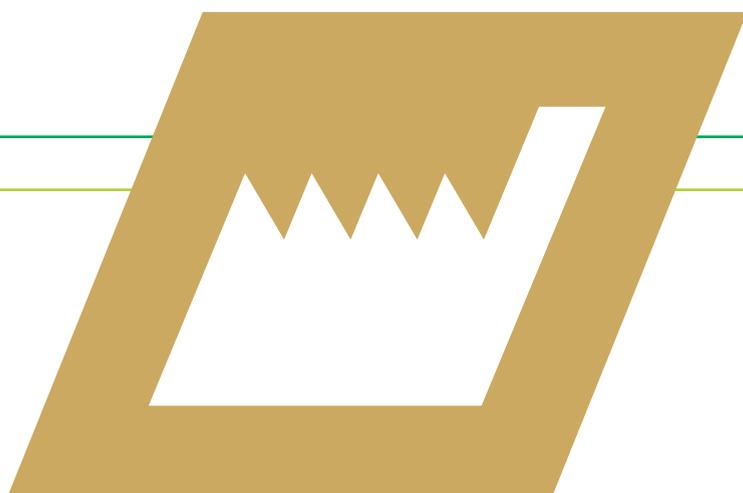




*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*



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

RÉGIS RATHMANN
(ORGANIZADOR)

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

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

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

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

ISBN: 978-85-88063-48-8

1. Mudanças Climáticas. 2. Emissão de gases. 3. Cimento. 4. Produção de cimento - 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

Camilla Chaves Nunes de Oliveira

Revisão

Anna Cristina de Araújo Rodrigues

Projeto Gráfico

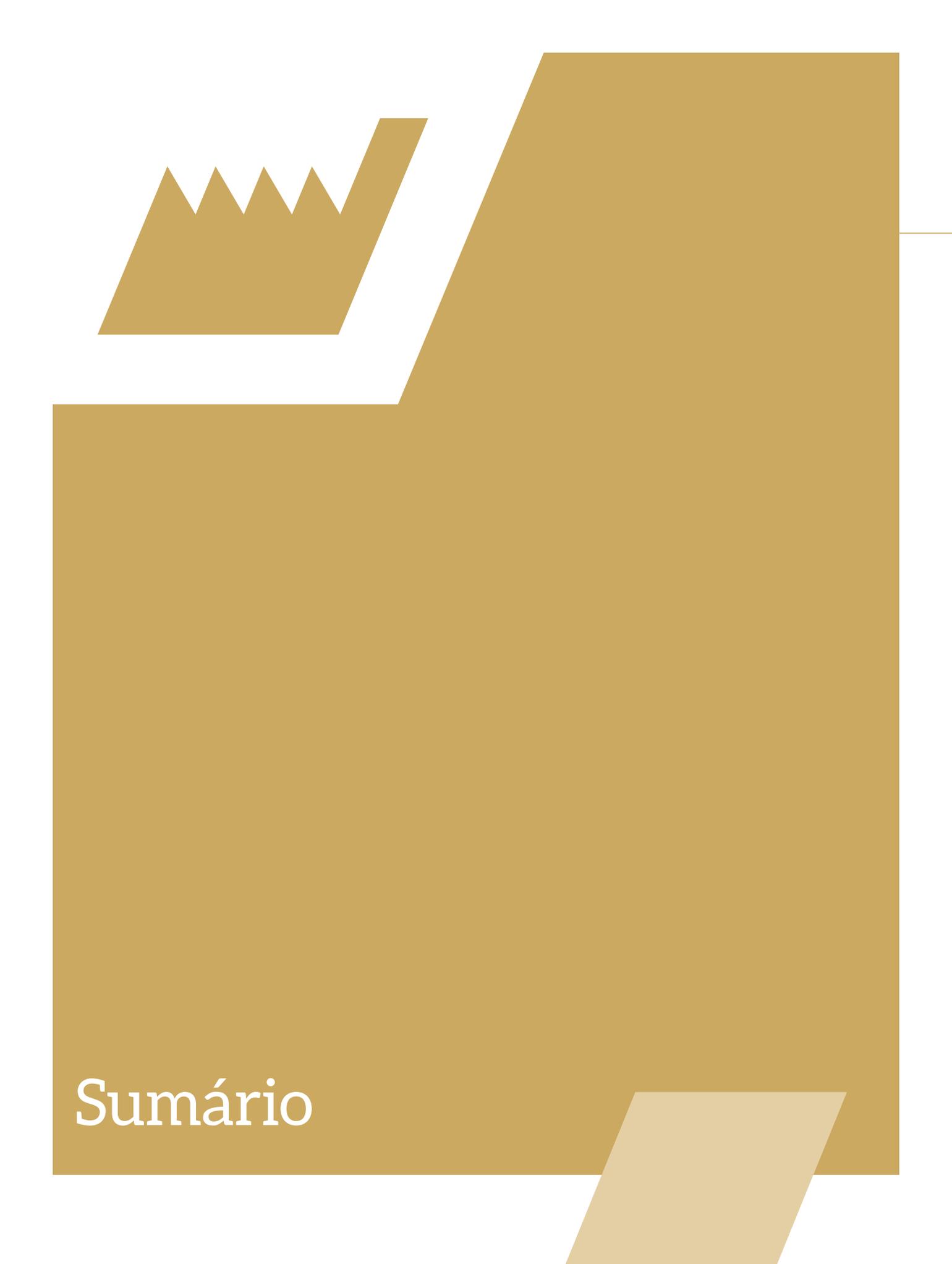
Capitular Design Editorial

Editoração

Phábrica de Produções: Alecsander Coelho e

Paulo Ciola (direção de arte); Ércio Ribeiro, Icaro Bockmann, Kauê Rodrigues, Marcelo Macedo e

Rodrigo Alves (diagramação)

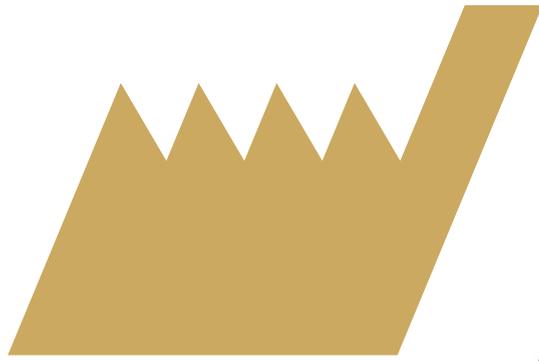
The image features a large, solid gold-colored shape that resembles a stylized letter 'L' or a large bracket, occupying the right and bottom portions of the frame. In the upper left, there is a smaller, jagged gold shape with five peaks, resembling a sawtooth or a mountain range. A thin horizontal line extends from the right edge of the large gold shape towards the right side of the image. At the bottom right, there is a smaller, tilted gold shape. The word 'Sumário' is written in white, serif font in the bottom left corner of the large gold shape.

Sumário

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	17
1 CARACTERIZAÇÃO SETORIAL	21
1.1 CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE	28
2 MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS APLICÁVEIS AOS PROCESSOS PRODUTIVOS DO SETOR	37
2.1 PROCESSO POR VIA SECA COM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS DE PRAQUECEDORES E PRÉ-CALCINADORES	37
2.2 CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO NA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER	38
2.3 REFRAATÁRIO NO FORNO DE CLINQUERIZAÇÃO PARA REDUÇÃO DE PERDA DE CALOR	39
2.4 MODIFICAÇÃO NOS PRAQUECEDORES	39
2.5 ELEVADORES DE CANECA PARA ALIMENTAÇÃO DO FORNO	40
2.6 MOINHOS DE ROLOS VERTICAIS PARA MOAGEM	40
2.7 VENTILADORES DE ALTA EFICIÊNCIA PARA PRAQUECEDORES	41
2.8 PRENSA DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO	41
2.9 DE FREQUÊNCIA PARA RESFRIADORES DE CLÍNQUER	41
2.10 PRAQUECEDOR COM ALTA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	42
2.11 RECUPERAÇÃO DE CALOR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	42
2.12 MELHORIAS NO SISTEMA DE COMBUSTÃO	43
2.13 REFRIGERADORES DE GRELHA DE ALTA EFICIÊNCIA	43
2.14 MOAGEM DE CIMENTO COM HOROMILL	44
2.15 MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA	44
2.16 VEDAÇÃO ADEQUADA DOS FORNOS	45
2.17 SILO GRAVITACIONAL PARA HOMOGENEIZAÇÃO	45

2.18	SEPARADORES E CLASSIFICADORES DE ALTA EFICIÊNCIA PARA MOAGEM DO CARVÃO.....	45
2.19	ADOÇÃO DE FORNOS DE CORRENTE ALTERNADA	46
2.20	MANUTENÇÃO PREVENTIVA.....	46
2.21	VARIADORES DE VELOCIDADE	46
2.22	ADIÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA NÃO CARBONATADA (CARBONETO DE ESCÓRIA) PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO	46
2.23	ADIÇÃO DE POZOLANA AO CIMENTO	47
2.24	ADIÇÃO DE CALCÁRIO AO CIMENTO	47
2.25	Uso DE MINERALIZADORES PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	48
2.26	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS, GASIFICAÇÃO DE PNEUS E RESÍDUOS DE ÓLEO COMO COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS.....	48
3	CENÁRIOS DE REFERÊNCIA, BAIXO CARBONO E BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO.....	51
3.1	CENÁRIO REF	52
3.1.1	Premissas.....	52
3.1.2	Resultados.....	55
3.2	CENÁRIO BC.....	57
3.2.1	Premissas	57
3.2.2	Resultados	58
3.2.3	Custos marginais de abatimento	61
3.3	CENÁRIO BC+I.....	67
3.3.1	Tecnologias inovadoras para o setor.....	67
3.3.2	Premissas	72
3.3.3	Resultados	74
4	INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA APLICÁVEIS PARA IMPLEMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO	77
4.1	BARREIRAS E COBENEFÍCIOS À IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO NO SETOR.....	78
4.2	SÍNTESE DE EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS COM POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO	80
4.3	INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO ..	84
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
	REFERÊNCIAS.....	97



Listas de tabelas, figuras, quadros, siglas e acrônimos

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maiores Produtores de Cimento	21
Tabela 2 – Produção por Grupo Industrial (em 1.000 toneladas)	22
Tabela 3 – Produção Anual de Cimento Portland por Estados e Regiões Brasileiras.....	24
Tabela 4 – Especificações e Tipos de Cimento Portland no Brasil.....	26
Tabela 5 – Produção Anual de Cimento Portland, segundo os Tipos	27
Tabela 6 – Evolução da Participação Relativa dos Energéticos Utilizados no Setor.....	28
Tabela 7 – Distribuição Percentual do Consumo dos Energéticos Utilizados na Indústria de Cimento no Brasil, por Usos Finais, em 2004	29
Tabela 8 – Rendimentos Médios de Conversão Estimados para 2004	30
Tabela 9 – Energia Elétrica Requerida por Etapas do Processo Produtivo do Cimento	33
Tabela 10 – Evolução do Consumo de Energia Térmica e Elétrica no Setor de Cimento Brasileiro.....	34
Tabela 11 – Evolução das Emissões de CO ₂ pelo Processo de Calcinação no Setor de Cimento Brasileiro.....	35
Tabela 12 – Consumo de Energia para Diferentes Fornos de Cimento	38
Tabela 13 – Custos Estimados para o Sistema de Controle e Otimização da Produção de Clínquer	39
Tabela 14 – Rendimentos de Conversão de Insumos em Serviços Energéticos por Tecnologia em 2010	52
Tabela 15 – Eficiências dos Fornos de Cimento no Cenário REF	53
Tabela 16 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Demanda Energética do Setor.....	53
Tabela 17 – Fatores de Emissão de CO ₂ pelo Uso de Energéticos (Queima de Combustíveis).....	54

Tabela 18 – Fator de Emissão do Clínquer (Calcinação)	54
Tabela 19 – Fatores de Emissão de CO ₂ do SIN	55
Tabela 20 – Produção de Cimento de 2010 a 2050,	55
Tabela 21 – Produção de Clínquer de 2010 a 2050	55
Tabela 22 – Participação dos Combustíveis no Consumo Total de Energia de 2010 e 2050	56
Tabela 23 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050	56
Tabela 24 – Emissões Totais de CO ₂ e do Setor de Cimento no Cenário REF	56
Tabela 25 – Eficiências dos Fornos de Cimento no Cenário BC	57
Tabela 26 – Produção de Clínquer nos Cenários REF e BC – 2010 a 2050	58
Tabela 27 – Participação dos Combustíveis no Consumo Total de Energia no Cenário BC	59
Tabela 28 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050	60
Tabela 29 – Emissões Totais de CO ₂ e do Setor de Cimento no Cenário BC	61
Tabela 30 – Preços dos Combustíveis	63
Tabela 31 – Preços de Petróleo Considerados para o Cálculo do Custo Marginal de Abatimento das Possibilidades de Mitigação	64
Tabela 32 – Preços dos Combustíveis e da Eletricidade para a Taxa de Desconto de 8% ao ano	64
Tabela 33 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para a Taxa de Desconto de 8%	64
Tabela 34 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para a Taxa de Desconto de 15%	65
Tabela 35 – Potenciais de Economia de Energia/Redução de Emissões no Setor de Cimento	73
Tabela 36 – Tecnologias Inovadoras para o Setor de Cimento com Seus Respectivos Potenciais de Abatimento	73
Tabela 37 – Penetração (%) das Tecnologias Consideradas no Cenário BC+I	74
Tabela 38 – Consumo de Energia e Emissões de GEE no Cenário BC+I	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção Anual de Cimento Portland no Brasil (em milhões de toneladas)	22
Figura 2 – Participação Regional Brasileira na Produção de Cimento.....	23
Figura 3 – Esquema da Produção de uma Planta de Cimento.....	25
Figura 4 – Evolução dos Índices de Adições de Clínquer ao Cimento no Brasil.....	26
Figura 5 – Distribuição Percentual, por Usos Finais, do Consumo Final de Energia no Setor	30
Figura 6 – Distribuição Percentual, por Usos Finais, do Consumo Total de Energia Útil	31
Figura 7 – Distribuição do Consumo de Energia no Processo de Cimento por Etapas.....	31
Figura 8 – Consumo Específico de Energia Térmica na Indústria de Cimento.....	32
Figura 9 – Consumo Específico de Energia Elétrica na Indústria de Cimento	33
Figura 10 – Evolução do Fator de Emissão no Setor de Cimento	35
Figura 11 – Proporção Clínquer/Cimento entre 2010 e 2010 para o Cenário REF.....	53
Figura 12 – Projeção da Proporção Clínquer/Cimento para os Cenários de Referência e Baixo Carbono.....	58
Figura 13 – Produção de Clínquer nos Cenários REF e BC	59
Figura 14 – Consumo de Energia nos Cenários REF e BC.....	60
Figura 15 – Emissões Totais de CO ₂ e nos Cenários REF e BC para o Setor de Cimento	61
Figura 16 – Curva de Custos e Potenciais de Abatimento para Taxa de Desconto de 15% ao ano.....	66
Figura 17 – Curva Marginal de Abatimento para o Setor de Cimento a uma Taxa de Desconto de 15% ao ano.....	66
Figura 18 – Consumo de Energia nos Cenários REF, BC e BC+I.....	75
Figura 19 – Emissões Totais de CO ₂ e nos Cenários REF, BC e BC+I.....	75
Figura 20 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais Equipamentos das Cimenteiras e Seus Usos Finais de Energia	29
Quadro 2 – Quadro-resumo de Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono	88

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC – Corrente alternada
AFOLU – Agricultura, florestas e outros usos do solo
APP – Asian-Pacific Partnership
BEN – Balanço Energético Nacional
BEU – Balanço de Energia Útil
BRICS – Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
C2ES – Center for Climate and Energy Solutions
C₂S – Silicato bicálcico
Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio
CaCO₃ – Carbonato de cálcio
CAL – Custo anual líquido
CaO – Cal
CCS – Captura e armazenamento de carbono
CDM – Clean Development Mechanism
CENÁRIO BC – Cenário de baixo carbono
CENÁRIO BC+I – Cenário de baixo carbono com inovação
CENÁRIO REF – Cenário de referência
CH₄ – Metano
CIPEC – Canadian Industry Program for Energy Conservation
CMA – Custos marginais de abatimento
CNI – Confederação Nacional da Indústria
CO₂ – Dióxido de carbono
CO₂e – Dióxido de carbono equivalente
COP15 – 15ª Conferência das Partes – Estocolmo
COP21 – 21ª Conferência das Partes – Paris
CSI/ECRA – Cement Sustainability Initiative/European Cement Research Academy

CTF – Cement Task Force
DC – Corrente contínua
DECC – Departamento de Energia e Mudança Climática do Reino Unido
EBC – Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FCT – Flame, Combustion, Technology
FGV – Fundação Getulio Vargas
FIPE – Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas
GEE – Gases de efeito estufa
GEF – Global Environment Facility
GJ – Gigajoule
GLP – Gás liquefeito de petróleo
GN – Gás natural
H₂O – Água
HFC – Hidrofluorcarbonetos
hPa – Unidade de pressão. Hectopascal, equivalente a 100 Pa
IEA – Agência Internacional de Energia
IIP – Institute for Industrial Productive
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
IPPC – International Plant Protection Convention
Kt – Kilotonelada
MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MgCO₃ – Carbonato de magnésio
MgO – Óxido de magnésio
MME – Ministério de Minas e Energia
MPa – Megapascal, unidade de pressão.
MRV – Monitoramento, relato e verificação
MTD – Melhores tecnologias disponíveis
N₂O – Óxido nitroso
O&M – Operação e manutenção

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OEE – Office of Energy Efficiency
P&D – Pesquisa e desenvolvimento
PFC – Compostos perfluorados
PIB – Produto interno bruto
PNMC – Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PVC – Policloreto de vinila
RSU – Resíduos sólidos urbanos
SF₆ – Hexafluoreto de enxofre
SIN – Sistema Interligado Nacional
SiO₂ – Dióxido de silício
SNIC – Sindicato Nacional da Indústria de Cimento
TCN – Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
tpd – Toneladas por dia
TI – Tecnologias da informação
TRA – *Technology Readiness Assessment*
TRL – Avaliação de prontidão tecnológica
UNEP – United Nations Environment Programme
UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
UNIDO – Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
US DoD – United States Department of Defense
VBP – Valor bruto da produção
WBCSD – World Business Council for Sustainable Development
ZKG – Zement Kalk Gips

The image features a large, solid gold-colored shape that occupies most of the frame. In the upper left, there is a smaller, jagged gold shape resembling a sawtooth or a stylized mountain range. At the bottom right, there is a light beige trapezoidal shape. The word "Introdução" is written in white, serif font in the bottom left corner of the gold area.

