Redução do consumo dos eletrodos em 40%;
- Redução de emissões na ordem de 30%;
- Redução do consumo de eletricidade em 60 kWh/t para *retrofit*;
- Custos de operação anual na faixa de 1,9 US\$/tonelada de aço bruto;
- Custo de investimento do *retrofit* de 4,4 a 5,5 US\$/tonelada de aço.

Características principais do Simetal:

- Economia de eletricidade de 120 kWh/tonelada de aço;
- Custo de investimento no *retrofit* de 6 US\$/tonelada de aço bruto;
- Redução do consumo dos eletrodos;
- Aumento da produtividade em 20%.

4.3.2.4 Hot DRI

Esse processo consiste no preaquecimento do DRI antes de sua injeção no EAF. Ao alimentar o forno com um DRI preaquecido à temperatura de 600°C, estima-se que 150 kWh/tonelada (0,5 GJ/tonelada) de aço bruto possam ser economizados quando comparado à injeção do DRI a frio (APP, 2010).

Características principais:

- Redução do consumo de energia;
- Aumento da produtividade;
- Aumento do teor de carbono na carga;
- Tecnologia madura, e em aplicação nas unidades Ternium/México, Essar Steel/Índia e Hadeed/Arábia Saudita).

4.3.2.5 ECOARC

O sistema desenvolvido pela JSP Steel Plantech, chamado Ecoarc, busca reduzir o custo de operação dos EAF bem como as emissões geradas pelo mesmo (APP, 2010).

Características principais:

- Redução no consumo de 200 kWh/tonelada de aço;
- Redução do consumo dos eletrodos;
- Menores custos para a flexibilização do uso de mistura de escória;
- Redução das emissões de CO₂;
- Trata-se de uma tecnologia emergente, apenas testada em ambiente operacional.

4.3.3 RECUPERAÇÃO DE CALOR NAS FORNALHAS DE AR QUENTE

As fornalhas de ar quente demandam grandes volumes de energia, atingindo até 3 GJ/tonelada de metal quente, podendo atingir entre 10% a 20% da demanda de energia total da produção de aço em unidades integradas. Entretanto, a eficiência das fornalhas de ar quente pode ser melhorada por meio da recuperação do calor dos gases de combustão (WORRELL et al, 2010), fazendo uso de sua energia para preaquecer os gases de combustão.

Segundo IIP (2014b), essa tecnologia apresenta as seguintes características:

- Redução do consumo de energia em 0,24 GJ/tonelada de metal quente, podendo atingir até 0,3 GJ/tonelada de gusa em usinas integradas;
- Em uma usina indiana, o que indica que a tecnologia está disponível comercialmente, foram verificadas reduções de 0,125 GJ/tonelada de gusa via recuperação de 50% do calor sensível dos gases de exaustão das fornalhas de ar quente (NEDO, 2016).

4.4 MANUFATURA DO AÇO

4.4.1 CASTRIP

Desenvolvido para reduzir o consumo de energia nos processos de moldagem do aço, apresenta a seguinte característica (USEPA, 2012):

- Redução do consumo de energia de até 90% quando comparado com os processos de laminação a quente tradicionais.
- Tecnologia emergente, que vem sendo testada em ambiente operacional.

4.5 QUADRO-RESUMO DAS MTD

Conforme citado, a descrição detalhada de todas as melhores tecnologias disponíveis pesquisadas aumentaria consideravelmente o volume do relatório. Assim, optou-se por descrever apenas algumas cujo grau de informação oferecido era maior. Entretanto, todas as mediadas tecnológicas analisadas foram compiladas em duas tabelas-resumo. A Tabela 29 mostra as economias relativas à implementação de cada MTD para a rota de usinas integradas, seus custos de investimento e de operação; e a Tabela 30, em que se apresentam as MTD em rotas de usinas semi-integradas operando com FEA.

Tabela 29 – Informações Técnicas das MTD para a Rota de Alto-forno

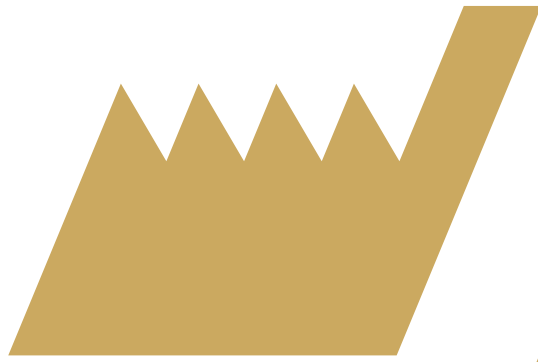
Etapa (atividade)	Tecnologia	Redução de CO ₂ (kgCO ₂ /t produto)	Redução de Combustível (GJ/t de produto)	Redução de Eletricidade (GJ/t de produto)	Custo de Operação Anual (US\$/t de produto)	Custo de Investimento (US\$/t de produto)
Preparação de materiais (sinterização)	Recuperação de calor residual	57,2	0,55	-	-	4,7
	Redução dos vazamentos de ar	2	-	-	-	0,14
	Aumento da profundidade do leito do forno	9,9	0,09	-	-	0
	Melhora do controle de processo	5	0,05	-	-	0,21
	Uso de resíduos combustíveis	19,5	0,18	-	-	0,29
	Melhora do carregamento do forno	-	-	-	-	-
	Aumento da eficiência de ignição do forno	-	-	-	2,5	2,4
Preparação de materiais (produção do coque)	Controle da mistura de carvão	6,7	0,3	-	-	76,6
	Automatização e controle do forno de coque	3,8	0,17	-	-	0,37
	Compressor de velocidade variável	0,12	-	-	-	0,47
	Apagamento de coque a seco	27,5	1,2	-	0,78	109,5
	Uso adicional de COG	-	-	-	-	-
	Sistema de câmara única	-	-	-	-	-
	Fornos de recuperação de calor (<i>non-coking</i>)	-	-	-	-	-
Produção de ferro (alto-forno)	Injeção de carvão pulverizado 130 kg/ton ferro	47	0,77	-	-3,1	11
	Injeção de carvão pulverizado 225 kg/ton ferro	34,7	0,57	-	-1,6	8,1
	Injeção de gás natural 140 kg/t ferro	54,9	0,9	-	-3,1	7,8
	Injeção de óleo	-	-	-	-	-
	Injeção de gás de coqueria e gás de BOF	-	-	-	-	-
	<i>Top pressure recovery turbines</i>	17,6	-	0,11	-	31,3
	Recuperação de gás de topo	4	0,07	-	-	0,47
	Automatização dos sopradores de ar quente	22,6	0,37	-	-	0,47
	Recuperação de calor nos fornos de ar quente	4,9	0,08	-	-	2,2
	Combustão avançada em fornos de ar quente	-	-	-	-	-
	Sistemas de controle avançados do alto forno	24,4	0,4	-	-	0,56
	Recirculação de gás de alto-forno	-	-	-	-	-
	Recuperação de calor da escória	-	-	-	-	-
Produção de aço (conversor a oxigênio)	Recuperação de calor sensível do conversor de oxigênio	46	0,92	-	-	35,4
	<i>Drive</i> de velocidade variável nos ventiladores	0,51	-	0,003	-	0,31
	Melhora do monitoramento e controle	-	-	-	-	-
Produção de aço (moldagem)	Aquecimento eficiente da moldagem	1,1	0,02	-	-	0,09
	Formação quase nítida – <i>thin slab</i>	728,8	3,5	0,64	-54,8	234,9
Manufatura do aço (laminação a quente)	Cargas aquecidas	30,2	0,6	-	-2,1	23,5
	Controle de processo no <i>strip mill</i>	15,1	0,3	-	-	3,9
	Queimadores regenerativos	35,2	0,7	-	-	-
	Queimadores sem chama	60%	60%	-	-	15,6
	Insulação dos fornos	8	0,16	-	-	0,79
	Controle do nível de oxigênio	16,6	0,33	-	-	-
	Recuperação de calor residual	1,9	0,03	-	0,11	1,3
Manufatura do aço (laminação a frio)	Recuperação de calor na linha de anelamento	17,5	0,3	0,02	-	4,2
	Redução do uso de vapor	9,9	0,19	-	-	4,4
	Sistema de automação	35,3	-	0,21	-	1,7
Aplicação transversal	Manutenção preventiva	35,7	0,43	0,02	0,03	0,02
	Monitoramento do consumo energético	9,5	0,11	0,01	-	0,23
	Sistemas de produção de potência e calor	82,1	0,03	0,35	-	22,7

Fonte: Elaboração própria a partir de EPA, 2012

Tabela 30 – Informações Técnicas das MTD para a Rota de Altos-fornos Elétricos a Arco

Etapa (atividade)	Tecnologia	Redução de CO ₂ (kgCO ₂ /t produto)	Redução de Combustível (GJ/t de produto)	Redução de Eletricidade (GJ/t de produto)	Custo de Operação Anual (US\$/t de produto)	Custo de Investimento (US\$/t de produto)
Produção de aço (forno elétrico a arco)	Sistema de controle avançado (via redes neurais)	17,6	-	0,11	-1,6	1,5
	Drivers de velocidade variável	-	-	0,05	-	2
	Transformadores de alta eficiência	10	-	0,06	-	4,3
	Injeção de gás na parte inferior	11,7	-	0,07	-3,1	0,94
	Escória espumante	10,6	-	0,07	-2,8	15,6
	Queimadores <i>oxy-fuel</i>	23,5	-	0,14	-6,2	7,5
	Pós-combustão dos gases de chaminé	-	-	-	-	-
	Fornalha com arco de corrente contínua	52,9	-	0,32	-3,9	6,1
	Preaquecimento da sucata (Consteel)	35,2	-	0,22	-3	7,8
	Preaquecimento da sucata (Fuchs)	35,3	-0,7	0,43	-6,2	9,4
	Monitoramento dos gases de escape	8,8	-	0,05	0	3,1
	<i>Tapping</i> inferior excêntrico	8,8	-	0,05	0	5
	Fornalha de carcaça dupla – DC – com preaquecimento	11,1	-	0,07	-1,7	9,4
Produção de aço (moldagem)	Aquecimento eficiente da moldagem	1,1	0,02	-	0	0,09
	Formação quase nítida – <i>thin slab</i>	265,3	3,2	0,64	-54,8	234,8
Manufatura do aço (laminação a quente)	Drives de aumento da eficiência energética	1,6	-	0,01	-	0,3
	Controle do processo	15,1	0,3	-	-	1,1
	Queimadores regenerativos	35,2	0,7	-	-	3,9
	Queimadores sem chama	60%	60%	-	-	-
	Insulação dos fornos	8,1	0,16	-	15,7	0,79
	Controle do nível de oxigênio	16,6	0,33	-	-	-
	Recuperação de calor residual	1,9	0,03	-	0,11	1,3
	Aplicação transversal					
Manutenção preventiva	15	0,09	0,05	0,03	0,02	
Monitoramento de energia	3,7	0,02	0,01	-	0,23	

Fonte: Elaboração própria a partir de USEPA, 2012



Cenários de referência, baixo carbono e baixo carbono com inovação

Parte

2

Nesta parte do relatório, serão apresentados os cenários REF, BC e BC+I, com foco no consumo de energia e nas emissões de GEE. O horizonte de projeção é de 2050, tendo 2010 como ano-base, e serão considerados parâmetros reais de consumo de energia e fatores de emissão do *grid* elétrico para o período de 2011 e 2015 (MCTI, 2015; EPE, 2017).

O cenário REF trata da evolução tendencial do consumo de energia e emissões de GEE, ou seja, com pequenas alterações estruturais em relação aos anos anteriores. Sua construção se deu, primeiramente, por meio de pesquisas dos dados históricos do setor, no que concerne ao consumo de energia por fonte, consumo específico de energia, produção, número de plantas existentes e capacidades de produção, aspectos sintetizados na primeira parte deste documento. Em seguida, foram determinados critérios e premissas que auxiliaram na projeção do cenário em questão, a qual se tratou de abordagem *bottom-up*, ou, como o próprio nome já diz, de baixo para cima. De acordo com o então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2016), esse tipo de abordagem permite detectar onde e como ocorrem as emissões, favorecendo o estabelecimento de medidas de mitigação.

O cenário BC foi construído considerando a penetração de algumas das MTD descritas, a partir de critérios que serão identificados. Por sua vez, no cenário BC+I, é avaliado o efeito sobre as emissões de GEE decorrente da maturação de tecnologias que se encontram em estágio de pesquisa e desenvolvimento (P&D). Trata-se de um cenário com grande incerteza, que objetiva exclusivamente apontar o papel que as tecnologias consideradas podem desempenhar no caso de se tornarem comprovadas e economicamente viáveis (DoD, 2011).

Para os cenários REF, BC e BC+I, serão descritas as premissas assumidas para sua construção e, em seguida, apresentados os resultados com foco em consumo de energia e emissões de GEE. Exclusivamente no cenário BC, serão apresentados os potenciais e custos marginais de abatimento das MTD.

A stylized line graph icon in a gold color, featuring four peaks of varying heights followed by a sharp upward slope.

Cenário de referência

Capítulo

5

5 CENÁRIO DE REFERÊNCIA

5.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E PREMISSAS

No cenário REF, a siderurgia nacional observa evolução tendencial do consumo de energia e emissões de GEE. Logo, não é forçada a inserção de qualquer MTD, cujos impactos serão avaliados exclusivamente nos cenários de baixo carbono.

Para determinar a projeção de crescimento do setor siderúrgico brasileiro, inicialmente foram consideradas projeções de produto interno bruto (PIB) para o período de 2010 a 2050, convertidas em médias quinquenais (HADDAD, 2015).

Tabela 31 – Taxas de Crescimento do PIB Aplicadas para a Projeção da Produção de Ferro e Aço

Período	Crescimento Médio Anual (%)
2010-2015	1,23%
2016-2020	1,94%
2021-2025	2,30%
2026-2030	2,12%
2031-2035	1,95%
2036-2040	1,81%
2041-2045	1,70%
2046-2050	1,59%

Fonte: Elaboração própria a partir de HADDAD, 2015

No âmbito da modelagem integrada dos cenários de emissões de GEE, que terá seus resultados reportados no documento *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, é considerada uma visão alternativa de crescimento do PIB (HADDAD, 2016). Esse cenário incorpora efeitos recentes da crise econômica nos agregados macroeconômicos, que certamente afetarão negativamente o crescimento setorial, reduzindo o consumo de energia e as emissões de GEE em relação aos níveis deste cenário REF.

Percebeu-se que, tipicamente, o setor informa as eficiências médias dos processos envolvidos em função da produção física de cada produto específico. Por exemplo, rendimentos das coquerias são apresentados em GJ/tonelada de coque, enquanto rendimentos de altos-fornos são apresentados em GJ/tonelada de ferro-gusa. Portanto, optou-se por usar o mesmo padrão na construção dos cenários do setor.

Uma abordagem detalhada do consumo típico de energéticos na siderurgia brasileira é feita pela Empresa de Pesquisa Energética (2009). Nesse documento, a siderurgia nacional é subdividida em três subsetores e produtores independentes de ferro-gusa, assim, optou-se por seguir a mesma classificação do estudo:

- Siderúrgicas integradas com coqueria;
- Siderúrgicas integradas sem coqueria;
- Siderúrgicas semi-integradas;
- Produção independente de ferro-gusa.

A necessidade dessa subdivisão se dá devido às características energéticas bem distintas de cada tipo de usina, uma vez que a presença de uma coqueria na planta permite o reaproveitamento dos gases de coqueria, alterando significativamente as características energéticas dos demais processos, assim como as siderúrgicas semi-integradas que não têm coquerias e altos-fornos para recuperação de calor. A produção independente de gusa também deve ser separada, pois seus processos são menos eficientes devido a uma questão de escala, portanto devem ser tratados separadamente (CGEE, 2014).

Diante disso, cada subsetor foi estruturado de acordo com sua cadeia produtiva e, dessa forma, a aplicação de MTD e de melhoras de processo, no âmbito do cenário BC, poderá ser acoplada aos processos produtivos adequados, o que permitirá medir a redução do consumo de um determinado *input* (em GJ) por tonelada de produto. As seguintes etapas da cadeia produtiva foram consideradas:

a) Siderúrgicas integradas com coqueria

- Coqueria;
- Sinterização;
- Alto-forno a coque;
- Conversor LD;

- Sistemas auxiliares e geração de energia elétrica (quando presentes);
- Laminação.

b) Siderúrgicas integradas sem coqueria

- Sinterização;
- Alto-forno a coque/alto-forno a carvão vegetal;
- Conversor LD;
- Sistemas auxiliares;
- Laminação.

- c) Siderúrgicas semi-integradas
 - Sistemas de aquecimento auxiliares;
 - Fornos elétricos a arco;
 - Laminação.
- d) Produção independente de ferro-gusa
 - Coqueria a carvão vegetal;
 - Sinterização;
 - Alto-forno a carvão vegetal.

A projeção das emissões de CO₂ no cenário REF se baseou na evolução da demanda energética para o mesmo cenário. Foram considerados os fatores de emissão *default* do IPCC (2006) constantes da Tabela 32, que também foram utilizados na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTI, 2016). Mais que isso, foram consideradas as emissões de processo do setor. Por outro lado, foram desconsideradas emissões de lenha e carvão vegetal para evitar dupla contagem com o setor de Afolu, o que pode ocorrer caso a origem desses energéticos seja de floresta nativa.

Tabela 32 – Fatores de Emissão de CO₂

Fontes	Fatores de emissão (tCO ₂ /TJ)
Gás natural	56,1
Carvão vapor	94,6
Óleo combustível	77,4
Carvão mineral	94,6
Coque de petróleo	97,5
GLP	63,1
Óleo diesel	74,1

Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC, 2006; MCTI, 2016

Para a eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN), foram utilizados os fatores de emissão informados pelo MCTI (2015) (Tabela 33). Para o período de 2017 a 2050, os valores são oriundos da modelagem integrada dos cenários de emissões do projeto. Esses fatores de emissão serão apresentados em valores médios por períodos, entre 2017 e 2050 (MCTIC, 2017).

Percebe-se significativo aumento do fator de emissão do *grid* elétrico a partir 2035, o qual decorre do deplecionamento do potencial hidrelétrico remanescente. Assim, a geração elétrica excedente, em um cenário de referência, no qual inexitem políticas adicionais de baixo carbono, passa a ser atendida por fontes de energia mais baratas e com maior intensidade carbônica, em particular carvão mineral (MCTIC, 2017).

Tabela 33 – Fatores de Emissão de CO₂ do SIN

Anos/Períodos	Fatores de emissão (tCO ₂ /MWh)
2010	0,0512
2011	0,0292
2012	0,0653
2013	0,0960
2014	0,1355
2015	0,1244
2016	0,0817
2017-2020	0,0492
2021-2025	0,0468
2026-2030	0,0906
2031-2035	0,0993
2036-2040	0,1333
2041-2045	0,1920
2046-2050	0,2525

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTI, 2015; MCTIC, 2017

Após reunião realizada em 18/06/2015 no Instituto Aço Brasil (2013), identificou-se a necessidade de atualizar o quadro-resumo das usinas siderúrgicas (Quadro 2). Algumas usinas foram separadas em uma categoria híbrida, pois combinam produção de aço utilizando altos-fornos e aciarias elétricas. Além disso, a capacidade instalada foi atualizada e foi inserida a partir de termelétrica (Quadro 3).

A capacidade das usinas de Ipatinga e Cubatão, da Usiminas, foram somadas em um único valor, pois o IABr não dispunha dos dados segregados. O mesmo ocorre com as usinas da Gerdau e da ArcelorMittal.

