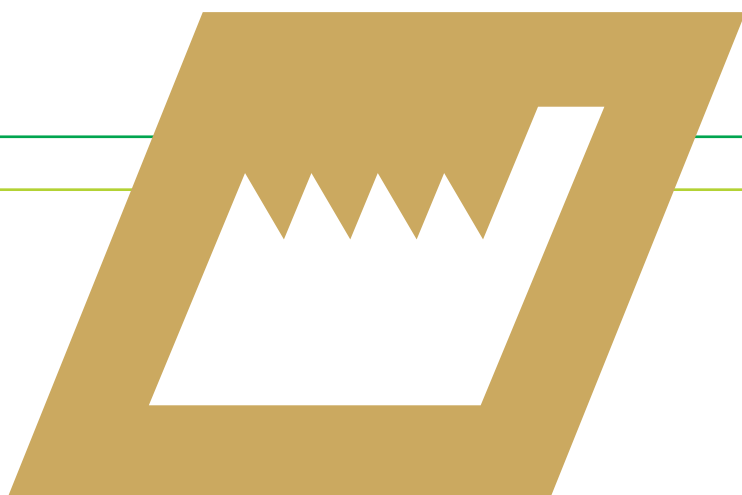




*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*



MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE FERROLIGAS



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



RÉGIS RATHMANN
(ORGANIZADOR)

***MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES
DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR
DE FERROLIGAS***

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

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

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

ISBN: 978-85-88063-49-5

1. Mudanças Climáticas. 2. Emissão de gases. 3. Ferroligas. 4. Produção de ferroligas - Tecnologia. 5. Políticas públicas - Emissão de gases. 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

Fernanda Pires Domingues Cardoso Guedes

Raymundo Moniz de Aragão Neto

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)

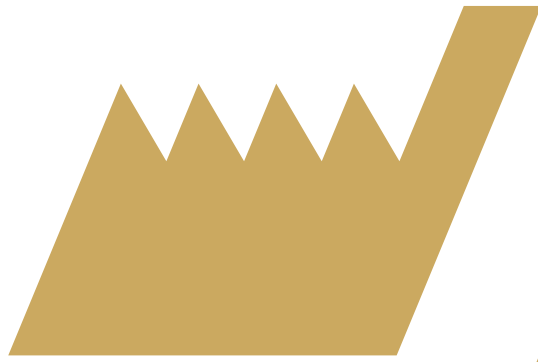
The image features a large, abstract composition of geometric shapes in shades of gold and brown. A prominent shape is a large, irregular polygon that occupies the right and bottom portions of the frame. In the upper left, there is a smaller, jagged shape resembling a sawtooth or a stylized mountain 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.

Sumário

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| INTRODUÇÃO | 17 |
| 1. CARACTERIZAÇÃO SETORIAL | 21 |
| 1.1 CONSUMO ENERGÉTICO | 28 |
| 2 MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS APLICÁVEIS AOS PROCESSOS PRODUTIVOS DO SETOR..... | 33 |
| 2.1 TECNOLOGIAS ESPECÍFICAS DO SETOR..... | 33 |
| 2.2 TECNOLOGIAS TRANSVERSAIS | 36 |
| 3 CENÁRIOS DE REFERÊNCIA, BAIXO CARBONO E BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO..... | 43 |
| 3.1 CENÁRIO REF | 44 |
| 3.1.1 Premissas..... | 44 |
| 3.1.2 Resultados..... | 47 |
| 3.2 CENÁRIO BC..... | 48 |
| 3.2.1 Premissas | 48 |
| 3.2.2 Resultados | 50 |
| 3.2.3 Custos marginais de abatimento | 51 |
| 3.3 CENÁRIO BC+I..... | 57 |
| 3.3.1 Tecnologias inovadoras para o setor..... | 57 |
| 3.3.2 Premissas..... | 62 |
| 3.3.3 Resultados | 63 |
| 4 SUBSÍDIOS À FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO..... | 69 |

| | |
|---|-----------|
| 4.1 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS À IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO | 70 |
| 4.2 SÍNTESE DAS EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS COM POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO..... | 72 |
| 4.3 INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO .. | 76 |
| CONSIDERAÇÕES FINAIS | 81 |
| REFERÊNCIAS..... | 85 |



Listas de tabelas,
figuras, quadros e
siglas e acrônimos

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Capacidade Instalada para Produção de Ferroligas..... | 28 |
| Tabela 2 – Produção, Consumo Total e Específico no Setor Ferroligas (Brasil, 2004-2013)..... | 29 |
| Tabela 3 – Rendimentos Médios de Conversão por Usos Finais e Fontes de Energia | 30 |
| Tabela 4 – Matriz de Energia Útil em 2010 (1.000 tep)..... | 30 |
| Tabela 5 – Valores Indicativos para Consumo de Redutores..... | 31 |
| Tabela 6 – Consumo Específico de Eletricidade | 31 |
| Tabela 7 – Potencial de Recuperação de Energia por Produto..... | 34 |
| Tabela 8 – Avaliação Financeira da Recuperação de Calor | 34 |
| Tabela 9 – Potenciais e Prazos de Retorno de Investimento de MTD Aplicáveis ao Setor de Ferroligas..... | 35 |
| Tabela 10 – Potenciais e Custos de MTD Aplicáveis ao Setor de Ferroligas na África do Sul..... | 35 |
| Tabela 11 – Potenciais e Custos de Investimento de MTD Aplicáveis a Sistemas de Bombeamento..... | 37 |
| Tabela 12 – Potenciais e Custos de Investimento de MTD Aplicáveis a Sistemas de Ventilação..... | 37 |
| Tabela 13 – Potenciais e Custos de Investimento de MTD Aplicáveis a Sistemas de Ar Comprimido | 38 |
| Tabela 14 – Potenciais e Prazos de Retorno de Investimentos de MTD Aplicáveis ao Setor de Ferroligas..... | 39 |
| Tabela 15 – Potenciais, Vida Útil e Custos de Atividades de Baixo Carbono Aplicáveis ao Setor de Ferroligas | 39 |
| Tabela 16 – Consumo por Fontes de Energia em 2010..... | 44 |
| Tabela 17 – Produção de Ferroligas e Silício Metálico em 2010..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Tabela 18 – Consumos Específicos | 45 |
| Tabela 19 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Demanda Energética do Setor | 45 |
| Tabela 20 – Penetrações dos Combustíveis no Cenário de Referência | 46 |
| Tabela 21 – Fatores de Emissão de CO ₂ | 46 |
| Tabela 22 – Fatores de Emissão de CO ₂ do SIN..... | 46 |
| Tabela 23 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050 | 48 |
| Tabela 24 – Emissões Totais de CO ₂ e de 2010 a 2050 | 48 |
| Tabela 25 – Penetrações dos Combustíveis no Cenário BC..... | 49 |
| Tabela 26 – Potenciais de Economia de Energia, Taxas de Penetração e Custos das MTD | 50 |
| Tabela 27 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050 | 51 |
| Tabela 28 – Emissões Totais e Variação com Relação ao Cenário REF de 2010 a 2050..... | 51 |
| Tabela 29 – Preços dos Combustíveis | 53 |
| Tabela 30 – Preços de Petróleo Considerados para o Cálculo do Custo Marginal de Abatimento das Possibilidades de Mitigação..... | 53 |
| Tabela 31 – Preços dos Combustíveis e da Eletricidade para a Taxa de Desconto de 8% ao ano..... | 54 |
| Tabela 32 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 8% ao ano..... | 54 |
| Tabela 33 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 15% ao ano..... | 55 |
| Tabela 34 – Consumo de Combustíveis e Eletricidade das Tecnologias de Pré-tratamento de Minério de Manganês | 61 |
| Tabela 35 – Potenciais de Economia de Energia por Tecnologia de Ruptura Considerada no Cenário BC+I | 62 |
| Tabela 36 – Taxas de Penetração das Tecnologias Inovadoras de 2010 a 2050 | 63 |
| Tabela 37 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050 | 64 |
| Tabela 38 – Emissões Totais e Variação com Relação ao Cenário BC de 2010 a 2050.... | 64 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Capacidade Instalada para Produção de Ferroligas..... | 25 |
| Figura 2 – Localização de Plantas Produtoras de Ferroligas | 26 |
| Figura 3 – Distribuição Geográfica dos Empreendimentos de Produção de Ferroligas e Silício Metálico em Minas Gerais..... | 28 |
| Figura 4 – Consumo Energético por Combustível de 2004 a 2016 | 29 |
| Figura 5 – Produção de Ferroligas até 2050..... | 47 |
| Figura 6 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 8%..... | 56 |
| Figura 7 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 15%..... | 56 |
| Figura 8 – Esquema do Forno TecnoRed | 60 |
| Figura 9 – Consumo Energético dos Cenários REF, BC e BC+I | 65 |
| Figura 10 – Emissões Totais de CO ₂ dos Cenários REF, BC e BC+I..... | 65 |
| Figura 11 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria | 73 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 1 - Ferroligas e Principais Aplicações..... | 22 |
| Quadro 2 - Influência dos Elementos de Liga no Aço..... | 23 |
| Quadro 3 - Dados de Plantas Produtoras de Ferroligas | 27 |
| Quadro 4 - Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono | 79 |

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABRAFE – Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico
AFOLU – Agricultura, florestas e outros usos do solo
BEN – Balanço Energético Nacional
BEU – Balanço de Energia Útil
BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social
CAL – Custo anual líquido
CENÁRIO BC – Cenário de baixo carbono
CENÁRIO BC+I – Cenário de baixo carbono com inovação
CENÁRIO REF – Cenário de referência
CH₄ – Metano
CHP – *Combined heat and power or cogeneratio*
CMA – Custo marginal de abatimento
CNI – Confederação Nacional da Indústria
CO₂ – Dióxido de carbono
CO₂e – Dióxido de carbono equivalente
COP21 – 21ª Conferência das Partes (Paris)
CTPin – Comissão Técnica do Plano Indústria
DEA – Department of Environmental Affairs – South Africa
EAF – Forno a arco elétrico
EC – European Comission
EMEP/EEA – European Monitoring and Evaluation Programme/European Environment Agency
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais
FGV/EAESP – Fundação Getúlio Vargas/Escola de Administração de Empresas de São Paulo
FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
GCF – Green Climate Fund
GEE – Gases de efeito estufa
GEF – Global Environment Facility
HFC – Hidrofluorcarboneto

IABr – Instituto Aço Brasil
IEA – International Energy Agency
IES – Sistemas de energia integrados
IETD – Industrial Efficient Technology Database
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
ITP – Industrial Technologies Program (USA)
MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MEPS – Níveis mínimos de eficiência energética
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério de Minas e Energia
MRV – Monitoramento, relato e verificação
MTD – Melhores tecnologias disponíveis
N₂O – Óxido nitroso
NEDO – New Energy and Industrial Technology Development Organization (Japan)
O&M – Operação e manutenção
PFC – Compostos perfluorados
PIB – Produto interno bruto
PNMC – Plano Nacional sobre Mudança do Clima
PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
SAF – Forno a arco submerso
SF₆ – Hexafluoreto de enxofre
tep – Tonelada equivalente de petróleo
UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UNIDO – Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
USEPA – The United States Environmental Protection Agency
VBP – Valor bruto da produção

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 most 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, there is a trapezoidal shape pointing downwards. 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 dióxido de carbono 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 (MCTIC, 2016). 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 o consumo de energia, o setor industrial passaria a ser responsável por cerca de 1/3 das emissões totais (HENRIQUES JR., 2010; MCTIC, 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 (MCTIC, 2016).

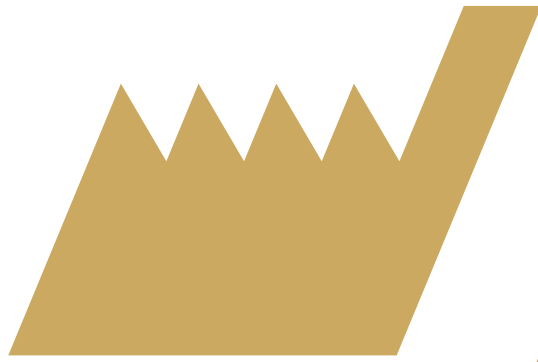
emissões de GEE (HENRIQUES JR., 2010; BORBA et al., 2012; CNI, 2012; RATHMANN, 2012), o que justifica a implementação de política pública nesse sentido, qual seja o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação, comumente chamado de Plano Indústria (FGV, 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 ferroligas, 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 composto por uma introdução, quatro capítulos e as considerações finais. O capítulo 1 tratará de caracterizar os principais processos produtivos do setor, bem como apresentará os consumos energéticos específicos em nível desagregado. No capítulo 2, serão detalhadas as melhores tecnologias disponíveis (MTD), visando, direta ou indiretamente, mitigar emissões de GEE. No capítulo 3, apresentar-se-ão os cenários de referência (REF), baixo carbono (BC) e baixo carbono com inovação (BC+I) construídos para o setor. No capítulo 4, serão identificados barreiras e cobenefícios à implementação das MTD e instrumentos aplicáveis, visando à adoção dos cenários de baixo carbono. Por fim, serão apresentadas as considerações finais do presente estudo.

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, 2017a; 2017b). Tais cenários abrangem 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. Deve-se enfatizar que resultarão desses cenários integrados estimativas robustas dos potenciais e custos de abatimento desses setores, as quais serão reportadas no relatório *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono* (MCTIC, 2017b). 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 setorial

Capítulo

1

1 CARACTERIZAÇÃO SETORIAL

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 1995) define ferroligas como as ligas de ferro com outras substâncias além de carbono. A limitação do conjunto de produtos que compõem o grupo ferroligas não é homogênea. Em Leite et al. (2010) é indicado que os produtos relevantes do setor, no Brasil, são os seguintes:

- Ferroligas de manganês;
- Ferrosilício;
- Ferro-cromo, distinto quanto ao teor de carbono (alto e baixo);
- Ligas de níquel.

Além destas, seriam consideradas outras, denominadas “especiais”, destacando-se o ferro-nióbio. Outra classificação é apresentada em FEAM (2010), em que as ferroligas são divididas em duas categorias: principais e especiais. São as ligas principais:

- Ferros-cromos, classificados conforme o teor de carbono em alto carbono (4%-10%), médio carbono (0,5%-4%) e baixo carbono (0,01%-0,5%);
- Ligas de silício, classificadas segundo a composição em ferro-silício (teor de Si inferior a 96%), silício metálico (teor de Si em torno de 96%) e ferro-silício-cálcio (teor de Si entre 60% e 65% e de Ca entre 30% e 35%);
- Ligas de manganês, também classificadas segundo sua composição em ferro-manganês de alto carbono (1,5% a 7,5% de C), médio carbono (0,5% a 1,5% de C) e baixo carbono (até 0,5% de C);

Também são indicadas as seguintes ligas especiais:

- Ligas de níquel;
- Ligas de ferro-vanádio;
- Ligas de ferro-nióbio;
- Ligas de ferro-tungstênio.

Em Guerra et al. (2004), é apresentada uma classificação segundo propriedades físicas das ligas:

- Ligas com solução sólida: são miscíveis tanto no estado sólido quanto no líquido;
- Ligas eutécticas: em estado sólido, apresentam proporções inalteráveis e ponto de fusão constante e característico, comportando-se como metal puro;

- Ligas nas quais os metais são totalmente miscíveis em estado líquido, mas em estado sólido só se misturam parcialmente;
- Ligas nas quais os metais não são miscíveis no estado líquido;
- Ligas que formam compostos: combinam-se formando os compostos intermetálicos, principais endurecedores das ligas industriais.

Abrafe (2014) apresenta quadro com os produtos e suas principais aplicações.

Quadro 1 – Ferroligas e Principais Aplicações

| Produto | Principais aplicações |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Ferro-manganês • Ferro-silício-manganês | <ul style="list-style-type: none"> • Aços comuns e especiais • Fundições |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ferro-silício • Ferro-cálcio-silício • Silício metálico • Silício eletrônico • Silício fotovoltaico | <ul style="list-style-type: none"> • Aços comuns e especiais • Alumínio • Células fotovoltaicas • Silicone |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ferro-cromo • Ferro-silício-cromo | <ul style="list-style-type: none"> • Aço inoxidável |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ferro-níquel | <ul style="list-style-type: none"> • Aço inoxidável |
| <ul style="list-style-type: none"> • Ferro-silício-magnésio • Ferro-nióbio | <ul style="list-style-type: none"> • Aço especial |

Fonte: Elaborado a partir de ABRAFE, 2014

Ferroligas são insumos importantes na indústria siderúrgica, pois influem diretamente na propriedade final do aço (LEITE et al., 2010). O Quadro 2 apresenta as propriedades conferidas aos diferentes tipos de aço, em função dos elementos de liga adicionados.