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).

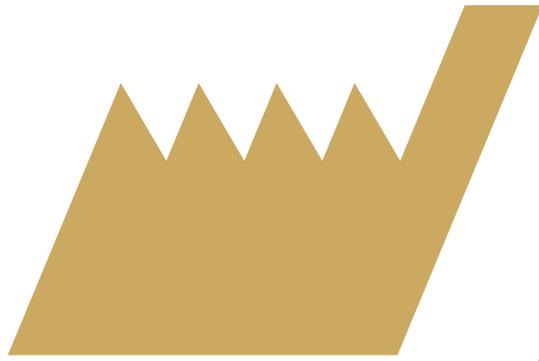
emissões de GEE (HENRIQUES JR., 2010; BORBA et al., 2012; CNI, 2012; RATHMANN, 2012), o que justifica a implementação de política pública nesse sentido, qual seja o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria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

O cimento é um material aglomerante em pó, capaz de agregar outros materiais, para obter o concreto e as argamassas utilizados na construção civil. É perecível e requer condições específicas de armazenamento. Esse fato, juntamente com o alto custo de transporte em relação ao baixo valor agregado do produto, traduz-se na reduzida expressividade do setor no comércio exterior (ABDI, 2012).

Em 2011, o Brasil foi o 6º maior produtor (Tabela 1) e o 4º maior consumidor de cimento do mundo. A China ocupava o 1º lugar em ambos os rankings (SNIC, 2012). No Brasil, havia 85 fábricas de cimento, com unidades produtoras próximas aos centros consumidores para reduzir o custo de frete (SNIC, 2012). A região Sudeste foi a que mais produziu cimento Portland (49% do total), seguida da região Nordeste (20% do total), com produções, em 2012, respectivamente, de 33,6 milhões e 13,8 milhões de toneladas (SNIC, 2012). Quanto ao consumo aparente, em 2012, a região Sudeste representou 45% do total, consumindo 31,4 milhões de toneladas de cimento, e o Nordeste consumiu 14,6 milhões, ou 21% do total (SNIC, 2012).

Tabela 1 – Maiores Produtores de Cimento

Países	Produção (milhões de toneladas)				
	2007	2008	2009	2010	2011
1. China	1.379,0	1.401,2	1.657,1	1.868,0	2.080,0
2. Índia	172,9	186,1	190	215,5	240,5
3. Estados Unidos	95,5	86,5	64	64,9	67,9
4. Turquia	50,8	53,4	57,6	62	67,8
5. Irã	40	44,4	48,8	61,3	66,4
6. Brasil	46,6	52,0	51,7	59,1	64,1
7. Japão	71,4	67,6	59,6	54	56,4
8. Rússia	60,1	53,5	45,7	50,4	56,1
9. Vietnã	35,8	36,3	47,7	55	52
10. Arábia Saudita	30,4	37,4	37,8	41	48,4
11. Coreia do Sul	54,4	55,1	52,2	47,4	48,3
12. Egito	40,1	40,1	46,9	48,2	45,4
13. Indonésia	39,9	41,8	39,7	39,5	45,2
14. México	39,2	37,7	35,4	34,5	35,4
15. Alemanha	33,4	33,6	30,4	30,2	33,5
Total mundial	2.190,1	2.227,0	2.465,0	2.731,1	3007,4

Fonte: Elaboração própria a partir de SNIC, 2012

O crescimento da indústria de cimento está correlacionado ao crescimento da construção civil, que cresceu 1,4% em 2012 em relação ao ano anterior. Sua produção em 2012 foi de 68,8 milhões de toneladas (Figura 1) e sua importação, de 977 mil toneladas, apenas 1,4% do consumo aparente (SNIC, 2012). No Brasil, o setor é representado principalmente por Votorantim e João Santos. A produção anual de cimento por empresa pode ser vista na Tabela 2.

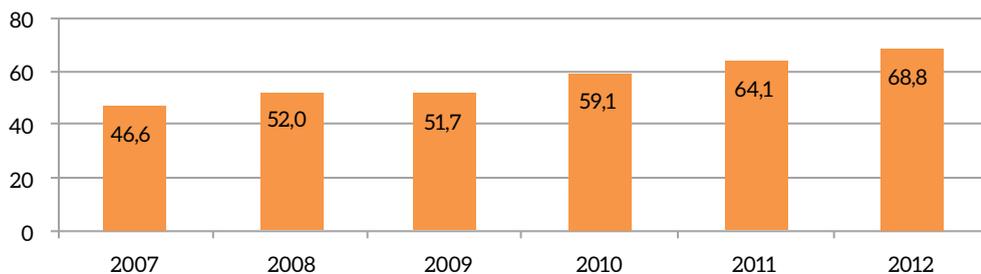


Figura 1 – Produção Anual de Cimento Portland no Brasil (em milhões de toneladas)

Fonte: Elaboração própria a partir de SNIC, 2012

Tabela 2 – Produção por Grupo Industrial (em 1.000 toneladas)

Fábricas por região	Produção (mil toneladas)	
	2011	2012
Região Norte		
João Santos	2.138	2.186
Votorantim	1.447	1.512
Total Norte	3.585	3.968
Região Nordeste		
João Santos	3.029	3.077
Votorantim	3.769	4.287
Cimpor	2.548	2.672
Lafarge	1.453	1.840
Intercement	301	319
Outros	838	1.620
Total Nordeste	11.938	13.815
Região Centro-Oeste		
Votorantim	3.003	2.887
Ciplan	2.011	2.414
Lafarge	350	379
Intercement	675	735
Cimpor	1.043	1.220
Total Centro-Oeste	7.082	7.635
Região Sudeste		
Votorantim	8.844	8.598

João Santos	1.737	1.898
Cimpor	1.016	1.073
Holcim	4.438	4.630
Inter cement	5.406	5.578
Lafarge	3.770	3.842
Outros	7.113	7.977
Total Sudeste	32.324	33.596
Região Sul		
Votorantim	6.317	7.076
Cimpor	1.016	1.039
Itambé	1.592	1.678
Outros	240	272
Total Sul	9.164	10.065
Total Brasil	64.093	68.809

Fonte: Elaboração própria a partir de SNIC, 2012; ABCP, 2014

Como pôde ser visto, as plantas estão presentes em todas as regiões brasileiras e são, em quase a sua totalidade, equipadas com fornos de via seca. A região Sudeste foi a que mais produziu cimento Portland, seguida da região Nordeste, com produções, em 2012, respectivamente, de 33,6 milhões e 13,8 milhões de toneladas (SNIC, 2012). A Figura 2 apresenta a participação regional na produção de cimento no Brasil.

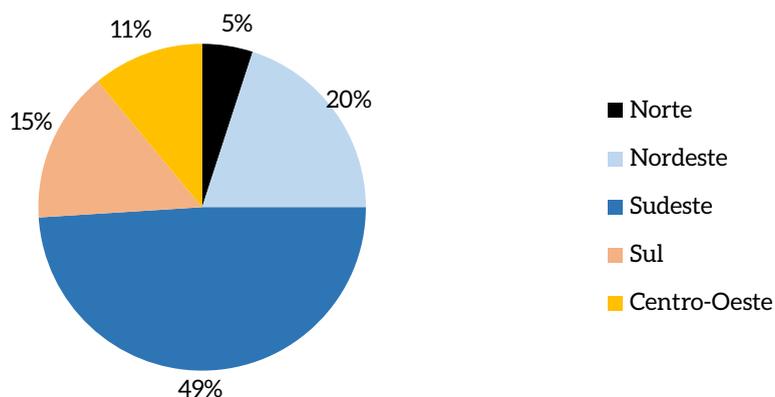


Figura 2 – Participação Regional Brasileira na Produção de Cimento

Fonte: Elaboração própria a partir de SNIC, 2012

O grau de concentração da indústria de cimento pode ser explicado por barreiras estruturais à entrada como propensão dos processos de fabricação a economias de escala, acesso a jazidas de calcário com condições adequadas do ponto de vista de composição e de localização e forte intensidade em capital fixo (EBC, 2012).

Apesar dessa concentração da indústria de cimento, o cenário nos últimos anos é de desconcentração, ainda que de forma gradual. Houve redução das participações das regiões Sudeste e Sul e aumento da parcela das regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. Entre 1995 e 2010, a participação

do primeiro grupo na produção total de cimento se reduziu de 74% para 65%, enquanto a do segundo grupo aumentou de 26% para 35% (EBC, 2012).

Segundo o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2012), Minas Gerais, São Paulo e Paraná foram os três maiores produtores de cimento brasileiros com produções, em 2012, de, respectivamente, 16.465 kt, 9.428 kt e 5.589 kt, que representam metade do cimento fabricado no Brasil. A produção de cimento anual por estado brasileiro pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 – Produção Anual de Cimento Portland por Estados e Regiões Brasileiras

Estados/ Regiões	Produção (mil toneladas)									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Rondônia	-	-	-	-	-	-	111	576	969	713
Amazonas	603	628	627	634	683	776	654	725	813	785
Pará	561	621	720	821	935	1.315	1.204	1.502	1.553	1.636
Tocantins							131	470	523	564
Região Norte	1.164	1.249	1.347	1.455	1.618	2.091	1.969	3.273	3.585	3.698
Maranhão	254	302	308	316	336	358	358	384	425	883
Piauí	304	284	413	344	411	501	588	627	609	655
Ceará	1.230	1.324	1.443	1.480	1.628	1.714	1.767	1.863	1.985	2.136
Rio Grande do Norte	330	334	365	378	438	450	461	463	658	1.293
Paraíba	1.364	1.477	1.609	1.811	1.919	2.073	1.844	2.162	2.025	2.462
Pernambuco	397	409	512	547	677	781	821	848	1.079	1.257
Alagoas	358	375	437	458	532	556	409	674	706	703
Sergipe	1.771	1.975	2.068	2.366	2.763	2.841	2.691	3.3031	3.181	3.080
Bahia	479	469	555	599	695	814	1.021	1.179	1.270	1.346
Região Nordeste	6.487	6.949	7.710	8.299	9.399	10.088	9.960	11.231	11.938	13.815
Mato Grosso do Sul	618	653	653	670	746	878	872	890	973	1.031
Mato Grosso	624	602	637	642	819	875	949	997	1.177	1.123
Goiás	647	716	789	766	832	1.052	1.149	1.324	1.392	1.599
Distrito Federal	1.646	2.091	2.322	2.492	2.824	2.660	2.690	3.159	3.540	3.882
Região Centro-Oeste	3.535	4.062	4.401	4.570	5.221	5.465	5.660	6.370	7.082	7.635
Minas Gerais	8.253	8.186	9.454	10.188	11.368	12.654	12.979	14.162	15.240	16.465
Espírito Santo	1.833	1.753	1.664	1.711	1.921	2.344	2.099	2.370	2.546	2.616
Rio de Janeiro	2.402	2.382	2.358	2.678	2.794	3.129	3.160	4.174	4.974	5.087
São Paulo	5.386	5.327	5.837	7.194	7.454	8.180	7.913	9.035	9.564	9.428
Região Sudeste	17.847	17.648	19.313	21.711	23.537	26.307	26.151	29.741	32.324	33.596
Paraná	3.944	4.059	4.018	3.923	4.548	5.313	5.332	5.685	5.746	5.589
Santa Catarina	263	229	209	222	282	406	364	455	988	1.979
Rio Grande do Sul	1.683	1.575	1.473	1.511	1.661	2.034	1.940	2.122	2.190	2.225
Ajustes	92	126	138	111	170	180	240	240	240	272
Região Sul	5.982	5.989	5.838	5.767	6.661	7.933	7.876	8.502	9.164	1.065

Fonte: Elaborado a partir de SNIC, 2012

O processo produtivo do cimento é uma combinação de exploração e beneficiamento de substâncias minerais não metálicas, sua transformação química em clínquer (produto intermediário do cimento) em um forno a cerca de 1.450°C e posterior moagem e mistura a outros materiais, conforme o tipo de cimento. As matérias-primas para a fabricação do clínquer são basicamente calcário e argila, além de eventuais adições como areia, bauxita e minério de ferro (CNI, 2012). A primeira etapa é a extração das matérias-primas. A seguir, há a britagem para redução de volume e, finalmente, moagem e homogeneização, em que são misturadas para obter composição em proporções e volumes exatos. A mistura é então moída, obtendo-se um pó denominado de farinha ou cru (CNI, 2012).

A farinha passa pelo preaquecedor e pré-calcinador a uma temperatura aproximada de 800°C, quando se dá o início da calcinação, passando em seguida para o forno rotativo, cuja chama atinge 1.500°C, fundindo-se parcialmente e resultando no clínquer, que é então resfriado e moído junto com gesso e/ou outras adições, como escória siderúrgica, cinzas volantes, pozolanas e fíler calcário, para formar o cimento Portland (CNI, 2012). O fluxograma do processo produtivo do cimento por via seca pode ser visto na Figura 3.

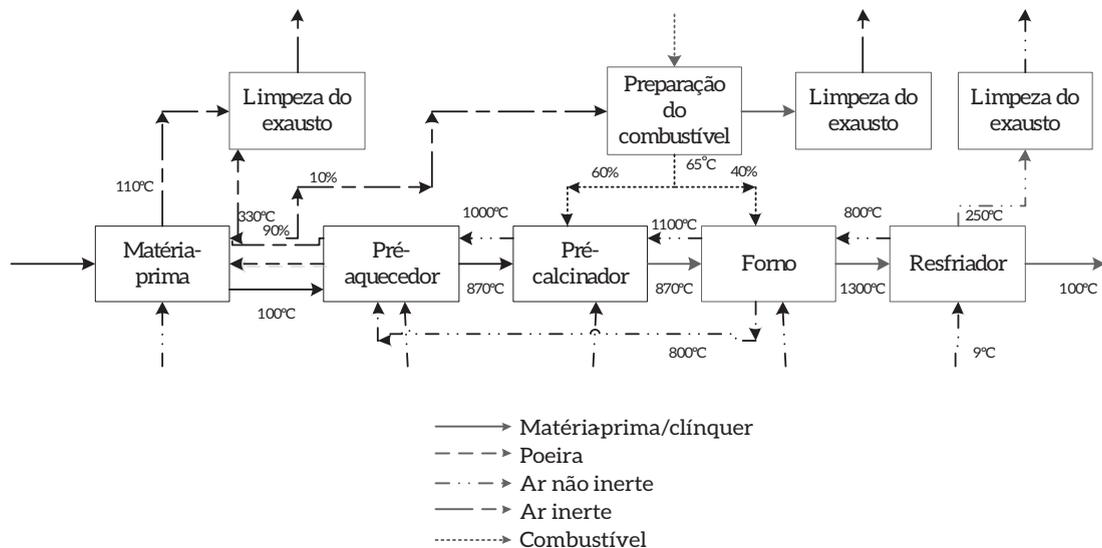


Figura 3 – Esquema da Produção de uma Planta de Cimento

Fonte: Elaboração própria a partir de BARKER et al., 2009

O cimento pode ser produzido por processos por via seca ou por via úmida, os quais diferem de acordo com o teor de umidade da mistura que entra no forno. No processo por via seca, a mistura é introduzida no forno em forma de farinha, com baixo teor de umidade, e, no processo por via úmida, a matéria-prima é preparada com água, formando uma lama, a qual é aquecida no forno que produzirá o clínquer. Essa via apresenta maior consumo energético pelo fato de necessitar de mais calor para a evaporação da água. O consumo específico médio de energia térmica no processo via seca é de 3,35 GJ/t clínquer, enquanto no processo via úmida é de 5,02 GJ/t de clínquer (DORILEO et al., 2010). Há derivações dos processos, como a via semiúmida e a semisseca (RATHMANN, 2012). Atualmente, no Brasil, só é empregado o processo por via seca (IEA, 2007).

No Brasil, são produzidos oito tipos básicos de cimento que se diferenciam de acordo com a proporção de clínquer, sulfato de cálcio, material carbonático e adições como pozolanas, calcário, escórias. Diferem também em função de propriedades intrínsecas, como cor branca e alta resistência inicial. O cimento Portland é definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) como “aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfatos de cálcio”. Os tipos de cimento Portland podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações e Tipos de Cimento Portland no Brasil

Tipo		Clínquer (%)	Escórias de Alto-forno (%)	Material Pozolânico (%)	Material Carbonático (%)
CP I	CP I	100	-	0	-
	CP I-S	95 a 99	-	1 a 5	-
CP II	CP II- E	56 a 94	6 a 34	-	0 a 10
	CP II- Z	76 a 94	-	6 a 14	0 a 10
	CP II- F	90 a 94	-	-	6 a 10
CP III	CP III	25 a 65	35 a 70	-	0 a 5
CP IV	CP IV	45 a 85	-	15 a 50	0 a 5
CP V	CP V	95 a 100	-	-	0 a 5

Fonte: Elaboração própria a partir de SNIC, 2007

A substituição de clínquer por adições diversifica as aplicações e características específicas do cimento, além de propiciar a redução das emissões de CO₂, uma vez que diminui a produção de clínquer e, portanto, reduz a queima de combustíveis e a emissão por calcinação (MCTI, 2010). No Brasil, essas adições representam uma das mais eficazes medidas de controle e redução das emissões de CO₂ na indústria. A Figura 4 ilustra o aumento do uso de adições ao cimento, no Brasil, nos últimos anos (MCTI, 2010).