Quadro 3 – Quadro-resumo com as Principais Informações sobre as Unidades Siderúrgicas do Brasil

Tipo de Usina	Produto	Unidade	Capacidade Anual Instalada da Aciaria (mil toneladas)	Cidade	Estado	Aciaria	Produção de Coque	Carvão Mineral ou Vegetal?	Geração de Energia	Capacidade de Geração de Energia a partir de termelétrica (mil MWh)
Usinas integradas	Laminados planos	ArcelorMittal Tubarão (CST)	7.750	Vitória	ES	BOF	Sim	Mineral	Sim	2.400
		CSN	5.750	Volta Redonda	RJ	BOF	Sim	Mineral	Sim	1.340
		Usiminas Ipatinga	9.454*	Ipatinga	MG	BOF	Sim	Mineral	Sim	620
		Usiminas Cubatão	*	Cubatão	SP	BOF	Sim	Mineral	Sim	160
		ThyssenKrupp CSA	5.200	Rio de Janeiro	RJ	BOF	Sim	Mineral	Sim	2.830
	Laminados longos	ArcelorMittal Aços Longos	1.200	João Monlevade	MG	BOF	Não	Mineral	Não	Não
		Gerdau Açominas (planos e longos)	5.445**	Ouro Branco	MG	BOF	Sim	Mineral	Sim	460
		Gerdau Aços Longos	**	Barão de Cocais	MG	BOF	Não	Vegetal	Não	Não
		Gerdau Aços Longos	**	Divinópolis	MG	EOF	Não	Vegetal	Não	Não
		Vallourec Tubos do Brasil	700	Belo Horizonte	MG	BOF	Não	Vegetal	Sim	80
Usinas semi-integradas	Laminados longos	ArcelorMittal Aços Longos	2.770***	Piracicaba	SP	Elétrica	Não	-	Não	Não
		CSN	500	Volta Redonda	RJ	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Longos	5.956****	São Paulo	SP	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Especiais	****	Pindamonhangaba	SP	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Especiais	****	Mogi das Cruzes	SP	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Longos Usiba	****	Simões Filho	BA	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Villares Metals	165	Sumaré	SP	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Longos Cosigua	****	Rio de Janeiro	RJ	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Votorantim Siderurgia	800	Barra Mansa	RJ	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Votorantim Siderurgia	1.000	Resende	RJ	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Longos	****	Guaíra	PR	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Longos Riograndense	****	Sapuçaia	RS	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Especiais	****	Piratini	RS	Elétrica	Não	-	Não	Não
		ArcelorMittal Aços Longos	***	Cariacica	ES	Elétrica	Não	-	Não	Não
		Gerdau Aços Longos Aço Norte	****	Recife	PE	Elétrica	Não	-	Não	Não
Gerdau Aços Longos	****	Manacaráu	CE	Elétrica	Não	-	Não	Não		
Usinas híbridas	Laminados planos	Aperam South America	745	Timóteo	MG	BOF/Elétrica	Não	Vegetal	Não	Não
		VSB	1.050	Jeceaba	MG	Elétrica	Não	Vegetal	Não	Não
		Sinobras	360	Marabá	PA	Elétrica	Não	Vegetal	Não	Não
		ArcelorMittal Aços Longos	***	Juiz de Fora	MG	Elétrica	Não	Vegetal	Não	Não

* Capacidade somada da Usiminas, unidades de Ipatinga e Cubatão.

** Capacidade somada da Gerdau, BOF/EAF, unidades de Ouro Branco, Barão de Cocais e Divinópolis.

*** Capacidade somada da ArcelorMittal, aciaria elétrica/híbrida, unidades de Piracicaba, Cariacica e Juiz de Fora.

**** Capacidade somada da Gerdau, aciaria elétrica, unidades de São Paulo, Pindamonhangaba, Mogi das Cruzes, Simões Filho, Rio de Janeiro, Guaíra, Sapuçaia, Piratini, Recife, Manacaráu.

Como a cadeia produtiva do setor é organizada em seus diferentes processos, deu-se início à pesquisa pelos consumos energéticos de cada processo e sua produção. Em EPE (2009), os energéticos envolvidos em cada um dos processos supracitados são detalhados. Entretanto, toda a cadeia é normalizada em função da produção de uma tonelada de aço bruto. Portanto, foi necessário compreender o fluxo de materiais envolvido em cada cadeia a fim de expressar o consumo de cada processo em GJ/tonelada de produto do processo. Tal tarefa foi realizada uma vez que eficiências de produção, custos associados, capacidades e utilizações históricas e futuras, bem como emissões de GEE, são apresentados na literatura em função de toneladas de produto do processo.

Em sequência, são apresentados os principais dados de *inputs* e *outputs* energéticos considerados nos cenários REF, BC e BC+I do setor de ferro-gusa e aço.

5.1.1 FLUXO DE MATÉRIA E CONSUMO ESPECÍFICOS DE ENERGIA DOS PROCESSOS POR TIPO DE USINAS

A Tabela 34 mostra a matriz típica resultante do fluxo de materiais na indústria siderúrgica, composta pelos consumos unitários médios de materiais por unidade de produto, em cada fase da cadeia produtiva. Esses dados são utilizados como fatores de conversão para permitir que os *outputs* por processo sejam organizados em função da tonelada de produto do processo, e não em função da tonelada de aço bruto.

Tabela 34 – Matriz de Fluxo de Materiais (kg de material/t produto)

Materiais	Unidade/Produto					
	Coqueria	Sinterização	Alto forno a coque	Alto forno a carvão vegetal	Aciaria a oxigênio (LD)	Aciaria elétrica
	Coque	Sínter				
Carvão ¹	1.300	-	-	-	-	-
Minério	-	800	-	-	-	-
Retorno de finos	-	380	-	-	-	-
Moinha/Antracito	-	50	-	-	-	-
Fundentes ²	-	150	-	-	-	-
Carga Metálica	-	-	1.630	1.630	-	-
<i>Sínter (80%)</i>	-	-	1.304	1.304	-	-
<i>Minério ou pelota (20%)</i>	-	-	326	326	-	-
Coque	-	-	354	-	-	-
Finos de carvão	-	-	141	-	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	400	-	-
Gusa	-	-	-	-	951	326
Sucata	-	-	-	-	138	761
Cal	-	-	-	-	55	55

¹ Base úmida.

² Calcário e cal fina.

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2009

Esses dados são utilizados como fatores de conversão para permitir que os *outputs* por processo sejam organizados em função da tonelada de produto do processo, e não em função da tonelada de aço bruto. A Tabela 35 mostra os consumos energéticos específicos praticados nas usinas integradas com coqueria no Brasil.

Tabela 35 – Consumos Energéticos Específicos dos Processos (GJ/t de aço bruto)

Energético	Coqueria	Sinterização	Alto forno a coque	Aciaria a oxigênio (LD)	Laminação	Sistema Energético	Consumo por energético (GJ/t aço)
	Coque	Sínter	Gusa	Aço	Laminados	Aço	
Carvão mineral	15,35	-	-	-	-	-	15,35
Finos de carvão	-	-	4,10				4,10
Coque	-	-	10,60	-	-	-	10,60
Moinha/Antracito	-	1,75	-	-	-	-	1,75
Gás de coqueria	0,67	0,07	0,63	0,18	0,75	0,51	2,82
Gás de alto-forno	0,67	-	1,41	-	0,37	1,78	4,24
Gás de aciaria	-	-	-	-	0,03	0,40	0,43
Energia elétrica	0,06	0,13	0,17	0,17	0,42	0,44	1,39
Oxigênio	-	-	-	0,39	-	0,21	0,60
Nitrogênio	-	-	-	0,22	-	-	0,22
Gás natural	-	-	-	0,08	0,58	-	0,66
Outras fontes	0,12	-	1,09	0,22	0,19	-	1,63
Consumo total (A)	16,87	1,95	18,01	1,26	2,36	3,34	43,79
Gás gerado coqueria	3,28	-	-	-	-	-	3,28
Gás gerado alto-forno	-	-	5,14	-	-	-	5,14
Gás gerado aciaria	-	-	-	0,49	-	-	0,49
Coque para alto-forno	10,91	-	-	-	-	-	10,91
Eletricidade gerada	-	-	-	-	-	1,01	1,01
Geração (B)	14,19	-	5,14	0,49	-	1,01	20,83
(A) - (B)	2,68	1,95	12,87	0,77	2,36	2,33	22,96

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2009

Para construção dos cenários e inserção dos dados na modelagem integrada, os valores foram convertidos para GJ/tonelada de produto do processo. A Tabela 36 mostra os consumos energéticos das usinas integradas sem coqueria, utilizando altos-fornos a coque ou a carvão vegetal. E a Tabela 37 mostra os consumos energéticos das usinas semi-integradas.

Tabela 36 – Consumos Energéticos Específicos dos Processos (GJ/t de aço bruto)

Energético	Coqueria	Sinterização	Alto forno a coque	Aciaria a oxigênio (LD)	Laminação	Sistema Energético	Consumo por energético (GJ/t aço)
	Coque	Sínter	Gusa	Aço	Laminados	Aço	
Carvão vegetal	-	-	10,68	-	-	-	10,68
Finos de carvão	-	1,22	2,86	-	-	-	4,09
Coque	-	3,88	-	-	-	-	3,88
Moinha/Antracito	0,79	-	-	-	-	-	0,79
Gás de alto-forno	0,09	0,75	1,49	0,12	1,32	0,63	4,40
Energia elétrica	0,06	0,16	0,09	0,30	0,93	0,30	1,83
Oxigênio	-	0,14	-	0,36	-	-	0,50
Nitrogênio	-	0,10	-	0,14	-	-	0,24
Gás natural	-	0,14	-	0,15	0,06	-	0,35
Outras fontes	0,18	0,10	1,12	0,18	0,57	-	2,14
Consumo total (A)	1,12	6,49	16,23	1,25	2,89	0,93	28,90
Gás gerado alto-forno	-	2,48	1,63	-	-	-	4,11
Geração (B)	-	2,48	1,63	-	-	-	4,11
(A) - (B)	1,12	4,01	14,60	1,25	2,89	0,93	24,79

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2009

Tabela 37 – Consumos Energéticos dos Processos (GJ/t de aço bruto)

Energético	Aciaria elétrica	Laminação	Sistema Energético	Consumo por energético (GJ/t aço)
	Aço	Laminados	Aço	
Energia elétrica	1,69	0,85	0,60	3,14
Oxigênio	0,38	-	-	0,38
Gás natural	0,74	1,19	0,97	2,90
Outras fontes	0,58	0,27	1,50	2,35
Consumo total (A)	3,39	2,30	3,07	8,76
Gás gerado alto-forno	-	-	-	-
Geração (B)	-	-	-	-
(A) - (B)	3,39	2,30	3,07	8,76

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2009

Para o preenchimento das intensidades energéticas dos processos envolvidos na produção de ferro-gusa independente, foram utilizados os dados disponibilizados em EPE (2009) para o fluxo de materiais (Tabela 34), que trata da conversão de carvão vegetal em ferro-gusa, e os consumo específicos de energia apresentados nas Tabelas 35, 36 e 37.

5.2 PROJEÇÕES DE PRODUÇÃO, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

Uma vez estabelecidas as premissas do cenário REF, foi possível projetar a produção de aço e ferro-gusa e, conseqüentemente, determinar a demanda energética para atender tal produção, bem como as emissões de CO₂ associadas ao processo produtivo.

A partir das taxas de crescimento setorial constantes da Tabela 31, inicialmente, foi possível projetar a produção de aço até 2050, conforme Figura 16. Cumpre enfatizar que a participação histórica média das rotas integrada com coqueria, integrada sem coqueria e aciaria EAF, foi mantida para as projeções de cada rota, como mostrado na Tabela 38.

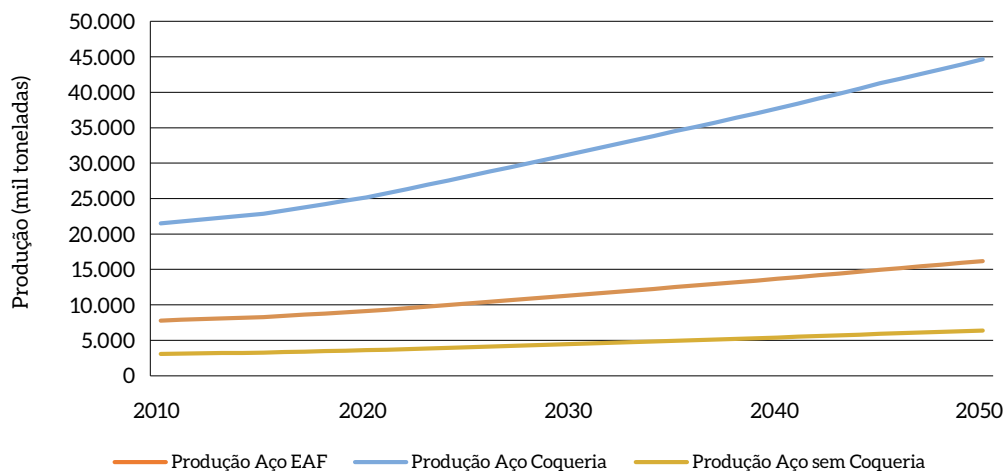


Figura 16 - Produção Brasileira de Aço entre 2010 e 2050

Fonte: Elaboração própria

Tabela 38 – Projeção da Produção de Aço no Brasil por Rota

Ano	Produção de aço por rota (mil toneladas)		
	Aço EAF	Integradas com Coqueria	Integradas sem Coqueria
2015	8.284	22.866	3.272
2020	9.118	25.167	3.601
2025	10.218	28.203	4.036
2030	11.347	31.318	4.482
2035	12.495	34.486	4.935
2040	13.667	37.723	5.398
2045	14.950	41.264	5.905
2050	16.180	44.659	6.391

Fonte: Elaboração própria

A produção total de aço, em face das premissas de crescimento do setor, mais do que dobra no período de 2015-2050, atingindo 67,2 milhões de toneladas de aço em 2050. Trata-se de uma visão otimista de crescimento da produção setorial, que desconsidera os efeitos do agravamento da crise econômica entre 2015 e 2016, a qual foi revisada (HADDAD, 2016) e tem seus resultados refletidos, em patamares inferiores, nos cenários integrados reportados no relatório *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*.

Em seguida, foi projetada a produção de ferro-gusa (Tabela 39).

Tabela 39 – Projeção da Produção de Ferro-gusa no Brasil até 2050

Ano	Produção de ferro-gusa (mil toneladas)	
	Gusa em Integradas	Gusa Independente
2015	24.903	5.577
2020	27.410	6.139
2025	30.716	6.879
2030	34.108	7.639
2035	37.559	8.412
2040	41.084	9.201
2045	44.687	10.008
2050	48.362	10.831

Fonte: Elaboração própria

Uma vez estabelecidos os níveis de produção de cada rota siderúrgica e da produção de ferro-gusa, foi possível obter a evolução da demanda de energia entre 2010 e 2050, mostrada na Figura 17.

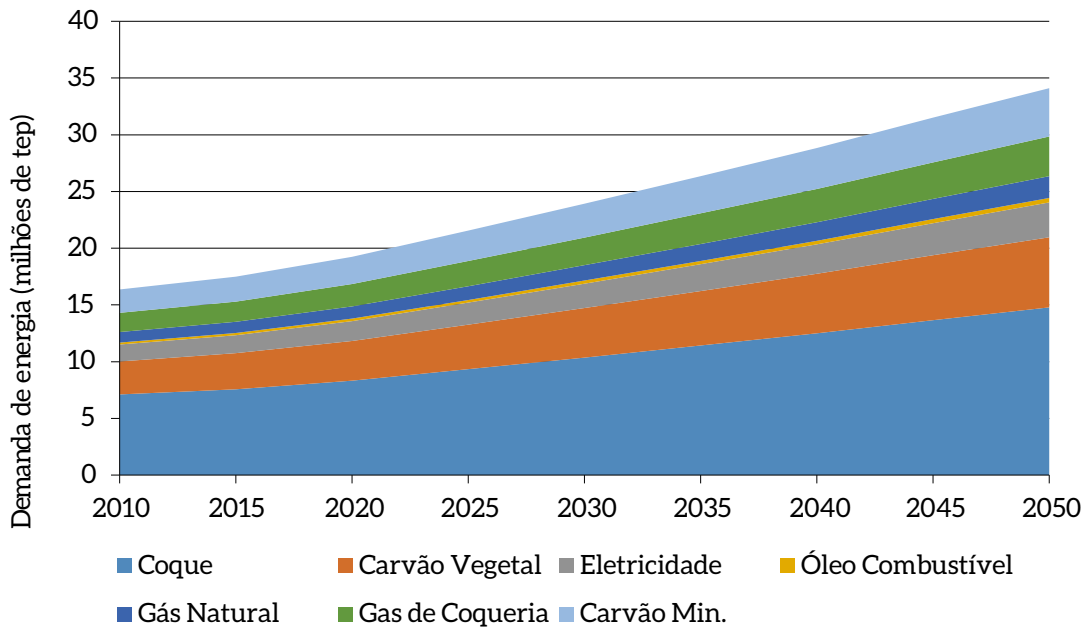


Figura 17 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Para fins de comparação, a Figura 18 apresenta a projeção do Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016). Observa-se que, mesmo perdendo importância no consumo energético industrial, a siderurgia ainda demandará grande volume de energia, que seria de 31 milhões de tep em 2050. A proximidade das projeções de demanda energética (Figura 17 e Figura 18) deriva da semelhança da taxa de crescimento médio anual do PIB projetada em EPE (2016) e Haddad (2015), qual seja, de 1,8% ao ano até 2050. Embora otimistas perante a projeção de crescimento médio constante de Haddad (2016) – 1,4% ao ano, em ambos os casos, o setor apresenta projeção de crescimento significativamente inferior à média da economia nacional, que é de 3,6% ao ano, em EPE (2016), e 2,1% ao ano, em Haddad (2015).

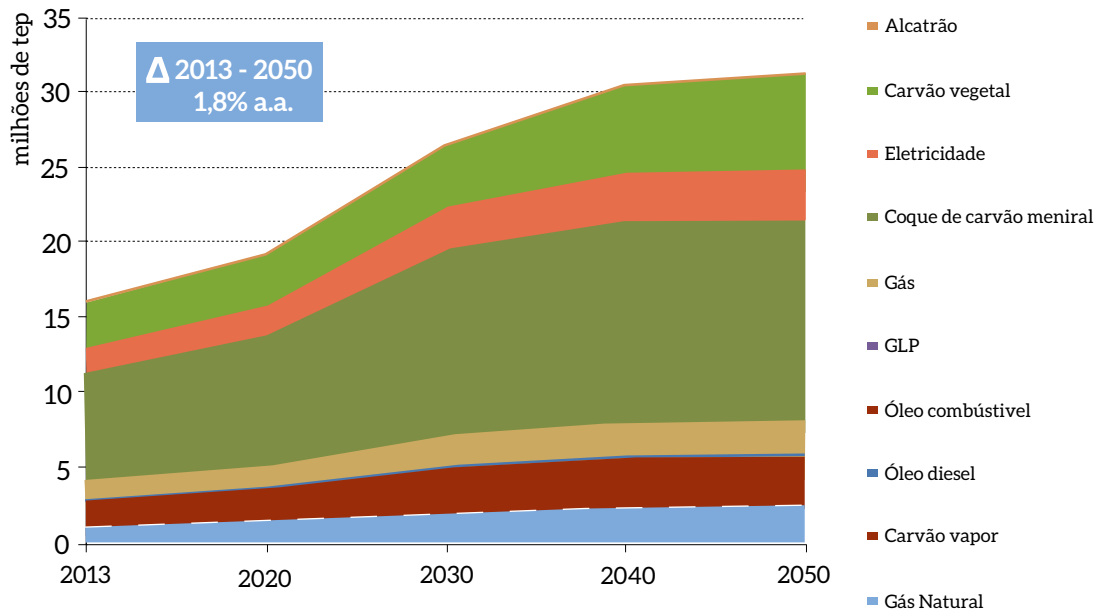


Figura 18 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço (2013-2050)

Fonte: EPE, 2016

Na Figura 19, Figura 20, Figura 21, são detalhados os consumos de energia das usinas integradas com coqueria, usinas integradas sem coqueria e usinas com aciaria elétrica, respectivamente.