Quadro 2 – Influência dos Elementos de Liga no Aço

| Elemento | Influência nas propriedades | Aplicações | Produtos |
|------------|--|---|---|
| Níquel | Aumento da resistência à tração e alta ductilidade. | Aço para construção mecânica, aço inoxidável e aço resistente a altas temperaturas. | Peças para automóveis, utensílios domésticos e tratamento térmico. |
| Manganês | Aumento da resistência mecânica e temperabilidade de peças e a resistência ao choque. | Aço para construção mecânica. | Peças para automóveis e peças para uso geral em engenharia mecânica. |
| Cromo | Aumento da resistência à corrosão e aumento da resistência a altas temperaturas. | Aços para construção mecânica, aços ferramenta e aços inoxidáveis. | Produtos para indústria química, talheres, válvulas e peças para fornos e ferramentas de corte. |
| Silício | Aumento da resistência à oxidação em temperaturas elevadas, melhoria da temperabilidade e da resistência à tração. | Aços com alto teor de carbono e aços para fundições em areia. | Peças fundidas. |
| Vanádio | Maior resistência mecânica, maior tenacidade e temperabilidade e resistência à fadiga e abrasão. | Aços cromo-vanádio. | Ferramentas de corte. |
| Tungstênio | Aumento da dureza, resistência à tração, resistência à corrosão e erosão. | Aos rápidos e aços ferramenta. | Ferramentas de corte. |
| Molibdênio | Alta dureza, aumento da resistência à tração e temperabilidade. | Aços ferramenta, aços cromo-níquel, substituto do tungstênio em aços rápidos. | Ferramentas de corte. |
| Nióbio | Aumento da resistência à corrosão e capacidade de solda de aço e aços inoxidáveis. | Construção civil, automotiva, naval, aeronáutica e espacial. | Tubulações, ferramentas de alta precisão. |

Fonte: Elaborado a partir de FEAM, 2010

De acordo com Mineral Data (2014), a produção de ferroligas no Brasil, em 2010, que é o ano-base considerado para realizar projeções de consumo de energia e emissões de GEE neste estudo, foi de 924.749 toneladas, e a de silício metálico foi de 184.189 toneladas, valor idêntico ao apresentado no Balanço Energético Nacional – BEN (EPE, 2014a). Em 2011, as produções foram de 853.949 e 210.438 toneladas, respectivamente.

Sindiextra (2014) apresenta desagregação da produção nacional em 2010, conforme o tipo de ferroliga:

- Ferro-cromo: 172.794 t
- Ferro-manganês: 305.808 t
- Ferro-nióbio: 77.246 t
- Ferro-níquel: 23.837 t
- Ferroligas especiais: 97.758 t
- Silício metálico: 184.149 t

EMEP/EEA (2013) e FEAM (2010) indicam que a produção de ferroligas, geralmente, envolve o uso de fornos a arco elétrico e cadinhos para reação, nos quais produtos naturais (como quartzo, cal, minérios) com relativa variação em composição são carregados.

Como indicado em Leite et al. (2010), ferroligas podem ser produzidas por diferentes processos, sendo o mais usual a redução carbotérmica em fornos elétricos de arco submerso, consistindo das seguintes etapas:

- Preparação das matérias-primas;
- Fusão e redução das cargas (fusão redutora);
- Preparação do produto.

A etapa de fusão redutora, do ponto de vista energético, é a mais relevante. São ainda mencionados outros processos:

- Compressão, em que misturas são submetidas a elevadas pressões, de importância na preparação de ligas de alto ponto de fusão e aquelas cujos componentes são imiscíveis no estado líquido;
- Eletrolítico, que consiste na mistura de sais, com o fim de provocar deposição simultânea de dois ou mais metais sobre catodos;
- Metalurgia associada, com obtenção de uma liga constituída de dois ou mais metais, submetendo-se ao mesmo processo metalúrgico uma mistura de seus minérios.

Os processos utilizados para produção de ligas especiais são apresentados em FEAM (2010):

- Ligas de níquel: produzidas em forno elétrico a arco submerso;
- Ligas de ferro-vanádio: podem ser produzidas por processos metalotérmicos ou carbotérmicos, dependendo da quantidade requerida no produto final;
- Ligas de ferro-nióbio: produzidas por processo aluminotérmico;
- Ligas de ferro-molibdênio e de ferro titânio: produzidas por processo metalotérmico;
- Ligas ferro-tungstênio: produzidas pelo processo carbotérmico;
- Ligas de ferro-boro: produzidas por rotas metalotérmica ou carbotérmica.

O processo a arco submerso é uma operação de redução (FEAM, 2010), em que são combinados:

- Reagentes, basicamente óxidos metálicos (óxidos de ferro, óxidos de sílica, óxidos de manganês, óxidos de cromo etc.);
- Redutores, usualmente coque, carvão vegetal ou carvão mineral;
- Agentes de fluxo, normalmente calcário.

O material carbonáceo (reductor) reage com o oxigênio contido nos reagentes, reduzindo-os para o metal. O metal fundido e a escória, separados por gravidade, são removidos por orifícios ao longo da corrida.

O processo metalotérmico consiste no tratamento químico de uma substância mineral pelo emprego de um metal como agente redutor para a produção de outro metal de interesse (HECK, 2014). De maneira geral, a carga do reator é uma mistura de compostos purificados previamente, em vez de carga de matérias-primas ainda com impurezas.

O processo carbotérmico é o tratamento químico de redução de uma substância mineral (quimicamente um óxido) com o emprego do gás CO que tem origem numa substância portadora do elemento carbono – comumente nas formas coque ou carvão vegetal – para a produção de um metal (HECK, 2014). Como o processo se realiza em altas temperaturas, os componentes da carga (exceto o carbono) acabam por se fundir, e os produtos podem ser removidos por se encontrarem em estado líquido. As diferenças de densidade permitem a separação, por gravidade, do metal e da escória.

O processo aluminotérmico (DE BRITO, 2007) é uma técnica exotérmica que ocorre com adição de alumínio, que oxida e reduz o metal inicialmente adicionado. A reação é iniciada pelo fornecimento de calor de um ignitor, normalmente um elemento resistivo. A vantagem da utilização do alumínio é ser facilmente removível nas etapas posteriores de refino, o que não acontece com processos redutores por carbono, silício ou cálcio.

Segundo Leite et al. (2010), em 2004, a capacidade instalada total para produção de ferroligas no Brasil foi de 1,14 milhão de toneladas anuais, distribuídas conforme a Figura 1.

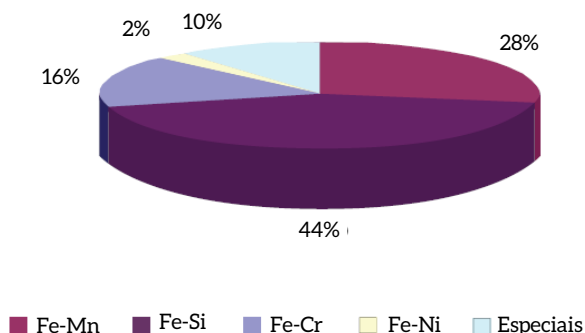


Figura 1 – Capacidade Instalada para Produção de Ferroligas

Fonte: LEITE; BAJAY; DEBONZI, 2010

Kruger (2009) cita 30 unidades produtivas, distribuídas no país conforme a Figura 2.

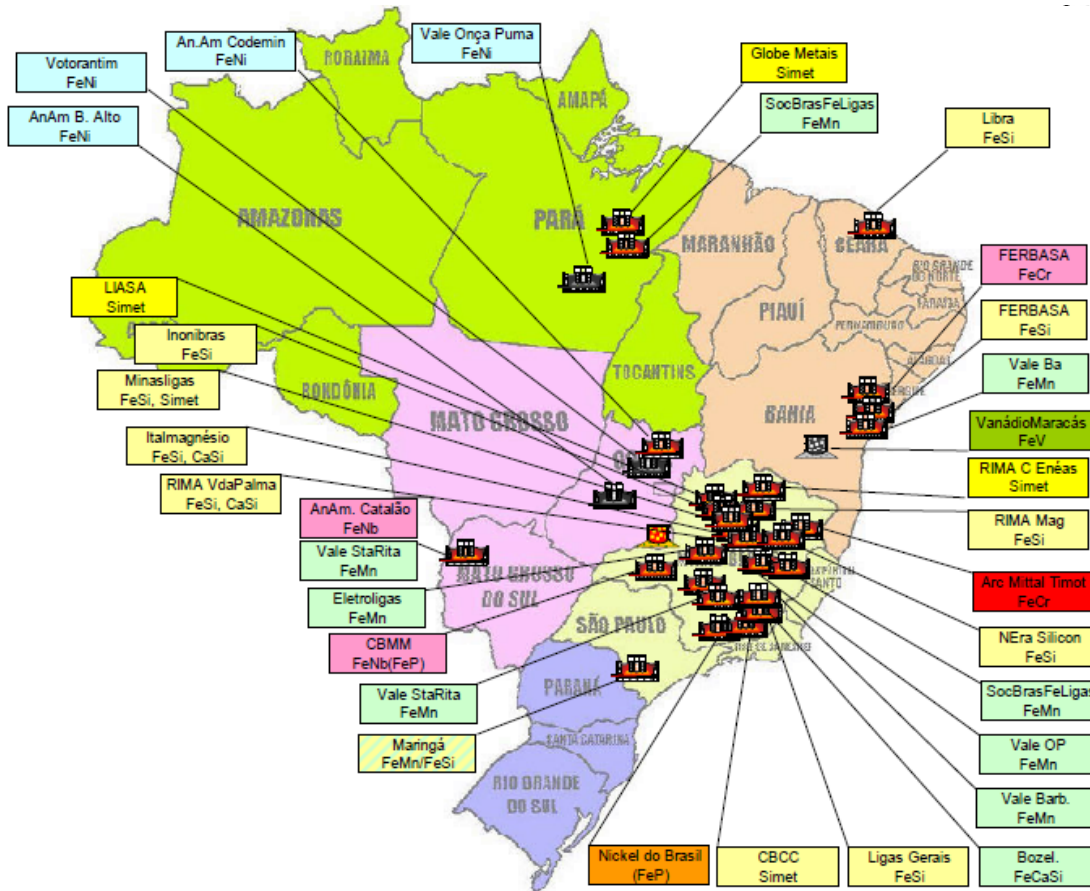


Figura 2 - Localização de Plantas Produtoras de Ferroligas

Fonte: KRUGER, 2009

Dados individualizados de plantas puderam ser levantados, considerando o universo de associados da Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico (ABRAFE, 2014) e indicações em Kruger (2009). O Quadro 3 apresenta uma consolidação desses dados, prevalecendo os dados indicados diretamente em sítios das empresas sobre valores apontados por Kruger (2009). Os valores apurados apontam capacidade instalada de 1,02 milhão de toneladas anuais.

Quadro 3 – Dados de Plantas Produtoras de Ferroligas

| Grupo industrial | Produto | Localização | Capacidade de produção total (t/ano) |
|-------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| Anglo American | FeNi | Niquelândia – GO | 10.000 |
| Anglo American | FeNi | Barro Alto – GO | 36.000 |
| Anglo American | FeNb | Catalão – GO | n.i. |
| Anglo American | FeNb | Ouvidor – GO | n.i. |
| Bozel Brasil | CaSi, FeSi, CaSiBa, CaSiMn | São João D'El Rey – MG | 27.000 |
| CBMM | FeNb | Araxá – MG | 90.000 |
| Dow Corning | Si | Campinas – SP | n.i. |
| FERBASA | FeCr, FeSi | Pojuca – BA | 321.000 |
| FERLIG | n.i. | Divinópolis – MG | n.i. |
| Granha Ligas | FeSiMn | Conselheiro Lafaiete – MG | n.i. |
| Inonibrás | FeSi | Pirapora – MG | 15.000 |
| Liasa | Si metálico | Pirapora – MG | 46.000 |
| Ligas Gerais | FeSiZr, ligas de Mn | São João D'El Rey – MG | 15.600 |
| Maringá Ferroliga | SiMn | Itapeva – SP | 80.000 |
| Minasligas | FeSi, Si metálico | Pirapora – MG | 100.000 |
| Nova Era Silicon | FeSi | Nova Era – MG | 52.000 |
| Vale Manganês | FeMn, FeSi | Simões Filho – BA | 224.000 |

Notas: n.i.: não informado. CaSi: Cálcio-silício; CaSiBa: Cálcio-silício-bário; CaSiMn: Cálcio-silício-manganês; FeCr: Ferro-cromo; FeMn: Ferro-manganês; FeNb: Ferro-nióbio; FeNi: Ferro-níquel; FeSi: Ferro-silício; FeSiMn: Ferro-silício-manganês; FeSiZr: Ferro-silício-zircônio; Si: Silício; SiMn: Silício-manganês.

Fontes: Elaborado a partir de KRUGER, 2009; ANGLO AMERICAN, 2014; BOZEL BRASIL, 2014; CBMM, 2014; DOW CORNING, 2014; FERBASA, 2014; GRANHA LIGAS, 2014; INONIBRÁS, 2014; LIASA, 2014; LIGAS GERAIS, 2014; MARINGÁ FERROLIGA, 2014; MINASLIGAS, 2014; NOVA ERA SILICON, 2014; VALE, 2014

De acordo com FEAM (2010), Minas Gerais concentrava a maior quantidade de indústrias do setor, com 22 unidades. A Tabela 1 apresenta detalhamento dessa capacidade, sendo a distribuição geográfica apresentada na Figura 3. Sindiextra (2014) indica que o estado foi responsável por 40% da produção nacional em 2010.

Tabela 1 – Capacidade Instalada para Produção de Ferroligas

| Produto | Capacidade instalada (t/mês) |
|----------|------------------------------|
| Si | 15.662 |
| Fe-Si | 17.022 |
| Ca-Si | 4.910 |
| Ca-C | 6 |
| Fe-P | 120 |
| Fe-Nb | 14.400 |
| Fe-Mn | 2.100 |
| Fe-Si-Mn | 12.406 |
| Mg | 975 |

Fonte: Elaborado a partir de FEAM, 2010

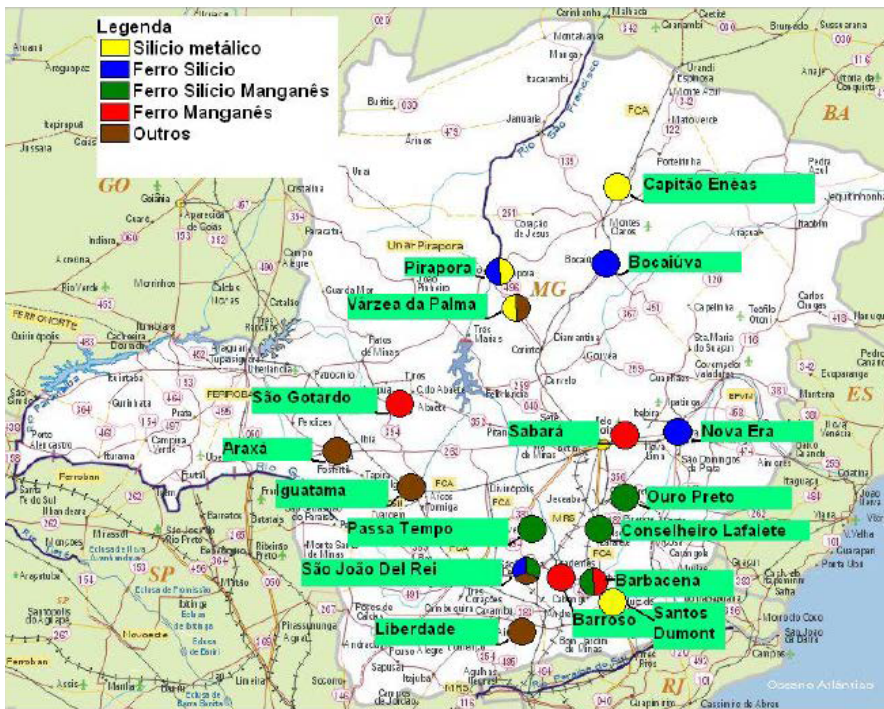


Figura 3 – Distribuição Geográfica dos Empreendimentos de Produção de Ferroligas e Silício Metálico em Minas Gerais

Fonte: FEAM, 2010

1.1 CONSUMO ENERGÉTICO

Conforme EPE (2017), o setor de ferroligas foi responsável por aproximadamente 1,4% do consumo total da indústria em 2016. O setor diminuiu significativamente seu uso da energia nos últimos dez anos, apresentando, no ano de 2016, consumo de aproximadamente 1,2 milhão de tep, o que representa queda de 22,1% em face do valor observado em 2004. Os principais energéticos utilizados pelo setor foram: eletricidade, respondendo por 42,6% do total da energia utilizada; carvão vegetal e lenha, com 36,3%.