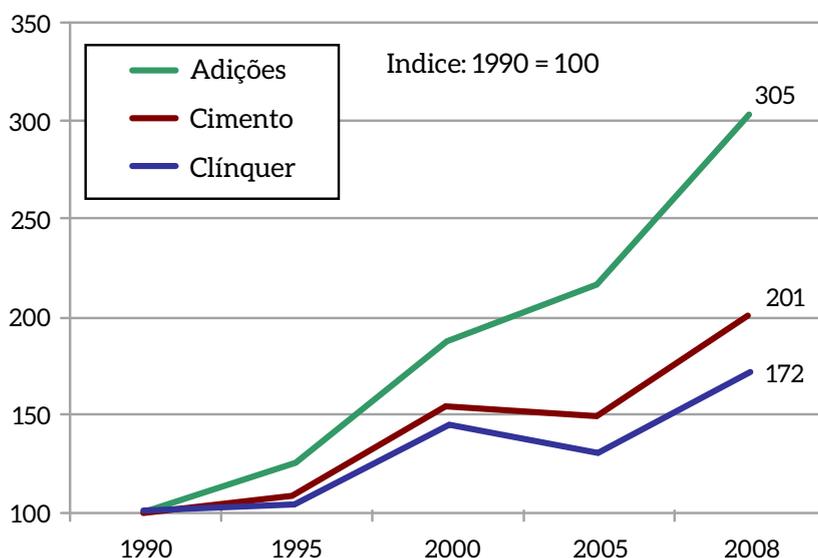


Figura 4 – Evolução dos Índices de Adições de Clínquer ao Cimento no Brasil

Fonte: SNIC, 2008

Inúmeros aspectos regionais contribuem para a diferenciação do perfil de matérias-primas e insumos utilizados na produção de cimento e, conseqüentemente, das emissões resultantes (MCTI, 2010). Características geográficas devem ser consideradas no cálculo das emissões, pois diferentes regiões brasileiras contêm calcários com diversos teores de cálcio e magnésio que influenciam o fator de emissão (SNIC, 2012). Portanto, não somente o método de produção de cimento adotado, mas também a qualidade da rocha calcária utilizada afeta as emissões de GEE decorrentes do setor de cimento.

Regiões cujo calcário apresenta maiores teores de magnésio, como a região Sul, têm maior fator de emissão por clínquer produzido. Regiões com maior número de siderúrgicas, como a região Sudeste, têm maior acesso a escórias de alto-forno, utilizadas como aditivo ao cimento, produzindo cimentos Portland do tipo CP II-E e CP III. Do mesmo modo, na região Sul, há um número restrito de termelétricas a carvão mineral, o que limita o acesso às cinzas para a produção dos cimentos Portland tipo CP II-Z e CP IV. As regiões Centro-Oeste e Nordeste são mais próximas às fontes de combustíveis alternativos, como carvão vegetal e casca de babaçu e coco, o que leva a um perfil de consumo de combustíveis com maior participação de biomassa (MCTI, 2010).

A produção de cimento com adições ao clínquer, além de diversificar as aplicações e características específicas do cimento, leva à redução das emissões de CO₂, uma vez que diminui a produção de clínquer, reduzindo também a queima de combustíveis e emissões por calcinação (ABDI, 2012; MCTI, 2010).

Os tipos de cimento também são desdobrados em função da resistência mecânica,³ da resistência a sulfatos e do calor de hidratação. Um cimento CP III-40 RS é um cimento de alto-forno com resistência à compressão de 40 MPa⁴ e capacidade de resistência a sulfatos (EBC, 2012). Ainda, além dos cimentos cinza, existem os cimentos brancos, que utilizam caulim no lugar da argila. Sua importância é menor do que os cinza e podem não servir para usos estruturais (EBC, 2012). No Brasil, desde 2009, não há produção de cimento branco (SNIC, 2012). A produção anual, por tipo de cimento, pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 – Produção Anual de Cimento Portland, segundo os Tipos

Ano	Produção por Tipos de Cimento (mil toneladas)					Subtotal	Ajustes ⁽¹⁾	Total
	CP I	CP II	CP III	CP IV	Branco			
2007	1.034	29.848	7.842	3.876	115	45.969	582	46.551
2008	346	33.080	8.879	5.714	86	51.682	288	51.970
2009	84	34.662	7.967	5.097	-	51.187	560	51.747
2010	88	38.474	8.345	6.686	-	57.804	1.313	59.117
2011	103	38.659	9.347	8.247	-	61.329	2.764	64.093
2012	98	39.743	10.000	9.612	-	65.033	3.776	68.809

(i) Dados estimados.

Fonte: Elaboração própria a partir de SNIC, 2012

3 Trata-se da resistência à compressão, medida normalmente após um período de 28 dias de cura.

4 Megapascal, unidade de pressão.

Alguns usos exigem cimentos com especificações bem precisas. Por exemplo, em galerias de esgoto e obras marítimas, requer-se resistência a sulfatos (sigla RS), e grandes obras e concreto massa demandam cimentos de baixo calor de hidratação para manter controle da dilatação (sigla BC). Além disso, há eventuais situações em que o tempo de cura deve ser menor do que o usual. Para isso, usam-se cimentos de alta resistência inicial (CP V-ARI) (EBC, 2012).

1.1 CONSUMO DE ENERGIA E EMISSÕES DE GEE

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o setor de cimento é o 7º maior consumidor de energia entre os segmentos industriais,⁵ tendo sido responsável por 5,4% do consumo energético total da indústria brasileira em 2016.

Segundo Henriques Jr. (2010) e conforme dados da EPE (2017), as mudanças no consumo de combustíveis têm sido significativas. No início da década de 1970, mais de 90% do setor era calcada em óleo combustível. Na década seguinte, o carvão mineral foi o mais representativo (40% a 50% do total) e, nos anos 1990, o coque do petróleo foi introduzido, representando, em 2016, 71,4% do total (Tabela 6).

Tabela 6 – Evolução da Participação Relativa dos Energéticos Utilizados no Setor

Fontes	Participação (%) por tipo de combustível										
	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016
Carvão mineral	-	-	9,1	47,8	25,7	17,2	5,5	1,6	1,2	1,5	1,4
Óleo combustível	91,3	90,5	74,2	4,1	43,3	53,9	15,2	0,8	0,2	0,2	0,1
Eletricidade	6,9	8,2	10	10,1	11,1	11,9	11,4	12	13,0	12,9	13,3
Carvão vegetal	-	-	3,8	34,6	15,4	12	6,9	8,7	1,5	2,3	2,3
Coque de petróleo	-	-	-	-	0,2	1,1	54,9	65,5	74,3	71,4	71,4
Outras	1,8	1,3	2,9	3,4	4,3	3,9	6,1	11,4	9,8	11,7	11,5
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

O Quadro 1 apresenta as etapas da fabricação do cimento, respectivos equipamentos necessários e o tipo de energia que alimenta cada equipamento. A Tabela 7 apresenta o consumo de insumos energéticos por usos finais em 2004.

5 Os segmentos industriais analisados pela EPE são: cimento, ferro-gusa e aço, ferroligas, mineração e pelotização, não ferrosos e outros da metalurgia, química, alimentos e bebidas, têxtil, papel e celulose, cerâmica e outros.

Quadro 1 – Principais Equipamentos das Cimenteiras e Seus Usos Finais de Energia

Etapas do processo	Principais equipamentos	Uso final da energia
Extração de matéria-prima	Britados, perfuratriz, locomotiva, caminhões, cinta transportadora	Força motriz
Britagem, depósito de calcário e argila	Britador, extrator, cinta transportadora, filtro de despoejamento	Força motriz
Moagem e homogeneização da farinha crua	Cinta transportadora, secador, moinho etc.	Aquecimento direto, força motriz e calor de processo
Alimentação do forno	Rosca, elevador, bomba e ciclones	Força motriz
Forno rotativo	Aquecedor, ventilador, queimador, bomba e motor	Aquecimento direto, força motriz e calor de processo
Britagem do gesso e moagem do cimento	Britador, cinta transportadora, moinho, separadores	Força motriz
Ensacamento e expedição	Sistema pneumático, ensacadoras, caminhões e filtros	Força motriz

Fonte: Elaboração própria a partir de CNI, 2010

Tabela 7 – Distribuição Percentual do Consumo dos Energéticos Utilizados na Indústria de Cimento no Brasil, por Usos Finais, em 2004

Energético	Usos finais de energia (%)					
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Iluminação	Refrigeração	Outras
Gás natural	-	-	100,0	-	-	-
Carvão vapor	-	-	100,0	-	-	-
Carvão metalúrgico	-	-	100,0	-	-	-
Outras fontes primárias	-	100,0	-	-	-	-
Óleo diesel	100,0	-	-	-	-	-
Óleo combustível	-	16,2	83,8	-	-	-
GLP	-	-	100,0	-	-	-
Coque de carvão mineral	-	-	100,0	-	-	-
Eletricidade	98,4	-	-	1,3	0,2	0,1
Carvão vegetal	-	-	100,0	-	-	-
Outras fontes secundárias de petróleo	-	-	100,0	-	-	-

Fonte: Elaboração própria a partir de CNI, 2010

Aplicando-se os dados da Tabela 7 aos consumos finais desses energéticos em 2010 (EPE, 2011), nota-se que o aquecimento direto foi o uso final de energia dominante, seguido da força motriz e do calor de processo. Os resultados podem ser vistos na Figura 5.

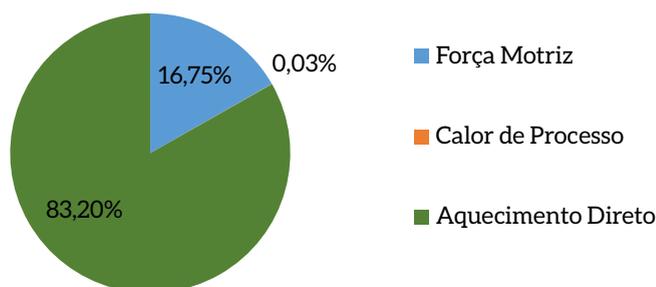


Figura 5 – Distribuição Percentual, por Usos Finais, do Consumo Final de Energia no Setor

Fonte: Elaboração própria

Os rendimentos médios de conversão para o consumo dos energéticos utilizados na indústria de cimento podem ser vistos na Tabela 8. Esses rendimentos foram aplicados aos consumos finais dos energéticos em 2010 (EPE, 2011), permitindo estimar a distribuição, por usos finais, do consumo total de energia útil do setor cimenteiro, conforme representado na Figura 6.

Tabela 8 – Rendimentos Médios de Conversão Estimados para 2004

Energético	Rendimentos médios de conversão (%)					
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Iluminação	Refrigeração	Outras
Gás natural	33,0	72,0	46,0	-	-	-
Carvão vapor	-	62,0	46,0	-	-	-
Carvão metalúrgico	-	-	46,0	-	-	-
Óleo diesel	43,0	72,0	46,0	-	-	-
Óleo combustível	-	72,0	46,0	-	-	-
GLP	28,0	72,0	46,0	-	-	-
Coque de carvão mineral	-	-	46,0	-	-	-
Eletricidade	90,0	94,0	55,0	24,5	60,0	100,0
Carvão vegetal	-	62,0	46,0	-	-	-
Outras fontes secundárias de petróleo	-	72,0	46,0	-	-	-

Fonte: Elaboração própria a partir de MME, 2005

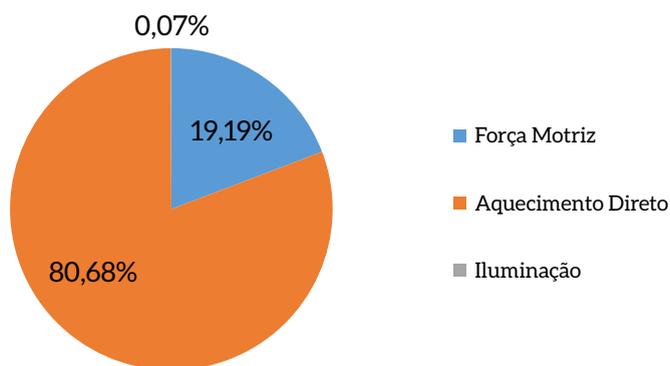


Figura 6 – Distribuição Percentual, por Usos Finais, do Consumo Total de Energia Útil

Fonte: Elaboração própria

Segundo o Balanço de Energia Útil – BEU (MME, 2005), a energia útil consumida na indústria cimenteira brasileira, em 2006, correspondeu somente a 52,2% da energia final adquirida naquele ano, o que é explicado pelos baixos rendimentos de conversão dos combustíveis no uso final dominante no setor, que é o aquecimento direto.

O Brasil produz diversos tipos de cimento Portland, cuja diferenciação consiste na quantidade e no tipo de adições misturados com o clínquer. Os consumos energéticos específicos envolvidos na fabricação de cimento dependem da proporção clínquer/cimento.

Como a etapa de clínquerização representa quase 90% da energia consumida no processo de fabricação do cimento, a redução dessa proporção, resultado do aumento do uso de adições, pode diminuir substancialmente o consumo de energia no processo produtivo de cimento (CNI, 2010; WORRELL et al., 2008). O restante de energia é consumido pelas atividades ligadas à preparação de combustível e matéria-prima, moagem do clínquer e mistura das adições. A Figura 7 apresenta a distribuição por etapa do consumo de energia.

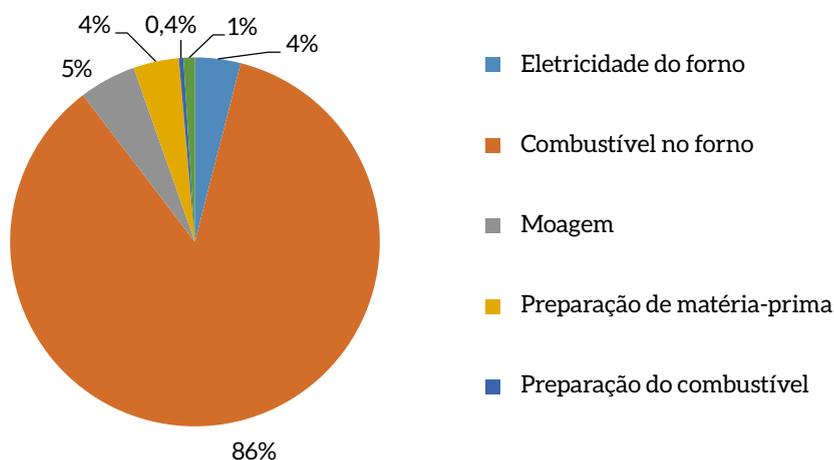


Figura 7 – Distribuição do Consumo de Energia no Processo de Cimento por Etapas

Fonte: Elaboração própria a partir de CIPEC, 2009

O consumo específico de energia térmica é definido por produção de clínquer, já que a clínquerização é a etapa que mais consome energia (IIP, 2014; CNI, 2010), representando 99% do consumo específico de energia térmica (CIPEC, 2009). As moagens e misturas realizadas para a obtenção dos vários tipos de cimento não envolvem energia térmica (IIP, 2014). Já o consumo específico de eletricidade é definido por produção de cimento (CNI, 2010).

De acordo com Soares (1998), a moagem do cru utiliza em torno de 30% da eletricidade e 3% da energia térmica consumida em uma planta típica brasileira. A clínquerização consome 95% da energia térmica e 29% da eletricidade, e a moagem do clínquer e de suas adições não requer energia térmica e gasta cerca de 40% do consumo total de eletricidade.

A Figura 8 apresenta o consumo específico de energia térmica na indústria de cimento em diversos países. Nota-se que o Brasil está em posição ligeiramente melhor do que União Europeia e EUA. Provavelmente, essa vantagem está no fato de que, no Brasil, 99% do cimento se produzem por via seca, processo que permite economia de quase 50% na energia empregada na fabricação de cimento (IEA, 2007).

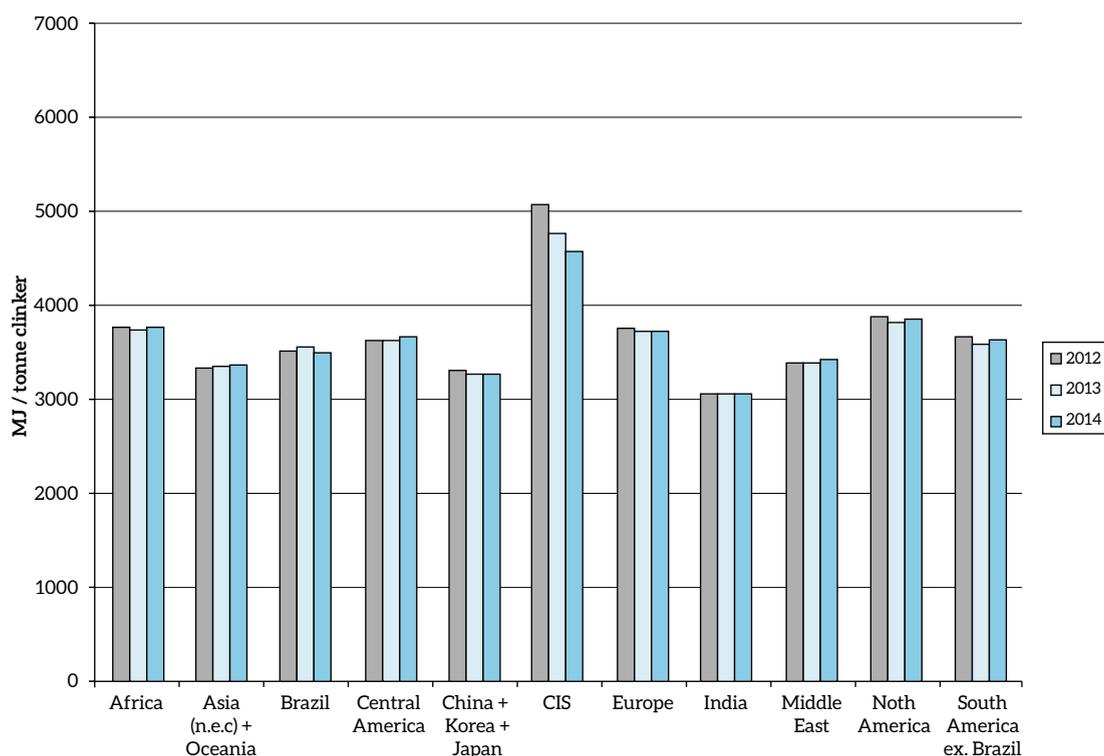


Figura 8 – Consumo Específico de Energia Térmica na Indústria de Cimento

Fonte: CSI, 2014

A posição brasileira no consumo específico de energia elétrica é ainda mais favorável do que no caso da energia térmica. De acordo com Cement Sustainability Initiative (CSI, 2014), esse parâmetro no Brasil foi inferior à média mundial, apesar de ser superior ao consumo dos vizinhos sul-americanos, do Oriente Médio e dos dois maiores produtores mundiais (China e Índia). A eficiência no uso de eletricidade não se converte em ganho de competitividade, pois o preço pago no Brasil pela energia elétrica de uso industrial se situa entre

os mais elevados do mundo (EBC, 2012). O consumo específico de energia elétrica de diversos países pode ser visto na Figura 9.