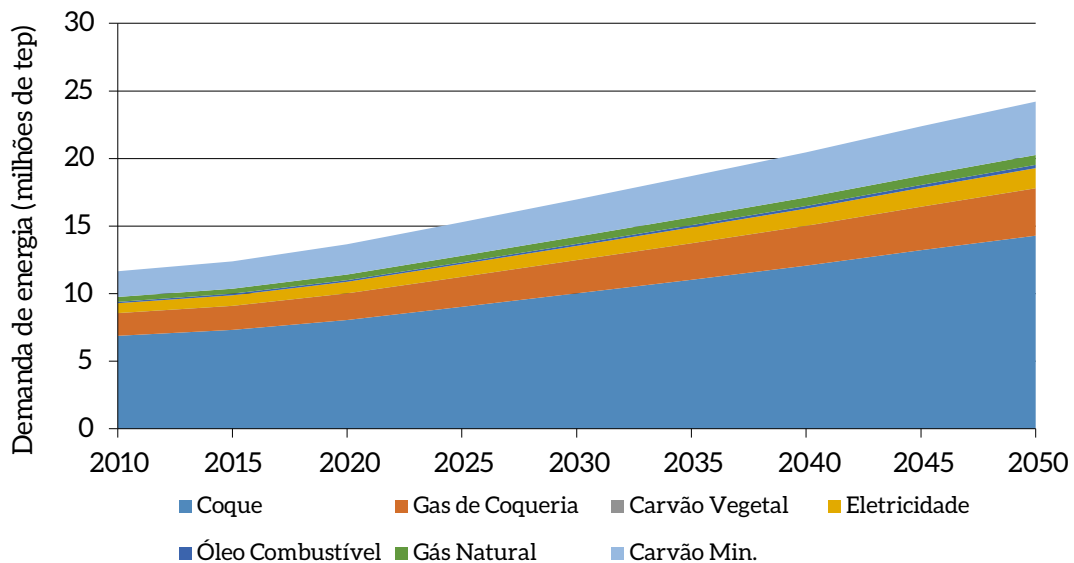


Figura 19 – Demanda de Energia das Usinas Integradas com Coqueria

Fonte: Elaboração própria

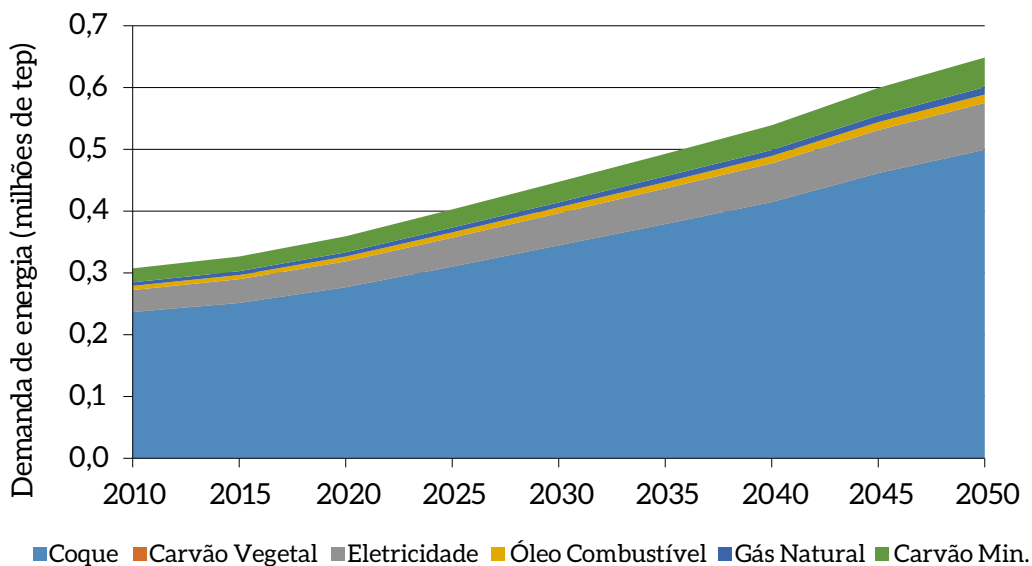


Figura 20 – Demanda de Energia das Usinas Integradas sem Coqueria

Fonte: Elaboração própria

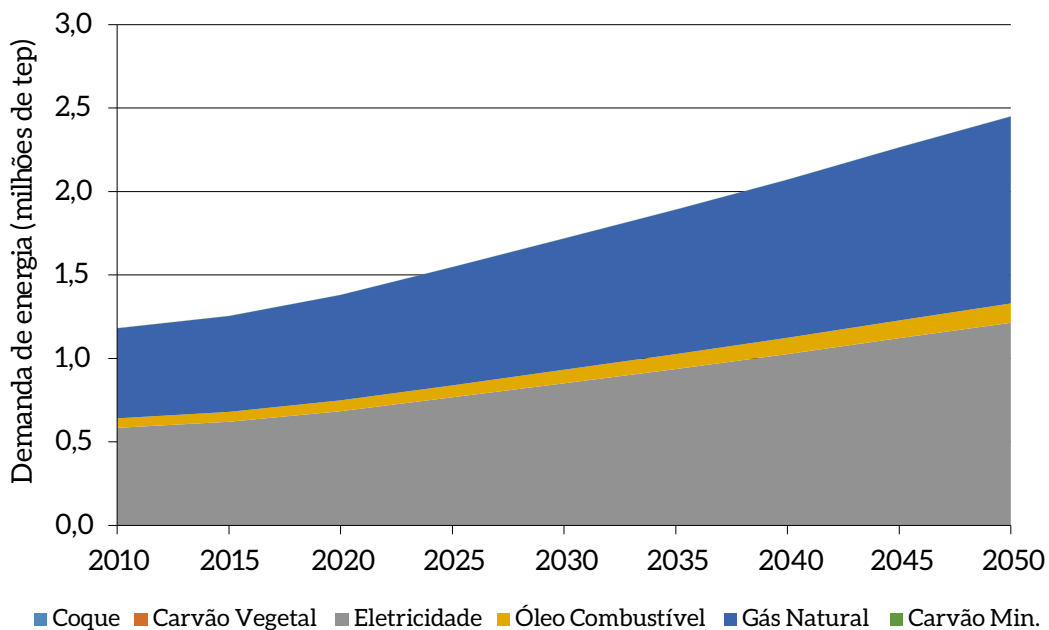


Figura 21 – Demanda de Energia das Usinas com Aciaria Elétrica

Fonte: Elaboração própria

Para a contabilização das emissões de dióxido de carbono, fez-se uso das projeções dos níveis de produção e dos fatores de emissão utilizados em MCTI (2015). Os resultados obtidos são exibidos na

Figura 22. Observa-se que as emissões praticamente dobram no período, e os principais responsáveis pelas emissões são as usinas integradas a coque.

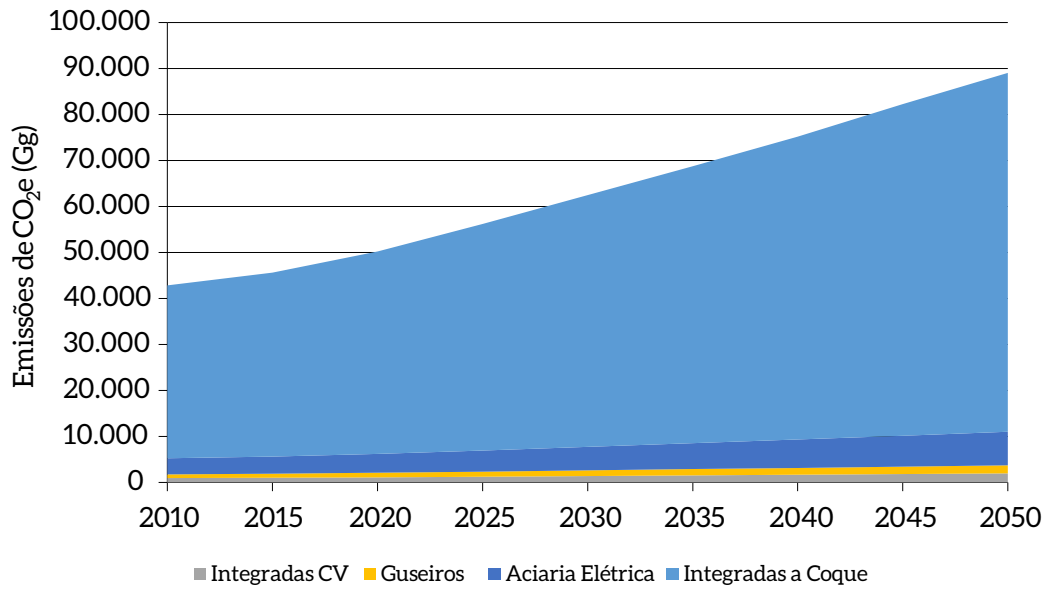
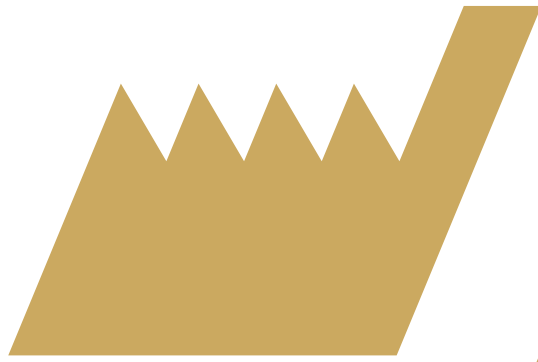


Figura 22 – Emissões de CO₂ no Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário REF (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria



Cenário de baixo carbono

Capítulo

6

6 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

Este capítulo objetiva elaborar o cenário BC do setor de ferro-gusa e aço. Em primeiro lugar, serão apresentados os procedimentos metodológicos considerados no cenário. Por fim, serão apresentadas as projeções de produção, consumo de energia, emissões de GEE, assim como os custos marginais de abatimento das atividades de baixo carbono.

6.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E PREMISSAS

Inicialmente, para o cenário de baixo carbono na indústria de ferro e aço brasileira, foram consideradas as premissas levantadas em Rathmann et al. (2010) e Henriques Jr. (2010), em que a siderurgia nacional seria capaz de ter participação de 46% de carvão vegetal na produção do ferro-gusa nacional em 2030. Entretanto, em entrevistas realizadas com o Instituto Aço Brasil e outros consultores do setor, verificou-se que essa perspectiva não se mostra viável no contexto nacional. Dessa forma, considerou-se no cenário BC uma evolução, até o ano de 2050, para participação de 34% de carvão vegetal na produção de ferro-gusa.

Além disso, observa-se que a participação da produção de ferro-gusa por produtores independentes não apresenta características favoráveis ao crescimento. Atualmente, a produção de ferro-gusa no Brasil se dá numa relação de 17% por produtores independentes e 83% por usinas integradas (a coque e carvão vegetal). Nas usinas integradas, apenas 9% da produção de ferro-gusa são feitos utilizando carvão vegetal. Visando atingir o total de 34% de participação do carvão vegetal, foi considerado incremento de 0,1% ao ano na participação de produtores independentes na produção de ferro-gusa a partir de 2030, fazendo que a relação 17%/83% (independentes/integradas) fosse alterada para 19,3% e 80,7%, respectivamente, em 2050.

Verificou-se que apenas o incremento da produção de ferro-gusa independente não é suficiente para atingir o total de 34%. Portanto, considerou-se que a produção de gusa em usinas integradas, que atualmente apresenta proporção de 9%/91% (carvão vegetal/carvão mineral), atingisse, em 2050, a proporção de 20,8%/79,2%. Para esse aumento na participação do carvão vegetal em usinas integradas, foi considerada a taxa de 0,6% ao ano entre 2030 a 2050.

Foi considerado o mesmo cenário econômico (HADDAD, 2015), assim como premissas de estruturação aplicadas no cenário de REF para a construção do cenário BC. No caso das emissões de GEE, foram considerados os fatores de emissão apresentados nas Tabelas 32 e 33.

Para a seleção das MTD analisadas no cenário BC, foram considerados dois critérios: i) tecnologias que apresentem nível de prontidão tecnológica (TRL) igual ou superior a 7 (EIPPCB, 2013); ii) tecnologias que tenham maior potencial de redução de emissões de GEE. Todas as tecnologias listadas no Quadro 4 foram comprovadas e implantadas na indústria, com TRL igual a 9, à exceção de preaquecimento da sucata e recuperação de calor sensível do BOF, que foram testadas em ambiente operacional (TRL 7).

Quadro 4 – MTD Consideradas no Cenário de Baixo Carbono

Medidas de Baixo Carbono	Segmento Aplicável
Sistema de controle avançado	Aciaria elétrica
Queimadores <i>oxy-fuel</i>	Aciaria elétrica
Preaquecimento da sucata	Aciaria elétrica
UTE avançadas para produção de eletricidade em usinas integradas	Usinas integradas com coqueria
<i>Drivers</i> de velocidade variável nos BOF	Usinas integradas
<i>Coke dry quenching</i>	Usinas integradas com coqueria
Controle da umidade do carvão	Usinas integradas
Recuperação de calor nas fornalhas de ar quente	Usinas integradas e aciaria elétrica
Fornos Scope 21	Usinas integradas com coqueria
Recuperação de calor residual	Usinas integradas
<i>Top pressure recovery turbine</i> (TRT)	Usinas integradas
Injeção de carvão pulverizado ¹	Usinas integradas
Recuperação de calor sensível do BOF	Usinas integradas

¹Injeção de 225 gramas por tonelada de aço

Fonte: Elaboração própria

Para a adoção das tecnologias, foram pressupostas taxas de penetração das MTD, conforme Tabela 40.

Tabela 40 – Penetração das Tecnologias Consideradas

Ano	Taxa de Penetração
2010	0%
2015	3%
2020	7%
2025	10%
2030	13%
2035	15%
2040	18%
2045	20%
2050	25%

Fonte: Elaboração própria

Finalmente, para obter potencial de mitigação de emissões de GEE das MTD, foram considerados o potencial específico de redução no consumo de energia (GJ/tonelada de produto) e a possibilidade de penetração da tecnologia no país.

6.2 PROJEÇÕES DE PRODUÇÃO, CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

No cenário BC, ocorre o incremento na produção de ferro-gusa via rota integrada, utilizando carvão vegetal. Logo, a produção de aço via rota integrada sem coqueria também tende a aumentar, seguindo a mesma proporção. A produção de aço via EAF também apresenta pequeno aumento em sua participação na produção de aço, resultante da variação na produção de ferro-gusa independente.

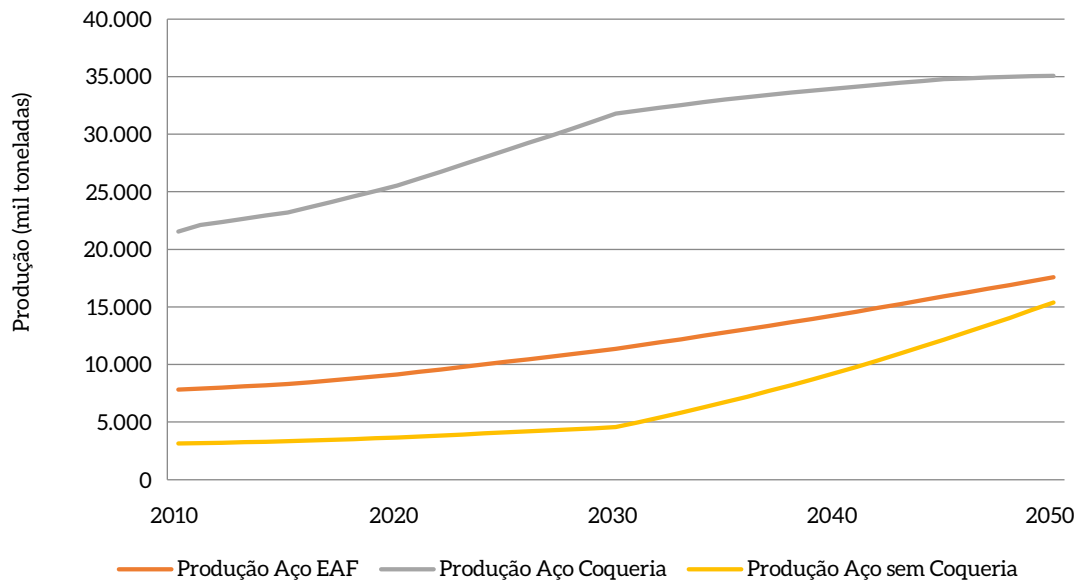


Figura 23 – Projeção da Produção de Aço por Rota no Cenário BC

Fonte: Elaboração própria

Seguindo a premissa de aumento na produção de ferro-gusa a partir de carvão vegetal para o total de 34% de participação, a Figura 24 foi elaborada de forma a exibir os resultados da projeção de produção. Percebe-se significativo incremento na produção de ferro-gusa a partir de produtores independentes, que mais do que dobra no período de 2010 a 2050.

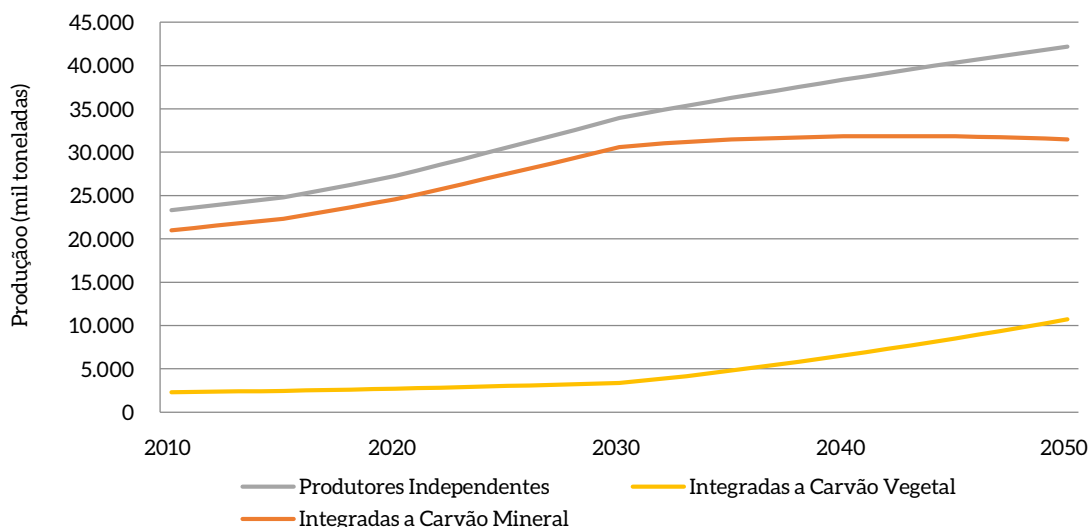


Figura 24 – Projeção da Produção de Ferro-gusa no Cenário BC

Fonte: Elaboração própria

A partir das produções por tipo de produto e rota, foram projetadas a demanda de energia e emissões de GEE cenário BC (Figura 25 e Figura 26).

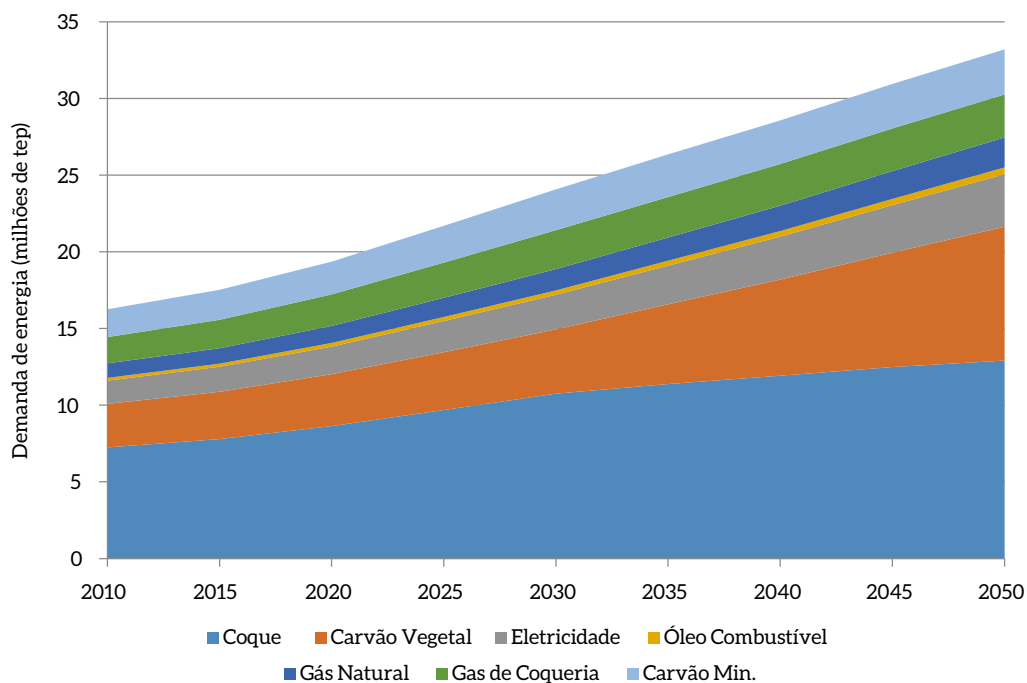


Figura 25 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

O consumo de energia praticamente não é reduzido no cenário BC, relativamente ao cenário REF. Mesmo com a melhora de eficiência de alguns processos, a utilização de altos-fornos a carvão vegetal é mais energointensiva devido à sua menor eficiência em relação ao forno de coque, o que leva a um incremento no consumo de energia que compensa os ganhos energéticos obtidos.

Devido à maior participação da aciaria elétrica no cenário BC, o consumo de eletricidade nesse cenário é 10% maior do que no cenário REF em 2050. Por sua vez, dado o incremento das usinas integradas a carvão vegetal, há um aumento no consumo desse energético que chega a 35%, com relação ao cenário REF, em 2050.