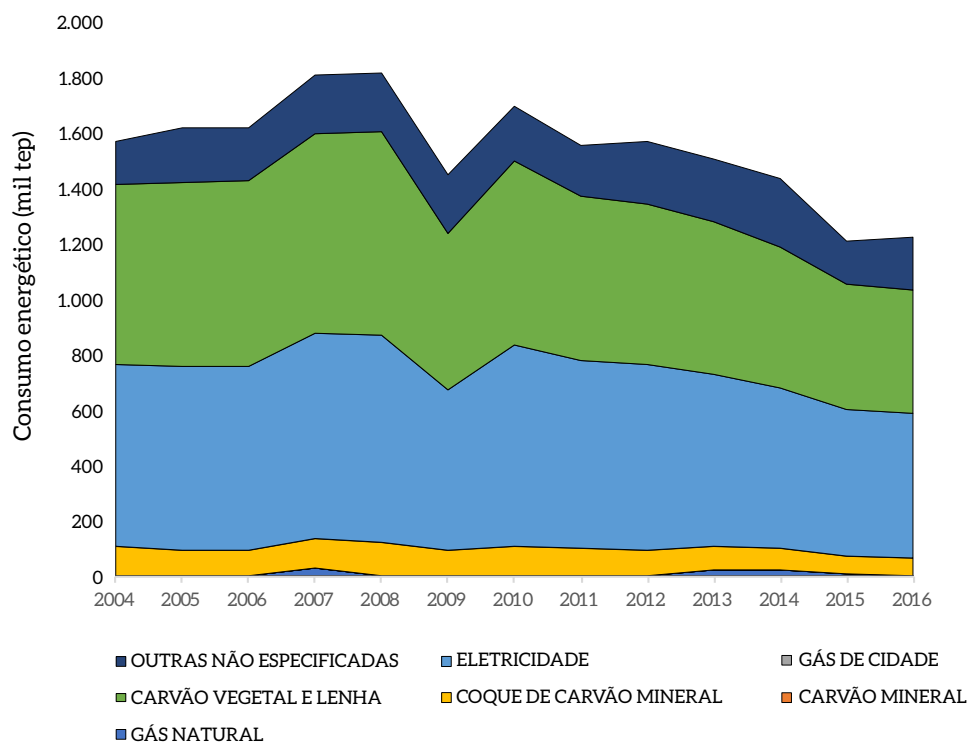


Figura 4 – Consumo por Fontes de Energia de 2004 a 2016

Fonte: Elaborado a partir de EPE, 2017

Observando-se os consumos específicos de energia elétrica e combustíveis, constata-se que totalizaram 6,8 MWh/t e 0,8 tep/t em 2013, respectivamente.

Tabela 2 – Produção, Consumo Total e Específico no Setor Ferroligas (Brasil, 2004-2013)

| Parâmetros | Unidade | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|----------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Produção | 10 ³ t | 1.223 | 1.401 | 1.020 | 1.158 | 1.204 | 750 | 1.109 | 993 | 1.045 | 1.075 |
| Consumo total | 10 ³ tep | 1.563 | 1.613 | 1.613 | 1.803 | 1.811 | 1.447 | 1.695 | 1.555 | 1.565 | 1.505 |
| Consumo total/produção física | tep/t | 1,279 | 1,152 | 1,581 | 1,557 | 1,505 | 1,929 | 1,529 | 1,566 | 1,497 | 1,400 |
| Consumo de eletricidade | GWh | 7.659 | 7.735 | 7.703 | 8.675 | 8.737 | 6.749 | 8.461 | 7.883 | 7.741 | 7.277 |
| Consumo de eletricidade/produção | MWh/t | 6,265 | 5,521 | 7,551 | 7,490 | 7,259 | 8,999 | 7,630 | 7,935 | 7,408 | 6,771 |
| Consumo combustíveis/produção | tep/t | 0,739 | 0,677 | 0,932 | 0,913 | 0,880 | 1,155 | 0,872 | 0,883 | 0,861 | 0,818 |

Fonte: Elaborado a partir de EPE, 2014a

Leite e Bajay (2006) indicam que o consumo de energia para a produção de ferroligas depende de diferentes fatores, como liga produzida, projeto do forno e procedimentos operacionais, resultando em variações no consumo específico de eletricidade de 2.100 kWh/t (para ferro-manganês de alto carbono) a 14.000 kWh/t para ligas especiais.

Ainda segundo esses autores, o consumo de energia é concentrado no uso final aquecimento direto, correspondendo aos fornos, exceto para eletricidade, cuja destinação é a seguinte:

- Aquecimento direto (fornos): 96,5%
- Força motriz (motores e acionamentos): 2,9%
- Iluminação: 0,4%
- Refrigeração: 0,2%

Os rendimentos médios de conversão, por usos finais e fontes de energia, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Rendimentos Médios de Conversão por Usos Finais e Fontes de Energia

| Fontes de energia | Usos finais de energia (%) | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------|--------------|
| | Força motriz | Aquecimento direto (fornos) | Iluminação | Refrigeração |
| Gás natural | 33,0 | 56,0 | - | - |
| Lenha | - | 56,0 | - | - |
| Óleo combustível | - | 56,0 | - | - |
| Coque de carvão mineral | - | 56,0 | - | - |
| Eletricidade | 90,0 | 60,0 | 24,0 | 60,0 |
| Carvão vegetal | - | 56,0 | - | - |
| Outras fontes secundárias do petróleo | - | 56,0 | - | - |

Fonte: Elaborado a partir de LEITE; BAJAY, 2006

Aplicando-se os coeficientes de destinação e rendimentos indicados na edição de 2005 do BEU (MME, 2005) sobre os valores de consumo apurados para 2010 no BEN (EPE, 2017), é possível compor uma matriz de energia útil para o setor.

Tabela 4 – Matriz de Energia Útil em 2010 (1.000 tep)

| Fontes de energia | Usos finais de energia | | | | |
|-------------------|------------------------|--------------------|--------------|------------|--------------|
| | Força Motriz | Aquecimento Direto | Refrigeração | Iluminação | Total |
| Gás natural | - | 1,1 | - | - | 1,1 |
| Lenha | - | 51,5 | - | - | 51,5 |
| Óleo combustível | - | 16,3 | - | - | 16,3 |
| Querosene | - | 0,5 | - | - | 0,5 |
| Coque | - | 60,2 | - | - | 60,2 |
| Eletricidade | 19,0 | 421,3 | 0,8 | 0,7 | 441,8 |
| Carvão vegetal | - | 318,3 | - | - | 318,3 |
| Outras fontes | - | 94,0 | - | - | 94,0 |
| Total | 19,0 | 963,2 | 0,8 | 0,7 | 983,7 |

Fonte: Elaborado a partir de MME, 2005 e EPE, 2017

Kruger (2009) informa que os principais redutores utilizados são carvão vegetal e coque, havendo casos em que carvão mineral é utilizado em mistura com as outras fontes. Em 2005, foram utilizadas as seguintes quantidades:

- Carvão vegetal: 1.048 mil toneladas
- Coque: 126 mil toneladas
- Carvão mineral: 12,5 mil toneladas

Dados desagregados de consumo de energia e insumos (especialmente redutores) são apresentados em Kruger (2009), conforme o tipo de liga produzido. Valores indicativos gerais são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores Indicativos para Consumo de Redutores

| Liga | Carvão vegetal | Coque |
|-------------------------------|----------------|-------|
| Ferro-manganês (alto carbono) | - | 520 |
| Ferro-silício-manganês | - | 530 |
| Silício metálico | 1.156 | - |
| Ferro-silício (75%) | 960 | - |
| Ferro-cromo (alto carbono) | - | 440 |

Nota: O autor não apresenta a unidade, supostamente tratando-se de kg/t produto.

Fonte: Elaborado a partir de KRUGER, 2009

Algumas ligas especiais, segundo o autor, utilizam pó de alumínio como redutor. Sobre consumo específico de eletricidade, indicam-se os seguintes valores, conforme o produto obtido. Constatase que o consumo específico de eletricidade apresenta grande variação em função do produto.

Tabela 6 – Consumo Específico de Eletricidade

| Produto | Consumo específico (kWh/t) |
|------------------------------|----------------------------|
| Ferro-manganês, alto carbono | 3.500 |
| Ferro-silício-manganês | 4.300 |
| Ferro-silício (75%) | 8.600 |
| Ferro-silício (45%) | 4.200 |
| Ferro-cromo alto carbono | 5.300 |
| Ferro-cromo baixo carbono | 3.600 |
| Ferro-níquel | 13.400 |
| Silício metálico | 13.000 |

Fonte: Elaborado a partir de KRUGER, 2009

A stylized line graph icon in a gold color, featuring four peaks of varying heights followed by a sharp upward trend, set against a white background.

Melhores tecnologias disponíveis aplicáveis aos processos produtivos do setor

Capítulo

2

2 MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS APLICÁVEIS AOS PROCESSOS PRODUTIVOS DO SETOR

Este capítulo objetiva apresentar as melhores tecnologias disponíveis (MTD) aplicáveis ao setor de ferroligas que permitiriam reduzir, direta e/ou indiretamente, emissões de GEE. Sempre que possível, serão apresentados parâmetros de potencial de economia de energia, redução de emissões de GEE, assim como custos de investimento e custos de operação e manutenção (O&M) das medidas.

A descrição será segmentada em tecnologias específicas aplicáveis no setor e processos transversais de eficiência energética ao setor industrial, aplicáveis à produção de ferroligas.

2.1 TECNOLOGIAS ESPECÍFICAS DO SETOR

Leite et al. (2010) apresentam avaliação do potencial técnico de conservação de energia no setor de ferroligas, tendo como referência a comparação entre consumos específicos verificados no Brasil e em estudos de referência. Os autores indicam potencial de 16,4%, sendo 2007 o ano de referência e a redução do consumo unicamente considerada para eletricidade. Os fornos respondem por 96,5% do potencial, e o restante é distribuído entre força motriz, iluminação e refrigeração. Não há indicação de custos ou descrição das tecnologias.

EC (2011) apresenta medidas voltadas à redução das emissões em plantas do setor, especialmente a utilização de coifas e sistemas de captura de gases para fornos a arco submerso e semissubmerso. O emprego desses equipamentos possibilita:

- Recuperação de calor para diferentes finalidades, inclusive aquecimento de água;
- Melhor controle do processo de fusão;
- Geração de eletricidade;
- Utilização de CO como combustível ou exportação (como matéria-prima ou combustível para plantas vizinhas);
- Queima direta para secagem e preaquecimento.

Para produtores de ferro-manganês e silício-manganês, também é apontada a viabilidade de uso dos gases capturados para pré-redução. Na referência, não são apresentados custos para as tecnologias propostas.

Segundo Klingspor e Striplle (2008), a redução setorial do consumo de energia, na maior parte dos casos, só é possível pelo uso de um eficiente sistema de recuperação de calor, para aproveitamento ou conversão em eletricidade. Igualmente, indica-se que monóxido de carbono recuperado pode ser utilizado como combustível ou matéria-prima em processos químicos. Os autores apresentam potenciais para recuperação de energia, segundo o produto.

Tabela 7 – Potencial de Recuperação de Energia por Produto

| Produto | Potencial de recuperação de energia | | |
|------------------|-------------------------------------|---------|-------|
| | Eletricidade | Térmica | Total |
| Ferro-cromo | - | 38,9% | 38,9% |
| Ferro-silício | 17,3% | 20,7% | 38,0% |
| Silício metálico | 13,0% | 17,2% | 30,2% |
| Ferro-manganês | 4,3% | 29,7 | 34,0% |

Fonte: Elaborado a partir de KLINGSPOR; STRIPLLE, 2008

Os autores apresentam dois estudos de caso, envolvendo aproveitamento de calor recuperado. Os parâmetros são resumidos a seguir.

Tabela 8 – Avaliação Financeira da Recuperação de Calor

| Parâmetro | Caso 1 | Caso 2 |
|---|--------|--------|
| Potência (planta) | 117 MW | 60 MW |
| Energia economizada | 32,9% | 16,5% |
| Custo capital (€ milhão) | 43,1 | 11,7 |
| Custo operação e manutenção (€ mil/ano) | 250 | 45 |

Fonte: Elaborado a partir de KLINGSPOR; STRIPLLE, 2008

De acordo com os autores, fornos abertos não podem ser considerados como MTD, tendo em vista a grande quantidade de energia térmica perdida com admissão de ar externo. Melhor seria aproveitar o CO gerado no processo de fusão e redução para outras finalidades, e não simplesmente oxidá-lo para atendimento de requisitos ambientais e de segurança.

Holappa (2010) descreve alternativas para tornar o setor mais sustentável:

- Emprego de fornos a arco fechados e recuperação de gases;
- Aproveitamento de CO capturado de fornos para concentração de matérias-primas (sinterização);
- Preaquecimento de carga, também utilizando CO capturado;

O autor estima redução de aproximadamente 22% no consumo de energia com uso dessas tecnologias, sem apresentar custos. Além dessas medidas, o autor questiona o não aproveitamento do calor latente da matéria fundida, indicando conhecer apenas uma planta produtora de ferro-cromo, integrada à produção de aço inoxidável, que utiliza tal recurso.

Nedo (2008) aponta diferentes tecnologias para setores industriais, não havendo indicação específica para o de ferroligas. No entanto, algumas recomendações para o setor siderúrgico são aplicáveis ao de ferroligas (Tabela 9). O tempo de retorno dos investimentos, quando indicado, refere-se aos valores superiores apresentados.

Tabela 9 – Potenciais e Prazos de Retorno de Investimento de MTD Aplicáveis ao Setor de Ferroligas

| Atividades de baixo carbono | Potencial de economia de energia | Prazo de retorno do investimento |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| Otimização do carregamento de material sinterizado | 2,8% (consumo de coque) | 2,4 anos |
| Sistema de recuperação de gás em conversor (forno) | - | 15,2 anos |
| Preaquecimento de carga de fornos | 20% | 7,8 anos |
| Fornos com eletrodos por corrente contínua | 5% | 26,7 anos |

Fonte: Elaborada a partir de NEDO, 2008

DEA (2014) apresenta análise do potencial de mitigação para diferentes setores na África do Sul, incluindo especificamente o de ferroligas.³

Tabela 10 – Potenciais e Custos de MTD Aplicáveis ao Setor de Ferroligas na África do Sul

| Atividades de baixo carbono | Potencial de economia de energia (%) | Aplicabilidade (%) | Custo de capital (US\$/t) | Custo operacional (US\$/t) |
|--|--------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|
| Implementação de melhores técnicas de produção disponíveis | 5 | 100 | 52,8 | 2,6 |
| Substituição de fornos a arco semicobertos por cobertos | 20 | 95 | 158,4 | 7,9 |
| Recuperação de CO em gases exaustos e geração de eletricidade | 13 | 95 | 104,0 | 5,2 |
| Recuperação de calor e geração de eletricidade de fornos semicobertos (ciclo Rankine) | 13 | 95 | 207,9 | 10,4 |
| Recuperação de calor e geração de eletricidade de fornos semicobertos (ciclo Rankine orgânico) | 13 | 95 | 221,8 | 11,1 |

³ Os custos são apresentados originalmente em Rands e foram convertidos para dólares americanos a uma taxa de 1 ZAR = 0,085 US\$. Foi também considerado um parque instalado com capacidade de produção de 400 mil ton/ano.

| Atividades de baixo carbono | Potencial de economia de energia (%) | Aplicabilidade (%) | Custo de capital (US\$/t) | Custo operacional (US\$/t) |
|---|--------------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|
| Sistema de monitoramento e gestão de energia | 1 | 100 | 2,6 | 0,1 |
| Controle avançado de motores elétricos e inversores de frequência | 10 | 5 | 9,2 | 0,5 |
| Sistemas de utilidades eficientes | 10 | 5 | 6,6 | 0,3 |
| Trocadores de calor eficientes | 10 | 5 | 4,0 | 0,2 |

Fonte: Elaborado a partir de DEA, 2014

2.2 TECNOLOGIAS TRANSVERSAIS

Foram identificadas tecnologias aplicáveis a diferentes atividades industriais, por isso designadas como transversais, que contribuiriam para redução do consumo de energia e emissões associadas no setor de ferroligas.

Vertiola (1990), ao analisar oportunidades para conservação de energia na indústria metalúrgica, descreve soluções aplicáveis ao setor de ferroligas, agrupadas em categorias:

- Redução de perdas de energia existentes nos fornos;
- Redução de energia fornecida aos produtos aquecidos;
- Integração de soluções de gestão às tecnológicas.

Dentre as medidas, são indicadas:

- Recirculação dos gases no interior do forno, aumentando a transferência de calor dos gases para o material aquecido (carga);
- Recuperação de calor dos gases para preaquecimento da carga;
- Redução de perdas por paredes;
- Controle de temperatura dos fornos;
- Preaquecimento da carga;
- Redução da temperatura final da carga;
- Otimização do ciclo de funcionamento dos fornos.

Embora o consumo de eletricidade, excluindo-se fornos, seja pequeno, da ordem de 3,5% conforme o BEU (MME, 2005), convém indicar os potenciais como forma de contribuir, mesmo que marginalmente, com o aumento da eficiência energética.

Em IEA (2014), são apresentadas medidas para redução do consumo em utilidades e sistemas anulares, como ventilação e bombeamento. As tabelas a seguir apresentam os potenciais de redução de consumo (tendo como referência o consumo total do sistema) e custos requeridos.