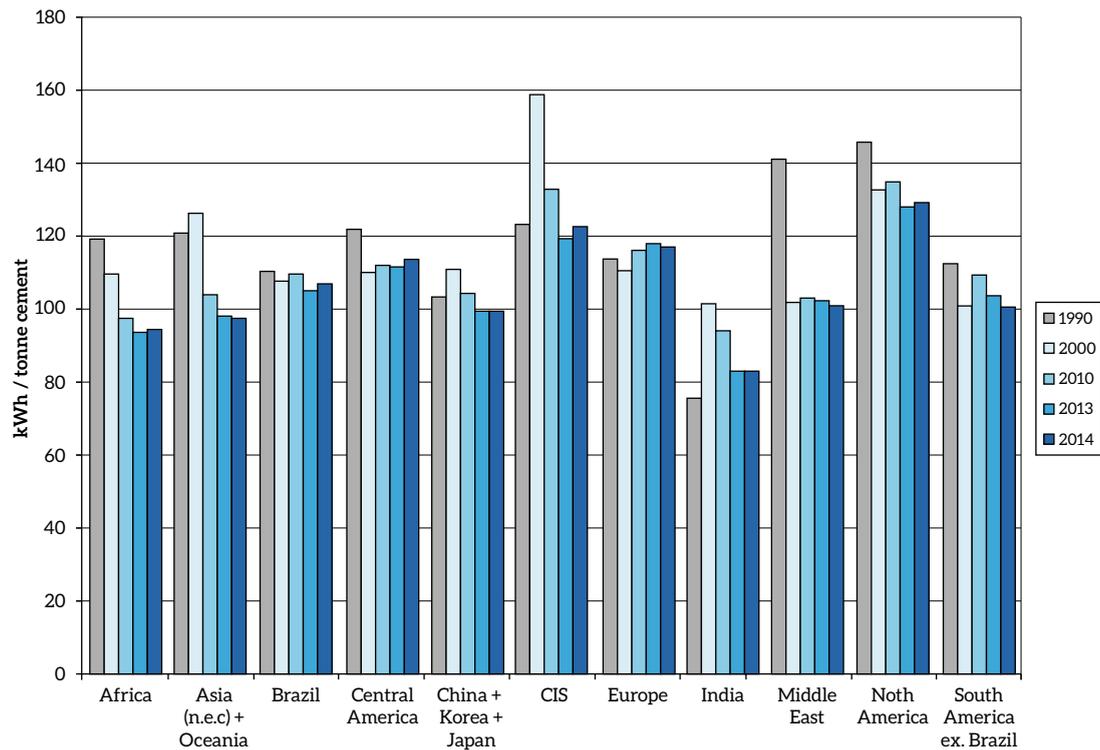


Figura 9 – Consumo Específico de Energia Elétrica na Indústria de Cimento

Fonte: CSI, 2014

De acordo com Avami e Sattari (2007), o consumo de eletricidade para o processo via seca pode ser distribuído segundo a Tabela 9.

Tabela 9 – Energia Elétrica Requerida por Etapas do Processo Produtivo do Cimento

Processo	Consumo elétrico (%)
Tratamento/moagem matéria-prima	3%
Maceração	33%
Ventiladores e refrigeradores	18%
Coletor de poeira	5%
Moagem do cimento	35%
Transporte	6%
Total	100%

Fonte: Elaboração própria a partir de AVAMI; SATTARI, 2007

A Tabela 9 apresenta dados para uma planta com consumo específico elétrico de 130 kWh/tonelada de cimento. Para o Brasil, os valores são inferiores, já que este parâmetro está na faixa de 103 kWh/tonelada de cimento (Tabela 10).

Tabela 10 – Evolução do Consumo de Energia Térmica e Elétrica no Setor de Cimento Brasileiro

Ano	Consumo específico de energia									
	1990	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Energia térmica (MJ/t clínquer)	4.210	3.470	3.740	3.770	3.580	3.610	3.570	3.680	3.620	3.520
Energia elétrica (kWh/t cimento)	110	108	110	112	112	114	113	109	108	103

Fonte: Elaboração própria a partir de CSI, 2014

Os ganhos de eficiência energética ao longo dos anos refletem aprimoramento tecnológico, como transição da via úmida para a via seca, inclusão de preaquecedores e pré-calcinadores, aumento do uso de adições, além de implantação de novas instalações e modernização de plantas antigas, aumentando a capacidade dos fornos (OEE, 2001).

No que se refere às emissões de GEE em nível mundial, a indústria de cimento é, depois da geração elétrica, a segunda maior fonte emissora, representando 5% do total (IEA, 2009). Metade das emissões de CO₂ da indústria de cimento é proveniente do processo de calcinação (ou descarbonatação), 40% da combustão dos combustíveis no forno, 5% do transporte das matérias-primas, assim como nos motores estacionários utilizados para garantir força motriz durante o processo produtivo, e o restante é proveniente da energia elétrica usada nas operações (LI et al., 2013; BENHELAL et al., 2013; BOSOGA et al., 2009). A reação de calcinação pode ser vista na Equação 1.



A maior parte das emissões diretas de GEE na produção de cimento é composta por CO₂ (WBCS, 2008). As emissões de CH₄ são responsáveis por apenas 0,01% do total de emissões nos fornos, em função da alta temperatura de combustão. Outros GEE têm baixa participação nas emissões do setor de cimento (WBCS, 2008).

A evolução das emissões de CO₂ do processo de calcinação, assim como a evolução do fator de emissão (FE) na produção de cimento nacional, segundo dados da CSI (2014), podem ser vistas na Tabela 11 e na Figura 10, respectivamente.

Tabela 11 – Evolução das Emissões de CO₂ pelo Processo de Calcinação no Setor de Cimento Brasileiro

Ano	Emissões de CO ₂ (Gg)
1990	12.000
2000	17.100
2005	14.300
2006	16.200
2007	20.400
2008	22.100
2009	22.700
2010	25.300
2011	26.800

Fonte: Elaboração própria a partir de CSI, 2014

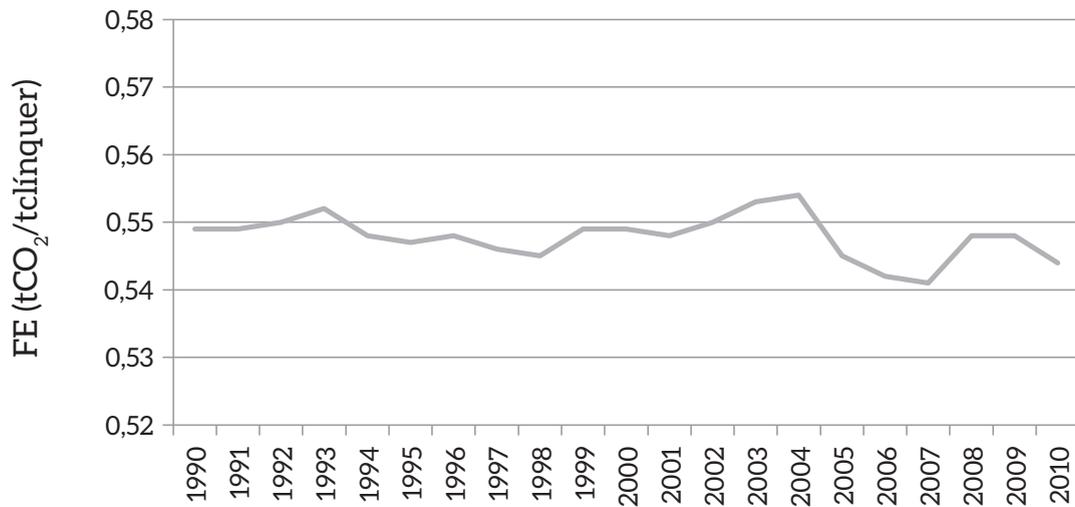
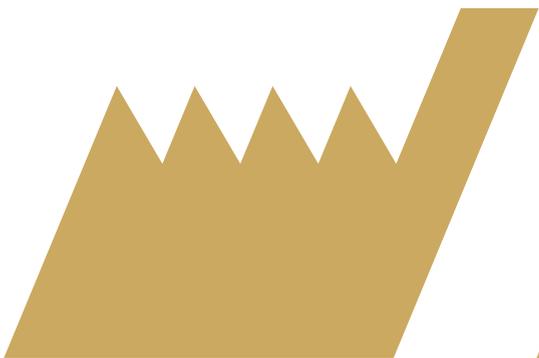


Figura 10 – Evolução do Fator de Emissão no Setor de Cimento

Fonte: Elaboração própria a partir de MCTI, 2014



Melhores tecnologias disponíveis aplicáveis aos processos produtivos do setor

Capítulo

2

2 MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS APLICÁVEIS AOS PROCESSOS PRODUTIVOS DO SETOR

A produção de cimento é um processo energointensivo, o que resulta em emissões de dióxido de carbono não só pelo consumo de combustíveis, como pela calcinação do calcário. Assim, a aplicação de medidas de eficiência energética é altamente significativa para que essas emissões sejam reduzidas, assim como seus impactos ao meio ambiente.

Dessa forma, este capítulo discutirá as MTD de efficientização energética aplicáveis ao setor de cimento, assim como os usos de combustíveis alternativos e de adições ao cimento. 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 tecnologias.

2.1 PROCESSO POR VIA SECA COM MÚLTIPLOS ESTÁGIOS DE PRAQUECEDORES E PRÉ-CALCINADORES

A tecnologia mais avançada para os fornos é o processo por via seca, combinado com estágios de preaquecimento e pré-calcinação. Esses estágios utilizam o calor residual do forno e do resfriador do clínquer para preaquecer e pré-processar a alimentação do forno e, assim, permitir consideráveis economias de energia (IIP, 2014; IPPC, 2013).

Existem três tipos de fornos rotativos para clínquerização: forno sem preaquecedor, forno com preaquecedor e forno com preaquecedor e pré-calcinador. O segundo e o terceiro são mais vantajosos que o primeiro, já que apresentam consumo menor de energia. Por essa razão, fornos sem preaquecedores têm sido substituídos ao longo dos anos. Plantas novas incluem, além do preaquecedor, o pré-calcinador, o que reduz ainda mais a energia termal do processo (IEA, 2010).

Um preaquecedor consiste numa série de ciclones verticais nos quais o material passa em contracorrente com os gases de exaustão do forno. Assim, o calor é transferido do gás quente para a farinha crua, que é preaquecida e parcialmente calcinada (30%), antes de entrar no forno. Quanto maior o número de estágios do ciclone, maior a quantidade de calor recuperada (IPPC, 2013; IEA, 2010).

Sistemas de fornos com cinco estágios de ciclones preaquecedores e pré-calcinadores são considerados tecnologia padrão para novas plantas (IIP, 2014). O consumo de energia para diferentes fornos cimenteiros pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 – Consumo de Energia para Diferentes Fornos de Cimento

Processo	Consumo de energia (GJ/t clínquer)
Via úmida	5,9 - 6,7
Via seca	4,6
1 estágio preaquecedor	4,2
2 estágios preaquecedores	3,8
3 estágios preaquecedores	3,3
4 estágios preaquecedores	3,1
5 estágios preaquecedores	3,0 - 3,1
6 estágios preaquecedores	2,9

Fonte: FLSMidth, 2006

Segundo o IIP (2014), a economia de combustível dessa tecnologia pode chegar a 3 GJ/t clínquer, e o consumo elétrico pode aumentar para 9 kWh/t clínquer. O potencial de redução de emissão de CO₂ foi estimado em 284 kg CO₂/t clínquer na China, 297 kg CO₂/t clínquer na Índia e 233 kg CO₂/t clínquer nos Estados Unidos.

2.2 CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO NA PRODUÇÃO DE CLÍNQUER

A otimização do processo de produção do clínquer é feita para reduzir o consumo de calor, aprimorar a qualidade do clínquer e aumentar a vida útil dos equipamentos pela estabilização dos parâmetros do processo. Para isso, devem ser incluídas técnicas que assegurem a composição ótima da farinha crua, gerenciem adequadamente os processos de combustão e melhorem a operação de arrefecimento (IIP, 2014).

Processos que não são automatizados ou não otimizados podem levar a perdas de calor e instabilidades de processo, causando paragens operacionais (CSI/ECRA, 2009). Atualmente, todos os fornos modernos são equipados com sistemas de controle e otimização (CSI/ECRA, 2009). Ademais, o custo de operação de um forno otimizado é atenuado devido a: redução de combustível e refratário, redução do custo de manutenção e aumento da produtividade (IIP, 2014).

Além de automatizar a pesagem e homogeneização do processo, outros parâmetros, como ar, vazão mássica e variação de temperatura, podem ser controlados para otimizar a operação do forno (IIP, 2014; IPPC, 2013). Sistemas adicionais de controle incluem o uso de analisadores *on-line* que permitem que os operadores determinem a composição química das matérias-primas e do produto, viabilizando mudanças imediatas na mistura desses materiais. Assim, o sistema de controle do processo do forno melhora a recuperação de calor, passagem de material e aumenta a confiabilidade do teor de cal livre contido no clínquer (IIP, 2014; IPPC, 2013; CSI/ECRA, 2009).

De acordo com Cement Sustainability Initiative/European Cement Research Academy (CSI/ECRA, 2009), essa tecnologia impacta no decréscimo de energia térmica de 50 a 100 MJ/t clínquer e de energia elétrica de 0 a 1 kWh/t clínquer. As emissões diretas de CO₂ têm o potencial de redução entre 4 e 18 kg CO₂/t clínquer, e as indiretas, entre 0 a 0,7 kg CO₂/t clínquer. Ainda segundo CSI/ECRA (2009), os principais parâmetros influenciadores são o *status* inicial da planta, a instrumentação, a educação do *staff* e a intensidade de CO₂ dos combustíveis.

Os custos estimados para essa tecnologia estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Custos Estimados para o Sistema de Controle e Otimização da Produção de Clínquer

Custo estimado ⁽¹⁾	Novas plantas		Retrofit	
	Investimento ⁽²⁾ (milhão €)	Operacional ⁽³⁾ (€/t clínquer)	Investimento (milhão €)	Operacional (€/t clínquer)
	0,25 a 0,35	0,22 a 0,63	0,25 a 0,35	0,27 a 0,74

- 1 O custo estimado é baseado na capacidade de produção de clínquer de 2 milhões de tonelada por dia.
- 2 Os custos de investimento podem variar significativamente, de acordo com a configuração da planta e nível de instrumentação e automação.
- 3 Depreciação, inflação e taxa de juros não estão incluídas nos custos operacionais.

Fonte: CSI/ECRA, 2009

2.3 REFRATÁRIO NO FORNO DE CLINQUERIZAÇÃO PARA REDUÇÃO DE PERDA DE CALOR

A perda de calor pode se dar pelo casco do forno, especialmente na zona de queima. Assim, a utilização de melhores isolantes refratários reduz esse efeito indesejável. A escolha do refratário é função da qualidade do isolamento e da habilidade de desenvolver e manter um revestimento (WORRELL; GALITSKY, 2008).

O uso de melhores refratários pode levar ao aumento da confiabilidade do forno e reduzir o tempo de parada, o que também leva à redução dos custos de produção e da energia requerida no *start-up* (WORRELL; GALITSKY, 2008).

De acordo com IIP (2014), a redução no consumo de combustível é estimada em 0,12 a 0,4 GJ/t clínquer, com potencial de redução de emissão de CO₂, na China, entre 11 e 38 kg/t clínquer. Quanto aos custos, ainda segundo IIP (2014), o valor estimado é de aproximadamente US\$ 0,25/ano.t clínquer.

2.4 MODIFICAÇÃO NOS PRAQUECEDORES

Como já mencionado, os ciclones com múltiplos estágios de preaquecimento são os principais componentes para a troca de calor entre o gás e a farinha crua no processo de combustão do clínquer. No entanto, a perda de pressão dos preaquecedores aumenta com o número de estágios do ciclone. Assim, a instalação de ciclones com menor queda de pressão reduz o consumo elétrico do sistema de ventilação dos gases de exaustão (IIP, 2014; CSI/ECRA, 2009; WORRELL; GALITSKY, 2008).

A redução da queda de pressão é atingida por otimização geométrica do ciclone com separação quase constante da alimentação do forno. Segundo CSI/ECRA (2009), para cada hPa⁶ de redução de perda de pressão, 0,12 a 0,15 kWh/ t clínquer de energia elétrica pode ser economizada, o que vai depender da eficiência do sistema de ventilação. Para a maioria dos fornos antigos existentes, a quantidade economizada está entre 0,6 e 1,5 kWh/t clínquer. E para IIP (2014), a economia de eletricidade está entre 0,7 a 4,4 kWh/t clínquer, com potencial de redução de emissão de 0,5 a 3,5 kg/ clínquer.

⁶ Unidade de pressão. Hectopascal, equivalente a 100 Pa.

A instalação desses ciclones pode ser cara, já que implica reconstrução ou modificação da torre de preaquecimento e os custos são específicos para cada planta. De acordo com Worrell e Galitsky (2008), o custo para esse sistema é de US\$ 2,7/ ano.t clínquer. E para IPP (2014), o custo é de US\$ 3/ ano.t clínquer.

2.5 ELEVADORES DE CANECA PARA ALIMENTAÇÃO DO FORNO

Os sistemas de transporte mecânico e pneumático são usados pelas plantas de cimento para transportar a alimentação ao forno, poeira do forno, cimento acabado e combustível (IIP, 2014).

Plantas novas devem estar disponíveis para usar esteiras mecânicas, a menos que o projeto impeça sua utilização ou faça do sistema pneumático uma escolha mais viável. Para as plantas já existentes, a conversão do sistema pneumático para mecânico pode ser rentável devido a aumento de confiabilidade e tempo reduzido de parada (WORRELL; GALITSKY, 2008).

De acordo com Hollingshead e Venta (2009), a substituição por sistema mecânico pode economizar 2,9 kWh/t cimento, com custo de instalação estimado em US\$ 4,1/t cimento. A instalação da esteira rolante (*belt conveyor*) e elevador de canecas (*bucket elevator*) resulta no custo de investimento de US\$ 3,43/t cimento e reduz o custo de operação para US\$ 0,17/t cimento. Ademais, o consumo elétrico pode ser reduzido em 2,5 kWh/t cimento (WORRELL; GALITSKY, 2008).