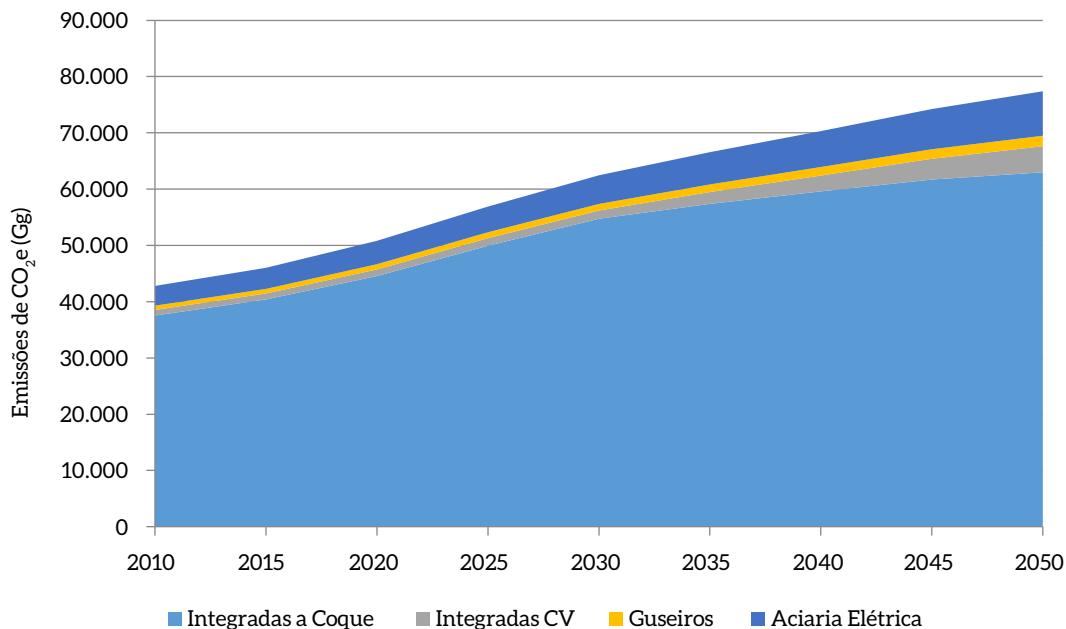


Figura 26 – Emissões de CO₂e no Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

Quanto às emissões de GEE, observa-se que, a partir de 2035, quando ocorre maior uso do carvão vegetal na siderurgia nacional, as emissões passam a se reduzir em patamares relevantes, chegando a aproximadamente 13% em 2050. Essa redução também é explicada por uma maior adoção de fornos elétricos a arco. Trata-se de um potencial de abatimento relativamente baixo, que se tornaria mais relevante apenas no longo prazo. Além disso, trata-se de uma modelagem setorial, que não é capaz de diferenciar a fonte de carvão vegetal, quais sejam, florestas comerciais e florestas nativas. Portanto, a estimativa de potencial de abatimento pode estar sobrestimada na medida em que parte da demanda poderia estar sendo suprida, dependendo da dinâmica de uso e mudanças no uso do solo, por florestas nativas. Essa limitação é superada por meio da construção integrada dos cenários nos modelos MSB8000, Otimizagro e Efes, que terão seus resultados reportados em relatório próprio.

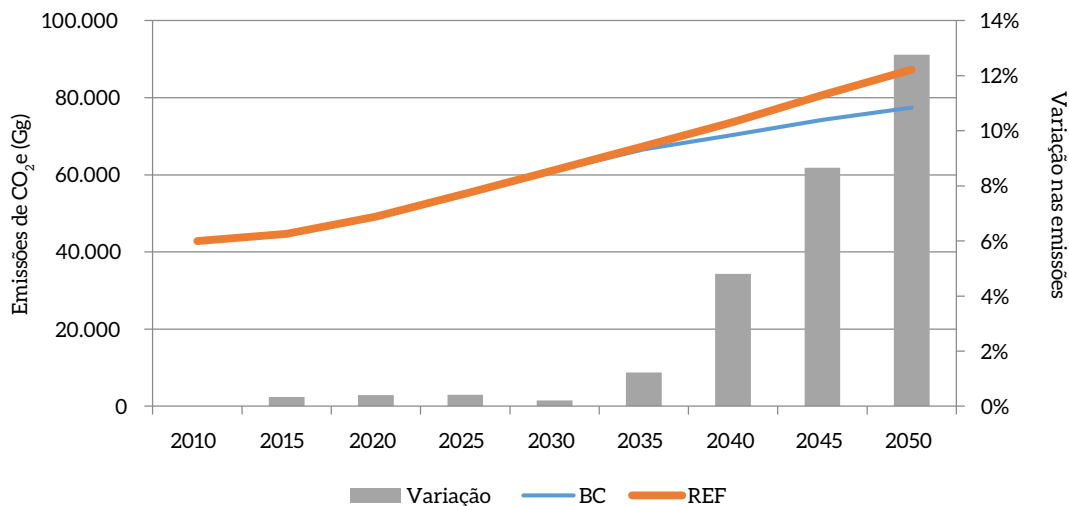


Figura 27 – Comparação das Emissões dos Cenários BC e REF

6.3 CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO DO CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

Nesta seção, são calculados os custos marginais de abatimento (CMA) das MTD aplicáveis ao setor de ferro-gusa e aço (Quadro 5). As MTD foram selecionadas por associarem potenciais satisfatórios de mitigação de emissões a níveis de prontidão tecnológica (TRL) a partir de 7, o que indica aplicabilidade operacional e disponibilidade comercial

Inicialmente, serão descritos os procedimentos metodológicos considerados para calcular os CMA. Em seguida, serão descritas as premissas consideradas para mensurá-los. Por fim, serão apresentados os resultados, com destaque para a curva de CMA, que relaciona os potenciais e custos das opções de mitigação até 2050.

6.3.1 METODOLOGIA

O CMA consiste na diferença entre o custo do cenário REF e o custo do cenário de mitigação, ambos expressos por unidade de massa de CO₂ equivalente (US\$/tonelada CO₂e) (HENRIQUES JR., 2010). Sendo assim, o custo do CO₂e evitado consiste no gasto necessário para mitigar cada unidade de CO₂e.

Quando o custo é negativo, entende-se que a mitigação incorre em benefícios líquidos, ou seja, que, além de possibilitar redução da emissão de CO₂e, provê retorno financeiro ao longo da vida útil da tecnologia e/ou horizonte de implementação da atividade de baixo carbono. Por outro lado, se o custo mesmo for positivo, a mitigação de emissões demanda esforço financeiro para o agente, exceto mediante precificação de carbono no mercado. Nesse caso, apenas quando o custo da medida for inferior ao preço de carbono, o delta entre os valores representa ativo financeiro para o agente.

O CMA leva em conta investimentos necessários, custos operacionais em geral (inclusive com os energéticos) e economias em geral (HALSNAES et al., 1998). Esse custo, para cada opção de mitigação,

está determinado a partir do custo incremental com a implementação da medida em comparação com o cenário referencial e das emissões anuais evitadas.

$$CMA^{opção} = \frac{CAL^{baixo\ carbono} - CAL^{base}}{EA^{base} - EA^{baixo\ carbono}} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, CMA é o custo marginal de abatimento por atividade de baixo carbono; CAL, o custo anual líquido referente aos cenários de referência (base) e baixo carbono; e EA, a emissão anual dos cenários de referência e baixo carbono.

O custo anual líquido (CAL) representa a diferença do custo de investimento anualizado e do resultado financeiro anual da implantação de opção de mitigação. Esse resultado financeiro é dado pela receita total e pelos gastos com operação e manutenção com a implantação da opção.

$$CAL = \frac{INV * r * \left[\frac{(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \right] + OM + COMB - REC}{(1+r)^{(n-2011)}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, INV é igual ao custo do investimento da medida; r é a taxa de desconto; OM é igual ao custo de operação e manutenção da medida; COMB é o custo com combustíveis; REC é a receita obtida com a implementação da medida; e n, o ano de análise.

6.3.2 PREMISSAS

Para determinar os CMA, primeiramente, fez-se necessário identificar taxas de desconto. A taxa de desconto de um investimento consiste no custo de oportunidade do capital, ou o custo do capital utilizado em uma análise de retorno. A definição da taxa de desconto de mercado adotada em um projeto tem importância fundamental e necessita ser bem calibrada para permitir boa avaliação dos custos de abatimento do setor. Uma das formas utilizadas para o seu cálculo utiliza o custo do capital próprio da empresa, que é comparado à rentabilidade de diferentes ativos nos quais o setor poderia investir. Nesse cálculo, parte-se, normalmente, de uma taxa livre de risco, à qual se aplicam prêmios de risco para cada opção de investimento.

Para obtê-la, fez-se consulta ao setor em dezembro de 2014, por meio de ofício enviado pela coordenação do projeto, a respeito da taxa de desconto aplicada setorialmente. Transcorrido o prazo estabelecido, e não tendo sido exitosa a consulta, optou-se por considerar taxa de desconto privada de 15% ao ano.

Em seguida, foi analisado o impacto das medidas/tecnologias por tonelada de aço produzida. Uma vez que os custos das medidas foram obtidos na literatura em US\$/t de aço, o impacto de cada tecnologia foi mensurado em GJ/t de aço. Esse tipo de abordagem facilita o processo de obtenção dos custos marginais de abatimento. Com os dados ajustados por unidade de aço produzida, procedeu-se à adaptação dos cálculos para qualquer cenário de penetração das tecnologias.

Para o cálculo dos fatores de emissão de dióxido de carbono por unidade de energia consumida, foram utilizadas as intensidades energéticas das diversas rotas do setor – calculadas a partir dos consumos energéticos apresentados em EPE (2009) – e dos valores mostrados em CGEE (2010), combinadas com o fator de emissão de cada rota, como mostrado na Tabela 41 e na Tabela 42.

Tabela 41 – Intensidades Energéticas das Rotas Siderúrgicas

Intensidades Energéticas dos Processos (Insumos)		
Integradas (carvão mineral)	22,9	GJ/t aço
Integradas (carvão vegetal)	20,7	GJ/t aço
Minimills	8,76	GJ/t aço
Produção independente	17,25	GJ/t gusa

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2009; CGEE, 2010

Tabela 42 – Fatores de Emissão Considerados no Processo de Produção de Ferro-gusa e Aço

Fatores de Emissão (Insumos)		
Integradas (coque)	1,67	kgCO ₂ /t aço
Integradas (carvão vegetal)	0,25	kgCO ₂ /t aço
Minimills	0,45	kgCO ₂ /t aço
Usinas independentes	0,25	kgCO ₂ /t aço

Fonte: Elaboração própria a partir de IPCC, 2006

Com essas informações, é possível determinar a emissão média de CO₂ para cada GJ consumido em cada rota de produção, mostrados na Tabela 43.

Tabela 43 – Emissão de CO₂ por GJ Consumido em Cada Rota da Siderurgia Nacional

Fatores de Emissão (Insumos)		
Integradas (coque)	0,0729	tCO ₂ /GJ
Integrada (carvão vegetal)	0,0121	tCO ₂ /GJ
Minimills	0,0514	tCO ₂ /GJ
Usinas independentes	0,0145	tCO ₂ /GJ

Fonte: Elaboração própria

Os preços de combustível considerados (Equação 1) foram obtidos a partir de preço constante do petróleo de US\$ 75/bbl (Tabela 44). Esse valor deriva do patamar considerado no âmbito da modelagem integrada do projeto e trata-se de um preço de robustez do petróleo, que é conservador, para não subestimar os custos de abatimento das medidas (MCTIC, 2017).

Tabela 44 – Preços de Combustíveis Considerados e Sua Conversão para Conteúdo Energético

Combustíveis	Parâmetros	Valor	Unidade
Carvão mineral	Preço	180	US\$/t
	Conteúdo energético	28	GJ/t
	Preço/Conteúdo energético	6,43	US\$/GJ
Eletricidade	Preço/Conteúdo energético	0,104	US\$/kWh
Gás natural	Preço	0,43	US\$/m ³
	Conteúdo energético	39,3	MJ/m ³
	Preço/Conteúdo energético	10,87	US\$/GJ
Óleo combustível	Preço	550	US\$/m ³
	Densidade	1100	kg/m ³
	Preço	0,5	US\$/kg
	Conteúdo energético	39,7	MJ/kg
	Preço/Conteúdo energético	12,6	US\$/GJ
Carvão vegetal	Preço	32,36	US\$/m ³
	Densidade	230	kg/m ³
	Preço	0,14	US\$/kg
	Conteúdo energético	27	MJ/kg
	Preço/Conteúdo energético	5,21	US\$/GJ

Fonte: Elaboração própria

Os custos associados a cada tecnologia selecionada, bem como os impactos na redução do consumo (ou geração) de eletricidade e de energia primária considerados para a determinação das MTD, são exibidos na Tabela 45 e foram baseados nos dados e informações detalhadas em IIP (2015).

Tabela 45 – Dados de Entrada Utilizados para o Cálculo dos Custos Marginais de Abatimento das MTD

Medidas	Custo (US\$/t)	Impacto Eletricidade (kWh/t aço)	Impacto Combustíveis (GJ/t aço)
Recuperação de calor residual	2,94	0	0,33
Queimadores <i>oxy-fuel</i>	7,5	37,8	0
Preaquecimento da sucata	7,8	60,94	0
UTE avançadas para produção de eletricidade em usinas integradas	24	69,25	0
<i>Drivers</i> de velocidade variável nos BOF	0,79	0	0,3
<i>Coke dry quenching</i>	36,73	0	0,37
Controle da umidade do carvão	20,2	0	0,18
Recuperação de calor das fornalhas de ar quente	2,2	0	0,08
Fornos Scope 21	140	0	0,88
Sistema de controle avançado	2	30,4	0
<i>Top pressure recovery turbine</i> (TRT)	30	41,55	0
Injeção de carvão pulverizado	8,1	0	0,57
Recuperação de calor sensível do BOF	36,5	0	0,92

Fonte: Elaboração própria a partir de IIP, 2015

6.3.3 RESULTADOS

Considerando as premissas adotadas, foram calculados os custos de abatimento para cada medida, bem como seus potenciais de abatimento até 2050, para a taxa de desconto de 15% ao ano.

Cerca de 85% do potencial total de mitigação estão associados a tecnologias comprovadas e que têm disponibilidade comercial. Isso não significa que as medidas possam ser implementadas, já vez que barreiras não econômicas, como deficiências regulatórias, aspectos comportamentais, entre outras, podem estar presentes. Mais que isso, até mesmo barreiras econômicas não captadas nos custos de abatimento podem impedir a adoção das atividades, como é o caso dos custos de transação, disponibilidade de crédito para realização dos investimentos e conjuntura econômica. Finalmente, os custos obtidos na literatura internacional não necessariamente são adequados à realidade brasileira, em particular considerando a atual conjuntura econômica, o que encarece a obtenção de crédito e conseqüentemente afeta a viabilidade dos investimentos nas MTD. Além disso, um significativo potencial de mitigação (35%) tem custos de abatimento positivos, o que implica barreira adicional, qual seja, a inviabilidade econômica da implementação da tecnologia ao longo da sua vida útil. Tais aspectos serão analisados posteriormente neste relatório.

Tabela 46 – Potenciais e Custos Marginais de Abatimento com Taxa de Desconto de 15% ao ano

Medidas de baixo carbono	Potencial de Abatimento Total (MtCO ₂ e)	Custo Marginal de Abatimento (US\$/tCO ₂ e)
Sistema de controle avançado	1,39	-330,35
Preaquecimento da sucata	2,78	-281,49
UTE avançadas para produção de eletricidade em usinas integradas	6,69	-247,92
<i>Drivers</i> de velocidade variável nos BOF	4,53	-231,35
Queimadores <i>oxy-fuel</i>	1,77	-132,39
Recuperação de calor sensível do BOF	6,99	-110,74
Recuperação de calor das fornalhas de ar quente	1,21	-31,38
Injeção de carvão pulverizado	6,09	-20,32
<i>Coke dry quenching</i>	3,40	-14,19
Recuperação de calor residual	3,00	24,74
Fornos Scope 21	9,60	50,14
<i>Top pressure recovery turbine</i> (TRT)	4,62	50,22
Controle da umidade do carvão	1,87	150,07

Fonte: Elaboração própria

A curva de CMA é apresentada na Figura 28. O potencial acumulado de abatimento de emissões das MTD foi estimado em cerca de 53,9 MtCO₂e. Entretanto, esse potencial de abatimento não representa o potencial líquido de redução de emissões do setor. É apenas o total da redução de cada medida aplicada em relação ao cenário REF. Dessa forma, pode ocorrer, e está ocorrendo, dupla contagem de redução de emissões, visto que a redução do consumo energético de duas medidas não é necessariamente igual à soma de suas contribuições individuais. Essa característica das curvas de abatimento convencionais e setoriais mostra a necessidade de uma modelagem integrada para a eliminação da dupla contagem e para representar, de forma mais fidedigna, o potencial de mitigação do setor.

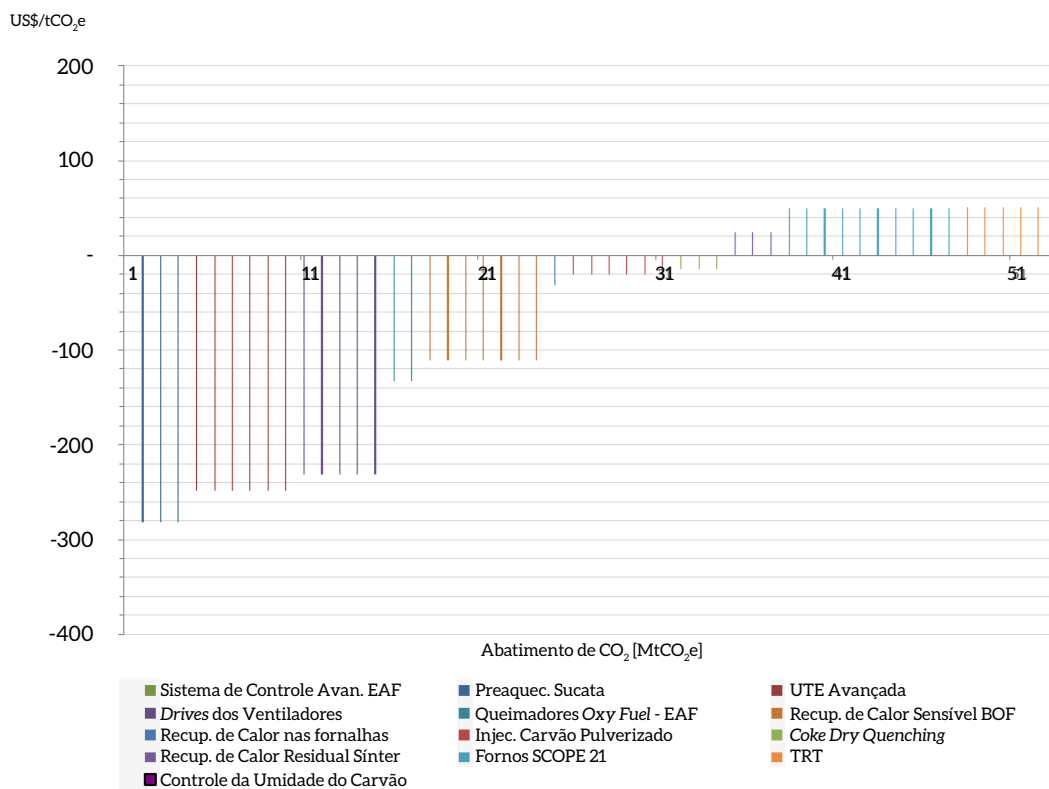
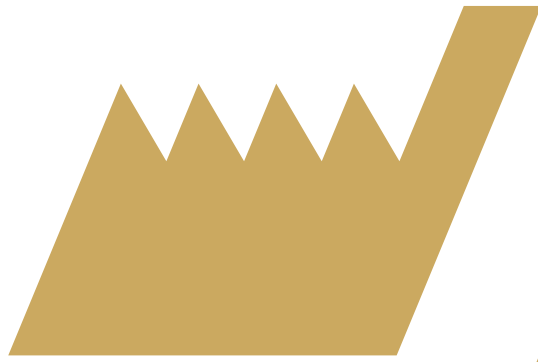


Figura 28 – Curva de Custos Marginais de Abatimentos Considerando uma Taxa de Desconto de 15% ao ano

Por fim, deve-se enfatizar que o potencial total de abatimento do cenário BC em relação ao cenário REF, em 2050, é de 13%. Esse potencial poderia ser ampliado mediante o investimento em P&D de tecnologias inovadoras, as quais serão avaliadas no cenário BC+I.



Cenário de baixo carbono com inovação

Capítulo

7

7 CENÁRIO DE BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO

Este capítulo, primeiramente, descreverá tecnologias de ruptura aplicáveis aos processos produtivos do setor, com potencial de viabilização comercial no longo prazo. Em seguida, serão descritos premissas e parâmetros considerados na construção do cenário BC+I. Por fim, serão apresentadas as projeções de demanda de energia e emissões de CO₂ relativas ao cenário.

Diferentemente do cenário BC, a inexistência de parâmetros econômicos de grande parte das tecnologias inovadoras inviabiliza a mensuração de custos de abatimento de emissões de GEE. Portanto, trata-se de avaliar exclusivamente o potencial técnico de mitigação que está condicionado à criação de políticas públicas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I), visando ao desenvolvimento de tecnologias de ruptura aplicáveis aos processos fabris do setor de ferro-gusa e aço. Objetiva-se, especificamente, avaliar o papel que tecnologias inovadoras podem desempenhar, em termos de redução de emissões de GEE, caso se tornem disponíveis comercialmente.