Tabela 11 – Potenciais e Custos de Investimento de MTD Aplicáveis a Sistemas de Bombeamento

| Atividades de baixo carbono | Ganhos em eficiência | Investimento (US\$/GJ economizado) |
|--|----------------------|------------------------------------|
| Isolamento de fluxo para equipamentos não essenciais | 10,0% | 0,00 |
| Uso de sensores de pressão | 5,0% | 7,00 |
| Correção de vazamentos (inclusive selagem) | 2,5% | 12,00 |
| Manutenção preditiva | 9,0% | 14,00 |
| Substituição de impelidor | 15,0% | 21,00 |
| Remoção do acúmulo de sedimentos | 7,0% | 27,00 |
| Instalação de variador de frequência | 15,0% | 42,00 |
| Remoção de incrustação em trocadores de calor | 7,5% | 39,00 |
| Uso de bombas mais eficientes | 15,0% | 120,00 |
| Uso de motores mais eficientes | 3,0% | 214,00 |

Fonte: Elaborado a partir de IEA, 2014

Tabela 12 – Potenciais e Custos de Investimento de MTD Aplicáveis a Sistemas de Ventilação

| Atividades de baixo carbono | Ganhos em eficiência | Investimento (US\$/GJ economizado) |
|--|----------------------|------------------------------------|
| Correção em <i>dampers</i> | 3,0% | 1,00 |
| Remoção do acúmulo de sedimentos | 1,5% | 3,00 |
| Isolamento do fluxo para equipamentos não essenciais | 8,0% | 4,00 |
| Correção de vazamentos (inclusive selagem) | 3,0% | 4,00 |
| Substituição de correias de transmissão | 2,5% | 5,00 |

| Atividades de baixo carbono | Ganhos em eficiência | Investimento (US\$/GJ economizado) |
|---|----------------------|------------------------------------|
| Adequação das condições de admissão do ar | 5,0% | 10,00 |
| Manutenção preditiva | 2,0% | 11,00 |
| Instalação de variador de frequência | 20,0% | 50,00 |
| Dimensionamento adequado de ventiladores | 11,0% | 71,00 |
| Uso de motores mais eficientes | 3,0% | 121,00 |

Fonte: Elaborado a partir de IEA, 2014

Tabela 13 – Potenciais e Custos de Investimento de MTD Aplicáveis a Sistemas de Ar Comprimido

| Atividades de baixo carbono | Ganhos em eficiência | Investimento (US\$/GJ economizado) |
|--|----------------------|------------------------------------|
| Correção de vazamentos e ajuste de controles | 15,0% | 1,00 |
| Redução de perdas de carga | 4,0% | 2,00 |
| Desligamento de equipamentos em espera | 8,0% | 3,00 |
| Eliminação de usos inadequados | 13,0% | 4,00 |
| Manutenção preditiva | 5,0% | 5,00 |
| Substituição de filtros | 2,0% | 6,00 |
| Substituição de drenos (purgadores) | 3,0% | 8,00 |
| Otimização de controles de pressão | 7,0% | 9,00 |
| Instalação de sequenciador | 8,0% | 13,00 |
| Adequação de condições de admissão do ar | 1,0% | 14,00 |
| Dimensionamento adequado de reservatórios | 3,0% | 21,00 |
| Adequação de tubulações | 3,0% | 25,00 |
| Adequação de sistemas de tratamento de ar | 6,0% | 27,00 |
| Correção de perdas de pressão | 3,0% | 28,00 |
| Instalação de variador de frequência | 15,0% | 44,00 |
| Dimensionamento adequado de compressores | 13,0% | 59,00 |
| Otimização de controles automáticos | 4,2% | 23,00 |

Fonte: Elaborado a partir de IEA, 2014

Em Nedo (2008), são apresentadas tecnologias para diferentes setores, com diferentes níveis de detalhamento de custos e benefícios. A Tabela 14 apresenta as tecnologias que poderiam ser aplicadas ao setor de ferroligas.⁴

Tabela 14 – Potenciais e Prazos de Retorno de Investimentos de MTD Aplicáveis ao Setor de Ferroligas

| Atividades de baixo carbono | Potencial de economia de energia | Prazo de retorno do investimento |
|--|----------------------------------|----------------------------------|
| Gerenciamento da pressão de compressores de ar | 10% | - |
| Sistema para detecção de vazamentos de ar comprimido | - | 1,5 anos |
| Correção do fator de potência em motores e outros equipamentos indutivos | 3% | 3,9 anos |
| Transformadores de ultra-alta eficiência | 0,5% | - |
| Emprego de inversores no acionamento de motores | 15% | 1,5 anos |
| Redução da potência de motores de ventiladores de extração de ar | 30% | 4 anos |

Fonte: Elaborado a partir de NEDO, 2008

Por sua vez, Ecotope (2011) detalha medidas aplicáveis ao setor industrial que seriam aplicáveis à produção de ferroligas. Destaca-se que os potenciais de economia são baseados no consumo do sistema específico.

Tabela 15 – Potenciais, Vida Útil e Custos de Atividades de Baixo Carbono Aplicáveis ao Setor de Ferroligas

| Atividades de baixo carbono (sistema) | % economia | % aplicação | Vida útil (anos) | Custo inicial (US\$/MWh) | Custo anual O&M (US\$/MWh) |
|---|------------|-------------|------------------|--------------------------|----------------------------|
| Redução da demanda (ar comprimido) | 20 | 26 | 10 | 60 | 27 |
| Modernização de equipamento (ar comprimido) | 35 | - | 10 | 12,4 | 51 |
| Substituição de equipamento (ar comprimido) | 35 | 17 | 10 | 48 | 27 |
| Uso de luminárias de alta eficiência (iluminação) | 51 | - | 10 | 181 | - |

4 A referência não indica, explicitamente, aplicação para o setor de ferroligas. Essa aplicabilidade é de responsabilidade dos autores.

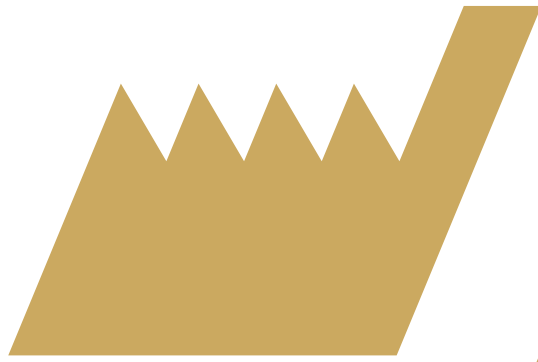
| Atividades de baixo carbono (sistema) | % economia | % aplicação | Vida útil (anos) | Custo inicial (US\$/MWh) | Custo anual O&M (US\$/MWh) |
|---------------------------------------|------------|-------------|------------------|--------------------------|----------------------------|
| Controles (iluminação) | 28 | 15 | 10 | 147 | - |
| Rebobinamento (motores) | 0,5 | - | 10 | 172 | - |
| Modernização de bombas | 8 | 31 | 10 | - | 33 |
| Modernização de transformadores | 1,6 | 17 | 10 | 524 | - |
| Instalação de novos transformadores | 0,4 | 37 | 32 | 569 | - |
| Uso de correias sincronizadoras | 2 | 21 | 10 | 160 | - |

Fonte: Elaborado a partir de ECOTOPE, 2011

Como ações adicionais, IEA (2011) acrescenta a obrigação de níveis mínimos de eficiência energética (MEPS) para equipamentos industriais, como motores, transformadores, compressores e bombas. Em combinação com os MEPS, incentiva ações de treinamento e assessoramento tecnológico, providos pelos governos.

Ainda se destacam, em IEA (2011), intensificação e incentivo pelos governos para adoção de sistemas de gestão energética com base na norma ISO 50.001 ou outros protocolos. Ações de gestão energética incluiriam:

- Identificação e avaliação de oportunidades de redução de consumo, comparação (*benchmarking*), medição e documentação do consumo de energia;
- Implementação das ações;
- Publicidade aos resultados obtidos.



Cenários de referência, baixo carbono e baixo carbono com inovação

Capítulo

3

3 CENÁRIOS DE REFERÊNCIA, BAIXO CARBONO E BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO

Este capítulo apresenta os cenários de referência (REF), baixo carbono (BC) e baixo carbono com inovação (BC+I), com foco no consumo de energia e nas emissões de GEE, construídos para o setor de ferroligas. O horizonte de projeção é 2050, sendo considerados parâmetros reais de consumo de energia e fatores de emissão do *grid* elétrico para o período de 2011 a 2015 (MCTI, 2015; EPE, 2017). Considera-se 2010 o ano-base para as projeções, tendo em vista a ampla disponibilidade de parâmetros, em particular, relativos a produção e consumo de energia (MCTIC, 2016; EPE, 2017).

A técnica de cenários empregada neste estudo não objetiva a realização de previsões para o setor. Trata-se de analisar efeitos, em particular, sobre emissões, de estados futuros possíveis derivados dos pressupostos considerados na modelagem.

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 e capacidades de produção, aspectos sintetizados no capítulo 1. Em seguida, foram determinados critérios e premissas que auxiliaram na projeção do cenário em questão, a qual se tratou de uma abordagem *bottom-up*, ou, como o próprio nome diz, de baixo para cima. De acordo com o então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2010), 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 no segundo capítulo, a partir de critérios que serão discutidos posteriormente. 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 de ruptura podem desempenhar no caso de se tornarem comprovadas e economicamente viáveis (DoD, 2011).

A seguir, serão descritas as premissas assumidas na construção dos cenários, e, em seguida, serão apresentados os resultados em termos de consumo de energia e emissões de GEE. Exclusivamente no cenário BC, serão apresentados os potenciais e custos marginais de abatimento das MTD consideradas.

3.1 CENÁRIO REF

3.1.1 PREMISSAS

A construção do cenário REF do setor de ferroligas 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 e crescimento econômico.

No que se refere ao perfil produtivo, foram consideradas três tecnologias: forno elétrico a arco submerso, motores e equipamentos elétricos diversos (refrigeração, iluminação etc.).

Em seguida, foi definido o perfil energético do setor no ano-base do estudo, qual seja 2010 (EPE, 2017). O principal energético empregado pelo setor naquele ano foi a eletricidade, dado que a principal tecnologia de produção foi o forno elétrico a arco submerso. Os demais insumos energéticos são utilizados como agentes redutores no processo a arco submerso. O consumo de energia para o ano-base de 2010 é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Consumo por Fontes de Energia em 2010

| Fontes de energia | Consumo (mil tep) |
|--|-------------------|
| Gás natural | 2 |
| Coque de carvão mineral | 107 |
| Carvão vegetal e lenha | 660 |
| Eletricidade | 728 |
| Outras fontes secundárias de petróleo e OC | 198 |
| Total | 1.695 |

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

De acordo com Mineral Data (2014), a produção total foi de mais de 1 milhão de toneladas em 2010, considerando-se a produção de ferroligas e silício metálico (Tabela 17).

Tabela 17 – Produção de Ferroligas e Silício Metálico em 2010

| Segmento | Produção (toneladas) |
|------------------|----------------------|
| Ferroligas | 924.749 |
| Silício metálico | 184.189 |
| Total | 1.108.938 |

Fonte: Elaboração própria a partir de MINERAL DATA, 2014

Com base em EPE (2014a; 2014b; 2017), o consumo específico foi de aproximadamente 1,6 tep/tonelada de produto em 2010, sendo o consumo específico de combustíveis de 0,9 tep/tonelada de produto e de eletricidade de 0,68 tep/tonelada de produto.

Tabela 18 – Consumos Específicos

| Fontes de energia | Consumo específico (tep/t) |
|-------------------|----------------------------|
| Combustíveis | 0,90 |
| Eletricidade | 0,68 |
| Total | 1,58 |

Fonte: EPE, 2014a; 2014b; 2017

Para a projeção de produção e consumo de energia do setor, foram consideradas projeções de PIB para o período de 2010 a 2050, convertidas em médias quinquenais (HADDAD, 2015).

Tabela 19 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Demanda Energética do Setor

| Período | Crescimento Médio Anual |
|-----------|-------------------------|
| 2010-2015 | 1,25% |
| 2016-2020 | 1,81% |
| 2021-2025 | 2,04% |
| 2026-2030 | 1,92% |
| 2031-2035 | 1,80% |
| 2036-2040 | 1,70% |
| 2041-2045 | 1,61% |
| 2046-2050 | 1,52% |

Fonte: Elaborado 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 (MCTIC, 2017a; 2017b). Esse cenário incorpora efeitos recentes da crise econômica nos agregados macroeconômicos, que, por certo, afetarão negativamente o crescimento setorial, reduzindo o consumo de energia e as emissões de GEE em relação aos níveis deste cenário REF.

Utilizando-se as taxas de crescimento do PIB e os dados relativos a consumo específico de energia, é possível projetar o consumo de energia do setor até 2050. Para construir a matriz energética por fonte, foram definidas taxas de penetração para cada tipo de combustível utilizado, tendo como base os valores para o ano de 2010, os quais foram obtidos em EPE (2017). A Tabela 20 apresenta as taxas de penetração utilizadas para projetar o consumo de energia pelo setor.

Tabela 20 – Penetrações dos Combustíveis no Cenário de Referência

| Fontes de energia | Taxas de penetração | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Gás natural | 0,12% | 0,15% | 0,20% | 0,25% | 0,30% | 0,33% | 0,35% | 0,40% | 0,70% |
| Coque de carvão mineral | 6,31% | 5,80% | 5,60% | 5,40% | 5,30% | 5,00% | 4,70% | 4,95% | 4,20% |
| Carvão vegetal e lenha | 38,94% | 37,00% | 36,25% | 36,00% | 35,70% | 35,10% | 34,60% | 34,90% | 35,00% |
| Eletricidade | 42,95% | 45,00% | 46,50% | 47,00% | 47,50% | 48,50% | 49,40% | 50,00% | 50,50% |
| Outras fontes secundárias | 11,68% | 12,05% | 11,45% | 11,35% | 11,20% | 11,07% | 10,95% | 9,75% | 9,60% |
| Total | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

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 constantes da Tabela 21, que também foram utilizados na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTIC, 2016). Foram desconsideradas emissões de lenha e carvão vegetal provenientes de florestas comerciais e florestas nativas. No primeiro caso, o fator de emissão é nulo, e, no caso da origem de florestas nativas, as emissões foram desconsideradas para evitar dupla contagem com o setor de Afolu.

Tabela 21 – Fatores de Emissão de CO₂

| Fontes | Fatores de emissão (tCO ₂ /TJ) |
|-------------------------|---|
| Gás natural | 56,1 |
| Coque de carvão mineral | 107,0 |
| Óleo combustível | 77,4 |

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

Para a eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN), foram utilizados os fatores de emissão informados pelo MCTI (2015) (Tabela 22). Para o período de 2017 a 2050, por sua vez, 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, 2017b).

Tabela 22 – Fatores de Emissão de CO₂ do SIN

| Anos ou 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 |

| Anos ou Períodos | Fatores de emissão (tCO ₂ /MWh) |
|------------------|--|
| 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: Elaborado a partir de MCTI, 2015; 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 REF, no qual inexistem 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, 2017b).

3.1.2 RESULTADOS

A partir das premissas descritas, foi possível projetar a produção de ferroligas, conforme Figura 5, até 2050.

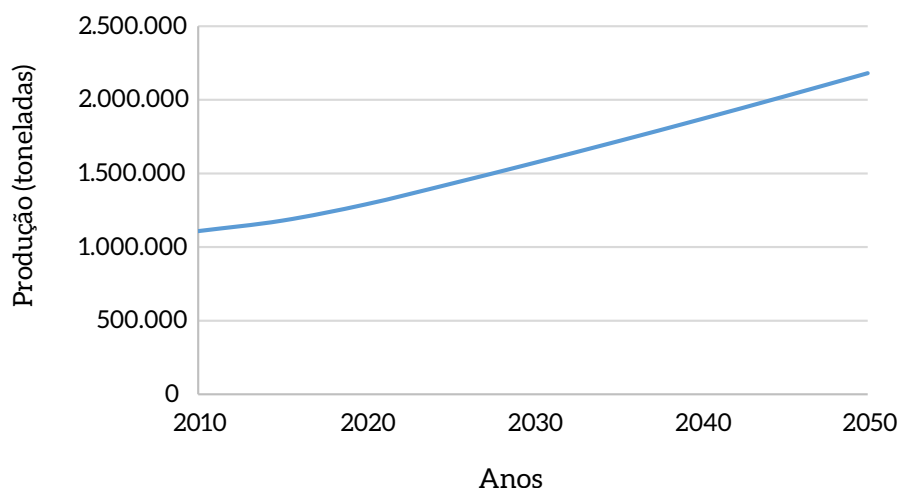


Figura 5 – Produção de Ferroligas até 2050

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

A matriz de consumo de energia, por fontes, relativa ao cenário REF no período de 2010 e 2050, é apresentada na Tabela 23. Observa-se um crescimento no consumo de energia de 110% no período de projeção, com a eletricidade permanecendo como principal fonte energética do setor.

A partir do consumo energético, foram aplicados os fatores de emissão constantes nas tabelas 21 e 22 para projetar as emissões totais de GEE do setor de ferroligas até 2050 (Tabela 24). Observa-se um incremento nas emissões de 101% no período de 2010 a 2050 no cenário REF.

Cumpra enfatizar que a diferença no consumo de energia em 2015, com relação a EPE (2017), deriva das taxas de crescimento consideradas por Haddad (2015) para o quinquênio 2010-2015. Como mencionado, o autor desconsiderou efeitos recentes da recessão econômica sobre o nível de produção do setor, o que implica consumo de energia e emissões de GEE, no referido período, superiores aos patamares reais verificados. Em MCTIC (2017b), é realizado ajuste nas projeções relativas ao período 2010-2015, corrigindo esse desvio de curto prazo.