2.6 MOINHOS DE ROLOS VERTICAIS PARA MOAGEM

A moagem de cimento representa quase 40% da energia elétrica utilizada na produção de cimento. Os moinhos de bolas (*ball mills*) representam quase 60% de todos os moinhos numa planta de cimento, seguidos dos moinhos de rolos verticais (*vertical roller mills*) e prensa de rolos (*roller presses*), cada um com 17%, além dos moinhos horizontais (*horizontal mills*), com 7% (ZKG, 2010; CSI/ECRA, 2009).

A escolha de cada moinho deve levar em consideração o fato de que a matéria-prima, o carvão, o clínquer e a escória têm diferentes moabilidades, tamanho de partículas e teor de umidade, exigindo diferentes fluxos, índices de finura⁷ e outros parâmetros de qualidade. Cada tipo de moinho, e seu processo de moagem associado, é mais adequado para algumas aplicações do que para outras, não existindo um moedor universal. Em vez disso, há uma combinação de processos ou certos tipos de moinho dominam determinada aplicação. Quanto maior a pressão durante a moagem, menor a distribuição de tamanhos das partículas e maior o impacto na demanda de água e no tempo de pega⁸ do cimento (ZKG, 2010).

Além do aumento da produtividade, uma redução significativa da demanda específica de energia para a moagem de cimento pode ocorrer, combinando a moagem em moinhos de rolos verticais ou moinhos de alta pressão com os moinhos de bolas, ou até pela substituição completa destes últimos. O consumo de energia específico dos moinhos de bolas varia de 30 a 42 kWh/t clínquer, dependendo da finura do cimento (IIP, 2014).

7 A finura do cimento é uma noção relacionada com o tamanho dos grãos do produto. É definida de duas maneiras: pelo tamanho máximo do grão, quando as especificações estabelecem uma proporção em peso do material retido na operação de peneiramento em malha de abertura definida, e pelo valor da superfície específica (soma das superfícies dos grãos contidos em um grama de cimento) (SIQUEIRA, 2008).

8 Definido como o momento em que a pasta adquire certa consistência que a torna imprópria a um trabalho. Corresponde à evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, consequente a um processo químico de hidratação (SIQUEIRA, 2008).

Ainda há a necessidade de desenvolver tecnologias de moagem, no entanto, combinando os diferentes tipos de moagens, não ocorrem problemas na qualidade do produto. Essa configuração com múltiplos estágios é mais complexa de operar (CSI/ECRA, 2009).

Segundo IPP (2014), a economia de energia pela substituição do moinho de bolas pelos moinhos de rolo vertical pode variar entre 20% e 30% e é função principalmente da granulometria do produto. O consumo elétrico pode ser reduzido para 10 a 20 kWh/t cimento. Quanto ao potencial de redução de emissão de CO₂, na China, as emissões podem ser reduzidas de 7,9 a 19 kg/t cimento e, na Índia, de 8,1 a 19,4 kg/t cimento. Ainda de acordo com IPP (2014), o custo de investimento foi estimado entre US\$ 2,5 a 8/t cimento.ano.

2.7 VENTILADORES DE ALTA EFICIÊNCIA PARA PRAQUECEDORES

Ventiladores com baixa eficiência podem ser substituídos por ventiladores com alta eficiência, resultando em economia de eletricidade. Segundo IPP (2014), a eletricidade pode ser economizada em 0,7 kWh/t clínquer. Na Índia, foi reportada economia entre 0,3 e 0,5 kWh/t clínquer, dependendo do tempo de uso do ventilador já existente. O potencial de redução das emissões de CO₂ é de 0,55 a 0,57 kg CO₂/t clínquer. O custo de capital foi de US\$ 0,01/t clínquer.ano.

2.8 PRENSA DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO

Nessa tecnologia, duas prensas de rolos pressurizam o material até 3.500 bar, aumentando significativamente a eficiência da moagem e reduzindo o consumo energético. Essas prensas são usadas para ampliar a capacidade dos moinhos já existentes e são encontradas especialmente em países com alto custo de eletricidade.

O consumo elétrico pode ser reduzido para 10 a 24 kWh/t cimento. Na Índia, foi reportada economia de 7 a 15 kWh/t cimento (IPP, 2014). Na China, uma planta de 5.000 t cimento/dia reduziu seu consumo elétrico para 8 a 10 kWh/t cimento, com a substituição do moinho de bolas para a prensa de rolos de alta pressão (IPP, 2014). Quanto às emissões, na China, o potencial de redução é de 7,9 a 19 kg/t cimento e, na Índia, 8,1 a 19,4 kg/t cimento (IPP, 2014). O custo de investimento foi estimado entre US\$ 2,5 e 8/t cimento.ano (IPP, 2014).

2.9 DE FREQUÊNCIA PARA RESFRIADORES DE CLÍNQUER

Na maioria das plantas, a quantidade de ar para arrefecimento deve ser ajustada dependendo da sua demanda. Os amortecedores podem controlar esse fluxo de ar do ventilador para o refrigerador. Apesar dessa vantagem, oferecem controle do fluxo ineficiente, já que o ventilador continua a operar a plena carga. Assim, um inversor de frequência pode ajustar a velocidade do ventilador, economizando grande quantidade de energia (CDM, 2008).

Segundo IPP (2014), o potencial de economia de energia foi estimado entre 0,04 e 0,17 kWh/t clínquer. E o custo de implementação dessa tecnologia está em torno de US\$ 0,01/t clínquer.ano.

2.10 PRAQUECEDOR COM ALTA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Esse sistema promove alta taxa de transferência de calor sólido-gás com duas séries de correntes de ar em paralelo, fazendo que essa taxa dobre ou mais para cada preaquecedor, assim o consumo de calor da produção de clínquer tende a ser próximo do consumo térmico teórico. Esse sistema é combinado com cinco ciclones, e o gás flui uniformemente através destes, que têm duas séries paralelas de ar, de modo que a taxa sólido-gás do preaquecedor dobra, o que aumenta a eficiência da troca de calor do sistema, reduzindo a temperatura do gás de exaustão na saída do preaquecedor (IPP, 2014).

Outro sistema denominado *external circulation calciner*, com alta taxa de sólido-gás, adota um *by-pass*, em que certas quantidades de materiais sólidos que saem do calcinador retornam para este. Assim, as partículas com calcinação insuficiente continuam a calcinar repetidamente no forno, aumentando a taxa de calcinação do material que sai do calcinador, reduzindo a carga térmica do forno rotativo e aumentando significativamente a produção do forno por unidade de volume, o que reforça a estabilidade térmica do pré-calcinador e reduz a emissão de gases nocivos (IPP, 2014).

Segundo IPP (2014), o consumo de energia térmica da produção de clínquer pode ser reduzido em 2.85 GJ/t clínquer, economizando 14,3 kg de carvão por tonelada de clínquer (no caso da China). Foi reportada redução anual de 571,5 TJ de consumo energético em uma planta da China com capacidade de 2.500 toneladas por dia de clínquer. O custo de investimento dessa tecnologia para essa mesma planta chinesa foi de US\$ 5,11 milhões, com redução de US\$ 5,04 milhões devido à economia de energia.

2.11 RECUPERAÇÃO DE CALOR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os gases de saída do forno, do sistema de arrefecimento do clínquer e do sistema de preaquecimento contêm energia útil que pode ser convertida em eletricidade. Apenas em fornos para processo via seca, a temperatura do exausto é suficientemente alta para recuperar o calor e transformá-lo em eletricidade de maneira custo-efetiva (WORRELL; GALITSKY, 2008).

O sistema de cogeração pode ter turbinas a gás que utilizam o calor residual (*top cycle*) ou podem ter a instalação de uma caldeira de calor residual com um sistema de turbina a vapor (*bottom cycle*). No entanto, esta última é a mais utilizada em plantas internacionais e já provaram sua economicidade (WORRELL; GALITSKY, 2008).

O calor residual dos fornos de cimento é usualmente utilizado para secagem da matéria-prima. Dependendo da umidade destas e da tecnologia de arrefecimento, há ainda calor residual adicional proveniente dos fornos e do refrigerador. Esse calor pode então ser utilizado para secar outros materiais, como escória ou combustíveis secundários, ou então para produção de vapor e eletricidade. Essa tecnologia tem aplicação limitada para plantas com matéria-prima com alto teor de umidade, já que a secagem desta é o mais importante na planta de cimento (CIS/ECRA, 2009).

De acordo com CSI/ECRA (2009), essa tecnologia pode produzir entre 8 e 22 kWh/t clínquer sem mudança na operação do forno e 45 kWh/t clínquer com mudanças, tal qual o uso de menos estágios de ciclones. O potencial de redução das emissões de CO₂ é de 4 a 15 kg CO₂/t clínquer. Uma usina instalada numa planta indiana (4.500 toneladas por dia de clínquer) com capacidade de 8 MW reduziu as emissões de CO₂ em 45.000 t/dia (IPP, 2014). Na China, para uma planta com capacidade de 2.000 t/dia, 20 kWh/t clínquer de eletricidade foram geradas, com custo de investimento de US\$ 3,1 a 4,7 milhões (IPP, 2014).

2.12 MELHORIAS NO SISTEMA DE COMBUSTÃO

A combustão de fontes energéticas pode levar a ineficiências no forno, como queima mal ajustada, queima incompleta com formação de CO e combustão com excesso de ar. Melhorias no sistema de combustão otimizam a chama, a mistura do ar/combustível e reduzem a quantidade de ar em excesso (WORRELL; GALITSKY, 2008).

A tecnologia *gyro-therm* melhora a qualidade da chama do gás enquanto reduz as emissões de NOx (FCT, 2014). Desenvolvida na University of Adelaide, Austrália, essa tecnologia pode ser aplicada a queimadores a gás ou gás/carvão (WORRELL; GALITSKY, 2008). O queimador *gyro-therm* utiliza a tecnologia patenteada *precessing jet*, em que o desenho do bocal produz um jato com um efeito giroscópico. Esse movimento produz uma mistura em larga escala em que o ar é engolido pelo combustível sem utilizar gás de alta velocidade ou jatos de ar (FCT, 2014).

Além de reduzir o consumo energético, reduz a emissão de NOx entre 30% e 70% e aumenta a produtividade em 5%. Atinge-se economia específica de combustível de 8% em plantas com a tecnologia *gyro-therm*. Os custos foram estimados em US\$ 1,0/t clínquer.ano (WORRELL; GALITSKY, 2008).

2.13 REFRIGERADORES DE GRELHA DE ALTA EFICIÊNCIA

Refrigeradores de grelha (*grate cooler*) são usados para resfriar o clínquer imediatamente após sua saída do forno. Estes são parte integrante da recuperação de calor do clínquer. Assim, refrigeradores de grelha que operam com alta eficiência levarão a um menor desperdício de calor e reduzirão o uso de combustível no processo (WORRELL; GALITSKY, 2008).

O resfriamento também influencia a qualidade do clínquer, pois, ao resfriar rapidamente, consegue-se manter a estrutura cristalográfica desejada para obtenção da resistência mecânica e estabilidade química necessária ao cimento (SILVA, 2013).

Há três tipos de resfriadores: satélite ou planetário, rotativo e de grelha. O mais moderno é o de grelha, que vem substituindo os outros dois modelos (SILVA, 2013). Ambos os modelos mais antigos utilizam a quantidade exata de ar para o resfriamento do clínquer, que é necessário à combustão. Isso leva a temperaturas do clínquer mais altas (entre 120°C a 200°C acima da temperatura ambiente), comparado com os resfriadores de grelha (60°C a 80°C acima da temperatura ambiente). Uma corrente de ar de exaustão também é produzida e é utilizada para secagem ou produção de eletricidade (EPA, 2010; CIS/ECRA, 2009; WORRELL; GALITSKY, 2008).

A maior vantagem do resfriador de grelha é o fato de que este é ideal para grandes produções por ter capacidade de produção de até 12.000 tpd, comparado com 4.000 tpd das outras grelhas, além de ter maior eficiência na recuperação de calor (CIS/ECRA, 2009).

A substituição de um refrigerador planetário por um de grelha pode reduzir o consumo de combustível em 8%, apesar do aumento do consumo de eletricidade em 2,5 kWh/t cimento. No entanto, o custo para sua obtenção é proibitivo para capacidades menores que 550 t/dia (WORRELL; GALITSKY, 2008).

Esses resfriadores são os mais indicados para forno com pré-calcinador, pois permitem que o ar aquecido (terciário) seja enviado para a câmara de combustão do pré-calcinador, diferentemente do planetário, que não permite essa opção. A conversão para um resfriador de grelha pode ser mais econômica para plantas que têm ou terão um pré-calcinador (WORRELL; GALITSKY, 2008).

De acordo com CIS/ECRA (2009), essa tecnologia permite redução de energia térmica entre 100 e 300 MJ/t clínquer e aumento de energia elétrica entre 1 e 6 kWh/t clínquer. Para esse mesmo estudo, o potencial de redução de emissão direta de CO₂ é de 9 a 28 kg CO₂/t clínquer e de emissões indiretas de 1 a 3 kg CO₂/t clínquer.

Os custos para converter um resfriador planetário para um de grelha de última geração em uma planta com capacidade de 6.000 t/dia foram estimados em € 15 a 20 milhões. O *retrofit* de um refrigerador de grelha antigo demanda custo entre € 1 e 3 milhões. Para Worrell e Galitsky (2008), o custo da conversão para um *grate cooler* é estimado em US\$ 0,44 e US\$ 5,5/t clínquer.ano, dependendo do grau de reconstrução necessário. Os custos de operação anuais podem aumentar em US\$ 0,11/t clínquer.

2.14 MOAGEM DE CIMENTO COM HOROMILL

O conceito dessa tecnologia Horomill foi demonstrado na Itália, em 1993, e consiste num rolo horizontal dentro de um cilindro. A força centrífuga resultante do movimento do cilindro promove a distribuição uniforme de uma camada dentro do cilindro. A camada então passa pelo rolo com pressão entre 700 e 1.000 bar, e o produto acabado é coletado num filtro de poeira (WORRELL; GALITSKY, 2008).

Horomill é um moinho compacto que produz um produto acabado em um só estágio e com custo de capital relativamente baixo. O consumo elétrico pode ser reduzido entre 10 e 25 kWh/t cimento, e as emissões, na China, foram reduzidas em 7,9 a 19,8 kg CO₂/t cimento e, na Índia, entre 8,1 a 20,3 kg CO₂/t cimento (WORRELL; GALITSKY, 2008).

2.15 MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA

Uma planta típica de cimento utiliza entre 500 e 700 motores de diferentes tamanhos para mover ventiladores e forno rotatório, transportar o material e fazer a moagem. Motores de alta eficiência reduzem a demanda de eletricidade na planta (WORRELL; GALITSKY, 2008).

Essa tecnologia leva a uma economia de eletricidade entre 3% e 8%. Para uma planta de 5.000 tpd, a substituição de todos os motores do sistema de ventilação apresenta custo de US\$ 0,22/t cimento.ano (WORRELL; GALITSKY, 2008).

Em Davenport, Califórnia, a substituição de 13 motores de alta eficiência levou a uma economia de 2,1 MWh de eletricidade por ano. Os custos com energia foram reduzidos em US\$ 168 mil/ano, e os custos com manutenção, em US\$ 30 mil/ano. O custo de implementação foi de US\$ 134 mil (WORRELL; GALITSKY, 2008).

2.16 VEDAÇÃO ADEQUADA DOS FORNOS

Vazamentos no forno podem afetar a eficiência da combustão e levar a perdas de calor. Esses vazamentos podem ser controlados com a implantação de selos, que reduzem a entrada de ar nos fornos, do tipo pneumáticos, de mola ou *lamella*. Apesar de os selos durarem entre 10 mil e 20 mil horas, é necessário monitorar o seu funcionamento para reduzir possíveis vazamentos (WORRELL; GALITSKY, 2008).

Em uma planta japonesa, a vedação adequada com selos reduziu o vazamento de ar nos fornos em 160 Nm³/min, resultando em economia de energia de 0,042 MJ/t clínquer. Para uma planta de 5.000 tpd, o custo da implantação dessa tecnologia foi de US\$ 50 mil (APP, 2008).

2.17 SILO GRAVITACIONAL PARA HOMOGENEIZAÇÃO

Para obter um produto de alta qualidade e manter uma combustão ótima e eficiente no forno, é crucial que a farinha crua esteja completamente homogeneizada (WORRELL; GALITSKY, 2008). A maioria das plantas usa ar comprimido para agitar a farinha nos silos de homogeneização de ar fluidizado. Algumas plantas, com processos antigos, usam sistemas mecânicos com retirada simultânea de material de 6 a 8 silos, a taxas variáveis (FUJIMOTO, 1993).

Plantas modernas usam silos do tipo gravitacional para reduzir o consumo de energia elétrica. Nesses silos, o material afunila para baixo, onde é misturado em um cone invertido. Esse tipo de silo pode não fornecer a mesma eficiência de homogeneização que os sistemas com ar fluidizado, embora cada vez mais plantas estejam substituindo seus sistemas mecânicos ou de ar fluidizado pelo silo gravitacional (HOLDERBANK, 1993).

A economia de energia para esse processo é estimada entre 1 e 2,5 kWh/t de farinha crua processada. Na China, para cada tonelada de matéria-prima processada, de 0,8 a 2,5 kg de CO₂ podem ser economizados. Na Índia, a quantidade varia entre 0,8 e 2 kg de CO₂. Os custos para o *retrofitting* é estimado em US\$ 3,7/t de matéria-prima (IIP, 2014).

2.18 SEPARADORES E CLASSIFICADORES DE ALTA EFICIÊNCIA PARA MOAGEM DO CARVÃO

Separadores e classificadores enviam partículas maiores de volta para a moagem. Os separadores ou classificadores com alta eficiência separam as partículas maiores com mais precisão, reduzindo o excesso de moagem e, conseqüentemente, o consumo de energia do moinho (IIP, 2014).

Substituindo o separador externo por moinho de bolas com separadores externos mais eficientes, o consumo de energia da usina pode ser reduzido, e a capacidade da fábrica aumentada (IIP, 2014).

Essa tecnologia pode economizar 1,7 kWh de eletricidade por tonelada de carvão processado. Na China, as emissões foram reduzidas em 1,3 kg de CO₂/t de carvão. Os custos de instalação foram estimados em US\$ 0,01/t clínquer.ano (IIP, 2014).