7.1 TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA O SETOR DE FERRO-GUSA E AÇO

Foram considerados os seguintes estudos para mapeamento de tecnologias disruptivas ou emergentes com potencial de mitigar emissões de GEE no setor: APP (2010), USEPA (2012), EIPPCB (2013) e IEA (2015a). O mapeamento foi feito a partir da identificação de indicadores de prontidão tecnológica (TRL) entre 3 e 6, os quais consideram, respectivamente, prova de conceito e característica; tecnologias ou componentes da tecnologia validados em ambiente laboratorial; tecnologia testada em ambiente operacional; e demonstração do modelo ou protótipo em ambiente operacional.

7.1.1 REFORMA DOS GASES DE COQUERIA

A tecnologia de reforma dos gases de coqueria tem por objetivo a produção de hidrogênio e monóxido de carbono a partir dos componentes dos gases de forno de coque.

O princípio é aumentar o teor de hidrogênio dos gases de coqueria de uma média de 55% para valores entre 63% e 67%, reduzindo a demanda de coque para a redução do minério de ferro e as emissões de CO₂ dos altos-fornos em até 30% (IEA, 2015a).

A produtora de aço coreana Posco está desenvolvendo um processo de conversão para produzir um gás rico em hidrogênio a partir dos gases de coqueria utilizando vapor.

De acordo com estimativas conservadoras, o preaquecimento da sucata em processos de altos-fornos poderia incrementar a produtividade em 10%. Além disso, a recirculação de oxigênio no alto-forno resultaria em demanda menor de calcário, levando à redução das emissões de CO₂. Outra opção poderia ser a utilização da escória para outras aplicações, como a produção de cimento. A eficiência do alto-forno pode ser aumentada por meio do uso de oxigênio puro em substituição do ar enriquecido de oxigênio e na recirculação de parte do gás de topo, gerando a minimização da necessidade de agentes redutores (IEA, 2010).

7.1.2 ALTOS-FORNOS COM RECICLAGEM DOS GASES (TGR) SEM E COM CAPTURA DE CARBONO

A reforma dos gases de topo com captura de carbono é uma tecnologia em desenvolvimento pela Ultra-Low Carbon Dioxide Steelmaking (Ulcos), programa de pesquisa europeu. O gás de topo, subproduto do processo de redução do minério de ferro nos altos-fornos, é coletado, tratado e reutilizado como elemento redutor no alto-forno, reduzindo, assim, o consumo de coque. A Figura 29 mostra um esquema descritivo do processo.

A utilização desse tipo de tecnologia demanda a injeção de oxigênio puro no forno, que permite maior concentração de dióxido de carbono no gás de topo, facilitando sua captura.

Uma planta comercial foi planejada pela ArcelorMittal na França, em 2013. Entretanto, sua instalação foi suspensa devido a questões financeiras do grupo (IEA, 2015).

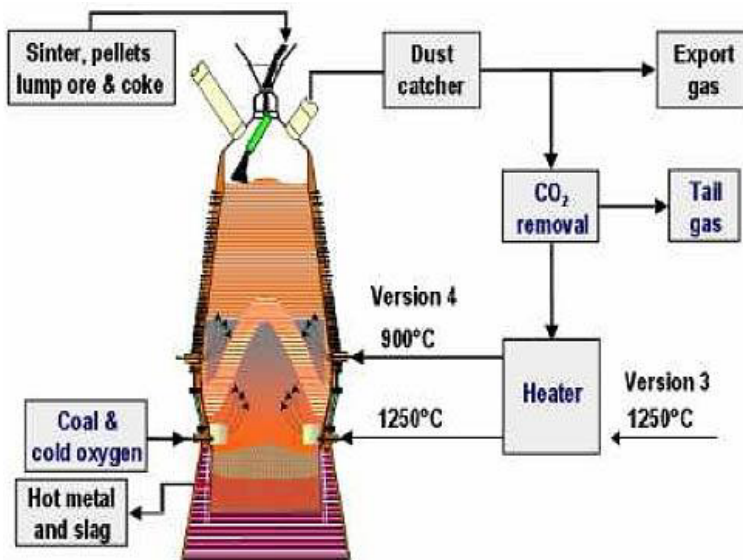


Figura 29 – Esquema do Processo de Recuperação dos Gases de Topo do Alto-forno

A literatura apresenta uma intensidade energética de 12,2 GJ/tonelada de metal quente, com custos de investimento variando entre 240 a 340 US\$/tonelada instalada (IEA, 2015a). Uma redução de cerca de 15% das emissões de dióxido de carbono poderia ser obtida mesmo sem a captura de carbono, enquanto valores de até 50% poderiam ser obtidos com o processo de captura (IIP, 2015).

7.1.3 NOVOS PROCESSOS DE FUSÃO REDUTORA

Novas tecnologias de fusão redutora, como a Hismelt, atingem valores de emissão de CO₂ da ordem de 1,6 tonelada de CO₂ por tonelada de metal quente. Dessa forma, a fusão redutora apresenta vantagens e desvantagens, como o fato de alguns processos nessa rota não serem capazes de utilizar o minério de ferro fino e serem mais flexíveis em relação ao tipo de carvão utilizado, além de não necessitar de coque.

O consumo de potência em fusões redutoras tende a ser maior do que quando comparado com o processo de alto-forno, porém o gás de exaustão pode ser utilizado como fonte de energia, gerando grande impacto na eficiência total do processo. Estudos indicam que no futuro a fusão redutora pode atingir eficiência de 5% a 30% superiores aos processos de alto-forno (IEA, 2010).

7.1.3.1 PROCESSO HISARNA

O processo Hisarna é uma fusão redutora também desenvolvida pela Ulcoss. Combina um ciclone e uma câmara de fusão, não necessita de utilizar coque ou sinter e reduz consideravelmente as emissões e os consumos energéticos do pré-tratamento de matérias-primas. Operando com oxigênio puro, a captura de carbono também se mostra mais simples. Na Figura 30 é mostrada uma ilustração do forno utilizado.

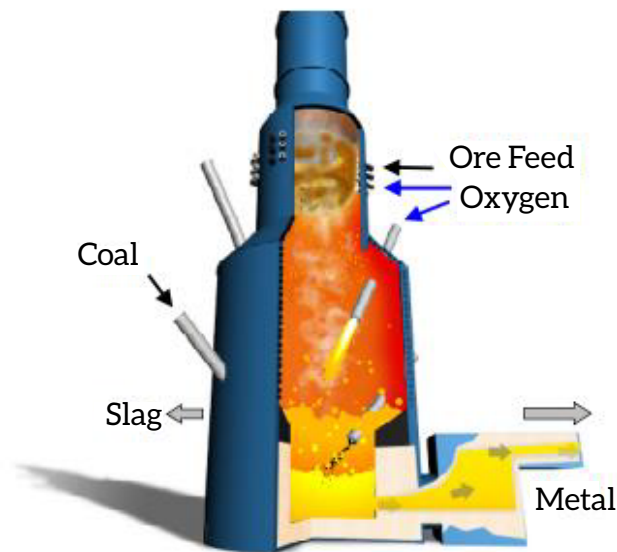


Figura 30 – Sistema Hisarna

Fonte: WWW.ULCOS.ORG

As plantas comerciais que utilizam esse processo começaram a ser desenvolvidas em 2013. Em 2014, foram realizados testes para verificar a estabilidade do processo, sendo a operação contínua esperada em 2016 (IEA, 2015a). A Figura 31 mostra o forno real desenvolvido pela Ulcoss.



Figura 31 – Forno HISarna em Instalação

Fonte: www.ulcos.org

Segundo a Ulcos, a intensidade energética desse processo seria de 12,2 GJ por tonelada de metal, com investimentos de cerca de 140 US\$/tonelada instalada (IEA, 2015a). Estima-se que uma redução de 20% nas emissões de CO₂ seja obtida quando comparadas com emissões de usinas integradas convencionais. Ademais, caso a captura de carbono seja acoplada ao sistema, um valor de até 80% poderia ser atingido (IIP, 2015).

7.1.4 PROCESSO ULCORED

É um processo de redução direta do minério de ferro desenvolvido pela Ulcos, em que o ferro é produzido pela redução do minério de ferro em fornos com gases redutores provenientes da gaseificação de carvão ou reforma de gases. Os gases de exaustão do forno são reutilizados no processo após a captura de CO₂.

Em 2013, duas unidades-piloto foram projetadas para produzir 1 tonelada de DRI por hora de forma a demonstrar o processo, entretanto tais unidades ainda não entraram em operação (IEA, 2015a).

7.1.5 PROCESSOS ULCOWIN AND ULCOLYSIS

São processos baseados na utilização de eletricidade para produção de ferro, fazendo uso da eletrólise. O processo Ulcowin consiste em uma eletrólise aquosa de óxido de ferro a 110°C. O princípio do processo é a decomposição do minério de ferro em oxigênio e metal líquido a 1.550°C. A sustentabilidade do processo deriva do uso de energia elétrica proveniente de matrizes limpas.

7.1.6 RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL DO FORNO ELÉTRICO A ARCO

A recuperação de calor nos EAF se dá via conversão da energia nos gases exaustos do EAF para produção de energia.

Devido à operação dos EAF em bateladas, a energia disponível na exaustão do equipamento está sujeita a grande variação. Durante o processo de fusão, as temperaturas podem atingir 1.500°C, enquanto, no momento em que a sucata é inserida na fornalha, esse valor cai de forma abrupta. Dessa forma, a aplicação de ciclos Rankine orgânicos (ORC) para produção de eletricidade se mostra uma opção viável.

Em um projeto de recuperação de calor de EAF na Alemanha, fez-se uso de um sistema de termoacumulação, onde um tubulão de vapor armazena o calor extraído do forno durante a fusão, na forma de vapor a 27 bar e temperatura de 245°C, fazendo uso de dois trocadores de calor. As condições do vapor gerado não permitem que ele seja expandido em uma turbina para produção de potência, demandando, por isso, o uso de um ORC.

7.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E PREMISSAS

Considerou-se, primeiramente, que a participação das usinas integradas a coque, usinas a carvão vegetal, aciaria elétrica, produtores independentes de gusa, entre outras, seria a mesma considerada no cenário BC. Entretanto, nessa divisão, as novas tecnologias inovadoras penetrariam de acordo com as possibilidades de cada rota produtiva.

De forma a simplificar o processo de inserção de tecnologias no cenário BC+I, optou-se por considerar apenas a tecnologia de HIsarna nas opções de tecnologia de fusão redutora, uma vez que, segundo IEA (2015a), essa seria a mais promissora dentre aquelas analisadas.

As tecnologias de redução direta foram descartadas devido à pequena participação dessa rota no setor siderúrgico nacional e no fato de não se esperar grande penetração da rota no país.

As tecnologias Ulcowin e Ulcolysis foram desconsideradas por ainda estarem em etapa de desenvolvimento muito inicial e com previsão de penetração de mercado após 2040. É, inclusive, complexo determinar dados, como potencial de economia, redução de emissões de CO₂, custos de investimento e operação e manutenção.

Portanto, a partir da descrição prévia das tecnologias de ruptura e premissas, foram consideradas as seguintes tecnologias no cenário BC+I:

- Altos-fornos com reciclagem dos gases de topo (sem captura de carbono);
- Altos-fornos com reciclagem dos gases de topo (com captura de carbono);
- Novos processos de fusão redutora (processo HIsarna sem captura de carbono);
- Novos processos de fusão redutora (processo HIsarna com captura de carbono);
- Recuperação de calor residual forno elétrico a arco.

O Quadro 5 resume as principais informações sobre as tecnologias avaliadas no cenário BC+I, incluindo tipo de processo em que a tecnologia se enquadra, estágio de desenvolvimento e ano de penetração da tecnologia, intensidade energética e custo de investimento associado.

Quadro 5 – Tecnologias de Ruptura Avaliadas e Suas Características Principais

Processo	Tipo	Estado da Tecnologia	Disponibilidade	Intensidade Energética	Custo de Investimento (US\$/t de produto)
Altos-fornos com reciclagem dos gases de topo (sem captura de carbono)	Alto-forno	Piloto	2025	10,42 (apenas AF)	230
Altos-fornos com reciclagem dos gases de topo (com captura de carbono)	Alto-forno	Piloto	2025	10,42 (apenas AF)	280
Processo HISarna sem captura de carbono	Fusão redutora	Piloto	2030	12,2	140
Processo HISarna com captura de carbono	Fusão redutora	Piloto	2030	12,2	240
Recuperação de calor residual do forno elétrico a arco	Aciaria elétrica	Início de comercialização	2016	Gera 50 kWh/ton de aço	30

Fonte: Elaboração própria a partir de IEA, 2015b; IIP, 2015; DECC, 2015

De forma a criar um cenário que contemple as tecnologias inovadoras no segmento de ferro-gusa e aço, foi necessário estipular uma penetração máxima dessas novas tecnologias no mercado. Os valores utilizados são mostrados na Tabela 47.

Tabela 47 – Penetração Máxima das Tecnologias nas Suas Rotas de Produção

Processo	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Altos-fornos com reciclagem dos gases de topo (sem captura de carbono)	-	-	-	-	15	30	50	75	100
Altos-fornos com reciclagem dos gases de topo (com captura de carbono)	-	-	-	-	5	15	25	45	65
Processo HIsarna sem captura de carbono	-	-	-	-	5	10	15	20	30
Processo HIsarna com captura de carbono	-	-	-	-	5	10	15	20	30
Recuperação de calor residual do forno elétrico a arco	-	-	5	10	15	25	35	55	75

Fonte: Elaboração própria

7.3 PROJEÇÕES DE CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

A partir das premissas adotadas, foi possível projetar a demanda de energia e emissões de GEE no cenário BC+I. A Figura 32 mostra a projeção do consumo de energia entre 2010 e 2050 para a setor, considerando a penetração das tecnologias de ruptura conforme a Tabela 47.

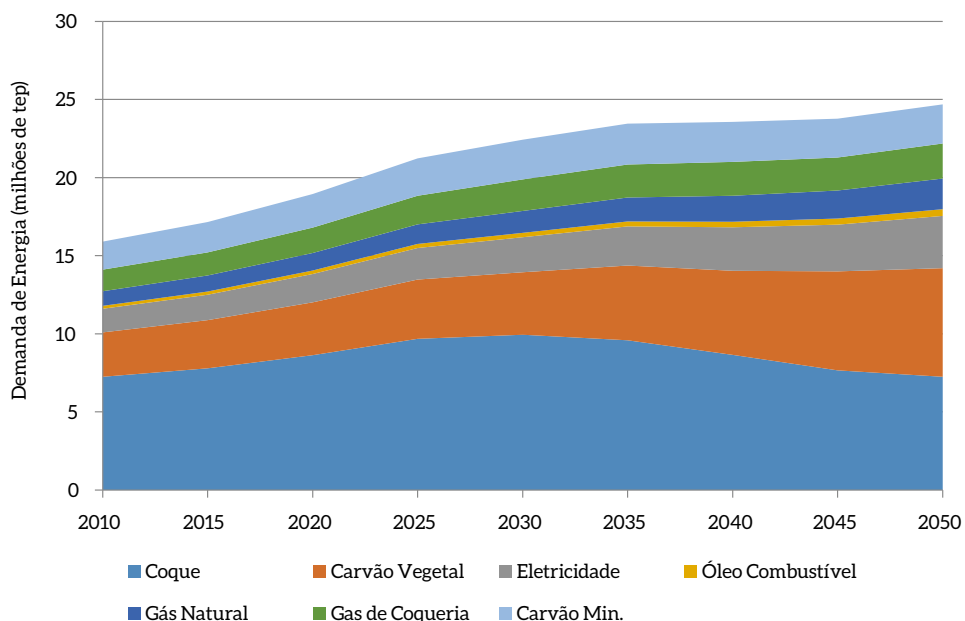


Figura 32 – Demanda de Energia do Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC+I (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

A implementação das tecnologias de ruptura leva à redução, com relação ao cenário REF, de 25% no consumo de energia em 2050. A fonte de energia preponderante para a queda no consumo é o coque.

A Figura 33 mostra o consumo de energia anual do setor, em que é possível observar queda significativa a partir da penetração de tecnologias mais eficientes em 2030. A principal razão da queda do consumo energético está associada à adoção da reciclagem de gases de topo dos altos-fornos, que reduzem o consumo de coque das usinas integradas.

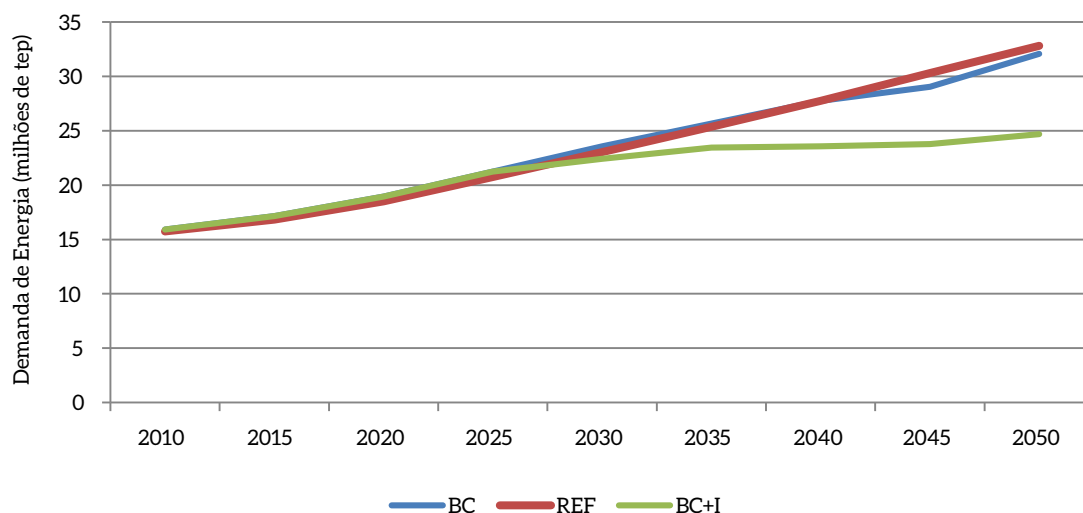


Figura 33 – Consumo de Energia – Comparação entre os Cenários

Fonte: Elaboração própria

A Figura 34 mostra o comportamento das emissões de GEE do setor para o cenário BC+I.

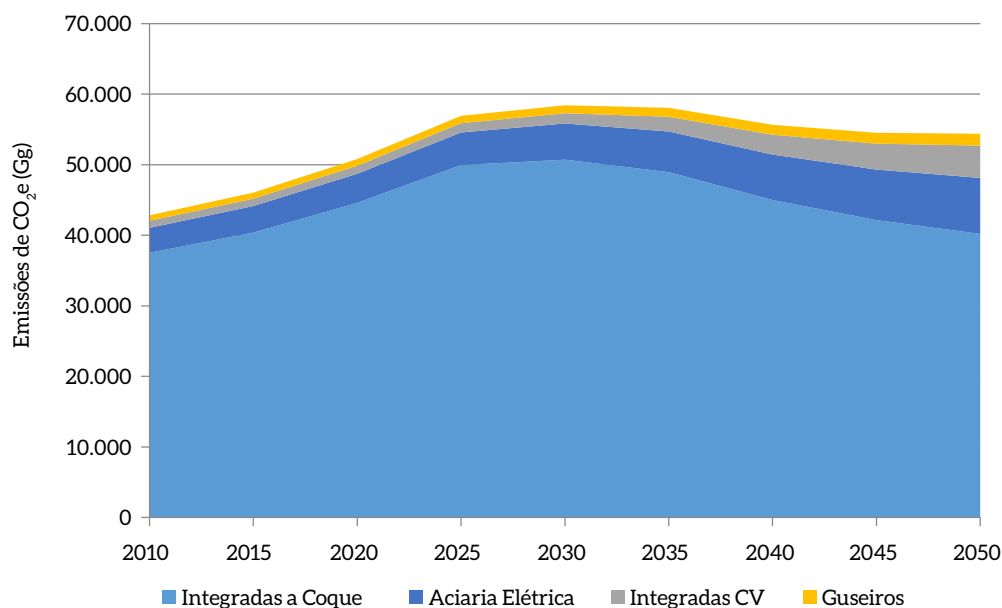


Figura 34 – Emissões de CO₂e para o Setor de Ferro-gusa e Aço no Cenário BC+I (2010-2050)

Fonte: Elaboração própria

É possível notar que a diferença de emissões entre os cenários BC e BC+I é bem significativa. Isso ocorre pelo fato de as penetrações das medidas inovadoras propiciarem, potencialmente, ganhos substancialmente maiores que medidas maduras e em estágio de comercialização. Todavia, é comum a existência de otimismo de bancada, que, mediante a maturação das tecnologias, geralmente, acaba por revelar potenciais significativamente menores do que aqueles observados em laboratório.