Tabela 23 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050

| Fontes de energia | Consumo de energia (tep) | | | | | | | | |
|--|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Gás natural | 2.000 | 3.417 | 4.987 | 6.687 | 8.549 | 9.951 | 11.099 | 13.507 | 24.900 |
| Coque de carvão mineral | 107.000 | 132.129 | 139.637 | 144.440 | 151.040 | 150.765 | 149.045 | 167.146 | 149.400 |
| Carvão vegetal e lenha | 660.000 | 842.895 | 903.898 | 962.932 | 1.017.384 | 1.058.374 | 1.097.225 | 1.178.466 | 1.245.002 |
| Eletricidade | 728.000 | 1.025.142 | 1.159.482 | 1.257.161 | 1.353.662 | 1.462.425 | 1.566.559 | 1.688.347 | 1.796.360 |
| Outras fontes secundárias de petróleo e óleo combustível | 198.000 | 274.510 | 285.507 | 303.591 | 319.179 | 333.795 | 347.243 | 329.228 | 341.486 |
| Total | 1.695.000 | 2.278.094 | 2.493.511 | 2.674.810 | 2.849.815 | 3.015.310 | 3.171.171 | 3.376.694 | 3.557.148 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 24 – Emissões Totais de CO₂e de 2010 a 2050

| Ano | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Emissões (tCO ₂ e) | 2.216.595 | 2.979.012 | 3.247.151 | 3.473.184 | 3.697.853 | 3.905.299 | 4.095.166 | 4.300.479 | 4.444.393 |

Fonte: Elaboração própria

3.2 CENÁRIO BC

3.2.1 PREMISSAS

O cenário BC foi construído a partir da penetração de algumas MTD descritas no capítulo 2. Para a seleção das MTD, 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.

Em função desses pressupostos, será considerada, no cenário BC, a introdução das seguintes atividades de baixo carbono:

- Substituição de fornos a arco semicobertos por fornos cobertos;
- Recuperação de CO em gases exaustos e geração de eletricidade;
- Adoção de controle avançado em motores elétricos e inversores de frequência;
- Recuperação de calor e geração de eletricidade em fornos semicobertos;
- Implementação de trocadores de calor mais eficientes.

Para a construção do cenário BC, utilizou-se perfil tecnológico do cenário REF, ou seja, considerando-se três tecnologias: fornos elétricos a arco submerso, motores e equipamentos elétricos diversos.

Os combustíveis consumidos pelo setor no cenário BC, assim como no cenário REF, são: gás natural, coque de carvão mineral, carvão vegetal e lenha, outras fontes secundárias de petróleo e óleo combustível e eletricidade. Porém, foram definidas novas taxas de penetração para cada tipo de combustível utilizado, com o objetivo de reduzir o consumo de outras fontes secundárias de petróleo, óleo combustível e coque de carvão mineral.

Tabela 25 – Penetrações dos Combustíveis no Cenário BC

| Fontes de energia | Taxas de penetração | | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Gás natural | 0,12% | 0,90% | 0,95% | 1,00% | 1,20% | 1,40% | 1,55% | 1,65% | 1,80% |
| Coque de carvão mineral | 6,31% | 5,70% | 5,45% | 5,50% | 4,90% | 4,00% | 3,70% | 2,50% | 2,00% |
| Carvão vegetal e lenha | 38,94% | 37,40% | 36,60% | 36,75% | 37,40% | 37,80% | 37,85% | 39,05% | 39,70% |
| Eletricidade | 42,95% | 45,00% | 46,50% | 47,00% | 47,50% | 48,50% | 49,40% | 50,00% | 50,50% |
| Outras fontes secundárias | 11,68% | 11,00% | 10,50% | 9,75% | 9,00% | 8,30% | 7,50% | 6,80% | 6,00% |
| Total | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

Em seguida, foram definidos potenciais de economia de energia, taxas de penetração, custos de capital e custos de O&M das MTD.⁵ Houve dificuldade, por parte do presente estudo, em encontrar dados referentes à penetração das tecnologias de abatimento para o caso brasileiro, sendo assim, adotaram-se taxas médias obtidas em DEA (2014), que as apresenta para o setor de ferroligas da África do Sul. Em virtude da aplicação restrita, optou-se por limitar em 5% a penetração de controle avançado em motores elétricos e inversores de frequência, assim como trocadores de calor mais eficientes até 2050.

5 Os custos são apresentados originalmente em Rands e foram convertidos para dólares americanos a uma taxa de 1 ZAR = 0,085 US\$. Foi também considerado um parque instalado com capacidade de produção de 400 mil t/ano.

Tabela 26 – Potenciais de Economia de Energia, Taxas de Penetração e Custos das MTD

| Medida | Potencial de economia de energia (%) | Taxa de Penetração até 2050 (%) | Custo de capital (US\$/t) | Custo O&M (US\$/t) |
|---|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Substituição de fornos a arco semicobertos por cobertos | 20 | 95 | 158,4 | 7,9 |
| Recuperação de CO em gases exaustos e geração de eletricidade | 13 | 100 | 104,0 | 5,2 |
| Adoção de controle avançado em motores elétricos e inversores de frequência | 10 | 5 | 9,2 | 0,5 |
| Recuperação de calor e geração de eletricidade em fornos semicobertos | 13 | 95 | 207,9 | 10,4 |
| Implementação de trocadores de calor eficientes | 10 | 5 | 4,0 | 0,2 |

Fonte: Elaboração própria a partir de DEA, 2014

No que concerne à produção do setor, neste cenário, também é projetada de acordo com as taxas apresentadas na Tabela 19. Quanto aos consumos específicos de energia e eletricidade, para o cenário BC, foram utilizados novos valores, considerando os efeitos do potencial de abatimento das medidas de baixo carbono.

Por fim, adotaram-se os mesmos procedimentos do cenário REF para projetar a demanda de energia e emissões de GEE.

3.2.2 RESULTADOS

A partir das premissas descritas, foi possível projetar o consumo de energia e emissões de GEE do setor de ferroligas, no cenário BC, até 2050.

Constata-se que a implementação das MTD implicaria consumo de energia 14% menor, em 2050, com relação ao cenário REF. Grande parte da queda na demanda de energia decorre da eficiência energética, que diminui a demanda elétrica. Mais que isso, a penetração menor de coque de carvão mineral, óleo combustível e outras fontes secundárias de petróleo incentiva o maior consumo de gás natural, que aumenta sua participação na matriz energética do setor.

De fato, grande parte dos setores industriais encontra no gás natural uma oportunidade de reduzir emissões perante energéticos com maior intensidade de carbono. Todavia, uma análise setorial não observa a disponibilidade de gás natural para todos os setores, competição que, inclusive, afeta os seus preços. Conseqüentemente, os custos de abatimento da substituição de combustíveis tendem a ser subestimados, e o potencial de mitigação, ao desconsiderar restrições de oferta, é superestimado.

Trata-se de uma limitação da análise setorial e da metodologia de custos marginais de abatimento, superada pela integração dos cenários BC nos modelos MSB8000, Otimizagro e Efes (MCTIC, 2017b).

A partir da projeção da demanda de energia para o cenário BC, foram calculadas as emissões de CO₂ do setor de ferroligas. Constata-se que a adoção das MTD reduziria as emissões do setor em 27%, em 2050, com relação ao cenário REF.

Tabela 27 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050

| Fontes de energia | Consumo de energia (tep) | | | | | | | | |
|--|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Gás natural | 2.000 | 20.503 | 20.914 | 23.401 | 29.640 | 36.486 | 42.372 | 47.927 | 54.981 |
| Coque de carvão mineral | 107.000 | 129.851 | 119.983 | 128.705 | 121.031 | 104.244 | 101.146 | 72.617 | 61.090 |
| Carvão vegetal e lenha | 660.000 | 852.007 | 805.755 | 859.981 | 923.785 | 985.110 | 1.034.697 | 1.134.277 | 1.212.645 |
| Eletricidade | 728.000 | 1.025.142 | 1.023.706 | 1.099.839 | 1.173.256 | 1.263.963 | 1.350.436 | 1.452.340 | 1.542.534 |
| Outras fontes secundárias de petróleo e óleo combustível | 198.000 | 250.590 | 231.159 | 228.158 | 222.301 | 216.307 | 205.026 | 197.518 | 183.271 |
| Total | 1.695.000 | 2.278.094 | 2.201.517 | 2.340.083 | 2.470.013 | 2.606.110 | 2.733.677 | 2.904.680 | 3.054.522 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 28 – Emissões Totais e Variação com Relação ao Cenário REF de 2010 a 2050

| Ano | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Emissões (tCO ₂) | 2.931.420 | 2.823.117 | 2.968.919 | 3.036.881 | 3.090.119 | 3.179.140 | 3.188.100 | 3.237.902 |
| % redução nas emissões com relação ao cenário REF | -1,6% | -13,1% | -14,5% | -17,9% | -20,9% | -22,4% | -25,9% | -27,1% |

Fonte: Elaboração própria

3.2.3 CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO

Nesta seção, são calculados os custos marginais de abatimento (CMA) das MTD listadas no início deste capítulo. Inicialmente, serão brevemente descritos os procedimentos metodológicos considerados no cálculo desses custos. Em seguida, serão descritas as premissas, em particular, relativas à definição do custo de oportunidade do capital (taxa de desconto) do setor de ferroligas. Por fim, serão apresentados os resultados, com destaque para a curva de CMA, que relaciona potenciais e custos das opções de mitigação até 2050.

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, 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 demandará 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; 2007). Esse custo, para cada opção de mitigação, é determinado a partir do custo incremental com a implementação da medida em comparação com o cenário REF e das emissões anuais evitadas, conforme equação 1:

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

Em que 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, conforme equação 2:

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

Em que 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.

3.2.3.1 PREMISSAS

Para mensurar os custos marginais de abatimento das MTD, inicialmente, 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 de calcular essa taxa 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.

Fez-se uma pesquisa na literatura a respeito das decisões de investimentos específicos e ambientais de negócios do setor no presente e no futuro. Para o cumprimento da etapa de entrevistas com associações e empresas do setor de ferroligas, realizou-se contato com a Confederação Nacional da Indústria (CNI) para tentativa de agendamento de entrevista com a Abrafe, porém não houve

retorno. Agendou-se, então, uma reunião com o Instituto Aço Brasil (IABr), juntamente com o setor de ferro-gusa e aço na expectativa de que alguma informação pudesse ser obtida. A reunião ocorreu no dia 18 de junho de 2015, na sede do IABr, no Rio de Janeiro. Apesar de muito produtiva para o setor de ferro-gusa e aço, a reunião não obteve os mesmos resultados para o setor de ferroligas, pois os agentes presentes não sabiam informar dados desse setor.

Diante disso, foram selecionadas duas taxas de desconto a serem utilizadas no cálculo dos custos de abatimento das MTD para o setor: uma taxa social, de 8% ao ano, e uma taxa de mercado, de 15% ao ano. Essas taxas são compatíveis com estudos da literatura que mensuraram custos de abatimento para setores industriais (HENRIQUES JR., 2010; SCHAEFFER; SZKLO, 2009; RATHMANN, 2012).

Em seguida, foram considerados os parâmetros técnico-econômicos listados na Tabela 10 para mensurar custos marginais de abatimento das MTD. Ainda tendo em vista os dados necessários para aplicação nas equações 1 e 2, fez-se necessário obter os preços de combustíveis constantes na Tabela 29 para serem aplicados no ano-base (2010), visando à obtenção dos CMA.

Tabela 29 – Preços dos Combustíveis

| Combustível | Preço | Unidade |
|-------------------|--------|---------------------|
| Gás natural | 0,65 | US\$/m ³ |
| Óleo combustível | 0,53 | US\$/litro |
| Coque de petróleo | 70,00 | US\$/bbl |
| Carvão vegetal | 47,70 | US\$/m ³ |
| Lenha | 30,00 | US\$/m ³ |
| Eletricidade | 147,85 | US\$/MWh |

Fonte: Elaboração própria com base em EPE, 2017

Em seguida, foi necessário projetar preços dos combustíveis para obtenção dos custos marginais de abatimento até 2050. Para tanto, foram analisados cenários de preços de petróleo, dos quais derivam preços dos insumos energéticos (Tabela 30). Nos cálculos de CMA realizados pela taxa de desconto de mercado, o preço do petróleo foi considerado constante. No caso, US\$ 75 por barril. Trata-se de um preço de robustez do petróleo, que é conservador para não subestimar os custos de abatimento das medidas. No caso da taxa de desconto social, foi considerada a evolução de preços de petróleo do cenário *Low Price Case* do EIA (EIA, 2015).

Tabela 30 – Preços de Petróleo Considerados para o Cálculo do Custo Marginal de Abatimento das Possibilidades de Mitigação

| Taxa de desconto | Preço do petróleo (US\$/barril) | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| 15% ao ano (ótica de mercado) | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |
| 8% ao ano (ótica social) | 60 | 55 | 75 | 90 | 105 | 120 | 135 | 140 | 145 |

Fonte: Elaboração própria com base em EIA, 2015

Perante os cenários de preços do petróleo, foram projetados preços dos insumos energéticos para mensuração dos CMA segundo a taxa de desconto social (Tabela 31). Cumpre destacar que esse procedimento não é necessário para aplicação ao cálculo com taxa de desconto de mercado, dado que o preço de petróleo é constante no período. Logo, são considerados os preços dos insumos energéticos apresentados na Tabela 29.

Tabela 31 – Preços dos Combustíveis e da Eletricidade para a Taxa de Desconto de 8% ao ano

| Combustíveis | Unidade | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|-------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Gás natural | US\$/m ³ | 0,65 | 0,65 | 0,89 | 1,06 | 1,24 | 1,42 | 1,60 | 1,66 | 1,72 |
| Coque de petróleo | US\$/bbl | 70,00 | 70,00 | 71,40 | 73,40 | 77,80 | 81,20 | 94,30 | 101,70 | 108,90 |
| Lenha | US\$/m ³ | 30,0 | 30,0 | 35,7 | 35,6 | 35,9 | 36,2 | 35,3 | 27,3 | 24,2 |
| Óleo combustível | US\$/litro | 0,53 | 0,53 | 0,73 | 0,87 | 1,02 | 1,16 | 1,31 | 1,35 | 1,40 |
| Carvão vegetal | US\$/m ³ | 47,7 | 47,7 | 56,3 | 58,2 | 53,7 | 55,0 | 54,4 | 54,5 | 56,4 |
| Eletricidade | US\$/MWh | 147,85 | 147,85 | 201,61 | 241,94 | 282,26 | 322,58 | 362,90 | 376,34 | 389,78 |

Fonte: Elaboração própria

3.2.3.2 RESULTADOS

A Tabela 32 e a Tabela 33 apresentam custos e potenciais acumulados de abatimento das MTD com taxas de desconto de 8% e de 15%, respectivamente.

Tabela 32 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 8% ao ano

| MTD | Custo de abatimento (US\$/tCO ₂) | Potencial de abatimento (MtCO ₂) |
|---|--|--|
| Substituição de fornos a arco semicobertos por fornos cobertos | -616,13 | 11,23 |
| Adoção de controle avançado em motores elétricos e inversores de frequência | -479,33 | 0,01 |
| Recuperação de CO em gases exaustos e geração de eletricidade | -615,54 | 7,30 |
| Recuperação de calor e geração de eletricidade em fornos semicobertos | -561,54 | 7,30 |
| Implementação de trocadores de calor mais eficientes | -666,86 | 0,30 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 33 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 15% ao ano

| MTD | Custo de abatimento (US\$/tCO ₂) | Potencial de abatimento (MtCO ₂) |
|---|--|--|
| Substituição de fornos a arco semicobertos por fornos cobertos | -346,40 | 11,23 |
| Adoção de controle avançado em motores elétricos e inversores de frequência | -261,71 | 0,01 |
| Recuperação de CO em gases exaustos e geração de eletricidade | -345,96 | 7,30 |
| Recuperação de calor e geração de eletricidade em fornos semicobertos | -305,07 | 7,30 |
| Implementação de trocadores de calor mais eficientes | -384,83 | 0,30 |

Fonte: Elaboração própria

É possível notar que, para todas as medidas, os custos de abatimento calculados com a taxa de 15% são maiores do que os custos calculados com a taxa de 8%. Esse aspecto já era esperado, dado que o fator de recuperação de capital para o primeiro caso é maior, o que consequentemente aumenta o valor presente do investimento a ser realizado, bem como o custo da medida. Além disso, nota-se que todos os custos de abatimento são negativos, o que demonstra viabilidade econômica das atividades de baixo carbono independentemente da taxa de desconto. Todavia, isso não significa que as medidas possam ser implementadas, uma 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 da disponibilidade de crédito para realização dos investimentos. Tais aspectos serão brevemente analisados no capítulo 4.