2.19 ADOÇÃO DE FORNOS DE CORRENTE ALTERNADA

Uma quantidade substancial de energia é utilizada para rodar o forno. O uso de motores de corrente alternada (AC) tem mais vantagens que o de corrente contínua (DC), tradicionalmente utilizados. O sistema de motor AC resulta em ganhos de eficiência ligeiramente superior (0,5% a 1% de redução de energia elétrica no forno) e tem menores custos de investimento. Essa tecnologia resulta em economia de eletricidade entre 0,55 e 3,9 kWh/t clínquer (WORRELL; GALITSKY, 2008).

2.20 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

Esta prática demanda o treinamento de pessoal para estar atento ao consumo de energia e eficiência das plantas cimenteiras. Enquanto diversos processos na produção do cimento são automatizados, ainda há oportunidades que requerem treinamento de empregados para aumentar a economia de energia (WORRELL; GALITSKY, 2008).

Manutenção preventiva garante que os equipamentos e outras infraestruturas estejam em boas condições para atingir resultados ideais. Além de economizar energia, essa ação aumenta a capacidade de utilização. Manutenção dos refratários do forno ou redução de ar no forno são áreas típicas em que a manutenção preventiva pode atuar (WORRELL; GALITSKY, 2008).

A economia de energia típica devido a essa ação é de 3 kWh/t clínquer. Os custos para implantação são baixos, resultando em um *payback* de menos de um ano (WORRELL; GALITSKY, 2008).

2.21 VARIADORES DE VELOCIDADE

Motores elétricos são os maiores consumidores de eletricidade numa planta de cimento, com alta necessidade de controle de fluxo. Motores são usados para ventiladores, fornos rotatórios, transporte de material e moagem. A maior eficiência energética para os motores é a utilização de variadores de velocidade (CSI/ECRA, 2009).

A economia de energia dessa tecnologia pode variar entre 7% e 60%, dependendo do fluxo padrão do equipamento (CSI/ECRA, 2009). Em uma planta no Canadá, a implantação de variadores de velocidade resultou em economia de 6 kWh/t cimento (IPP, 2014). Os custos são estimados em US\$ 0,9 a 1,0/cimento.ano (CSI/ECRA, 2009).

2.22 ADIÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA NÃO CARBONATADA (CARBONETO DE ESCÓRIA) PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTO

Esse projeto foi criado por Nanning Shizuo Building Materials CO., Ltd., na China, e utiliza fontes de cálcio não carbonatadas (carboneto de escória) para substituir parcialmente o calcário como matéria-prima para a produção de cimento (CDM, 2009). Carboneto de escória (*carbide slag*) é um resíduo sólido gerado na produção industrial de etino, PVC, polietileno, álcool e outros (CDM, 2009). Esse resíduo é poluente para o meio ambiente, especialmente para a água. No entanto, ainda não há disposição adequada para esse resíduo, razão pela qual é depositado em aterros (CDM, 2009).

Na produção convencional de cimento, o calcário é descarbonizado na calcinação, produzindo CaO e CO₂, reação principal para emissão de CO₂ durante a produção de clínquer. A maior parte do carboneto de escória é composto por Ca (OH)₂ e produz CaO e H₂O, sem emissão de CO₂, reduzindo as emissões de GEE e melhorando a eficiência energética dos processos (CDM, 2009).

Em algumas plantas chinesas, essa escória foi utilizada como matéria-prima alternativa para a produção de cimento, tornando-se 68% da alimentação do forno, em massa crua (IIP, 2014). A utilização desse resíduo requer pré-tratamento por secagem e moagem e mistura com o restante das matérias-primas (arenito, argila, calcário etc.). Após esse tratamento, segue-se o fluxo convencional do processo (IIP, 2014).

Segundo CDM (2009), essa tecnologia gerou potencial de redução das emissões de 184,13 tCO₂e com custo de investimento total de US\$ 4,3 milhões para uma planta com capacidade anual de 372 mil t de clínquer e 473.400 t de cimento.

2.23 ADIÇÃO DE POZOLANA AO CIMENTO

A adição de pozolana reduz a quantidade de clínquer no cimento, assim as emissões de CO₂ proveniente da combustão e da calcinação são reduzidas. Existem dois tipos de pozolanas: as naturais e as calcinadas. As primeiras têm origem em materiais vulcânicos ou em rochas sedimentares com adequada composição química e mineralógica (por exemplo, pedra-pomes). As segundas têm origem em material vulcânico, argila, rochas sedimentares, ativadas por tratamento térmico (CIS/ECRA, 2009).

Pozolanas são materiais siliciosos ou sílico-aluminosos com alto teor de sílica reativa (SiO₂) que, na presença de água e temperatura ambiente, reage com hidróxido de cálcio, formando silicatos de cálcio. Sua adição ao cimento só é possível se a quantidade de dióxido de sílica reativa for maior ou igual a 25% em massa. Metacaulim é um exemplo conhecido de pozolana calcinada (CIS/ECRA, 2009).

A produção do cimento com pozolana envolve pré-tratamento como secagem, moagem e mistura ao clínquer. O consumo elétrico é menor devido à melhor moabilidade da maioria das pozolanas, se comparado ao clínquer substituído. O consumo térmico da produção de cimento se reduz quase linearmente com o aumento da proporção de pozolana. Para a produção da pozolana calcinada, há maior demanda de energia para sua calcinação (CIS/ECRA, 2009).

De acordo com CSI/ECRA (2009), a energia térmica se reduz entre 0 e 600 MJ/t de cimento e a elétrica se reduz entre 0 e 25 kWh/t de cimento. É possível redução das emissões de 0,52 tonelada de CO₂ por tonelada de clínquer substituído por pozolana. O custo de investimento para *retrofit* foi estimado entre € 8 e 12 milhões. O custo de capital está relacionado à capacidade de armazenamento extra para a pozolana e os cimentos, bem como o equipamento técnico para manuseio e secagem da pozolana.

2.24 ADIÇÃO DE CALCÁRIO AO CIMENTO

Uma maneira simples e eficiente de reduzir a taxa clínquer/cimento é moer calcário com clínquer para produzir cimento. Essa substituição do clínquer pelo calcário reduz as emissões de CO₂ da calcinação do calcário, causada pela produção de clínquer.

A adição de até 5% de calcário não apresenta impactos negativos na qualidade do cimento. No entanto, o calcário não contribui para o endurecimento do cimento. Sua quantidade no cimento é decisiva para a resistência da pasta a ácidos e sulfatos e a congelamento e descongelamento (CIS/ECRA, 2009).

Para um cimento com 25% a 35% de massa de calcário, a demanda de energia térmica reduz-se entre 0,22 e 0,60 GJ/t de cimento. A energia elétrica também é reduzida entre 12 e 23 kWh/t de cimento. Para esse mesmo cimento, as emissões diretas de CO₂ podem ser reduzidas entre 50 e 140 t CO₂/t de cimento e as indiretas, entre 6 e 16 kg CO₂/t de cimento. Os custos foram estimados entre € 8 e 12 milhões e são relacionados a custo de capital extra para armazenamento de outros componentes, para os novos cimentos e para o equipamento técnico para secar tais componentes (CIS/ECRA, 2009).

2.25 USO DE MINERALIZADORES PARA REDUÇÃO NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Alguns componentes contidos na matéria-prima ou que são adicionados a ela para produzir o clínquer exercem importante influência no comportamento da queima. Certas substâncias atuam como fundentes e diminuem a temperatura de fusão do clínquer, como os mineralizadores, que promovem a formação do clínquer sem participar das reações de formação. Os fluoretos são substâncias que promovem a formação do silicato tricálcico.⁹

A utilização dos mineralizadores reduz a demanda de energia do combustível, já que reduzem a temperatura de fusão do clínquer. Para um forno moderno, foi estimado que a redução de 200 K da temperatura de fusão resulta em economia de energia de mais de 5%.

O potencial de economia dessa medida é limitado, uma vez que a adição de pequenas quantidades de mineralizadores aumenta a qualidade do produto, mas grandes quantidades afetam a qualidade e a operação do forno. De acordo com CSI/ECRA (2009), a energia térmica pode ter redução de 50 a 180 MJ/t clínquer, e a elétrica pode apresentar aumento de 0 a 1 kWh/t clínquer. O potencial de redução das emissões de CO₂ é de 5 a 16 kg CO₂/t clínquer.

Essa tecnologia reduz o custo operacional entre 0,06 e 0,43 €/t clínquer. Esse custo inclui economia de combustível e consumo adicional de eletricidade. O preço de mercado dos mineralizadores não foi determinado e não é requerido investimento significativo para essa tecnologia (CSI/ECRA, 2009).

2.26 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS, GASIFICAÇÃO DE PNEUS E RESÍDUOS DE ÓLEO COMO COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

A troca de combustíveis é uma prática relevante para redução do consumo energético e emissões de GEE na indústria (HENRIQUES JR., 2010). No caso do setor cimenteiro, combustíveis derivados de resíduos, gasificação de pneus e utilização de óleo residuais podem ser aplicados como substitutos de combustíveis fósseis.

⁹ Composto químico do clínquer, que, juntamente com outros, traz acentuada característica de ligante hidráulico e está diretamente relacionados com a resistência mecânica do material após a hidratação.

Combustíveis derivados de resíduos podem ser usados para substituir combustíveis fósseis, oferecendo também alternativa melhor de gestão de resíduos, já que as temperaturas e os tempos de retenção destes no forno de cimento são altos o suficiente para eliminar os problemas relacionados com as emissões de dioxinas e furanos (APP, 2008).

A fim de serem efetivamente usados como combustíveis alternativos, os resíduos precisam ser coletados e separados por tamanho. Dependendo da característica do resíduo, este pode ser alimentado no forno ou no calcinador, como é o caso do biogás proveniente de efluentes industriais. É importante destacar que certos constituintes, como o cloro, devem ser controlados para evitar impactos negativos na qualidade do produto e no processo de produção do cimento (APP, 2008).

De acordo com APP (2008), para cada tonelada de resíduo, há economia de 15 a 19 GJ de combustível fóssil, além de redução das emissões de CO₂ de 1,42 a 1,80 t, na China, e de 1,17 a 1,48 t, nos EUA. Quanto aos custos, no Japão, o custo de instalação para plantas que processam 10 t/dia de resíduos é de aproximadamente US\$ 650 mil.

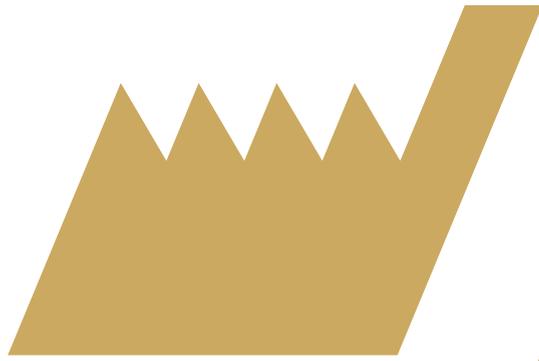
A indústria cimenteira japonesa solucionou o problema da disposição ilegal dos pneus usados, utilizando-os como combustível substituto desde a década de 1980 (APP, 2008). Os pneus usados podem ser gasificados como estiverem ou depois da trituração (APP, 2008). No forno de gasificação, são aquecidos e o gás produzido pela sua decomposição térmica pode ser usado no forno ou no calcinador como combustível substituto (IIP, 2014; APP, 2008).

A gasificação soluciona o problema tal como a não uniformidade dos componentes atribuídos à mistura excessiva de aço, que faz parte dos pneus. O aço e outros componentes incombustíveis são retirados do sistema (APP, 2008).

De acordo com APP (2008), a energia térmica a partir dos resíduos dos pneus é de aproximadamente 25 a 29 MJ/kg. Combustíveis fósseis, para a mesma quantidade de calor, podem ser economizados. Os custos foram estimados para um sistema de 7.000 toneladas/ano e resultou em cerca de US\$ 1,8 milhão.

O Japão iniciou a utilização de resíduos de óleo como combustível em 1985 como forma de substituir os combustíveis fósseis. Os resíduos são levados em caminhões até a planta e são armazenados em tanques. A seguir, são colocados no forno ou no calcinador por uma bomba (APP, 2008).

Para cada tonelada de resíduo de óleo utilizado, há economia de 21,6 GJ de combustíveis fósseis e de 2,04 t CO₂, na China, e de 1,68 t CO₂, nos EUA. No Japão, o custo de instalação para armazenamento e processamento de 10 mil t/ano é de aproximadamente US\$ 730 mil (APP, 2008).



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 cimento. O horizonte de projeção é de 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, consumo de energia e emissões (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, produção, número de plantas existentes 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 já 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 da referência do setor de cimento 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, crescimento econômico, número de plantas existentes e capacidades de produção.

Em seguida, fez-se necessário definir os seguintes parâmetros:

- 1) Tecnologias consideradas nos processos produtivos, que são forno calcinação a coque, forno calcinação a biomassa/resíduos, forno calcinação a carvão mineral, forno calcinação a carvão vegetal, forno calcinação a óleo combustível e forno calcinação a gás natural;
- 2) Processo, que tem como *input* primário o consumo específico térmico de 3.680 MJ/t clínquer (CSI, 2014) e como *input* secundário o consumo específico elétrico de 109 KWh/t cimento (CSI, 2014);
- 3) Força motriz, que tem como *input* a eletricidade comprada do *grid* e como *output* a eletricidade usada no processo para, por exemplo, moer combustíveis, farinha crua, o próprio cimento, além do sistema de ventilação e arrefecimento do sistema. Essa eletricidade foi denominada na planilha de eletricidade intermediária;
- 4) Quantidade de clínquer, que tem como *input* calor e como *output* a quantidade de clínquer produzida. Esta última tecnologia será necessária para que o modelo desconte da demanda de energia térmica do processo a redução da quantidade de clínquer que será atingida ao longo do período de análise, já que a produção do clínquer é a etapa que mais consome energia térmica.

A Tabela 14 apresenta os rendimentos (eficiência) de conversão de insumos energéticos em energia final, no ano-base (2010), de acordo com as tecnologias escolhidas. As eficiências foram obtidas de Karamarković et al. (2013), e os consumos específicos, de CSI (2014).

Tabela 14 – Rendimentos de Conversão de Insumos em Serviços Energéticos por Tecnologia em 2010

Tecnologia	Fontes	Quantidade (MJ ou KWh)	Serviço energético	Quantidade (MJ ou KWh)
Forno	Coque	1	Calor	0,85
Forno	Biomassa/resíduos	1	Calor	0,8
Forno	Carvão mineral	1	Calor	0,85
Forno	Carvão vegetal	1	Calor	0,8
Forno	Óleo combustível	1	Calor	0,86
Processo	Combust.	3.680	Calor	1
Equipamentos elétricos	Eletricidade	1	Eletricidade	1

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2014; CSI, 2014; KARAMARKOVIĆ et al., 2013

A seguir, foram projetadas eficiências dos fornos rotativos usados nas plantas de cimento, bem como a proporção de clínquer no cimento no cenário REF. Esses dados podem ser vistos na Tabela 15 e na Figura 11, respectivamente.

A projeção da proporção clínquer/cimento foi projetada linearmente a partir de dados históricos. Foi considerada uma redução dessa proporção, tendência que tem sido verificada ao longo dos anos com a utilização cada vez maior de adições que reduzem o teor de clínquer no cimento final. Para a projeção das eficiências, assumiu-se crescimento de 0,1% a cada cinco anos.

Tabela 15 – Eficiências dos Fornos de Cimento no Cenário REF

Tecnologia	Eficiências dos fornos por unidade de insumo									
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
Forno a coque	0,80	0,80	0,80	0,801	0,802	0,803	0,804	0,805	0,806	
Forno a biomassa	0,75	0,75	0,75	0,751	0,752	0,753	0,754	0,755	0,756	
Forno a carvão mineral	0,80	0,80	0,80	0,801	0,802	0,803	0,804	0,805	0,806	
Forno a carvão vegetal	0,78	0,78	0,78	0,781	0,782	0,783	0,784	0,785	0,786	
Forno a gás natural	0,88	0,88	0,88	0,881	0,882	0,883	0,884	0,885	0,886	
Forno a óleo combustível	0,83	0,83	0,83	0,831	0,832	0,833	0,834	0,835	0,836	

Fonte: Elaboração própria

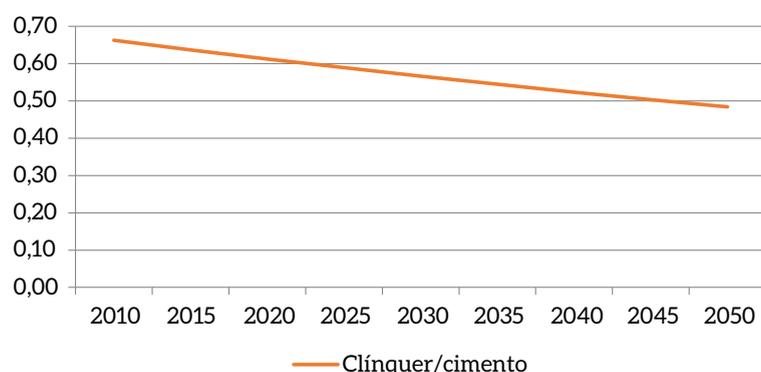


Figura 11 – Proporção Clínquer/Cimento entre 2010 e 2050 para o Cenário REF

Fonte: Elaboração própria

Para projetar a demanda de energia, inicialmente, foram consideradas projeções de PIB para o período de 2010 a 2050, convertidas em médias quinquenais (HADDAD, 2015).

Tabela 16 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Demanda Energética do Setor

Período	Crescimento Médio Anual
2010-2015	1,49%
2016-2020	2,20%
2021-2025	2,36%
2026-2030	2,17%
2031-2035	2,00%
2036-2040	1,82%
2041-2045	1,63%
2046-2050	1,45%

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, 2017b). Esse cenário incorpora efeitos recentes da crise econômica nos agregados macroeconômicos, que certamente afetarão negativamente o crescimento setorial, reduzindo o consumo de energia e as emissões de GEE em relação aos níveis deste cenário REF.

Utilizando-se as taxas de crescimento da Tabela 16, e os dados relativos a consumo específico de energia, eficiências de conversão e proporção de clínquer/cimento, é possível projetar o consumo de energia do setor até 2050.

A projeção das emissões de CO₂ se baseou na evolução da demanda energética para o cenário REF. Foram considerados os fatores de emissão *default* do IPCC constantes da Tabela 17, que também foram utilizados na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – TCN (MCTIC, 2016). Mais que isso, foram contabilizadas emissões de processo do setor, assim como foi adotado o fator de emissão da calcinação constante na TCN (MCTIC, 2016). Por fim, foram desconsideradas emissões do carvão vegetal, posto que o fator de emissão é nulo, e, no caso da origem de florestas nativas, as emissões não foram medidas para evitar dupla contagem com o setor de Afolu.