A reciclagem de gases de topo de altos-fornos também é o maior responsável pela significativa redução nas emissões de GEE no cenário BC+I. Quando aplicado em conjunto com a captura de carbono, a redução pode chegar a 50% em relação à rota de integradas a alto-forno convencionais. O fato de grande parte da produção de aço no Brasil se dar em usinas integradas a coque torna a adoção da medida ainda mais importante e impactante no setor.

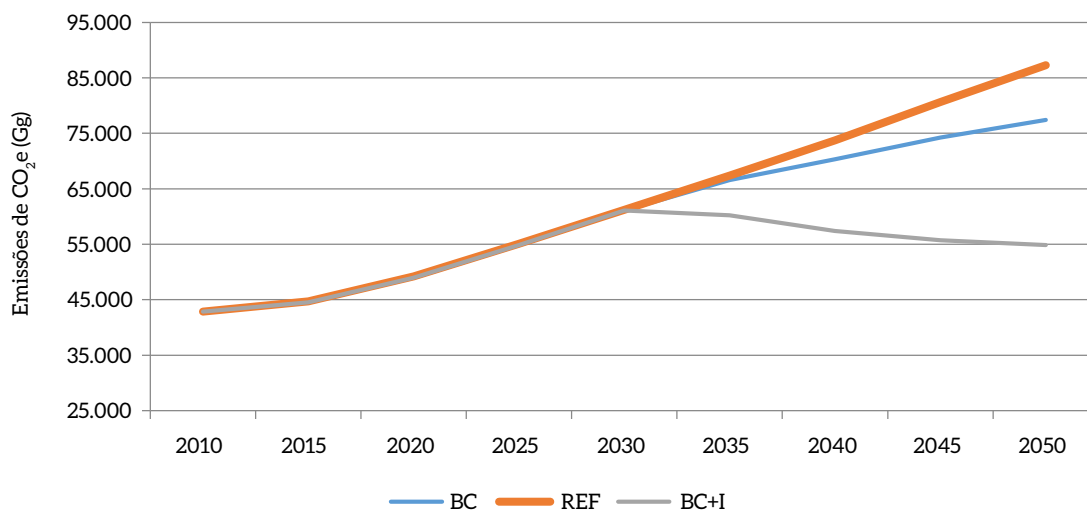
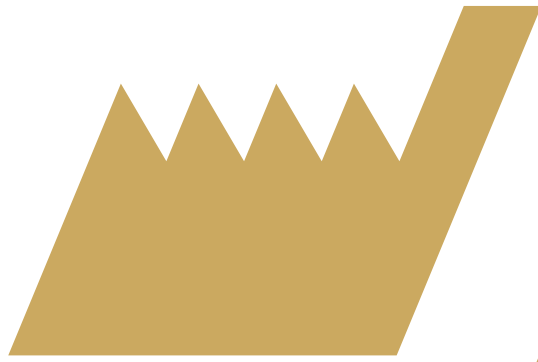


Figura 35 - Comparação das Emissões de GEE entre os Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

Entretanto, não devem ser desconsideradas as barreiras à adoção das tecnologias de ruptura, que são tecnológicas e econômicas, sobretudo. No próximo capítulo, serão tratados de forma mais detalhada barreiras existentes para a entrada das tecnologias e seus cobenefícios, assim como instrumentos de política capazes de removê-las e potencializá-los, respectivamente.



Subsídios à formulação de instrumentos de política pública para a adoção dos cenários de baixo carbono

Parte

3

Perante o mapeamento das oportunidades de mitigação para o setor, esta parte, inicialmente, objetiva analisar as barreiras e os cobenefícios da sua aplicação enquanto estratégia de baixo carbono. Partindo desse mapeamento, que também considera experiências nacionais e internacionais com políticas públicas relacionadas à temática, serão propostos instrumentos capazes de incentivar a penetração das medidas mapeadas no âmbito dos cenários de baixo carbono pelo setor de ferro-gusa e aço.


Pôde-se constatar um potencial acumulado de abatimento de 53,9 MtCO₂e no cenário BC, com cerca de 65% desse montante apresentando custos de abatimento negativos, e o restante com custos positivos, ou seja, medidas que não têm viabilidade econômica. Ainda que grande parte das atividades de baixo carbono seja atrativa sob o ponto de vista financeiro, aspectos que não foram avaliados no estudo poderiam levar a resultados distintos. Tipicamente, análises setoriais de oportunidades de mitigação de emissões de GEE tendem a desconsiderar aspectos que afetam significativamente a mensuração de potenciais e custos de abatimento: i) competição por tecnologias de baixo carbono com outros setores; ii) adequação dos custos de capital e O&M, obtidos na literatura científica, à realidade econômico-tributária do país; iii) impactos de deficiências regulatórias, refletidos em custos de transação que não capturados pela metodologia de CMA; iv) não aditividade e aplicabilidade de medidas em face de restrições técnico-operacionais; entre outras.

No caso das tecnologias de ruptura, avaliadas no cenário BC+I, o potencial de mitigação seria substancialmente maior, qual seja, de 37% de redução de emissões em 2050 com relação ao cenário REF. Todavia, são medidas mitigadoras de emissão distantes da disponibilidade comercial, sendo o objetivo da análise demonstrar os efeitos que trariam mediante a remoção de substanciais barreiras por meio de instrumentos de política pública variados, mas em particular voltados a pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D).

As lacunas associadas à não aditividade e competição por tecnologias de baixo carbono são superadas por meio da técnica de integração de cenários adotada pelo projeto (MCTIC, 2017). Seus resultados permitem obter informações precisas em termos de potenciais e custos de mitigação de emissões de GEE. Por exemplo, constatou-se que somente a recuperação de calor (fornalhas de ar quente, sensível do BOF e residual), perante o conjunto de medidas com custo de abatimento negativo (Tabela 46), é verdadeiramente custo-efetiva no horizonte de implementação até 2025. E, mesmo que tenha custo-efetividade, exige a remoção de barreiras para sua adoção, pois não faz parte, em sentido amplo, do *baseline* do setor.

Para mapear esses aspectos de natureza qualitativa, com objetivo de fornecer elementos para que os formuladores de política pública possam implementar, efetivamente, instrumentos que permitam abater emissões do setor, serão discutidos os seguintes tópicos nesta parte:

- i)** Identificação de barreiras e cobenefícios da adoção das medidas de baixo carbono;
- ii)** Exemplos internacionais e nacionais de políticas públicas de baixo carbono;
- iii)** Instrumentos de política pública aplicáveis ao setor para promover o abatimento de emissões de GEE;
- iv)** Síntese da proposta de instrumentos de política pública para a implementação dos cenários de baixo carbono.



Barreiras e cobenefícios da adoção dos cenários

Capítulo

8

8 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS DA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO

Neste estudo, assim como em Bergh (2012), as barreiras serão avaliadas considerando as seguintes categorias: econômicas e de mercado; regulatórias e institucionais; comportamentais e informacionais/culturais; e tecnológicas.

Conforme se pôde verificar no cenário BC, relevante parte das medidas aplicáveis para mitigar emissões de GEE tem CMA positivos. Além dessa barreira econômica, a atual situação econômica do país leva a que o governo realize ajustes fiscais que dificultam o acesso a crédito por parte do setor. Esse aspecto influencia até mesmo a realização de investimento em medidas viáveis economicamente, pois a conjuntura econômica recessiva afeta a capacidade financeira das empresas. Essas restrições são percebidas em termos da disponibilidade de capital no mercado de crédito, bem como do aumento da taxa de juros para a concessão de financiamentos. Existe assimetria no acesso ao crédito associado ao porte das empresas, o que inibe a realização de investimentos em ações de eficiência energética por médias e pequenas empresas, bem como custos de transação que precisariam ser removidos para a realização de investimentos. Finalmente, a recessão afeta a renda das famílias e, conseqüentemente, a demanda por bens duráveis derivados da cadeia do ferro e aço, o que dificulta a realização de investimentos em eficientização dos processos produtivos.

Ainda que a barreira de acesso ao capital possa ser removida, não necessariamente os recursos seriam integralmente destinados para esse propósito, em face da competição com outros investimentos, como os necessários para expandir a capacidade de produção. Em geral, todos os acionistas estão inclinados a seguir o *status quo*, que tende a ser menos eficiente e conservador, respondendo em termos de eficiência energética apenas em situações críticas, como escassez de recursos. Por isso, investimentos no incremento da capacidade de produção e na penetração de mercado tendem a ser priorizados (UNIDO, 2011a; 2011b; 2013). Mais que isso, pesquisa do Departamento de Energia e Mudança Climática do Reino Unido (DECC, 2015), realizada no setor siderúrgico britânico, apontou que os acionistas demandam *paybacks* inferiores a dois anos, o que impossibilitaria a adoção de grande parte das MTD mapeadas neste estudo.

No caso das medidas viáveis sob o ponto de vista econômico e menos complexas, como é o caso da recuperação de calor sensível do BOF, recuperação de calor das fornalhas e instalação de *drivers* de velocidade variável nos BOF, também é necessária a disponibilização de capital para instalação das tecnologias. Ademais, e em linha com DECC (2015), essas medidas demandam menores prazos de retorno de capital, aspecto que frequentemente impede a sua adoção.

Outra barreira econômica está associada ao encarecimento da importação de tecnologias, dado pelo atual patamar da taxa de câmbio do real com relação ao dólar e ao euro. Em função disso, a realização de investimentos em eficiência, associada à importação de equipamentos, exigiria altas taxas internas de retorno. Esse seria o caso dos fornos Scope 21, TRT e queimadores *oxy-fuel*, entre outras tecnologias de baixo carbono que não se encontram disseminadas no Brasil. No que tange especificamente às tecnologias inovadoras, a incerteza acerca da viabilidade comercial e a dificuldade de acesso a crédito para investimentos em P&D são as principais barreiras.

No nível institucional e regulatório, a obtenção de crédito para o financiamento em atividades de baixo carbono, em particular aquelas com custos de abatimento positivos, está condicionada a uma série de exigências burocráticas, dentre as quais se destaca a elaboração de projetos para o acesso a linhas de crédito de programas governamentais. Além do custo de transação relacionado às inúmeras exigências processuais e documentais para acesso ao crédito, em particular por bancos de fomento, médias e pequenas empresas do setor têm dificuldade na elaboração de projetos, com restrição de mão de obra qualificada para esse propósito (SORREL et al., 2004).

A questão do suprimento de carvão vegetal, dado pelo aumento da participação da fonte para a produção de ferro-gusa, se constitui em entrave relevante. Esse também é o caso do emprego de gás natural na produção de aço. É necessário garantir a oferta da fonte, sob pena de afetar a capacidade produtiva do setor. No caso do carvão vegetal, entretanto, a medida pode incentivar, sem a revisão do arcabouço regulatório e institucional existente, o suprimento com base em lenha proveniente de florestas nativas (DI MAURO, 2013; CBCS, 2012), aumentando as emissões do setor de Afolu. Nesse sentido, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS, 2012) relata dificuldades de assimilação e casos de adulteração do Documento de Origem Florestal (DOF) que precisam ser mitigados. Por fim, o aumento da oferta de carvão vegetal a partir do aproveitamento de resíduos florestais é inviabilizado pela inexistência de regulamentação a respeito.

Ainda no âmbito regulatório, a inexistência de padrões de efficientização energética e/ou emissões de carbono constitui barreira adicional, tendo em vista que consumidores da cadeia de aço tomam decisões baseadas em preços, e não em emissões de carbono (DECC, 2015).

Quanto às tecnologias inovadoras, existem barreiras referentes à adequação a padrões, normas e regulamentações e ao alto custo em pesquisa e desenvolvimento, visando à implantação de um produto ou serviço inovador (BELTRAME et al., 2013). Outra barreira à inovação é o tempo médio de análise para concessão de patentes pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Inpi), que, na maioria dos casos, varia de 7 a 11 anos, enquanto em países da União Europeia, assim como China, Coreia do Sul, EUA e Japão, o período médio é inferior a 3 anos (LICKS, 2017).

Em termos comportamentais e informacionais, muitos atores do setor industrial desconhecem a relação custo-benefício das medidas que resultam em efficientização energética, como é o caso das tecnologias mapeadas no cenário BC. Mesmo diante do conhecimento dos benefícios, é comum inexistir pessoal técnico capacitado para identificar, implementar e monitorar as referidas medidas (UNIDO, 2011a; BERGH, 2012), em particular em unidades industriais de médio e pequeno porte. É o caso, por exemplo, da implementação de sistemas avançados de controle de processos. Ainda, pode-se verificar, em casos restritos, a resistência a substituir equipamentos existentes que já se pagaram ou que já estão em fim de vida útil por outros mais eficientes em face do costume com a sua operação. Mais que isso, destacam-se as barreiras à mudança nos processos produtivos, que derivam de suposta complexidade operacional de novas tecnologias. Finalmente, pode-se entender que a introdução de tecnologias que aumentam a produtividade

fabril pode levar ao paradoxo do aumento da lucratividade com desemprego de mão de obra, aspecto que pode implicar conflitos de natureza laboral.

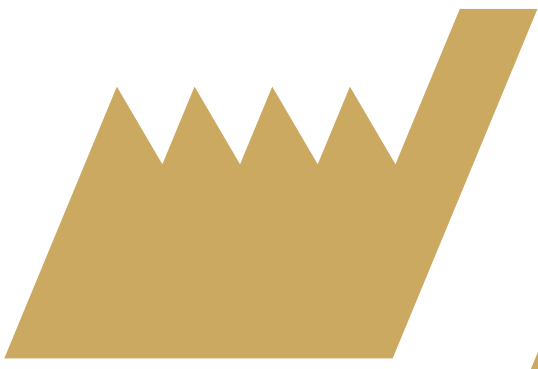
No que diz respeito às barreiras tecnológicas, é possível mencionar os riscos técnicos e operacionais das medidas de eficiência energética (BERGH, 2012), ou seja, riscos associados a uma nova tecnologia que demanda tempo de aprendizagem dos que a utilizam para que estes não operem sobre ou subdimensionados. No caso dos fornos Scope 21, por exemplo, observa-se a complexidade associada a instalação, manutenção e monitoramento das unidades. Além disso, não necessariamente, é possível a incorporação de novas tecnologias nos processos produtivos do setor de ferro-gusa e aço, visto que o *layout* do processo pode não permitir a adaptação das novas tecnologias à configuração das plantas industriais existentes (ZILAHY, 2004). Finalmente, a falta de conteúdo local das tecnologias de baixo carbono pode constituir barreira a sua adoção. Tecnologias importadas têm restrições de manutenção e comumente não estão adaptadas para atender as especificidades dos processos produtivos locais, o que pode retardar ou impedir sua introdução, inviabilizando ganhos em termos de produtividade e economia de energia (CURRÁS, 2010).

No tocante aos cobenefícios relacionados à implementação das atividades de baixo carbono mapeadas neste estudo, podem ser destacados os efeitos diretos associados à redução no consumo de energia, *vis-à-vis* emissão de poluentes, quais sejam:

- Redução nos custos variáveis associados ao consumo de energia;
- Melhoria na conversão de energia em serviços energéticos;
- Incentivo à difusão tecnológica;
- Promoção ao uso de fontes menos energointensivas de energia;
- Utilização eficiente dos recursos naturais;
- Geração de emprego e renda por meio do aumento da competitividade dos polos de produção; entre outros.

Ainda podem ser destacados efeitos sinérgicos relacionados à adoção de atividades de baixo carbono. Entre estes, o próprio desenvolvimento setorial pela difusão das tecnologias aplicadas, que podem implicar vantagens competitivas duradouras. A transição para atividades de baixo carbono é capaz de aumentar a lucratividade empresarial e gerar desenvolvimento regional, permitindo que o setor possa proteger-se da penetração de importações. Além disso, a promoção do uso de fontes menos intensivas em carbono, tal qual o aumento da participação de carvão vegetal na matriz energética do setor, proveniente de florestas comerciais, assim como a eficientização dos processos produtivos, implicam melhorias na saúde da população. Finalmente, a inserção das tecnologias de baixo carbono necessariamente deve vir acompanhada de atividades de capacitação da mão de obra, o que pode se traduzir em avanço em termos de índice de desenvolvimento humano (IDH), promovendo o desenvolvimento sustentável.

Deve-se enfatizar que os impactos relativos aos cobenefícios não puderam ser incorporados, por restrições metodológicas, à mensuração dos custos de abatimento. Tal aspecto aumenta a incerteza relativa ao potencial econômico de abatimento de emissões de GEE no setor. Todavia, não invalida a discussão qualitativa, que deve ser considerada para subsidiar a formulação de propostas de instrumentos de políticas públicas para implementar cenários de baixo carbono. Essa discussão será precedida por uma síntese de experiências internacionais e nacionais com políticas públicas de baixo carbono.



Síntese de experiências internacionais e nacionais com políticas públicas de baixo carbono

Capítulo

9

9 SÍNTESE DE EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS COM POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO

De acordo com o World Energy Council (2013), vários programas e medidas foram implementados em todo o mundo como parte de um esforço para reduzir emissões de GEE por meio da eficiência energética no setor industrial. Como esse setor abrange ampla variedade de subsetores, com diferentes perfis de consumo de energia, políticas destinadas a melhorar a eficiência energética na indústria são projetadas para permitir flexibilidade. Nesse contexto, todas as indústrias estão sujeitas à competição internacional, logo, a implementação de políticas nesse setor deve levar isso em conta, evitando a implementação de medidas muito restritivas e rigorosas que poderiam deixar a indústria menos competitiva.

Dentre os instrumentos típicos de políticas, destacam-se subsídios para auditorias energéticas nas indústrias como forma de ajudar a identificar investimentos rentáveis, disponibilidade de crédito em condições favoráveis e subvenções para reduzir o tempo de retorno desses investimentos e torná-los mais atraentes para consumidores industriais. Ações potenciais incluem ainda incentivos e informação acerca da importância relacionada à modernização de equipamentos e processos, como criação de selos de eficiência industrial, programas de depreciação obrigatória de fornos de geração de calor e vapor e definição de *benchmark* para novas plantas industriais.

Na Figura 36, nota-se a participação, por países selecionados, dos instrumentos de política pública implementados para promover atividades de baixo carbono. Deve-se destacar que, percentualmente, o Brasil é o país que mais políticas relacionadas com informação e educação tem, enquanto na China predominam os instrumentos regulatórios.

Vê-se que o Brasil conta com poucos instrumentos regulatórios e econômicos, quando comparado a outros países. Conforme se pôde verificar na análise de barreiras à adoção das MTD pelos setores de cal e vidro, é necessário avançar na proposição de instrumentos econômico-financeiros e regulatórios para viabilizar a transição dessas atividades para uma economia de baixo carbono.

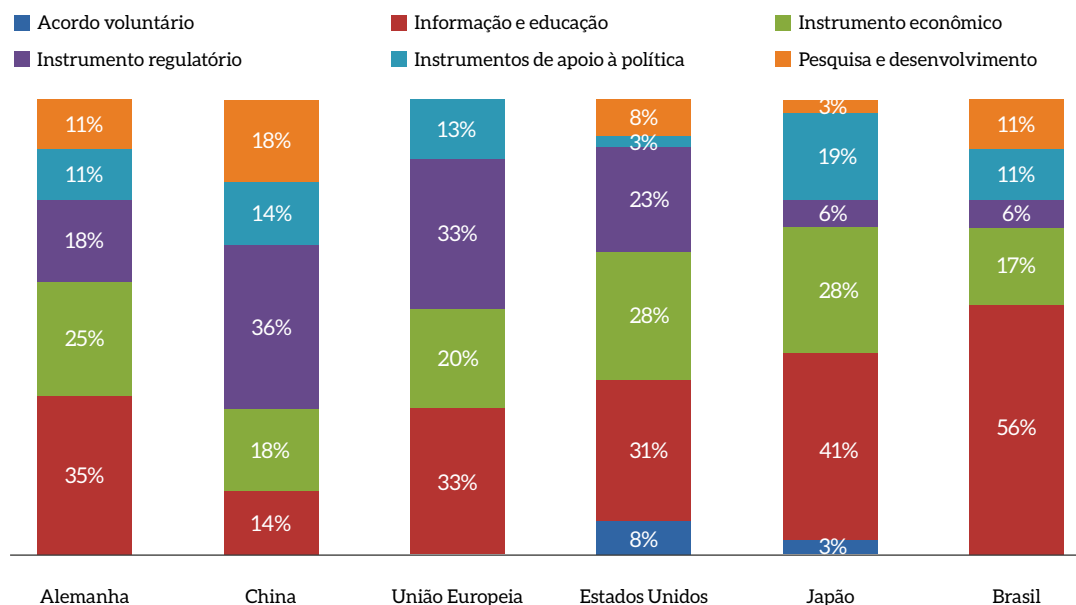


Figura 36 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria

Fonte: Elaboração própria a partir de WORLD ENERGY COUNCIL, 2013

A partir de pesquisa bibliográfica em documentos internacionais, como World Energy Council (2013) e International Energy Agency (2015), tornou-se possível a identificação de políticas públicas criadas para remover as barreiras apresentadas. Entre os mecanismos utilizados, encontram-se incentivos fiscais, disponibilização de financiamentos e fundos para investimento em tecnologias de eficiência energética, exigência do monitoramento relativo às emissões de CO₂, iniciativas de pesquisa com forte ênfase na eficiência energética, desenvolvimento de sistemas para fornecer aos consumidores informações relacionadas à eficiência energética, como certificação de produtos, taxaço de carbono e créditos de carbono.