As curvas de custos de abatimento podem ser construídas no nível de tecnologia/atividade ou setor/programa. As curvas no nível de tecnologia/atividade são mais simples e avaliam cada opção de mitigação separadamente, com base nos seus custos e emissões evitadas. Assim, os efeitos de uma medida não afetam as demais. Para as curvas no nível de setor/programa, as medidas avaliadas têm influência umas sobre as outras (SCHAEFFER et al., 2015). As curvas obtidas neste trabalho foram construídas no nível de tecnologia/atividade (Figura 6 e Figura 7).

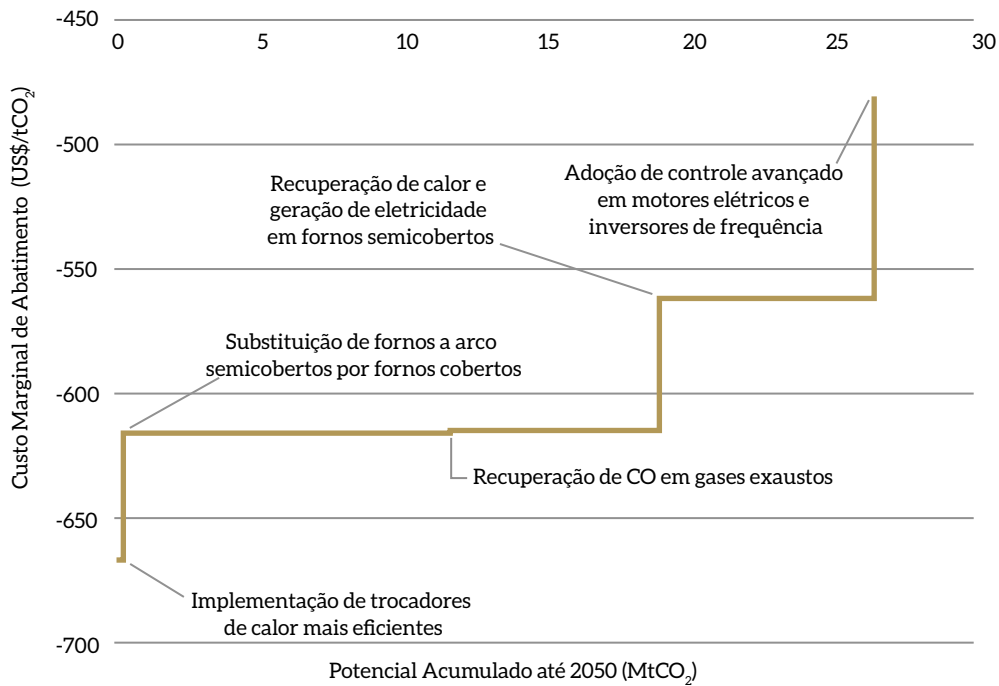


Figura 6 - Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 8%

Fonte: Elaboração própria

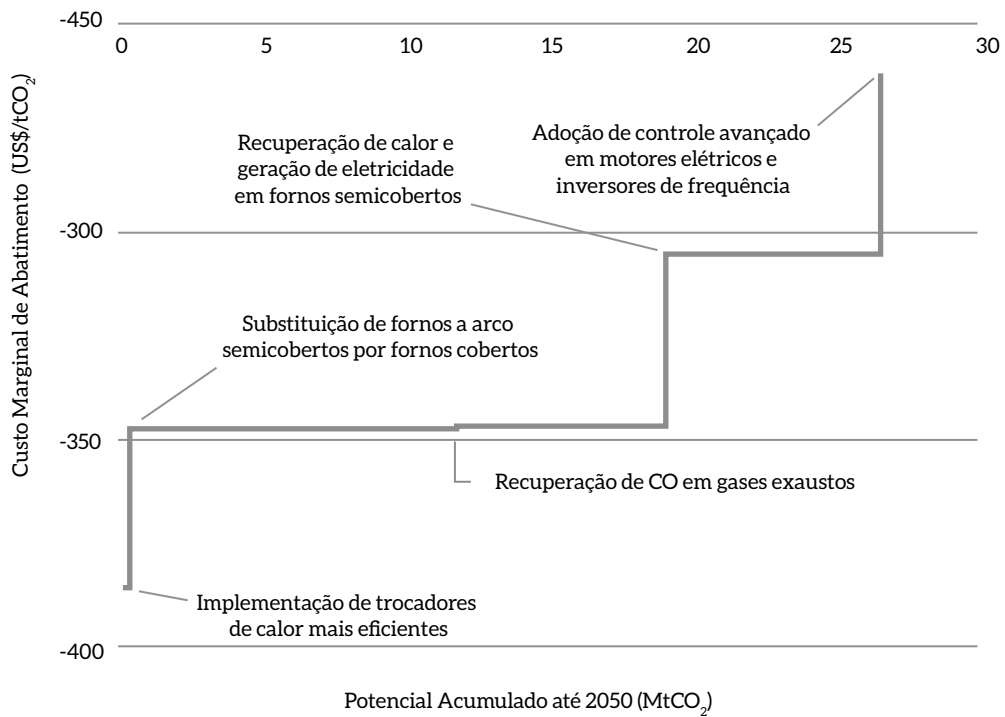


Figura 7 - Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 15%

Fonte: Elaboração própria

O potencial demonstrado na Figura 6 e na Figura 7 representa a redução acumulada das emissões das medidas aplicadas até 2050. O potencial total em 2050 foi estimado em 26,1 MtCO₂.

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. Tal aspecto justifica a publicação do documento *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, que deve ser utilizado como referencial para avaliação das oportunidades setoriais de mitigação de emissões de GEE (MCTIC, 2017b).

3.3 CENÁRIO BC+I

Esta seção, 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 ferroligas.

Algumas tecnologias que serão descritas já vêm sendo testadas, mas ainda não se encontram na fase comercial. Logo, podem ser classificadas em níveis de prontidão tecnológica (TRL) inferiores a 7, que indicam que se encontram em fase de pesquisa, desenvolvimento e/ou demonstração (PD&D) para aplicação no setor.

3.3.1 TECNOLOGIAS INOVADORAS PARA O SETOR

Segundo CNI (2009), o desenvolvimento e o emprego de tecnologias inovadoras em processos industriais capazes de reduzir consumo de energia, geração de resíduos e emissão de GEE, bem como de contribuir para o aumento da competitividade das plantas, constitui objetivo fundamental da indústria na atualidade. Mais que isso, segundo IEA (2015a), sua adoção é essencial para cumprir as metas climáticas de longo prazo e promover a segurança energética de forma custo-efetiva.

Os nichos em que pesquisas e validações de novas tecnologias estão em andamento, no setor de ferroligas, compreendem o tratamento de ferro-cromo em conversor a vácuo com CO₂; a refinação do ferro-manganês pelo processo AOD; o processo TecnoRed para produção de ferro-cromo; forno

a arco submerso de dois estágios na produção de ferro-cromo; novos processos para aglomeração de finos na produção de ferro-níquel; novos processos para a fundição redutora metalúrgica direta do minério fino em fornos a arco elétrico especializados para a produção de ligas de Fe-Ni e escória; e tecnologias de valorização de escória para converter a escória produzida, mediante o processamento de fase quente ou frio, em produtos de alto valor agregado na produção de ferro-níquel.

A seguir, serão brevemente descritas as tecnologias de ruptura listadas.

3.3.1.1 TRATAMENTO DE FERRO-CROMO EM CONVERSOR A VÁCUO COM CO₂

De acordo com Germershausen et al. (2013), a tecnologia de tratamento de ferro-cromo em conversor a vácuo com CO₂ é uma alternativa ao tratamento convencional, a qual possibilita redução no consumo de material sólido utilizado para o resfriamento do ferro-cromo de até 50% devido ao arrefecimento ocasionado pelo CO₂. A reação fortemente endotérmica do CO₂ com o material fundido permite controle exato do processo de refinação e de sua temperatura.

Dependendo do teor de carbono final, é necessário reduzir a pressão de monóxido de carbono como força motriz de descarbonização, a qual é controlada pela pressão externa. A pressão pode ser obtida por um sistema de vácuo. Para descarbonizações mais profundas, pode-se utilizar a injeção de gás inerte.

Essa tecnologia está relacionada a todos os processos de refino de ferroligas, independentemente das condições iniciais das matérias-primas. Suas principais vantagens consistem em:

- Redução das perdas térmicas devido ao tratamento completo em um vaso;
- Menores custos de investimento;
- Economia de custos operacionais como refratários, gases de processo, agentes redutores;
- Menores teores de nitrogênio e hidrogênio no produto final;
- Baixo consumo do material de refrigeração.

Segundo Germershausen et al. (2013), o potencial de economia de energia elétrica dessa tecnologia é de aproximadamente 50 kWh/tonelada de produto.

3.3.1.2 REFINAÇÃO DE FERRO-MANGANÊS PELO PROCESSO AOD

De acordo com Germershausen et al. (2013), após a redução carbotérmica em forno a arco submerso, a liga de ferro-manganês ainda contém elevada quantidade de carbono. Logo, o metal, com temperatura de cerca de 1.350°C, é transferido para o conversor AOD. A descarbonização de FeMnHC tem o objetivo de diminuir o teor de carbono para um nível correspondente às exigências metalúrgicas e comerciais. O alto teor inicial de carbono e a sua elevada afinidade com o oxigênio tornam o processo fortemente exotérmico, o que, por sua vez, aquece o metal, requerendo refrigeração altamente eficiente.

A temperatura do processo de refinação de manganês deve se dar entre 1.700°C e 1.750°C. Níveis de temperatura mais elevados levam a vários problemas, como ataque ao refratário, processo de fundição complicado, devido ao superaquecimento do metal, e difícil separação metal/escória. Outro problema encontrado é a pressão de vapor muito elevada de manganês, levando a excessiva evaporação e oxidação pelo oxigênio em excesso.

Nessa tecnologia, o manganês oxidado é recolhido principalmente como Mn_3O_4 no sistema de limpeza de gás. O pó de óxido pode ser aglomerado e reciclado para a recuperação de Mn. A economia do processo é altamente dependente da recuperação de manganês na liga refinada. O rendimento total de manganês com esse processo é aproximadamente 92% acima da tecnologia convencional.

3.3.1.3 PROCESSO TECNORED PARA PRODUÇÃO DE FERRO-CROMO

Segundo Zambrano (2009), o processo TecnoRed presta-se à produção de ferroligas por meio da redução-fusão, utilizando aglomerados autorredutores curados a frio e produzidos a partir de finos de cromita e um agente carbonoso redutor, como finos de carvão mineral, carvão vegetal ou coque de petróleo. Tais materiais são misturados com agentes fluxantes e ligantes e são aglomerados em discos de pelletização tradicional para produção de pelotas ou em briquetadoras para produção de briquetes. Os aglomerados são curados em secadores especiais, o que lhes confere propriedades mecânicas necessárias para atender solicitações de manuseio externo e de processo. Após isso, são carregados no forno TecnoRed, caracterizado por duas inovações: alimentação lateral de combustível e queima secundária. A alimentação lateral previne a ocorrência de reação de gaseificação de carbono na cuba superior do forno, o que resulta em economia de combustível, e a queima secundária, através da energia gerada pela combustão do CO vindo das regiões inferiores do forno, supre a energia necessária para as reações endotérmicas de redução, mantendo o perfil térmico na cuba superior do forno.

Ainda de acordo com o autor, esse processo foi concebido primeiramente para a produção de ferro-gusa e está sendo consolidado em nível industrial pela Gerdau, porém para a produção de ferro-cromo, e ainda pode ser considerado um processo inovador que necessita de maior consolidação e melhoras na eficiência e na recuperação de cromo. A Figura 8 apresenta o esquema do forno TecnoRed.

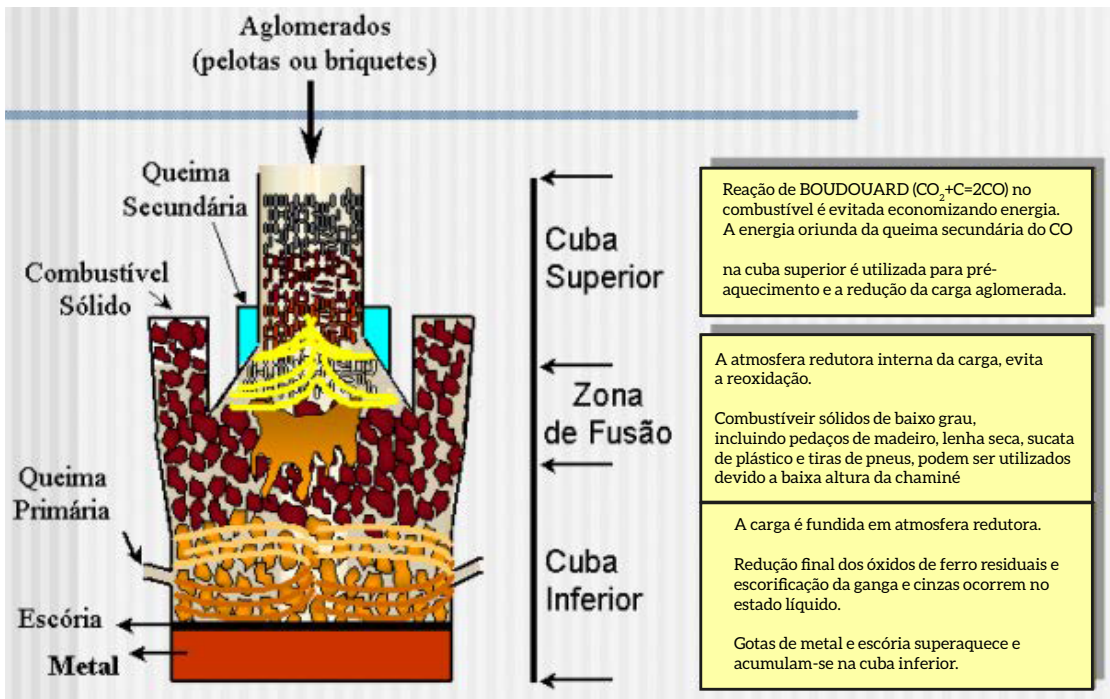


Figura 8 - Esquema do Forno TecnoRed

Fonte: CONTRUCCI et al., 1994

Segundo IETD (2015), o tempo de residência no forno TecnoRed é muito inferior ao do forno convencional, de 30 a 40 minutos, com taxa de metalização de até 99%.

3.3.1.4 FORNO A ARCO SUBMERSO DE DOIS ESTÁGIOS NA PRODUÇÃO DE FERRO-CROMO

A inovação trazida pelo forno a arco submerso de dois estágios consiste em produzir SiCr no primeiro estágio, o qual é carregado, juntamente com o minério de cromo, no segundo estágio.

Essa combinação de processos possibilita um teor de carbono menor do que 0,05% no produto final. Suas principais vantagens são menor custo energético e melhores rendimentos (SMS GROUP, 2013).

3.3.1.5 FORNO DE SOLEIRA ROTATIVA NA PRÉ-REDUÇÃO DE CROMITA

De acordo com European Commission (2014), essa tecnologia, capaz de pré-reduzir cromitas, pode ser considerada emergente no setor de ferroligas. Nela, finos de cromita são peletizados utilizando carvão como agente redutor, carregados em monocamadas estacionárias no forno de soleira rotativa, sendo descarregados após uma rotação.

As vantagens da tecnologia incluem (SLATTER, 1995) rápida metalização (15-20 minutos) a altos níveis (80%) e a temperaturas em torno de 1.450°C; e baixo custo de manutenção, se comparada aos fornos rotativos convencionais.

3.3.1.6 PRÉ-TRATAMENTO DE MINÉRIOS DE MANGANÊS

De acordo com Gordon e Nell (2013), o pré-tratamento de minério de manganês antes de sua fundição oferece oportunidade de redução de consumo de energia elétrica e coque de carvão mineral, assim como aumento da produtividade na produção de ferro-manganês. As tecnologias de pré-tratamento incluem:

- Calcinação num forno vertical ou rotativo para decompor minerais de carbonato sob condições parcialmente oxidantes ou redutoras. Essa tecnologia atenua liberação de CO₂ no forno a arco submerso, mas não serve para aglomeração de finos de minério;
- Aglomeração de finos de minério em forno rotativo sob condições de redução para decompor minerais de carbonato e reduzir o manganês para o estado bivalente de oxidação;
- Peletização de minério ultrafino para fornecer alimentação bem dimensionada, seguida de endurecimento para decompor minerais de carbonato;
- Sinterização *steel belt* para eliminar os finos de minério e remover CO₂;
- Sinterização *travelling grate* para aglomerar finos de minério e remover CO₂.

Dentre as tecnologias citadas, as que ainda não estão provadas em escala industrial para a produção de ferro-manganês são calcinação, peletização e sinterização *steel belt*. Para tais tecnologias, os consumos de eletricidade estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Consumo de Combustíveis e Eletricidade das Tecnologias de Pré-tratamento de Minério de Manganês

| Parâmetros | Tecnologias | | |
|---------------------------------|---|-------------|--------------------------------|
| | Calcinação | Peletização | Sinterização <i>steel belt</i> |
| Consumo de combustíveis (GJ/t) | 3,7 (forno vertical) a 4,6 (forno horizontal) | 1,1 | 1,8 |
| Consumo de eletricidade (KWh/t) | 20-40 | 30 | 45-80 |

Fonte: Elaboração própria com base em GORDON; NELL, 2013

Ainda de acordo com McCullough et al. (2010), o pré-tratamento de minérios é capaz de reduzir o consumo de eletricidade na etapa de fundição do processo em até 60% e o consumo de carvão metalúrgico em até 65%.