Tabela 17 – Fatores de Emissão de CO₂ pelo Uso de Energéticos (Queima de Combustíveis)

Combustível	Fator de Emissão (tCO ₂ /TJ)
Gás natural	56,1
Coque de petróleo	97,5
Óleo combustível	77,4
Carvão mineral	94,6

Fonte: Elaboração própria com base em IPCC, 2006; MCTIC, 2016

Tabela 18 – Fator de Emissão do Clínquer (Calcinação)

FE (tCO ₂ /t.clínquer)
0,544

Fonte: Elaboração própria com base em MCTIC, 2016

Para a eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN), foram utilizados os fatores de emissão informados pelo MCTI (2015) (Tabela 19). 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, 2017a; 2017b).

Tabela 19 – 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
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, 2017a; 2017b

Percebe-se significativo aumento do fator de emissão do grid elétrico a partir 2035, que 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, 2017).

3.1.2 RESULTADOS

A partir das premissas citadas, foi projetada a produção de cimento até 2050 (Tabela 20).

Tabela 20 – Produção de Cimento de 2010 a 2050,

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Produção Cimento (Mt)	59,12	63,66	70,97	79,75	88,79	98,03	107,28	116,29	124,97

Fonte: Elaboração própria

A partir da proporção clínquer/cimento (Figura 11), foi projetada a produção de clínquer, como apresentada na Tabela 21.

Tabela 21 – Produção de Clínquer de 2010 a 2050

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Produção clínquer (Mt)	39,14	40,53	43,44	46,95	50,26	53,36	56,15	58,53	60,48

Fonte: Elaboração própria

Projetou-se o consumo de energia para fins térmicos e elétricos até 2050 a partir do consumo específico da produção de cimento de 3,68 GJ/t clínquer (CSI, 2014) e da projeção da produção de clínquer obtida na Tabela 21. A partir do percentual de participação dos combustíveis no consumo total de energia do setor de cimento em 2010, demonstrado no Balanço Energético Nacional - BEN

(EPE, 2017), projetou-se o percentual de participação de cada combustível utilizado até o ano de 2050. Tais percentuais, para o cenário de referência, são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 – Participação dos Combustíveis no Consumo Total de Energia de 2010 e 2050

Fontes de energia	Participação (%)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Carvão mineral	1,3	1,6	1,8	4,0	4,5	7,0	7,5	7,6	8,0
Óleo combustível	0,2	0,5	1,3	2,0	5,0	5,3	5,0	3,5	4,0
Carvão vegetal	1,5	2,5	3,2	4,5	5,0	7,0	7,0	7,5	8,0
Coque de petróleo	76,0	70,3	65,0	54,0	45,0	38,0	35,0	33,0	30,0
Biomassa	10,0	12,5	13,0	15,0	16,0	18,0	19,0	20,0	20,0
Gás natural	0,5	0,8	4,0	9,0	13,0	13,0	15,0	17,0	18,0

Fonte: Elaboração própria

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 24% no período de projeção.

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

Fontes de energia	Consumo de energia (mil tep)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Carvão mineral	52,0	71,0	57,1	24,7	44,0	56,1	98,4	128,2	148,4
Óleo combustível	8,0	11,2	15,2	32,9	52,8	37,4	29,5	20,5	10,6
Carvão vegetal	63,0	63,9	60,9	82,3	193,8	233,8	295,2	256,4	280,9
Óleo diesel	45,0	60,0	-	-	-	-	-	-	-
Coque de petróleo	3.161,0	2.592,1	2.797,8	2.961,6	3.038,6	3.038,9	3.148,6	3.230,9	3.179,7
Outras	350,0	426,1	464,4	534,7	528,5	654,5	639,6	666,7	794,9
Gás natural	23,0	24,9	24,7	41,1	88,1	140,3	172,2	230,8	291,5
Eletricidade	553,0	379,9	407,2	440,1	471,1	500,2	526,3	548,7	567,0
Total	4.255,0	3.629,1	3.827,4	4.117,4	4.416,9	4.661,1	4.909,8	5.082,2	5.272,9

Fonte: Elaboração própria

A partir do consumo energético, foram aplicados os fatores de emissão constantes nas tabelas 17, 18 e 19 para projetar as emissões totais de GEE do setor de cimento até 2050 (Tabela 24). Observa-se um incremento nas emissões de 37% no período de 2010 a 2050 no cenário REF.

Tabela 24 – Emissões Totais de CO₂e do Setor de Cimento no Cenário REF

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissões (MtCO ₂ e)	35,0	33,6	36,0	38,6	41,0	42,8	45,0	46,9	48,0

Fonte: Elaboração própria

Em reunião realizada em maio de 2017, foi apresentada a projeção de emissões para representante da SNIC, que destacou que estimativas próprias indicavam patamar de emissões, em 2050, 35%

superior ao referido neste estudo (SNIC, 2017). Na ocasião, destacou-se que possivelmente a diferença consistia em taxas de crescimento superiores às mensuradas por Haddad (2015), em particular para o período de 2030 a 2050. Para garantir a consistência macroeconômica do estudo com relação às projeções de PIB dos demais setores industriais, optou-se pela manutenção das taxas constantes na Tabela 16 e, conseqüentemente, das projeções delas resultantes.

3.2 CENÁRIO BC

3.2.1 PREMISSAS

O cenário BC foi construído a partir da penetração das 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:

- Adoção de processo por via seca com múltiplos estágios de preaquecedores e pré-calcinadores;
- Controle e otimização de processo na produção de clínquer;
- Inserção de refratário no forno de clínquerização para redução de perda de calor;
- Melhorias no sistema de combustão;
- Adição de matéria-prima não carbonatada (carboneto de escória) para a produção de cimento;
- Adoção de refrigeradores de grelha de alta eficiência.

Todas as tecnologias listadas foram comprovadas e implantadas na indústria em âmbito internacional e/ou nacional, portanto apresentam TRL igual a 9. Por esse motivo, considera-se sua penetração a partir de 2015.

Em seguida, assumiu-se eficientização dos fornos em relação ao cenário REF, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 – Eficiências dos Fornos de Cimento no Cenário BC

Tecnologia	Eficiências dos fornos por unidade de insumo								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Fornos a coque	0,80	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fornos a biomassa	0,75	0,75	0,80	0,83	0,84	0,84	0,85	0,85	0,85
Fornos a carvão mineral	0,80	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
Fornos a carvão vegetal	0,78	0,78	0,80	0,83	0,85	0,88	0,88	0,88	0,88
Fornos a gás natural	0,88	0,88	0,90	0,90	0,90	0,92	0,92	0,92	0,92
Fornos a óleo combustível	0,83	0,83	0,86	0,90	0,90	0,90	0,91	0,91	0,91

Fonte: Elaboração própria

A projeção da produção de cimento para o cenário BC foi calculada a partir das taxas de crescimento constantes na Tabela 16. Além disso, assumiu-se redução da proporção clínquer/cimento com relação ao cenário REF, conforme mostra a Figura 12.

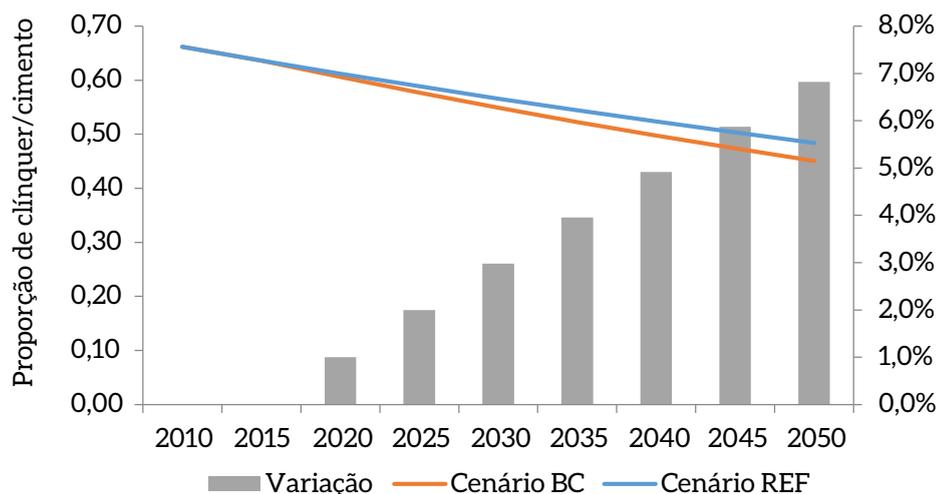


Figura 12 – Projeção da Proporção Clínquer/Cimento para os Cenários de Referência e Baixo Carbono

Fonte: Elaboração própria

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 produção de cimento é a mesma projetada no cenário REF, na medida em que não foram alteradas as taxas de crescimento do PIB. No caso da produção de clínquer, tendo em vista a queda proporção clínquer/cimento no cenário BC, observa-se um patamar 6,8% inferior ao cenário REF em 2050 (Tabela 26 e Figura 13).

Tabela 26 – Produção de Clínquer nos Cenários REF e BC – 2010 a 2050

Cenário/Anos	Produção de clínquer (Mt)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cenário REF	39,14	40,53	43,44	46,95	50,26	53,36	56,15	58,53	60,48
Cenário BC	39,14	40,53	43,01	46,01	48,76	51,25	53,39	55,09	56,36

Fonte: Elaboração própria

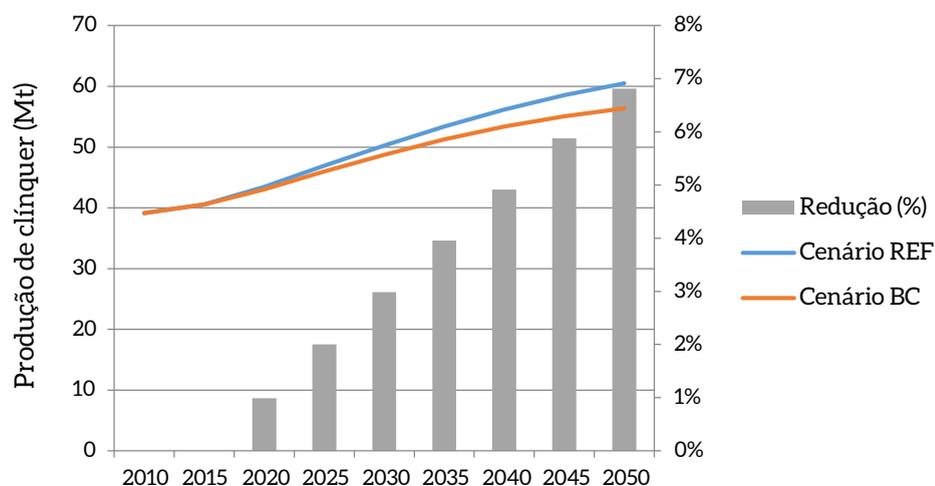


Figura 13 – Produção de Clínquer nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

A partir do percentual de participação dos combustíveis no consumo total de energia do setor de cimento em 2010, demonstrado no BEN (EPE, 2017), projetou-se o percentual de participação de cada combustível utilizado até o ano de 2050, considerando um *breakthrough* tecnológico. Tal projeção reflete redução gradativa do coque de petróleo com substituição, principalmente, por biomassa e gás natural, combustíveis com menor fator de emissão. Carvão mineral, óleo combustível e carvão vegetal apresentam aumento significativo para suprir a redução do coque de petróleo, embora sejam pouco representativos no *mix* final de combustíveis do setor (Tabela 27).

Tabela 27 – Participação dos Combustíveis no Consumo Total de Energia no Cenário BC

Fontes de energia	Participação (%)									
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
Carvão mineral	1,3	2,0	1,5	0,6	1,0	1,2	2,0	2,5	2,8	
Óleo combustível	0,2	0,3	0,4	0,8	1,2	0,8	0,6	0,4	0,2	
Carvão vegetal	1,5	1,8	1,6	2,0	4,4	5,0	6,0	5,0	5,3	
Coque de petróleo	76,0	73,0	73,5	72,0	69,0	65,0	64,0	63,0	60,0	
Biomassa	10,0	12,0	12,2	13,0	12,0	14,0	13,0	13,0	15,0	
Gás natural	0,5	0,7	0,6	1,0	2,0	3,0	3,5	4,5	5,5	

Fonte: Elaboração própria

Projetou-se o consumo de energia até 2050 a partir do consumo específico da produção de cimento de 3,68 GJ/t clínquer (CSI, 2014) e da projeção da produção de clínquer apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050

Fontes de energia	Consumo de energia (mil tep)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Carvão mineral	52,0	56,8	67,8	161,2	192,3	314,3	350,8	366,9	395,1
Óleo combustível	8,0	17,8	49,0	80,6	213,6	238,0	233,9	169,0	197,5
Carvão vegetal	63,0	88,8	120,6	181,4	213,6	314,3	327,4	362,0	395,1
Óleo diesel	45,0	60,0	-	-	-	-	-	-	-
Coque de petróleo	3.161,0	2.496,3	2.449,4	2.176,8	1.922,6	1.706,3	1.637,2	1.593,0	1.481,4
Outras	350,0	443,9	489,9	604,7	683,6	808,3	888,8	965,4	987,6
Gás natural	23,0	28,4	150,7	362,8	555,4	583,7	701,7	820,6	888,9
Eletricidade	553,0	379,9	403,2	431,3	457,1	480,4	500,4	516,4	528,3
Total	4.255,0	3.571,9	3.730,6	3.998,9	4.238,3	4.445,3	4.640,2	4.793,3	4.873,9

Fonte: Elaboração própria

Dadas as projeções da demanda de energia dos cenários REF e BC, a Figura 14 consolida os cenários e o desvio no consumo do segundo com relação ao primeiro. Consta-se que a implementação das MTD implicaria consumo de energia 7,5% menor, em 2050, com relação ao cenário REF.

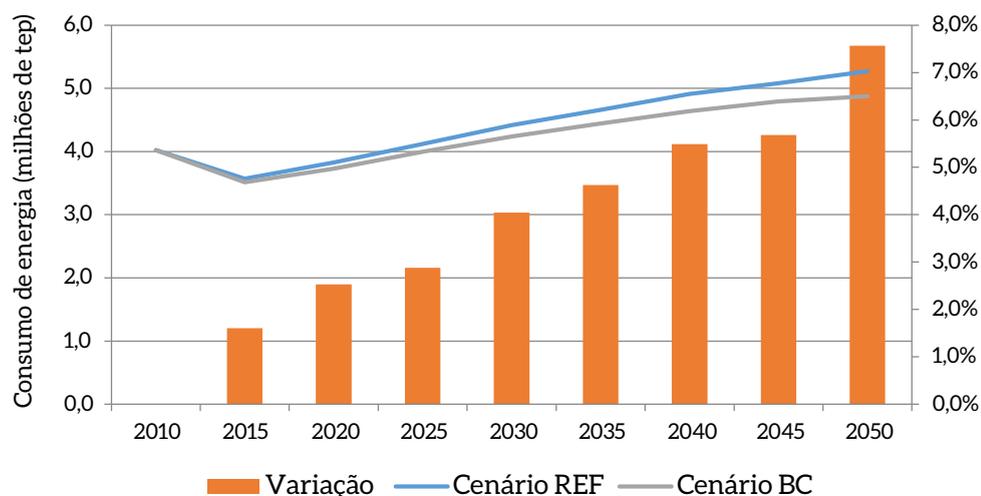


Figura 14 – Consumo de Energia nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

A partir da projeção da demanda de energia para o cenário BC, foram calculadas as emissões de CO₂ do setor de cimento. Foram utilizados os mesmos fatores de emissão utilizados para o cenário REF. As emissões totais de CO₂, ou seja, somando as emissões provenientes da queima dos combustíveis e as provenientes da calcinação do processo, são apresentadas na Tabela 29.

Tabela 29 – Emissões Totais de CO₂e do Setor de Cimento no Cenário BC

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissões (MtCO ₂ e)	35,0	33,1	34,8	36,3	37,8	38,9	40,2	41,1	41,8

Fonte: Elaboração própria

A Figura 15 compara as emissões nos cenários REF e BC. Constata-se que a adoção das MTD reduziria as emissões do setor em 12,9% em 2050.

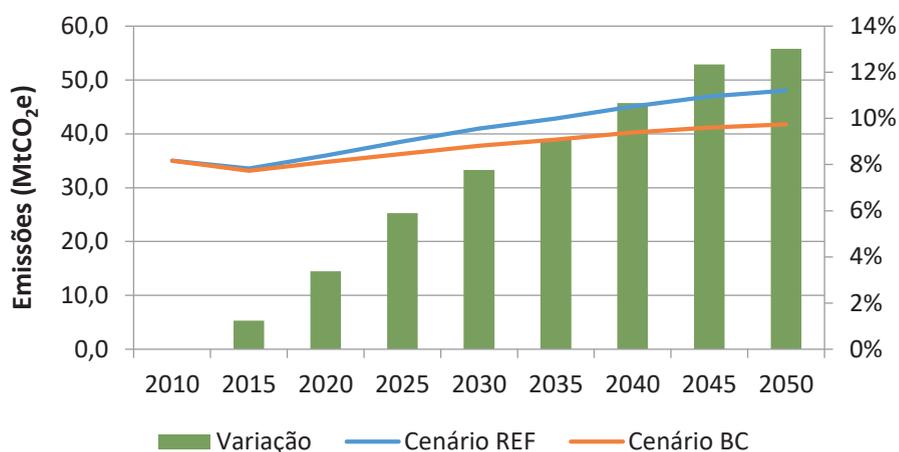


Figura 15 – Emissões Totais de CO₂e nos Cenários REF e BC para o Setor de Cimento

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 cimento. Por fim, serão apresentados os resultados, com destaque para a curva de CMA, que relaciona os potenciais e custos das opções de mitigação até 2050.

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). 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 2:

$$CMA^{opção} = \frac{CAL^{baixo\ carbono} - CAL^{base}}{EA^{base} - EA^{baixo\ carbono}} \quad (Eq. 2)$$

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 3:

$$CAL = \frac{INV * r * \left[\frac{(1+r)^t}{(1+r)^t} - 1 \right] + OM + COMB - REC}{(1+r)^{(n-2011)}} \quad (Eq. 3)$$

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.