Em âmbito nacional, considerando o propósito deste estudo, têm destaque o Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e o Plano Indústria. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o objetivo geral do PNMC é identificar, planejar e coordenar as ações e medidas que possam ser empreendidas para mitigar as emissões de GEE geradas no Brasil, bem como aquelas necessárias à adaptação da sociedade aos impactos que ocorram devido à mudança do clima (MMA, 2010).

As medidas mitigadoras, bem como as medidas de adaptação e o desenvolvimento de pesquisas, visam ao alcance dos principais objetivos específicos mencionados a seguir:

- Fomentar aumentos de eficiência no desempenho dos setores da economia na busca constante do alcance das melhores práticas;
- Manter elevada a participação de energia renovável na matriz elétrica, preservando a posição de destaque que o Brasil sempre ocupou no cenário internacional;
- Fomentar o aumento sustentável da participação de biocombustíveis na matriz de transportes nacional e atuar com vistas à estruturação de um mercado internacional de biocombustíveis sustentáveis;
- Buscar a redução sustentada das taxas de desmatamento, em sua média quadrienal, em todos os biomas brasileiros, até que se atinja o desmatamento ilegal zero;
- Eliminar a perda líquida da área de cobertura florestal no Brasil até 2015;
- Fortalecer ações intersetoriais voltadas para redução das vulnerabilidades das populações;
- Identificar os impactos ambientais decorrentes da mudança do clima e fomentar o desenvolvimento de pesquisas científicas para que se possa traçar uma estratégia que minimize os custos socioeconômicos de adaptação do país.

Visando à implementação do PNMC, foram formulados nove planos setoriais de mitigação e adaptação, dentre os quais o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação, comumente chamado de Plano Indústria (FGV/EAESP, 2015).

O objetivo desse plano é preparar a indústria nacional para um cenário futuro em que a intensidade de emissão de carbono por unidade de produto seja tão importante quanto a produtividade de trabalho e os demais fatores que definem a competitividade internacional da economia. Para tanto, estabelece metas de redução de emissões de processos industriais e de uso de energia em relação a um cenário tendencial projetado para 2020.

O plano é sustentado por três pilares de ação: implantação de sistema de monitoramento, relato e verificação (MRV) das emissões de GEE da atividade industrial, implantação de medidas e instrumentos de incentivos à redução de emissões, criação de Comissão Técnica do Plano Indústria (CTPI), composta por representantes do governo, sociedade civil, meio acadêmico, com responsabilidade de detalhar, monitorar e revisar ações do plano (FGV/EAESP, 2015).

O Plano Indústria focou inicialmente em ações setoriais da indústria de alumínio, cimento, papel e celulose e química, seguida pela indústria de ferro e aço, cal e vidro, em 2013, e com a incorporação progressiva de todos os demais setores da indústria de transformação até 2020.

Como estratégia, para viabilização das ações planejadas, o plano está dividido em cinco eixos de atuação:

AÇÕES EIXO 1: GESTÃO DE CARBONO

- Tornar obrigatória a realização anual de inventários corporativos de emissões a partir de 2013 para grandes empresas do setor de alumínio, cimento, papel e celulose e química; a partir de 2014, para grandes empresas do setor de siderurgia, cal e vidro; e, a partir de 2020, os demais setores, incluindo o setor de papel e celulose, segundo critérios definidos pela CTPIn;
- Criar condições para que pequenas e médias empresas possam realizar inventários simplificados;
- Criar um banco de dados de fatores de emissão;
- Capacitar técnicos para a coleta de dados de emissão das plantas;
- Criar o Sistema de Informações sobre Emissões de GEE na Indústria (Sincarbo);
- Realizar estudos de cenários de emissões para cada setor;
- Estabelecer requisitos de eficiência de emissões para a concessão de financiamentos de agentes públicos, incentivos positivos e tratamento diferenciado para empresas com baixo índice de emissão de GEE;
- Definir incentivos para produção com menor intensidade de GEE, como mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas, financiamento diferenciado, incentivos fiscais, capacitação técnica e outros instrumentos de apoio;
- Influenciar e estimular a formulação de políticas de apoio às pequenas empresas que fomentem ações eficientes de mitigação de emissões de GEE;
- Criar incentivos à realização de estudos e pesquisas para a fundamentação de *benchmarks* para os setores que ainda não disponham de estudos dessa natureza;
- Criar incentivos para a elaboração de estudos específicos, visando à adoção de tecnologias menos intensivas em carbono, substituição de combustíveis e eficiência energética.

AÇÕES EIXO 2: RECICLAGEM E APROVEITAMENTO DE COPRODUTOS

- Avaliar barreiras regulatórias ao processamento de resíduos sólidos industriais e urbanos e propor alterações no marco regulatório;
- Estabelecer tratamento tributário diferenciado para matéria-prima reciclada e renovável;
- Organizar bolsas de resíduos, propiciando que as indústrias possam oferecer ou procurar resíduos que substituam matérias-primas, com menor custo.

AÇÕES EIXO 3: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E COGERAÇÃO

- Criar selo de eficiência energética para bens de capital;
- Estabelecer linhas de crédito diferenciadas para equipamentos que ampliem a eficiência em termos de emissões de GEE das plantas industriais ou que promovam a redução de emissões líquidas em projetos de substituição de energia fóssil por renovável;
- Impulsionar as ações do Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) voltadas para o setor industrial.

AÇÕES EIXO 4: INICIATIVAS VOLUNTÁRIAS

- Realizar levantamentos setoriais de oportunidades de mitigação mediante projetos de redução de emissão (MDL);
- Promover parcerias público-privadas para a realização de projetos de MDL nos setores industriais;
- Criar programa voluntário de redução de emissões (PPB verde);
- Elaborar guia de identificação de medidas de adaptação para empresas.

AÇÕES EIXO 5: TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

- Criar banco de dados de tecnologias sustentáveis;
- Criar sistema expresso (*fast-track*) para concessão de patentes de tecnologias sustentáveis;
- Facilitar a transferência de tecnologias sustentáveis.



Instrumentos de políticas públicas para adoção do cenário de baixo carbono

Capítulo

10

10 INSTRUMENTOS DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA ADOÇÃO DO CENÁRIO DE BAIXO CARBONO

Este capítulo objetiva apresentar a proposta de instrumentos de política pública que poderiam ser criados ou aprimorados com vistas a estimular, por meio da remoção de barreiras, a adoção das MTD no setor de ferro-gusa e aço. Grande parte dos instrumentos já faz parte do Plano Indústria, todavia com implementação parcial. Por esse motivo, sua revisão seria necessária e/ou inclusão dos instrumentos propostos no âmbito da estratégia de implementação da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) brasileira. Importante notar que se trata de um pacote de instrumentos, sem o qual o atingimento do potencial de mitigação avaliado neste estudo seria apenas parcial.

Para remover barreiras econômicas e de mercado, tendo em vista que a disponibilização de crédito e subvenções econômicas é suscetível e associada às políticas fiscal e monetária, e a adoção de tecnologias de baixo carbono requer fluxos significativos e constantes de crédito para a realização de investimentos, é preciso ampliar a estrutura de captação de recursos por bancos públicos de fomento. Para tanto, os organismos gestores do Fundo Clima, e/ou aqueles que vierem a ser criados visando ao cumprimento da NDC, deveriam procurar recursos junto ao Green Climate Fund (GCF), ao Global Environmental Facility (GEF) e ao Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), entre outros. Mais que isso, os portfólios de crédito das instituições financeiras devem ser diversificados para pequenas, médias e grandes empresas, visando estabelecer igualdade na aquisição de financiamentos. No particular das pequenas empresas, que enfrentarem dificuldade de mão de obra qualificada para adoção de tecnologias de baixo carbono, também cabe o acesso a recursos de assistência técnica do Climate Technology Centre Network (CTCN).

A linha de financiamento do Finem – Eficiência Energética do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), com recursos do Fundo Clima e demais fontes de alavancagem mencionadas, poderia custear, com taxas subsidiadas de juros, a aquisição de equipamentos de baixo carbono. Em virtude do patamar de recursos necessário para adoção das medidas, poderia ser criada, pelo BNDES, a linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”, com portfólios subdivididos por porte de empresa. E, finalmente, a partir de 2025, a precificação de carbono poderia servir de incentivo à viabilização das atividades com custo marginal de abatimento positivo e, sobretudo, tecnologias de ruptura. Nesse caso, optando-se pela taxaço de carbono enquanto instrumento de internalização do preço de carbono na economia, seria desejável a reciclagem de parte dos recursos para incentivo de P&D.

A adoção dessas medidas exigiria a mobilização de atores do BNDES, bancos comerciais, Ministério da Fazenda (MF), Ministério do Meio Ambiente (MMA) e Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), e sua implementação, com exceção da precificação de carbono, poderia ocorrer a partir de 2020, estando condicionada a estudos de impactos orçamentários pelo governo no curto prazo (2018 a 2020).

Para remover a barreira relacionada a tecnologias importadas, e por isso estão sujeitas à volatilidade cambial e taxas alfandegárias, poderia ser implementado um instrumento econômico com vistas a desonerar impostos das importações de tecnologias-chave para a mitigação de emissões de GEE. Para tornar o instrumento eficiente, o MF poderia prever, com atribuições para o MDIC, que a desoneração fosse acompanhada de contrapartidas tecnológicas e sociais, quais sejam: i) estabelecimento de metas de eficiência energética; ii) manutenção dos níveis de emprego por um período mínimo de dois anos após o recebimento do benefício fiscal. O MDIC seria o agente responsável pelo monitoramento do cumprimento das metas, com auxílio da CNI e IABr. Considerando que as MTD propostas seriam implementadas a partir de 2020, os instrumentos precisam ser adotados no médio prazo.

No âmbito da concessão de crédito, é preciso minimizar custos de transação decorrentes da burocracia exigida pelas instituições financeiras, que solicitam documentos e projetos que podem afastar o interessado pela aplicação de uma atividade de baixo carbono. Para tanto, poder-se-ia propor a desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que visam mitigar emissões de GEE e que estejam correlacionadas a atividades-chave mapeadas no âmbito deste estudo. Todavia, os procedimentos burocráticos visam proteger o setor financeiro do risco de inadimplência, motivo pelo qual a desburocratização deve respeitar limites mínimos de análise de crédito. Uma maneira de gerar reciprocidade na concessão de crédito, seria a exigência de contrapartidas para contratação por meio da linha “Finem – Eficiência Energética na Indústria”, como apresentação de inventários corporativos para médias e grandes empresas e cumprimento de metas de eficiência energética e/ou emissões de GEE. Mais que isso, poderiam ser aplicadas taxas decrescentes de juros para empresas, mediante a comprovação de resultados em termos de redução de emissões por meio dos inventários. Tais instrumentos poderiam ser implementados em parceria entre o MMA, MF e MDIC, com horizonte de implementação de médio prazo.

Um critério relevante que deve ser respeitado, em particular para financiamento de equipamentos com alto custo de capital para médias e pequenas empresas, é a elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica. Em função da dificuldade que muitas empresas do setor enfrentam em termos de mão de obra qualificada para esse propósito, poderiam ser criadas parcerias público-privadas para treinamentos na realização de projetos técnico-financeiros de processos de baixo carbono. Para tanto, poderiam ser firmados convênios, a partir de 2018, entre IABr, MDIC e MCTIC para a realização das atividades.

Com vistas a promover uma cultura organizacional voltada para ações de eficiência energética, poderiam ser implementados mecanismos de auditoria energética. Este seria um incentivo para empresas que desejam acessar condições diferenciadas de crédito oferecidos por bancos públicos de fomento, e sua implementação seria regulamentada pelo MF e monitorada pelo MDIC e Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), com suporte do IABr. Adicionalmente, é importante a criação de instrumento voltado à substituição de equipamento no final da vida útil.

Nesse sentido, poderia ser elaborado um programa de depreciação obrigatória de fornos, com contrapartida relacionada a condições facilitadas de taxa de juros e análise simplificada de crédito no âmbito da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”. Para tanto, é relevante o envolvimento do MDIC, de associações representativas dos setores industriais e do BNDES. Os dois instrumentos poderiam ser implementados a partir de 2020.

Também é necessário estabelecer padrões máximos (metas) de emissões por unidades industriais e/ou combustíveis. A verificação das emissões poderia ocorrer junto ao Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene), que utilizaria informações relativas aos potenciais de mitigação mapeados neste estudo. Assim, seria possível acompanhar, anualmente, o nível de implementação das tecnologias de mitigação propostas no cenário BC.

Os instrumentos regulatórios anteriormente mencionados poderiam ser pré-requisito para obtenção do Selo de Eficiência Energética Industrial, que seria critério para acesso a condições privilegiadas de crédito junto a bancos públicos de fomento. Mais que isso, seria exigido para participação de empresas do setor nos processos licitatórios. Tais instrumentos poderiam ser aplicados a partir de 2020 e seriam liderados pelo MDIC, MMA, MME e bancos públicos de fomento.

No caso das tecnologias inovadoras, é extremamente importante diminuir o tempo de análise para a concessão de patentes. Para tanto, seria fundamental a ampliação do quadro de pessoal técnico no Inpi, assim como a disseminação e o aperfeiçoamento do e-Patentes, sistema que permite o depósito eletrônico de patentes. Trata-se de instrumentos que poderiam ser implementados a partir de 2020 e exigiriam a mobilização do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MP), MDIC e Inpi.

No caso da garantia de suprimento de carvão vegetal e gás natural, faz-se necessária elaboração de contratos e seguros. Também é preciso fomentar o setor de Afolu com vistas a expandir a área dedicada a florestas energéticas, o que está em linha com as premissas e os resultados do cenário de baixo carbono daquele setor, reportados no relatório *Modelagem setorial de opções de baixo carbono para agricultura, florestas e outros usos do solo* e com os objetivos do Projeto Siderurgia Sustentável (MMA, 2017).⁸ Finalmente, deve-se regulamentar o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal.

Também é necessário aprimorar o arcabouço regulatório existente no que tange à garantia de procedência da madeira. No caso do DOF, sugere-se: i) integração entre nota fiscal eletrônica e sistema DOF, permitindo o cruzamento das informações para atrelar os produtos comercializados; ii) estabelecimento de padrão de unidades de medida para preenchimento de nota fiscal e DOF; iii) obrigatoriedade de descrição precisa das espécies de madeira em nota fiscal; iv) obrigatoriedade do preenchimento de CNPJ ou CPF do comprador para envio da oferta, no caso de este ser classificado como consumidor final pelo fornecedor; v) permitir, no sistema DOF, a devolução parcial de cargas de madeira que não estejam em conformidade com o pedido; vi) disponibilizar no DOF um contato para denúncias de fraudes no documento, preferencialmente um telefone que permita ligações gratuitas (CBCS, 2012).

⁸ Trata-se de uma iniciativa alinhada às prioridades nacionais e estaduais com o objetivo de desenvolver uma cadeia de produção siderúrgica sustentável e de baixa emissão de gases de efeito estufa. Adicionalmente, exercerá papel estratégico no cumprimento das contribuições pretendidas pelo Brasil para atingir a redução da emissão de GEE indicada no contexto do Acordo de Paris. Entre os resultados esperados, se destacam criação e implementação de um arcabouço político favorável à produção de carvão limpo e eficiente utilizado pelo setor siderúrgico.

Finalmente, faz-se necessário criar incentivos à aquisição de madeira certificada. No caso da obtenção de crédito junto a bancos públicos de fomento, por empresas do setor que utilizam o carvão como insumo, deve ser pré-requisito a apresentação de documentos que atestem a procedência da madeira convertida em carvão, segundo um dos seguintes certificados: certificação de manejo florestal e certificação de cadeia de custódia (CoC) (REZENDE; AMARAL, 2006), ou certificação de madeira controlada, do Conselho Brasileiro de Manejo Florestal (FSC BRASIL, 2017). O sucesso desse instrumento está condicionado a que a certificação da madeira no Brasil passe a ser obrigatória.

A implementação desses instrumentos exige a mobilização do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), secretarias estaduais de Meio Ambiente, Instituto Aço Brasil, seguradoras, BNDES e entidades certificadoras da madeira. Sua discussão, visando ao aprimoramento dessa proposta, poderia iniciar em 2018, para implementação a partir de 2020.

Para a superação das barreiras comportamentais e informacionais, os instrumentos de política pública devem buscar a minimização da resistência existente à entrada de novas tecnologias. Em particular, a barreira associada à falta de informação dos benefícios das ações de eficiência energética poderia ser superada por meio da realização de ações de sensibilização, informação e capacitação. O monitoramento de emissões de GEE também seria necessário, o que permitiria verificar, por exemplo, se os pré-requisitos exigíveis para obtenção de financiamento estão sendo cumpridos. O presente projeto, no qual este estudo está inserido, vem desenvolvendo uma série de atividades com esse propósito, as quais poderiam ser ampliadas ao setor por meio do estabelecimento de acordo de cooperação técnica entre MDIC, MCTIC, IABr, CNI e Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI).

Um parceiro adicional relevante, em particular no que se refere à superação de barreiras comportamentais e culturais, seria o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae). Além da expertise na realização de atividades de sensibilização e capacitação, a inserção nas micro e pequenas empresas facilitaria a execução de ações nesse sentido. Todas as atividades mencionadas poderiam ser implementadas a partir de 2018.

A aplicação de instrumentos de políticas públicas voltados para a remoção de barreiras tecnológicas deve estar voltada para acelerar a penetração de tecnologias de baixo carbono ainda não maduras no mercado. Nesse sentido, destacam-se as medidas mapeadas para o cenário BC+I e reforça-se o papel do MDIC e do MCTIC como agentes indutores da inovação. Nesse caso, deve-se fomentar a P&D voltada para tecnologias de ruptura, sendo o lançamento de editais para o financiamento de projetos específicos de baixo carbono, junto à Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), instrumento relevante para o setor. Ademais, a oferta de estudos conjunturais, estratégicos e tecnológicos para diferentes setores da indústria, voltada para o desenvolvimento sustentável do setor, pela ABDI, deve ser incentivada. E, no caso do incentivo à penetração do carvão vegetal, devem ser disponibilizados recursos para pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de melhoria de carbonização na produção do energético. Finalmente, deve-se incentivar a implementação de unidades piloto de tecnologias de ruptura no processo siderúrgico por meio de parcerias com centros de pesquisa, universidades, agências de financiamento e empresas.

Para superar a barreira relativa à especificidade (*layout*) das plantas industriais, que muitas vezes limita a adoção de tecnologias de baixo carbono, poderiam ser elaborados estudos detalhados da aplicabilidade das atividades mapeadas pelo projeto para as plantas siderúrgicas existentes no Brasil. Esses projetos indicariam o que poderia ser feito em termos de engenharia de processos para adaptar as plantas às referidas tecnologias, em termos de reformas de unidades de equipamentos (*revamp*), assim como elaboração de projetos de novas unidades industriais. Para tanto, deveriam ser acessadas linhas de financiamento específicas junto à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii), e as propostas deveriam permitir o estabelecimento de parcerias público-privadas, devendo ABDI e o IABr servirem de suporte para elaboração das propostas e acompanharem, em conjunto com a Embrapii, a implementação dos projetos.

Finalmente, no que se refere ao fomento ao desenvolvimento de tecnologias de eficiência energética com maior conteúdo local, poderia ser retomado o Plano Brasil Maior, que estabeleceu a política industrial, tecnológica, de serviços e de comércio exterior para o período de 2011 a 2014. O plano poderia ser estendido e direcionado ao fomento de segmentos industriais que objetivariam o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono mapeadas neste estudo, em nível nacional. Para tanto, poderia utilizar recursos provenientes de mecanismos econômicos previstos para o cumprimento de metas de redução de emissões de GEE que serão mandatórias no país a partir de 2025. Por exemplo, caso seja adotada a precificação de carbono como mecanismo de flexibilização ao cumprimento de metas, parte dos recursos provenientes dela deveria ser direcionada para o referido plano. Por sua vez, a destinação dos recursos para fomento de pesquisa, desenvolvimento e aplicação das tecnologias, entre os diferentes segmentos industriais, seria definida pelo seu comitê gestor, composto por Casa Civil, MDIC, MCTI, MF e MP.