3.3.1.7 PROCESSOS INOVADORES PARA A PRODUÇÃO DE FERRO-NÍQUEL

De acordo com EC (2014), a SMS Siemag tem realizado investigações que visam desenvolver, testar e demonstrar rotas tecnológicas viáveis para o processamento de Ni e incluem:

- Novos processos para a aglomeração de finos, o que permitirá a fusão redutora dos finos aglomerados em fornos a arco elétrico convencionais (EAF) para a produção de ligas de Fe-Ni e escória;

- Novos processos para a fundição redutora metalúrgica direta do minério fino em fornos a arco elétrico especializados para a produção de ligas de Fe-Ni e escória, usando: i) tecnologia EAF com eletrodo oco ou sistema de alimentação de lança, tecnologia já disponível em outras aplicações industriais, mas nunca aplicada na redução de minérios lateríticos; ii) tratamento de resíduos em EAF, tecnologia inovadora que permitirá alimentação mais eficiente de minério fino no forno e da qual se espera menor consumo de energia;
- Tecnologias de valorização de escória para converter a escória produzida via processamento de fase quente ou frio em produtos de alto valor agregado, como: i) amorfos materiais siliciosos com propriedades hidráulicas e pozolânicas melhoradas para serem usadas como aditivos para cimento; ii) produtos de lâ mineral para aplicações de isolamento termoacústico; iii) produtos geopoliméricos para aplicações em construção e isolamento (tijolos, telhas etc.).

No que concerne aos novos processos, a SMS Siemag está desenvolvendo um novo forno elétrico a arco equipado com um sistema de alimentação inovador capaz de tratar direta e eficientemente o minério laterítico para a produção de ferro-níquel sem qualquer perda de material no *off-gas*. O minério, independentemente do seu tamanho de partícula, é introduzido diretamente no EAF, enquanto a utilização de um forno rotativo não será mais necessária. Isso resultará em poupança significativa de energia e em aumento da produtividade de todo o processo. O processo proposto pode ser aplicado universalmente e permitirá tratar economicamente graus hoje não explorados de minérios lateríticos.

Todas as tecnologias apresentadas para o ferro-níquel serão estudadas em escala de bancada e em escala piloto com construção e ensaio de fornos até 1 MVA. As pesquisas em todas as três rotas permitirão o desenvolvimento de um processo de zero desperdício e economicamente viável para a exploração de finos de Ni de baixo grau.

3.3.2 PREMISSAS

Considerou-se o nível TRL igual a 7 como a linha de corte para distinguir as tecnologias emergentes ou disruptivas das MTD. Abaixo de TRL 7, as tecnologias poderão ser consideradas no cenário BC+I, o que implica atividades de baixo carbono em estágio de PD&D. Mais que isso, foram consideradas somente tecnologias que têm parâmetros capazes de avaliar os efeitos sobre o consumo de energia e emissões de GEE decorrentes da sua inserção nos processos produtivos do setor de ferroligas.

A Tabela 35 apresenta os potenciais de redução no consumo de energia das tecnologias de ruptura consideradas no cenário BC+I.

Tabela 35 – Potenciais de Economia de Energia por Tecnologia de Ruptura Considerada no Cenário BC+I

| Tecnologias | Potencial de Redução de Consumo de Energia |
|--|--|
| Tratamento de ferro-cromo em conversor a vácuo com CO ₂ | Redução no consumo de eletricidade de 50 kWh/t produto. |
| Pré-tratamento de minérios de manganês | Redução de até 60% no consumo de eletricidade e até 65% no consumo de coque de carvão mineral. |

Fonte: Elaboração própria

Para converter o potencial de abatimento das emissões em percentuais de redução no consumo energético, foram consideradas as projeções das emissões de CO₂, do consumo de energia do setor de ferroligas, além da penetração de cada tecnologia inovadora a partir da fórmula a seguir para cada ano (i), conforme equação 3:

$$\text{Redução de energia (Mtep)} = \frac{\text{Consumo de energia}}{\text{Emissões (MtCO}_2\text{)}} \times \text{Redução das emissões (MtCO}_2\text{)} \quad (\text{Equação 3})$$

A redução das emissões está atrelada ao potencial de mitigação e à taxa de penetração anual de cada tecnologia inovadora. Considerou-se que todas as tecnologias entrariam em operação em 2035 e foram adotadas taxas máximas de penetração (Tabela 36) para cada uma, partindo do princípio de que estão em fase de bancada, sem aplicações industriais comprovadas, o que limita sua entrada no cenário BC+I.

Tabela 36 – Taxas de Penetração das Tecnologias Inovadoras de 2010 a 2050

| Tecnologia/Anos | Taxa de penetração | | | | | | | | |
|--|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Tratamento de ferro-cromo em conversor a vácuo com CO ₂ | - | - | - | - | - | 30% | 35% | 40% | 45% |
| Pré-tratamento de minérios de manganês – eletricidade | - | - | - | - | - | 40% | 45% | 50% | 55% |
| Pré-tratamento de minérios de manganês – coque de carvão mineral | - | - | - | - | - | 40% | 45% | 50% | 55% |

Fonte: Elaboração própria

Por fim, adotaram-se os mesmos procedimentos do cenário REF para projetar a demanda de energia e emissões de GEE.

3.3.3 RESULTADOS

A partir de informações sobre potencial de redução de energia das tecnologias inovadoras, foi possível projetar o consumo de energia e emissões no cenário BC+I. As tabelas 37 e 38 sintetizam essas informações.

Tabela 37 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050

| Fontes de energia | Consumo de energia (tep) | | | | | | | | |
|--|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2010 | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Gás natural | 2.000 | 20.503 | 20.914 | 23.401 | 29.640 | 36.486 | 42.372 | 47.927 | 54.981 |
| Coque de carvão mineral | 107.000 | 129.851 | 119.983 | 128.705 | 121.031 | 77.141 | 71.561 | 49.016 | 39.251 |
| Carvão vegetal e lenha | 660.000 | 852.007 | 805.755 | 859.981 | 923.785 | 985.110 | 1.034.697 | 1.134.277 | 1.212.645 |
| Eletricidade | 728.000 | 1.025.142 | 1.023.706 | 1.099.839 | 1.173.256 | 984.406 | 1.012.575 | 1.046.985 | 1.066.984 |
| Outras fontes secundárias de petróleo e óleo combustível | 198.000 | 250.590 | 231.159 | 228.158 | 222.301 | 216.307 | 205.026 | 197.518 | 183.271 |
| Total | 1.695.000 | 2.278.094 | 2.201.517 | 2.340.083 | 2.470.013 | 2.299.449 | 2.366.230 | 2.475.725 | 2.557.133 |

Fonte: Elaboração própria

Tabela 38 – Emissões Totais e Variação com Relação ao Cenário BC de 2010 a 2050

| Ano | 2015 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Emissões (tCO ₂) | 2.931.420 | 2.823.117 | 2.968.919 | 3.036.881 | 2.562.526 | 2.555.720 | 2.493.433 | 2.449.137 |
| % redução nas emissões com relação ao cenário BC | - | - | - | - | -17,1% | -19,6% | -21,8% | -24,4% |

Fonte: Elaboração própria

Constata-se que grande parte da redução no consumo energético decorre da eletricidade, a qual apresenta redução de 31% com relação ao cenário BC em 2050. Mais que isso, a introdução das tecnologias de ruptura aumenta o potencial de mitigação de emissões em 24%, com relação ao cenário BC, em 2050.

Dadas as projeções da demanda de energia dos cenários REF e BC e a projeção do cenário BC+I, a Figura 9 mostra o consumo de energia dos três cenários. A adoção de MTD no cenário BC e de tecnologias de ruptura no cenário BC+I implicam reduções no consumo energético, com relação ao cenário REF, de 14% e 28%, respectivamente.

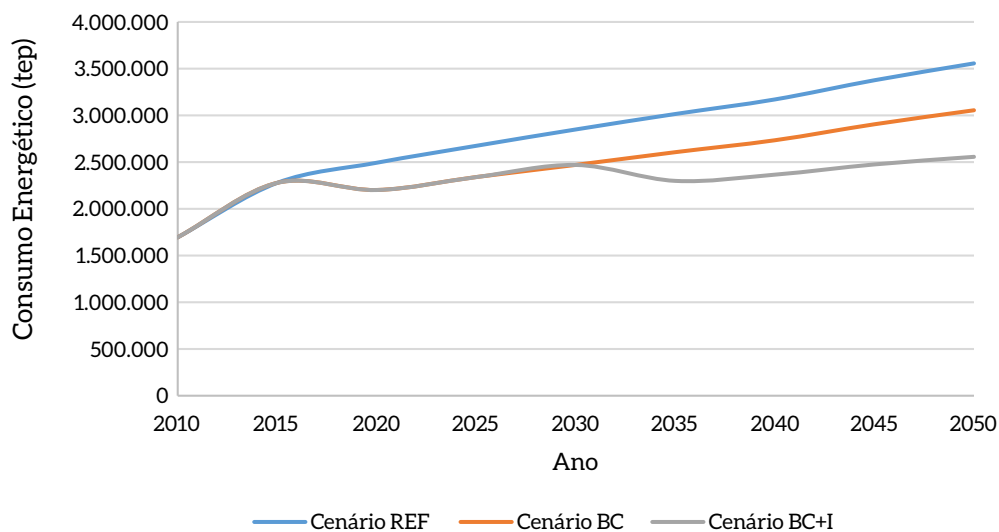


Figura 9 – Consumo Energético dos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

A Figura 10 apresenta as emissões de GEE nos cenários REF, BC e BC+I. Verifica-se que o potencial de redução de emissões no cenário BC e BC+I, com relação ao cenário REF, em 2050, é de 27% e 45%, respectivamente.

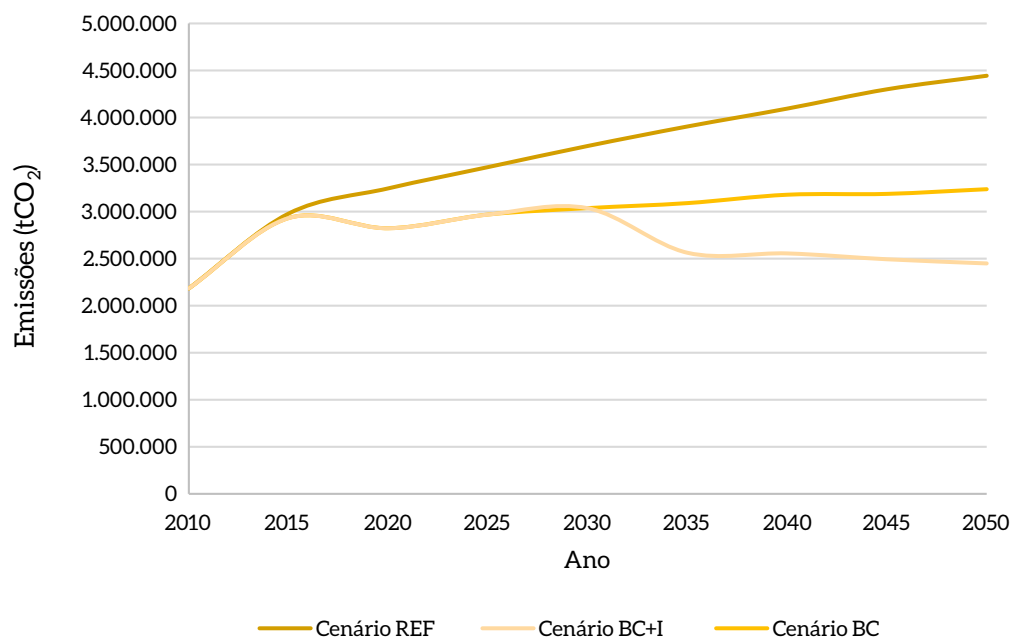



Figura 10 – Emissões Totais de CO₂ dos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

Dentre as tecnologias consideradas para a construção do cenário BC+I, o pré-tratamento de minérios de manganês pode ser considerado a mais relevante para o alcance de redução expressiva de emissões de CO₂ em relação ao cenário BC. Isso ocorre porque, além de as taxas de penetração consideradas para a medida em questão serem maiores do que as taxas consideradas para a tecnologia de tratamento de ferro-cromo em conversor a vácuo com CO₂, os potenciais de economia de energia são maiores, assim como a medida de pré-tratamento possibilita redução no consumo de carvão metalúrgico, o qual, por sua vez, tem fator de emissão cerca de três vezes maior do que o fator de emissão considerado para a eletricidade.

Ainda que o potencial de mitigação seja significativo, 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 adoção dos cenários de baixo carbono

Capítulo

4

4 SUBSÍDIOS À FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO

Perante o mapeamento das oportunidades de mitigação, este capítulo, 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 ferroligas.

Pôde-se constatar um potencial acumulado de abatimento de 26,1 MtCO₂ no cenário BC, com a totalidade desse montante apresentando custos de abatimento negativos segundo taxas de desconto social e de mercado. Entretanto, mesmo que todas as atividades de baixo carbono sejam atrativas sob o ponto de vista econômico, 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 maior, qual seja de 45% de redução de emissões com relação ao cenário REF, em 2050. Todavia, são medidas mitigadoras de emissão distantes da aplicabilidade no setor, 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 PD&D.

As lacunas associadas à não aditividade e à competição por tecnologias de baixo carbono são superadas por meio da técnica de integração de cenários adotada pelo projeto (MCTIC, 2017b). 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 em fornos semi-cobertos e a recuperação de CO em gases de exaustos, perante o conjunto de medidas com custo de abatimento negativo (Tabela 32 e Tabela 33), são verdadeiramente custo-efetivas no horizonte de implementação até 2050. E, mesmo que tenham custo-efetividade, exigem a remoção de barreiras para sua adoção, pois não fazem parte, em sentido amplo, do *baseline* setorial.

Com o 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 neste capítulo:

- i)** Identificação de barreiras e cobenefícios à adoção de medidas de baixo carbono no setor;
- 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 do cenário BC.

4.1 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS À IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES 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.

Existem problemas específicos para cada setor industrial e problemas específicos relacionados ao porte das empresas que são aplicáveis ao setor de ferroligas. CNI (2009) identificou barreiras comuns entre os diversos setores industriais que impedem o aproveitamento dos potenciais de eficiência energética:

- Não existem linhas de financiamento ou as existentes são inadequadas para as ações de eficiência energética;
- Existe competição entre a racionalização do uso de energia e prioridades de investimento;
- Existe necessidade de capacitação de pessoal para a correta identificação de oportunidades de eficiência energética e para a gestão dos projetos que se mostrarem viáveis;
- Novas tecnologias de eficiência podem significar riscos técnicos na visão da empresa.

No cenário BC, foram avaliadas exclusivamente as MTD de eficientização energética, e todas apresentam custos de abatimento negativos. Embora as medidas sejam economicamente viáveis, faz-se necessário realizar investimentos significativos para implementá-las. 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 a realização de investimento em medidas viáveis economicamente, pois a conjuntura econômica recessiva afeta a capacidade financeira das empresas e impede que o governo conceda crédito com taxas de juro atrativas junto aos bancos públicos de fomento. 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 de consumo durável, como é o caso de produtos derivados do setor de ferroligas, o que dificulta a realização de investimentos pelo setor 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).

No caso das medidas viáveis sob o ponto de vista econômico e menos complexas, como é o caso da recuperação de calor e CO de gases de exausto, 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.

No nível institucional e regulatório, a obtenção de crédito para o financiamento das atividades de baixo carbono 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. Ainda no âmbito regulatório, a inexistência de padrões de eficiência energética e/ou limites de emissões se constituem em barreiras à implementação de atividades de baixo carbono.

Em termos comportamentais e informacionais, muitos atores do setor desconhecem a relação custo-benefício das medidas que resultam em eficiência 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. Esse aspecto pode resultar em sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias. 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. Além disso, não necessariamente, é possível a incorporação de novas tecnologias nos processos produtivos do setor, 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. A importação de tecnologias, como é o caso das medidas inovadoras avaliadas no cenário BC+I, pode retardar ou impedir sua introdução, inviabilizando ganhos em termos de produtividade e economia de energia (CURRÁS, 2010).

Ainda no que se refere 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 na China, na Coreia do Sul, nos EUA e no Japão, o período médio é inferior a 3 anos (LICKS, 2017).

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;
- 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 e associadas à fase de implementação das tecnologias de baixo carbono; entre outros.

4.2 SÍNTESE DAS 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 da 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 11, 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, é necessário avançar na proposição de instrumentos econômico-financeiros e regulatórios para viabilizar a transição dessas atividades para uma economia de baixo carbono.

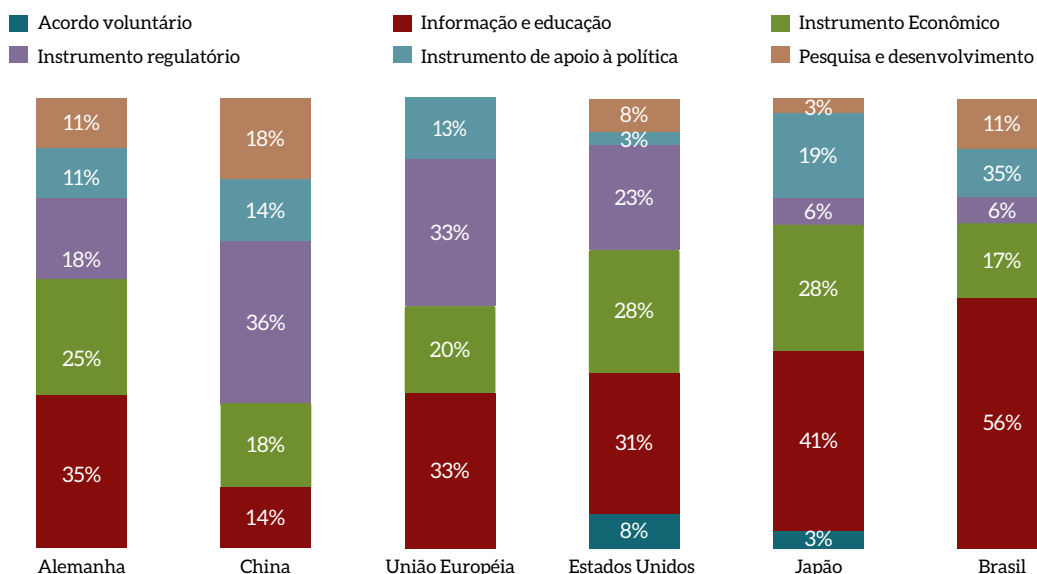


Figura 11 - Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria

Fonte: Elaborado a partir de WORLD ENERGY COUNCIL, 2013

A partir de pesquisa bibliográfica em documentos internacionais como World Energy Council (2013) e IEA (2015b), 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 de 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).

Medidas mitigadoras, medidas de adaptação e 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, 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, 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 CTPI;
- 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 as 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.

4.3 INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO

Para remover barreiras econômicas e de mercado, tendo em vista que a disponibilização de crédito e subvenção econômica é suscetível e associada às políticas fiscal e monetária e que 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 “Financiamento a empreendimentos – 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 de tecnologias de ruptura. Nesse caso, optando-se pela taxação 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).

Finalmente, para remover a barreira relacionada à associação do custo das tecnologias inovadoras de baixo carbono à volatilidade cambial, 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 o estabelecimento de metas de efficientização energética e a 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 da Abrafe. O instrumento seria implementado a partir de 2020 e seria condicionado a estudo de curto prazo sobre o impacto orçamentário decorrente da sua adoção.

Um instrumento que promoveria, transversalmente, a adoção de atividades de baixo carbono no setor seria sua inclusão no Plano Indústria, ou aquele que vier a sucedê-lo, tendo em vista a estratégia de implementação da NDC brasileira. Seria uma medida simples, a qual poderia ser implementada no curto prazo pelo MDIC.

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 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 realização de auditorias energéticas, apresentação de inventários corporativos para médias e grandes empresas e cumprimento de metas de eficiência energética e/ou emissões de GEE. Tais instrumentos poderiam ser implementados em parceria entre o MMA, MF e MDIC, com horizonte de implementação de médio prazo.

Ainda no âmbito regulatório, 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 de um selo que seria criado, visando incentivar a adoção de medidas mitigadoras de emissão no setor. No caso, propõe-se criar o “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 por 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.

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, desenvolveu 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, Abrafe, 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 destinados a remover barreiras tecnológicas, em particular, 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 é reforçado o papel do MDIC e do MCTIC como agentes indutores da inovação. Nesse caso, deve ser fomentada 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), um instrumento relevante para o setor de ferroligas. Ademais, a oferta de estudos conjunturais, estratégicos e tecnológicos para diferentes setores da indústria, destinada ao desenvolvimento sustentável do setor, pela ABDI, deve ser incentivada. Tais instrumentos poderiam ser implementados a partir de 2020.

Para superar a barreira relativa à especificidade 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 de ferroligas 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 Abrafe servir de suporte para elaboração das propostas e acompanhar, em conjunto com a Embrapii, a implementação dos projetos.

A seguir, no Quadro 4, 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 4 – Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono

| Medidas | Barreiras | Instrumentos |
|--|--|--|
| Substituição de fornos a arco semicobertos por fornos cobertos | <ul style="list-style-type: none"> • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da efficientização energética; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas; • Inexistência de padrões de eficiência energética e/ou limites de emissões para instalações industriais; • Resistência à substituição de equipamentos; • Restrições à instalação pelo layout das plantas. | <ul style="list-style-type: none"> • Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Criação da linha de crédito "Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria"; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • 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; • 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; • Diversificação das linhas de crédito existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • Inclusão do setor no Plano Indústria, ou naquele que vier a sucedê-lo no âmbito da NDC brasileira; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas e elaboração de inventários de emissões como incentivo para acesso a condições diferenciadas de 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 e monitoramento de ações de eficiência energética. |
| Adoção de controles avançado em motores elétricos e inversores de frequência | | |
| Recuperação de CO em gases exaustos e geração de eletricidade | | |
| Recuperação de calor e geração de eletricidade em fornos semicobertos | | |
| Implementação de trocadores de calor mais eficientes | | |
| Tecnologias de ruptura do cenário BC+I | <ul style="list-style-type: none"> • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Dificuldade de acesso a crédito para realização de investimentos em P&D; • Elevado tempo de análise para concessão de patentes; • Falta de adequação aos padrões, normas e regulamentações; • Falta de capacidade financeira para custear P&D; • Necessidade de importação perante a falta de conteúdo local das tecnologias; • Restrição à instalação pelo layout da planta; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias. | <ul style="list-style-type: none"> • Captação de recursos para investimento em ações inovadoras de mitigação no GCF, GEF e BID; • Contratação de servidores e aprimoramento do sistema e-Patentes para diminuir o tempo médio de análise de patentes pelo Inpi; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações inovadoras que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Desoneração de impostos de importação de tecnologias de baixo carbono; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • 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; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidade das tecnologias de ruptura; • Inclusão do setor no Plano Indústria, ou naquele plano que vier a sucedê-lo; • Precificação de carbono a partir de 2025, com retorno dos recursos captados mediante possibilidade de taxaço para investimento em P&D de tecnologias de ruptura; • 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. |

Fonte: Elaboração própria



Considerações
finais

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo objetivou identificar possibilidades de mitigação de emissões para o setor de ferroligas, 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, co-benefícios 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, que é de 27% e 45%, respectivamente, nos cenários BC e BC+I, com relação ao cenário REF em 2050. O potencial de abatimento de emissões de GEE acumulado até 2050, no cenário BC, é de aproximadamente 26 MtCO₂e, sendo as principais medidas a substituição de fornos a arco semicobertos por cobertos e a recuperação de calor e monóxido de carbono.

Ainda que todas as medidas de eficientização energética analisadas no cenário BC sejam atrativas 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 barreiras que afetam a sua implementação: i) competição por tecnologias de baixo carbono com outros setores, e dos investimentos nas medidas perante outras prioridades, como expansão da capacidade produtiva; ii) adequação dos custos de capital e O&M, obtidos na literatura científica, à realidade econômico-tributária do país; iii) conjuntura econômica e setorial recessiva; iv) alto custo de capital, potencializado por significativos custos de transação para acesso a crédito; v) restrição à instalação pelo *layout* da planta; vi) falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; vii) ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; entre outras. 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 das tecnologias ao nível das plantas industriais.

No caso das tecnologias de ruptura 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.

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 ferroligas, 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* (MCTIC, 2017b).



Referências

REFERÊNCIAS

ÁFRICA DO SUL. Department of Environmental Affairs – DEA. *South Africa's greenhouse gas (GHG) mitigation potential analysis*. Pretoria, South Africa: DEA, 2014.

ANGLO AMERICAN. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.angloamerican.com.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FERROLIGAS E DE SILÍCIO METÁLICO – ABRAFE (Brasil). *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.abrafe.ind.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

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.

BOZEL BRASIL. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.bozel.com/index.html>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Balanço Energético Nacional 2014 – ano-base 2013*. Rio de Janeiro: EPE, 2014a.

_____. *Plano Nacional de Energia – PNE 2050*. Rio de Janeiro: EPE, 2014b.

_____. *Balanço Energético Nacional 2017: Ano-base 2016*. Brasília: EPE, 2017.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. *Fatores de emissão de CO₂ pela geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional do Brasil*. 2015. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/72764.html>>. Acesso em: 5 mar. 2016.

_____. *Segundo inventário brasileiro de emissões de gases de efeito estufa*. Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais – Produtos minerais. Parte I. Produção de cimento. Brasília: MCTI, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC. *Trajetórias de mitigação e instrumentos de políticas públicas para alcance das metas brasileiras no acordo de Paris*. 2017a. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/2098519/Trajetorias-Ebook-b_final.pdf/29c11698-b71d-4009-850c-a162090e1108>. Acesso em: 18 dez. 2017.

_____. *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*. Brasília: MCTIC, 2017b.

_____. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima*. Brasília: MCTIC, 2016.

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.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia – MME. *Balanço de Energia Útil 2005*. Brasília: MME, 2005.

COMPANHIA BRASILEIRA DE METALURGIA E MINERAÇÃO – CBMM (Brasil). *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.cbmm.com.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

COMPANHIA DE FERROLIGAS DA BAHIA – FERBASA (Brasil). *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.ferbasa.com.br>>. Acesso em: 26 ago. 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI (Brasil). *Eficiência energética na indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional*. Brasília: CNI, 2009.

_____. *Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento*. Brasília: CNI, 2012.

CONTRUCCI, M. de A. et al. The production of high-carbon ferrochromium by the TECNORED process. PROCEEDINGS XVTH CMMI CONGRESS, Johannesburg, p. 217-220, 1994.

CURRÁS, T. A. *Barriers to investment in energy saving technologies – Case study for the energy intensive chemical industry in the Netherlands*. MSc Thesis Report. Universidade de Utrecht, 2010.

DE BRITO, R. *Obtenção de pó de tântalo metálico a partir da redução aluminotérmica com ignição a plasma*. 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

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.

DOW CORNING. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <http://www.dow-corning.com/pt_BR/content/brasil/default.aspx>. Acesso em: 2 ago. 2015.

ECOTOPE. *Energy efficiency and conservation measure resource assessment for the years 2010-2030*. Energy Trust of Oregon. 2011. Disponível em: <https://www.energytrust.org/wp-content/uploads/2016/12/021611_ResourceAssessment.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2015.

EUROPEAN COMISSION – EC. *Draft reference document on best available techniques for the non-ferrous metals industries*. Integrated Pollution Prevention and Control – IPPC. LUXEMBOURG: Publications Office of the European Union, 2011.

_____. *European innovation partnership on raw materials*. 2014. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eip/raw-materials/en/content/development-innovative-technologies-processing-low-grade-fine-feeds-primary-ferronickel>>. Acesso em: 2 ago. 2015.

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.

EUROPEAN MONITORING AND EVALUATION PROGRAMME/EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY – EMEP/EEA. *EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013*. LUXEMBOURG: EMEP/EEA, 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: FGV/EAESP, 2015.

GERMERSHAUSEN, T. et al. *Innovations in ferro-alloys process technologies*. SMS Siemag, Dusseldorf, Alemanha, 2013.

GORDON, Y.; NELL, J. *Methods of manganese ore thermal-treatment prior to smelting – What to choose?* THE THIRTEENTH INTERNATIONAL FERROALLOYS CONGRESS – EFFICIENT TECHNOLOGIES IN FERROALLOY INDUSTRY. Almaty, Kazaquistão, 2013.

GRANHA LIGAS. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.granhligas.com.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

GUERRA, S.; MARTINS, A.; MOURA, M. A. *Energia e gênero industrial de ferroligas*. Campinas: Unicamp, 2004.

HADDAD, E. *Projeções macrossetoriais para o Brasil: 2010-2050*. Projeto Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil. Subprojeto econômico. Coordenação: Eduardo Haddad. São Paulo: Fipe, 2015. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/full/354029/Opcoes_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Estufa_GEE_em_Setores_Chave_do_Brasil.html%20=#lista>. Acesso em: 18 jul. 2017.

HALSNAES, K. et al. Framing issues. In: *Climate Change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e NY, USA, 2007.

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.

HECK, N. *Redução carbonotérmica*. 2014. Disponível em: <<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENGO6632/Redcarb.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

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 Planejamento Energético) – Coppe/PPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

HOLAPPA, L. Towards sustainability in ferroalloy production. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 110, 2010.

INDUSTRIAL EFFICIENT TECHNOLOGY DATABASE – IETD. *Tecnored*. 2015. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/content/tecnored>>. Acesso em: 25 out. 2015.

INONIBRÁS. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.inonibras.com.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. Genebra: IPCC, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *25 Energy Efficiency Policies – Recommendations*. Paris: IEA, 2011.

_____. *Energy Technology Perspectives 2015*. Paris: IEA, 2015a.

_____. *Policies and Measures Database – Energy Efficiency*. 2015b. Disponível em: <<http://www.iea.org/policiesandmeasures/energyefficiency/>>. Acesso em: 18 mar. 2017.

_____. *World energy investments outlook*. Special Report. Paris: IEA, 2014.

JAPÃO. New Energy and Industrial Technology Development Organization – NEDO. *Global Warming Countermeasures 2008 Revised Edition – Japanese Technologies for Energy Savings/GHG Emissions Reduction*. Japão: NEDO, 2008

KLINGSPOR, M.; STRIPLLE, H. *A Nordic contribution concerning the revision of IPCC reference documento on best available techniques in the non-ferrous metals industries*. Stockholm: IVL Swedish Environmental Research Institute, 2008.

- KRUGER, P. *Relatório Técnico 60 – Perfil de ferroligas*. Brasília: MME, 2009.
- 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.
- LEITE, A. F., BAJAY, S. V. *Cenários de Novas Políticas Energéticas Voltadas para a Busca de Maior Eficiência Energética*. Artigo apresentado no XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – Belo Horizonte, Brasil, Agosto de 2006.
- LEITE, A.; BAJAY, S.; DEBONZI, F. *Oportunidades de eficiência energética para a indústria*. Relatório Setorial: ferrosligas. Brasília: CNI, 2010.
- LIASA. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.liasa.com.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.
- 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.
- LIGAS GERAIS. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.ligasgerais.com.br>>. Acesso em: 26 ago. 2014.
- MARINGÁ FERROLIGA. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.grupomaringa.com.br/ferroliga.asp>>. Acesso em: 26 ago. 2014.
- MCCULLOUGH, S. et al. *Pre-reduction and Smelting Characteristics of Kazakhstan Ore Samples*. THE TWELFTH INTERNATIONAL FERROALLOYS CONGRESS – SUSTAINABLE FUTURE. Helsinki, Finlândia, 2010.
- MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM. *Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no estado de Minas Gerais – Prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade*. Relatório Técnico. Belo Horizonte: FEAM, 2010.
- MINASLIGAS. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.minasligas.com.br>>. Acesso em: 26 ago. 2014.
- MINERAL DATA. *Séries históricas do setor mineral brasileiro*. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <http://mineraldata.cetem.gov.br/mineraldata/app/*>. Acesso em: 25 ago. 2014.
- NOVA ERA SILICON. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.novaerasilicon.com.br>>. Acesso em: 25 ago. 2014.
- 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. *Impactos da adoção de metas de redução de emissão de gases de efeito estufa sobre a competitividade de setores industriais energointensivos do Brasil*. 2012. 412 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Coppe/PPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SCHAEFFER et al. *Cenário integrado de baixo carbono*. Subprojeto de modelagem integrada. Projeto Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave no Brasil. Brasília: MCTI, 2015.

SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. *Relatório síntese para projeto para o Banco Mundial – Cenário de Baixa Emissão de Carbono no Brasil*. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2009.

SINDIEXTRA. *Sítio na rede mundial de computadores*. 2014. Disponível em: <<http://www.sindiextra.org.br/>>. Acesso em: 12 ago. 2014.

SLATTER, D. D. *Technological trends in chromium unit production and supply*. INFACOM 7, Norway, 1995.

SMS GROUP. *SAF – Submerged Arc Furnace – Bulletin 2013*.

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

USA. US Energy Information Administration – EIA. *Annual Energy Outlook 2015*. 2015. Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>>. Acesso em: 12 fev. 2016.

USA. United States Environmental Protection Agency – USEPA. *AP 42 – Compilation of air pollutant emission factors*. Washington, DC: Usepa, 1995.

VALE. *Energia e siderurgia*. 2014. Disponível em: <http://saladeimprensa.vale.com/Paginas/Segmentos.aspx?s=Energia_e_Siderurgia&SID=8>. Acesso em: 26 ago. 2014.

VERTIOLA, S. (Coord.). *Conservação de energia na indústria metalúrgica*. Manual de Recomendações. São Paulo: IPT, 1990.

WORLD BANK. *Overview Brazil*. 2016. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/en/country/brazil/overview>>. Acesso em: 18 mar. 2017

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

ZAMBRANO, A. P. *Estudo da redução de pelotas auto-redutoras de cromita*. 2009. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

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



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