A seguir, no Quadro 6, encontra-se a consolidação da proposta de instrumentos que deveriam ser aprimorados e/ou implementados com vistas a remover as barreiras associadas à transição do setor para uma economia de baixo carbono. É importante destacar que esses mecanismos são complementares e mutuamente dependentes, o que leva à conclusão de que seu sucesso depende da mobilização de inúmeros atores públicos e privados.

Quadro 6 – Quadro-resumo de Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Recuperação de calor residual</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de viabilidade econômica; • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Dificuldade na elaboração de projetos por médias e pequenas empresas; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e gás natural, e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais, visando à conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de fornos; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para produção de carvão vegetal; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal, e gás natural; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Controle da umidade do carvão</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de viabilidade econômica; • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais, visando à conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Dificuldade na elaboração de projetos por médias e pequenas empresas; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p><i>Top pressure recovery turbine (TRT)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de viabilidade econômica; • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Custos da importação; • Dificuldade na elaboração de projetos por médias e pequenas empresas; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e gás natural, deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Baixo conteúdo local da tecnologia; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • Desoneração de importações de tecnologias de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal, e gás natural; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Fornos Scope 21</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Ausência de viabilidade econômica; • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Custos da importação; • Dificuldade na elaboração de projetos por médias e pequenas empresas; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Resistência à substituição de equipamentos por aversão a mudança, risco de desemprego e complexidade operacional; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Falta de conteúdo local da tecnologia; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • Desoneração de importações de tecnologias de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de fornos; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que atinjam <i>benchmark</i> de eficiência energética; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p><i>Coque dry quenching</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Resistência à substituição de equipamentos por aversão a mudança, risco de desemprego e complexidade operacional; • Falta de conteúdo local da tecnologia; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Injeção de carvão pulverizado</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Disponibilização de recursos para pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de melhoria de carbonização na produção de carvão vegetal; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Recuperação de calor das fornalhas de ar quente</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e gás natural, e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuem o Selo Eficiência Energética Industrial; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de fornos; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal, e gás natural; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Recuperação de calor sensível BOF	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Exigência de <i>payback</i> do investimento inferior a dois anos; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e gás natural, e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de fornos; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal, e gás natural; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Queimadores oxy-fuel	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Exigência de <i>payback</i> do investimento inferior a dois anos; • Custos da importação; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e gás natural, e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Resistência à substituição de equipamentos por aversão a mudança, risco de desemprego e complexidade operacional; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Falta de conteúdo local da tecnologia; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Desoneração de importações de tecnologias de baixo carbono; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal, e gás natural; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Drivers de velocidade variável nos BOF</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Exigência de <i>payback</i> do investimento inferior a dois anos; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e gás natural, e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Resistência à substituição de equipamentos por aversão a mudança, risco de desemprego e complexidade operacional; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Falta de conteúdo local da tecnologia; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal, e gás natural; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>UTE avançadas para produção de eletricidade</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Exigência de <i>payback</i> do investimento inferior a dois anos; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Resistência à substituição de equipamentos por aversão a mudança, risco de desemprego e complexidade operacional; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Falta de conteúdo local da tecnologia; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Preaquecimento da sucata	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Exigência de <i>payback</i> do investimento inferior a dois anos; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias; • Restrição à instalação pelo <i>layout</i> da planta. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Sistema de controle avançado	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Conjuntura econômica e setorial; • Competição com outros investimentos; • Exigência de <i>payback</i> do investimento inferior a dois anos; • Falta de garantia de suprimento do carvão vegetal e gás natural, e deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais; • Inexistência de regulamentação para o aproveitamento de resíduos florestais visando a conversão para carvão; • Falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; • Falta de conteúdo local da tecnologia. 	<ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Precificação de carbono a partir de 2025; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal, e gás natural; • Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável; • Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF); • Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Tecnologias de ruptura do cenário BC+I</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Incerteza acerca da viabilidade comercial; • Alto custo de importação e falta de capacidade financeira para custear P&D; • Dificuldade de acesso a crédito para realização de investimentos em P&D; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Falta de capacidade financeira para custear P&D; • Falta de adequação aos padrões, normas e regulamentações; • Elevado tempo de análise para concessão de patentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desoneração de importações de componentes de tecnologias inovadoras de baixo carbono; • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID; • Reciclagem de recursos obtidos mediante taxaço de carbono para P&D em tecnologias de ruptura; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Definição de <i>benchmark</i> para novas plantas industriais; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • Contratação de servidores e aprimoramento do sistema e-Patentes para diminuir o tempo médio de análise de patentes pelo Inpi; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração das tecnologias inovadoras de baixo carbono; • Incentivar a implementação de unidades piloto de tecnologias de ruptura no processo siderúrgico por meio de parcerias com centros de pesquisa, universidades, agencias de financiamento e empresas; • Precificação do carbono a partir de 2025.

Fonte: Elaboração própria

The image features a large, solid gold-colored shape that occupies most of the frame. In the upper left, there is a smaller, white, jagged geometric shape resembling a stylized mountain range or a series of peaks. In the bottom right corner, there is a smaller, light gold-colored trapezoidal shape. The text "Considerações finais" is positioned in the lower-left area of the gold background.

Considerações
finais

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo objetivou identificar possibilidades de mitigação de emissões para o setor de ferro-gusa e aço, baseadas em tecnologias testadas em ambiente operacional ou comprovadas e implantadas na indústria (cenário BC) e de ruptura (cenário BC+I). Adicionalmente, foram avaliados barreiras, cobenefícios e potenciais instrumentos de política pública capazes de viabilizar a adoção dos cenários de baixo carbono.

Considerando os resultados obtidos, nota-se que o setor apresenta relevante potencial de abatimento de emissões a partir de 2040. O potencial nos cenários BC e BC+I, com relação ao cenário REF, em 2050, é de 13% e 37%, respectivamente. O potencial de abatimento de emissões de GEE acumulado até 2050, no cenário BC, é de aproximadamente 54 MtCO₂e, sendo a principal medida a aplicação de fornos Scope 21.

As principais barreiras à aplicação desses fornos são ausência de viabilidade econômica, dificuldade de acesso e custo do crédito, falta de conhecimento acerca das vantagens da adoção da medida e restrições à instalação pelo *layout* das plantas. Para removê-las, potencializando os cobenefícios associados, é fundamental a implementação dos seguintes instrumentos de política pública: i) criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; ii) desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE; iii) criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; iv) criação de um programa de depreciação obrigatória de fornos; v) promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética.; vi) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade da tecnologia ao nível das plantas industriais.

No caso das tecnologias de rupturas avaliadas no cenário BC+I, os principais entraves são: incerteza acerca da viabilidade comercial; dificuldade de acesso a crédito para investimentos em P&D; e elevado tempo de análise para concessão de patentes. Para maturação dessas tecnologias em âmbito nacional, é fundamental a formulação dos seguintes instrumentos: i) desoneração de importações de componentes de tecnologias inovadoras de baixo carbono; ii) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração das tecnologias inovadoras de baixo carbono; iii) precificação do carbono a partir de 2025; iv) ampliação do quadro de funcionários e aprimoramento do sistema e-Patentes do Inpi; v) implementação de unidades piloto de tecnologias de ruptura no processo siderúrgico.

Com exceção das usinas integradas com coqueria, é fundamental a remoção de barreiras com vistas a incrementar a participação do carvão vegetal na matriz energética do setor. A falta de garantia

de suprimento do carvão vegetal, deficiências do DOF para rastreamento de produtos florestais e a falta de obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência são entraves à difusão do carvão vegetal que precisam de instrumentos de política pública para serem superados. Para tanto, é necessária a implementação conjunta dos seguintes mecanismos:

- Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial;
- Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de madeira ou carvão vegetal;
- Implementação do Projeto Siderurgia Sustentável;
- Aprimoramento do sistema e Documento de Origem Florestal (DOF);
- Criação de regulamentação para o uso de resíduos florestais, como cavaco de madeira, restos de corte legalizado, podas e desmontes de construção para a produção de carvão vegetal;
- Disponibilização de recursos para pesquisa e desenvolvimento em tecnologias de melhoria de carbonização na produção de carvão vegetal;
- Criação de incentivo e obrigatoriedade de apresentação de certificados de procedência da madeira para acesso a crédito em bancos públicos de fomento.

Apesar de os resultados obtidos serem satisfatórios, este estudo apresentou limitações. A primeira consiste na limitação de análises setoriais no que concerne à não aditividade de potenciais de abatimento. O potencial de abatimento do estudo não representa o potencial líquido de redução de emissões do setor. Este é apenas o total da redução de cada medida aplicada em relação ao cenário REF. Dessa forma, pode, e está ocorrendo, dupla contagem de redução de emissões, visto que a redução do consumo energético de duas medidas não é necessariamente igual à soma de suas contribuições individuais. Essa característica das curvas de abatimento convencionais e setoriais mostra a necessidade de uma modelagem integrada para a eliminação da dupla contagem e para representar de forma fidedigna o potencial de mitigação do setor.

Além disso, este estudo destaca opções tecnológicas de mitigação de GEE que muitas vezes são consideradas tecnologias de ponta que podem não terem sido difundidas no Brasil. Sendo assim, questões como a aplicabilidade dessas tecnologias no cenário nacional e o custo-Brasil não foram consideradas aqui. Devido à necessidade de importação de diversas tecnologias, ou mesmo de componentes para que se inicie uma indústria local, às altas taxas de juros para a realização de financiamentos e às constantes variações cambiais, a implementação dessas tecnologias de mitigação se torna difícil. Visando contornar essas questões, procurou-se elencar as principais barreiras e propor políticas públicas que fomentem a implementação dessas tecnologias. Procurou-se destacar as melhores tecnologias disponíveis mundialmente para o setor de ferro-gusa e aço, a fim de entender como elas poderiam contribuir para a mitigação desse setor.

Outra limitação resulta das projeções econômicas consideradas na construção dos cenários. Para tratar essa questão, tendo em vista a transversalidade e a relevância das variáveis macroeconômicas para os cenários setoriais de emissões, será considerada uma segunda visão de crescimento setorial do PIB no âmbito da modelagem integrada, a qual considerará os efeitos de curto e médio prazo do recente contexto econômico nacional. Esta tem resultados reportados no documento *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*.



Referências

REFERÊNCIAS

ASIA-PACIFIC PARTNERSHIP FOR CLEAN DEVELOPMENT AND CLIMATE – APP. *The state of the art clean technologies for steelmaking handbook*. Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2010.

BELTRAME, T. F. et al. Gestão da inovação e barreiras para implantação de suas práticas. XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. Salvador: Brasil, 8 a 11 de outubro de 2013.

BERGH, C. *Energy Efficiency in the South African crude oil refining industry: Drivers, barriers and opportunities* (MSc Sustainable Energy Engineering). University of Cape Town, South Africa. 2012. Disponível em: <http://www.crses.sun.ac.za/files/research/completed-research/other/thesis_bergh_energyefficiency.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2012.

BORBA, B. S. M. C. et al. Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies. *Energy Policy*, v. 49, p. 460-441, 2012.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Nota Técnica DEA 13/15 – Demanda de energia 2050*. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

_____. *Balanço Energético Nacional 2013 – Relatório final*. Brasília: EPE, 2013.

_____. *Balanço Energético Nacional 2017 – Relatório final*. Brasília: EPE, 2017.

_____. *Nota Técnica DEA 02/09 – Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico brasileiro*. Rio de Janeiro: EPE, 2009.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. *Segundo inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa – Ferro e aço*. Brasília: MCTI, 2010.

_____. *Fatores de emissão de CO₂ do Sistema Interligado Nacional do Brasil*. 2015. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>>. Acesso em: 27 dez. 2015.

_____. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – Volume II*. Brasília: MCTI, 2016.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC. *Contribuição do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações para a elaboração da estratégia de implementação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil ao Acordo de Paris*. 2017. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/2098519/Subsi%CC%81dios+MCTIC+para+elaborac%CC%A7a%CC%83o+NDC_210217.pdf/c3c4bbbd-8656-4d-1c-b2fb-c9abfb44f552>. Acesso em: 18 mar. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. *Desenvolvimento de estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral – Produto 33*. Brasília: MME, 2009.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC. *Dados consolidados da siderurgia brasileira*. Sistema AliceWeb. 2014. Disponível em: <<http://aliceweb.mdic.gov.br/>>. Acesso em: 17 jul. 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente – MMA. *Plano Nacional sobre Mudança do Clima*. 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_nacional_mudanca_clima.pdf>. Acesso em: 10 out. 2010.

_____. *Projeto Siderurgia Sustentável*. 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/itemlist/category/220-clima-politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima-siderurgia-sustentavel>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. *Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa – Cenário 2020*. Brasília: CGEE, 2014.

_____. *Siderurgia no Brasil 2010 - 2025: Subsídios para tomada de decisão*. Brasília: CGEE, 2010.

_____. *TR 24: Aciaria elétrica – Situação atual e tendências de 2025*. Rio de Janeiro: AMB, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI (Brasil). *A indústria do aço no Brasil – Encontro da indústria para a sustentabilidade*. Brasília: CNI, 2012.

_____. *Oportunidades de eficiência energética para a indústria*. Brasília: CNI, 2010.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – CBCS. 2012. Como especificar, adquirir e receber madeira nativa legal. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/userfiles/comi-testematicos/materiais/CBCS_CT Materiais_Posicionamento_Como-especificar-adquirir-receber-madeira-nativa-legal.pdf>. Acesso em: 18 set. 2017.

CURRÁS, T. A. *Barriers to investment in energy saving technologies: Case study for the energy intensive chemical industry in the Netherlands (MSc Sustainable Development)*. University of Utrecht, Netherlands. 2010. Disponível em: <<ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2010/o10022.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2010.

DE GOUVELLO, C. *Estudo de baixo carbono para o Brasil*. Brasília: Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento. 2010. Disponível em: <http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Relatorio_Principal_integra_Portugues.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2014.

DI MAURO, F. J. P. *Madeira na construção civil: da ilegalidade à certificação*. 2013. 267 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

EUROPEAN INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL BUREAU – EIPPCB. *Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production*. Sevilha, Espanha: Joint Research Centre, 2013.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS – ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO DE EMPRESAS DE SÃO PAULO – FGV/EAESP. *Propostas para implementação do plano indústria de baixo carbono – Eficiência energética na indústria*. São Paulo: Centro de Estudos em Sustentabilidade da FGV/EAESP, 2015.

FUNDAÇÃO PARA TODOS PARA SEMPRE – FSC BRASIL. 2017. Cartilha sobre certificação em grupo. Disponível em: <<https://br.fsc.org/pt-br/certificacao>>. Acesso em: 17 set. 2017.

HADDAD, E. *Projeções macrossetoriais para o Brasil: 2010-2050*. Projeto Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil. Subprojeto econômico. São Paulo: Fipe, 2015. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/354029/Opcoes_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Estufa_GEE_em_Setores_Chave_do_Brasil.html%20=#lista>. Acesso em: 18 jul. 2015.

_____. *Revisão das projeções macrossetoriais para o Brasil: 2010-2050*. Projeto Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil. Subprojeto econômico. São Paulo: Fipe, 2016. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/354029/Opcoes_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Estufa_GEE_em_Setores_Chave_do_Brasil.html%20=#lista>. Acesso em: 5 ago. 2016.

HALSNAES, K.; CALLAWAY, J. M.; MEYER, H. J. *Economics of greenhouse gas limitations – Methodological guidelines*. UNEP Collaborating Centre on Energy and Environmental/Risø National Laboratory, 1998.

HENRIQUES JR., M. F. *Potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro*. 2010. 340 f. Tese (Doutorado em Ciências do Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

INSTITUTE FOR INDUSTRIAL PRODUCTIVITY – IIP. 2014a. *Iron and Steel: Coke Making*. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/content/coke-making/>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

_____. *Iron and steel: Blast furnace system*. 2014b. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/content/blast-furnace-system/>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

_____. Iron and steel: *Direct reduced iron*. 2014c. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/content/direct-reduced-iron/>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

_____. Iron and steel: *Electric arc furnace*. 2014d. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-arc-furnace/>>. Acesso em: 20 jul. 2014.

_____. Iron and steel: *Technology & Resources*. 2015. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/content/iron-and-steel#technology-resources>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Anuário estatístico*. Rio de Janeiro: IABr, 2013.

_____. Documentação técnica auxiliar para discussão n. 1. *Observações técnicas sobre as partes I e II do relatório de ferro-gusa e aço*. Projeto Opções de Mitigação de Emissões de GEE em setores-chave do Brasil. Rio de Janeiro: IABr, 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories – Volume 3 – Industrial processes and product use*. Genebra: IPCC, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Energy technology perspective 2015*. Paris: IEA, 2015a.

_____. *Energy technology perspectives*. Paris: IEA, 2010.

_____. *Energy technology system analysis program – Iron and steel*. Paris: IEA, 2010.

_____. *Policies and measures database – Energy efficiency*. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.org/policiesandmeasures/energyefficiency/>>. Acesso em: 26 out. 2016.

_____. *World Energy Outlook 2016*. 2016. Disponível em: <<http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2016/>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL – IPPC. *Integrated pollution prevention and control – Best available techniques reference document on the production of iron and steel*. 2008. European Commission, Directorate-General JRC, Institute for Prospective Technology Studies, Seville, Spain.

LA ROVERE, E. L. et al. *Implicações econômicas e sociais de cenários de mitigação de gases de efeito estufa no Brasil até 2030: Sumário Técnico/Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC*. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2016.

LICKS ADVOGADOS – LICKS. *Sugestões para o aperfeiçoamento do sistema Brasileiro de concessão de patentes de invenção*. 2017. Disponível em: <http://lickslegal.com/pdf/PPHbooklet_pt.pdf>. Acesso em: 15 maio 2017.

NEW ENERGY AND INDUSTRIAL TECHNOLOGY DEVELOPMENT ORGANIZATION – NEDO. *Implementation of a Demonstration Project for Adopting Regenerative Burner Technology in India*. 2016.

Disponível em: <http://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100065.html>. Acesso em: 18 jan. 2017.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – UNIDO. *Barriers to industrial energy efficiency: A literature review*. Viena: Unido, 2011a.

_____. *Policy options to overcome barriers to industrial energy efficiency in developing countries*. Viena: Unido, 2011b.

_____. *Energy efficiency technologies and benefits. Sustainable energy regulation and policymaking for Africa*. Viena: Unido, 2013.

RATHMANN, R. et al. *Sistema brasileiro de cap-and-trade no setor industrial: Vantagens, desafios, reflexos na competitividade internacional e barreiras à implementação*. Rio de Janeiro: COPPE/PPE, 2010.

RATHMANN, R. *Impactos da adoção de metas de redução de emissão de gases de efeito estufa sobre a competitividade de setores industriais energointensivos do Brasil*. 2012. 394 f. Tese (Doutorado em Ciências do Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

REZENDE, M. T.; AMARAL, S. P. *Avaliação dos principais sistemas de certificação florestal praticados no mundo de interesse para o Brasil*. III CNEG – Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Anais... Niterói, RJ, 17, 18 e 19 de agosto de 2006.

SINDICATO DAS INDÚSTRIAS DE FERRO DO ESTADO DE MINAS GERAIS – SINDIFER (Brasil). *Anuário*. Belo Horizonte: Sindifer, 2009.

_____. *Anuário*. Belo Horizonte: Sindifer, 2013.

SORRELL, S. et al. *The economics of energy efficiency: Barriers to cost-effective investment*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Ltd, 2004.

UBIETO, E. *Energy system analysis in the Swedish – Iron and steel industry*. Luleå: Luleå University of Technology, 2012.

UK. Department of Energy and Climate Change and Department for Business, Innovation and Skills – DECC. *Industrial decarbonisation and energy efficiency roadmaps to 2050*. London: DECC, 2015.

USA. Department of Defense – DoD. *Technology readiness assessment (TRA) guidance*. Assistant Secretary of Defense for Research and Engineering (ASD R&E). Washington: DOD, 2011.

USA. Environmental Protection Agency – USEPA. *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel industry*. Washington DC: USEPA, 2012.

WORLD BANK. *Overview Brazil*. 2016. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/en/country/brazil/overview>>. Acesso em: 13 mar. 2016.

WORLD ENERGY CONCIL. *World energy perspective: Energy efficiency policies: what works and what does not*. Londres: World Energy Concil, 2013.

WORLD STEEL ASSOCIATION. *Steel's contribution to a low carbon future*. Bruxelas: World Steel Association, 2014.

_____. *World Steel Association*. 2014. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org/>> Acesso em: 21 ago. 2014.

WORRELL, E. et al. *Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the U.S. iron and steel industry*. Berkeley: Environmental Energy Technologies Division, 2010.

_____. *World best practice energy intensity values for selected industrial sectors*. Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.

ZILAHY, G. Organisational factors determining the implementation of cleaner production measures in the corporate sector. *Journal of Cleaner Production*, v. 12, n. 4. p. 311, 2004.



MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES**