Foram analisadas as taxas de desconto do setor de cimento em um cenário de baixo carbono. Inicialmente, foi realizada pesquisa na literatura a respeito das decisões de investimentos específicos e ambientes de negócios do setor, tanto no presente quanto no futuro. Foi realizada, em seguida, uma entrevista com representante da SNIC sobre as tomadas de decisão de investimentos, as preocupações com emissões de GEE e com eficiência energética. A partir disso, foram selecionadas duas taxas de desconto a serem utilizadas no cálculo dos custos de abatimento das MTD para o setor de cimento: 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 obtidos parâmetros técnico-econômicos para mensurar custos marginais de abatimento das MTD. Para processo de via seca com múltiplos estágios de preaquecedores e pré-calcinadores, foi considerado que o consumo específico térmico da produção de cimento se reduziria para 2,9 GJ/t clínquer em 2050. O custo de investimento e o custo de O&M foram considerados como 16 US\$/t clínquer e 0,8 US\$/t clínquer, respectivamente (IIP, 2014; IPPC, 2013). No que se refere ao controle e otimização de processo na produção de clínquer, considerou-se uma redução de combustível de 3,5%, com custo de investimento e custo de O&M de, respectivamente, 0,2 US\$/t clínquer e 0,01 US\$/t clínquer (IIP, 2014; IPPC, 2013; CSI/ECRA, 2009). A utilização de refratário no forno de clínquerização promove redução de combustível de 6,8%, com custo de investimento e custo de O&M de, respectivamente, 0,3 US\$/t clínquer e 0,015 US\$/t clínquer (IIP, 2014; WORRELL; GALITSKY, 2008). No caso das melhorias no sistema de combustão, de acordo com Worrell e Galitsky (2008), há redução de 8% no consumo de combustível, com custo de investimento e custo de O&M de, respectivamente, 1US\$/t clínquer e 0,05 US\$/t clínquer. A adição de matéria-prima não carbonatada promove redução de combustível de 21%, com custo de investimento e custo de O&M de, respectivamente, 0,5 US\$/t clínquer e 0,025 US\$/t clínquer (IIP, 2014; CDM, 2009). Finalmente, os refrigeradores de grelha de alta eficiência promovem redução de combustível de 5,43%, com custo de investimento e custo de O&M de, respectivamente, 3 US\$/t clínquer e 0,015 US\$/t clínquer (EPA, 2010; CIS/ECRA, 2009; WORRELL; GALITSKY, 2008).

Tendo em vista os dados necessários para aplicação na equação 3, fez-se necessário obter os preços de combustíveis constantes na Tabela 30 para serem aplicados no ano-base (2010), visando à obtenção dos CMA.

Tabela 30 – Preços dos Combustíveis

Combustível	Preço	Unidade
Gás natural	0,65	US\$/m ³
Óleo combustível	0,53	US\$/litro
Óleo diesel	1,06	US\$/litro
Coque de petróleo	70,00	US\$/bbl
Carvão vegetal	47,70	US\$/m ³
Carvão mineral	180,00	US\$/tonelada
Eletricidade	147,85	US\$/MWh

Fonte: Elaboração própria com base em EPE, 2012; 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. 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 31 – 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

Perante os cenários de preços do petróleo, foram projetados preços dos insumos energéticos para mensuração dos CMA segundo a taxa de desconto social (Tabela 32). Cumpre destacar que esse procedimento não é necessário para aplicação ao cálculo com taxa de desconto de mercado, na medida em que o preço de petróleo é constante no período. Logo, são considerados os preços dos insumos energéticos apresentados na Tabela 30.

Tabela 32 – 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
Óleo diesel	US\$/litro	1,06	1,06	1,45	1,74	2,02	2,31	2,60	2,70	2,80
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	52,1	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 33 e a Tabela 34 apresentam custos e potenciais acumulados de abatimento das medidas com taxas de desconto de 8% e de 15%, respectivamente.

Tabela 33 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para a Taxa de Desconto de 8%

MTD	Custo de abatimento (US\$/tCO ₂)	Potencial Acumulado de Abatimento (MtCO ₂)
Adição de carboneto de escória	-161,4	24,8
Inserção de refratário no forno de clinquerização	-155,5	8,1
Controle e otimização de processo	-154,8	4,1
Melhorias no sistema de combustão	-143,1	9,5
Adoção de refrigeradores de grelha de alta eficiência	-69,9	6,5
Processo de via seca com múltiplos estágios de ciclone	-7,0	37,3

Fonte: Elaboração própria

Tabela 34 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para a Taxa de Desconto de 15%

MTD	Custo de abatimento (US\$/tCO ₂)	Potencial Acumulado de Abatimento (MtCO ₂)
Adição de carboneto de escória	-69,3	24,8
Inserção de refratário no forno de clinquerização	-63,6	8,1
Controle e otimização de processo	-63,0	4,1
Melhorias no sistema de combustão	-47,3	9,5
Adoção de refrigeradores de grelha de alta eficiência	44,3	6,5
Processo de via seca com múltiplos estágios de ciclone	80,0	37,3

Fonte: Elaboração própria

A partir da Tabela 33 e da Tabela 34, nota-se que a maior parte dos custos de abatimento é negativa. Portanto, grande parte das medidas é atrativa sob o ponto de vista econômico, com taxa de desconto social. Todavia, isso não significa que a medida possa ser implementada, 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. No caso da taxa de desconto de mercado, que é mais próxima do custo de oportunidade do capital aplicado no setor, cerca de 48% do potencial de abatimento não pode ser atingido sem a internalização de um preço de carbono compatível na economia.

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 16 e Figura 17).

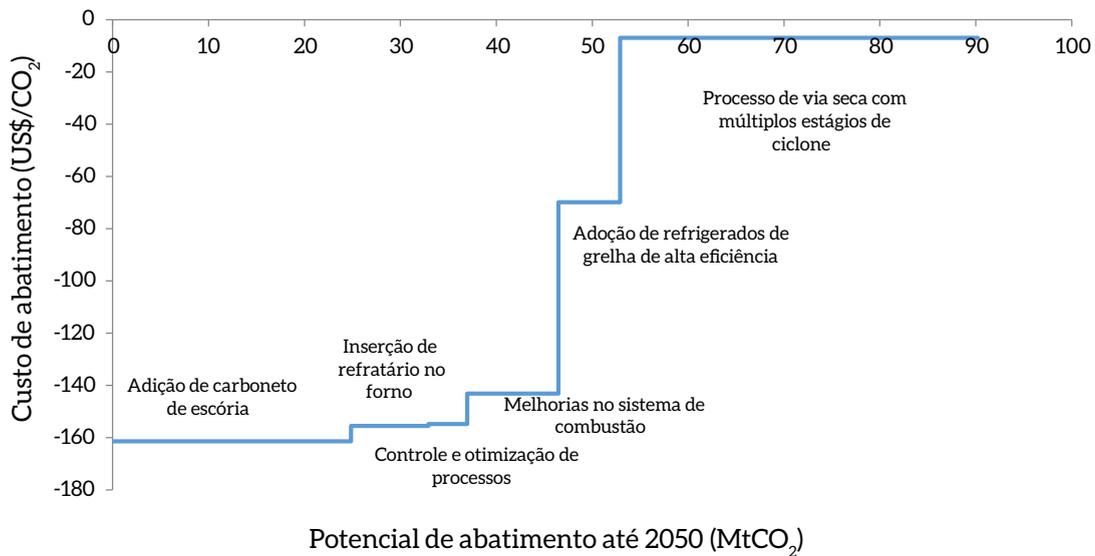


Figura 16 – Curva de Custos e Potenciais de Abatimento para Taxa de Desconto de 15% ao ano

Fonte: Elaboração própria

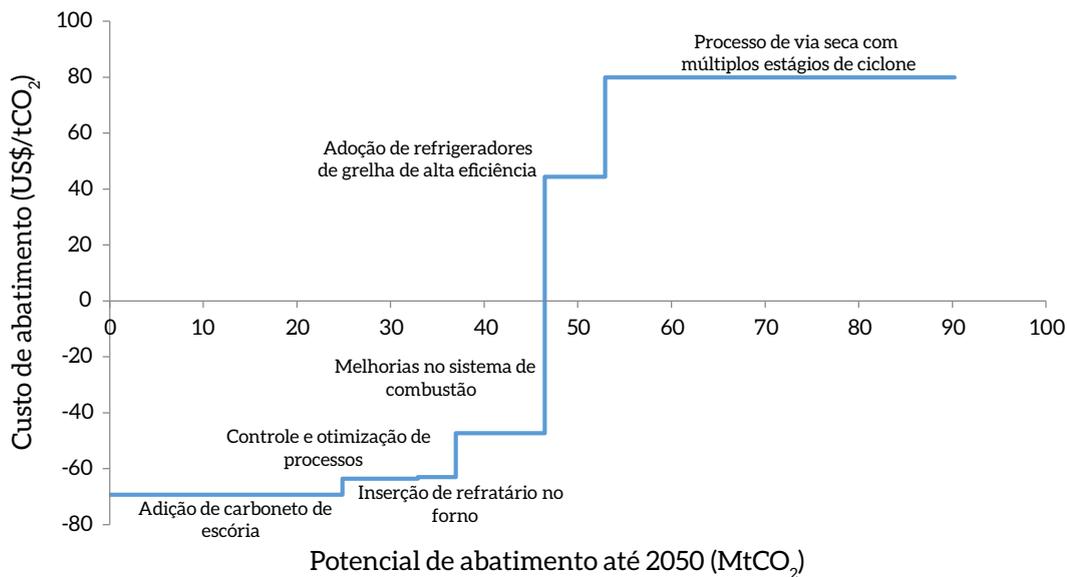


Figura 17 – Curva Marginal de Abatimento para o Setor de Cimento a uma Taxa de Desconto de 15% ao ano

Fonte: Elaboração própria

Nota-se que o potencial total em 2050 foi de 90,2 MtCO₂, com grande destaque para o papel de medidas com custo de abatimento negativo.

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 cimento.

Algumas tecnologias que serão descritas já vêm sendo testadas, mas ainda não se encontram na fase comercial. Algumas tecnologias consideradas neste relatório não são medidas de inovação *strictu sensu*. São tecnologias difundidas em outros segmentos, porém de aplicação inovadora em se tratando do setor cimenteiro. 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

3.3.1.1 LEITO FLUIDIZADO AVANÇADO

O leito fluidizado já é amplamente utilizado em outras indústrias e se mostra promissor quanto à melhora da eficiência térmica na produção de cimento, embora ainda não tenha sido provada sua viabilidade em escala (IEA, 2012). De acordo com o Imperial College (2013), essa tecnologia está em demonstração no Japão e na China, com plantas de capacidades de 200 t/dia e 1.000 t/dia, respectivamente.

A tecnologia de controle de granulação é o componente mais importante do sistema do leito fluidizado. Essa tecnologia oferece um processo de *self-granulation* em que a aglomeração de uma parte da matéria-prima gera núcleos granulares para que o restante da matéria-prima adira e “cresça”, controlando a granulação (IEA, 2012).

Estima-se redução de 0,3 €/t clínquer no custo operacional, sendo este relacionado a economia de combustível e custos adicionais com eletricidade. Custos de investimento ainda não estão disponíveis (IMPERIAL COLLEGE, 2013; CIS/ECRA, 2009; CTF, 2008). Quanto ao consumo de energia, espera-se redução de energia térmica de até 300 MJ/t clínquer e aumento de 9 kWh/t clínquer no consumo de energia elétrica (CIS/ECRA, 2009).

3.3.1.2 UTILIZAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS POR MEIO DE ALGAS

Algas podem ser utilizadas diretamente como combustíveis ou podem ser convertidas em biocombustíveis para fornecer energia para a produção de cimento. O crescimento das algas pode ser promovido aumentando os níveis de CO₂ do ambiente. A fotossíntese pode ser estimulada em tanques abertos ou biorreatores fechados na presença de luz (IEA, 2012).

Tanques abertos foram considerados comercialmente inviáveis. Assim, pesquisadores projetaram biorreatores com eficiências variadas. O CO₂ necessário pode ser fornecido pelos gases de combustão dos fornos em combinação com uma unidade de captura de CO₂ (IEA, 2012).

3.3.1.3 CIMENTO GEOPOLIMÉRICO

O cimento geopolimérico consiste em um sistema ligante que endurece em temperatura ambiente, como o cimento Portland comum. É um material inovador por se basear em materiais naturais minimamente processados ou subprodutos industriais para reduzir significativamente sua pegada de carbono, além de ser muito resistente a muitos problemas de durabilidade que podem prejudicar concretos convencionais (DAVIDOVITS, 2013; IEA, 2012).

Sua produção requer um material aluminossilicato, um reagente alcalino (silicatos solúveis de sódio ou potássio) e água. O endurecimento em temperatura ambiente baseia-se na adição de cátions de cálcio, essencialmente escória de alto-forno (DAVIDOVITS, 2013; IEA, 2012).

Esse tipo de cimento, por não se basear em CaCO₃, gera uma quantidade muito menor de CO₂ do que o cimento Portland, levando a uma redução em torno de 40% a 90%. Ademais, há redução de 59% da demanda energética em comparação com a produção do cimento Portland (DAVIDOVITS, 2013).

3.3.1.4 USO DE NANOTECNOLOGIA NO CIMENTO

Nanocimentos contêm nanopartículas de cimento uniformemente distribuídas entre partículas maiores de misturas minerais. As nanopartículas são dispersas em espessuras tão finas que mesmo um teor mínimo de cimento proporciona a ligação adequada dos agregados e das partículas de mistura, gerando a resistência e o desempenho requeridos para o concreto final (IEA, 2012).

A produção de nanocimentos permite a utilização de grandes quantidades de adições minerais, portanto tem potencial de fornecer significativas economias de cimento e baixas emissões de CO₂.

Ademais, as nanopartículas facilitam a ativação mecanoquímica da matéria-prima e do cimento, o que fornece maior reatividade durante a clínquerização (para a matéria-prima) e hidratação (para o cimento) (IEA, 2012).

A área mais estudada é o uso de nanopartículas como nanossílica em argamassa e concreto. Riscos potenciais à saúde associados à manipulação e utilização de nanopartículas devem ser estudados, compreendidos e mitigados (IEA, 2012).

3.3.1.5 MATERIAIS INOVADORES À BASE DE CIMENTO

Esses materiais inovadores têm benefícios específicos e desafios causados pela disponibilidade limitada dos diferentes materiais necessários para sua produção. Assim, sua substituição e os potenciais de redução de emissão de CO_2 variam para cada material inovador diferente (CLIMATE STRATEGIES, 2014).

Na maioria dos casos, a proposta é reduzir o conteúdo de CaO no produto, visto que a calcinação do CaCO_3 causa as emissões de CO_2 do processo. Uma corrente inovadora propõe o uso de produtos à base de MgCO_3 , cuja reação produz o óxido de magnésio (MgO), que também emite CO_2 , no entanto com o benefício adicional de o produto capturar as emissões de CO_2 durante a fase de estabilização após a construção (CLIMATE STRATEGIES, 2014).

A seguir, serão descritos os diferentes tipos de cimento com materiais inovadores, incluindo produtos que foram trabalhados por diferentes empresas de cimento. É importante ressaltar que, apesar de alguns desses produtos já terem sido desenvolvidos há mais de uma década, ainda não são usados comercialmente. Todas as seguintes tecnologias foram obtidas de Climate Strategies (2014).

CIMENTOS À BASE DE CALCÁRIO

- Cimento de sulfoaluminato de cálcio: esse tipo de cimento pode ser produzido por meio de baixas temperaturas e contém menos cal que o cimento Portland. Esse cimento oferece reduções de emissão de CO_2 de 25% a 50%, comparado com o cimento comum. No entanto, é mais caro que o Portland e cimentos baseados em belita (C_2S) apresentam endurecimento lento;
- Aether: esse tipo de cimento tem sido desenvolvido pela Lafarge e consiste na redução do teor de CaO e sua substituição por mais óxidos de alumínio e silício. Sua composição é baseada em uma mistura de belita como a fase principal e sulfoaluminato de cálcio e aluminoferrita de cálcio como as duas outras fases principais. Os cimentos produzidos são adaptados para aplicações específicas, ao contrário da utilização generalizada do concreto. Podem ser atingidas economias entre 25% e 30% de emissões, dado o baixo teor de CaO . Ademais, há economia nas operações de moagem e mistura que são obtidas devido à excelente propriedade de moagem do clínquer Aether.

CIMENTOS DE ALUMINATO DE CÁLCIO E ALUMINOSSILICATOS DE CÁLCIO

Esses cimentos são produzidos em fornos rotatórios usando bauxita em vez dos silicatos de cálcio.

Apesar de reduzir as emissões de CO₂, são mais caros e menos viáveis que o cimento Portland. Frequentemente, são misturados com altas concentrações de escória granulada de alto-forno:

- Pozolanas artificiais: essas pozolanas são produzidas pela ativação térmica de argilas caulínicas para obter o metacaulium, permitindo a redução das emissões de CO₂ em até 20% em relação ao cimento Portland. O desafio reside na sua disponibilidade. Esse cimento pode ser muito caro devido à extrema escassez de argilas caulínicas;
- Celitement: esse cimento é um hidrossilicato de cálcio produzido a partir das mesmas matérias-primas que o cimento Portland, à base de óxidos de cálcio e silício, no entanto exige uma proporção cálcio/silício muito menor. A diferença consiste no fato de que esse tipo de cimento não é uma mistura, mas contém apenas um produto que adiciona resistência mecânica para o concreto, enquanto reduz emissões e demanda por energia e calcário. Esse cimento contém um terço de CaO, se comparado com o cimento Portland, e reduz as emissões em até 50%. Ademais, suas operações unitárias são bem conhecidas, apresenta composição homogênea e é compatível com a utilização do cimento convencional, portanto ambos podem ser misturados. Esse produto está em desenvolvimento no Karlsruhe Institute for Technology (KIT), na Alemanha.

CIMENTOS QUE NÃO UTILIZAM CALCÁRIO

- Cimentos à base de magnésio: a reação aqui é similar à do processo convencional, com a exceção de que o carbonato de cálcio é substituído pelo carbonato de magnésio, gerando óxido de magnésio. Essa substituição reduz a demanda de energia em 30%, visto que a reação ocorre em temperaturas significativamente menores que o processo convencional.¹⁰ Durante o processo de carbonatação, a captura de emissões atmosféricas de CO₂ ocorre muito mais rapidamente que o concreto obtido de cimento Portland.

POEIRAS DE FORNOS DE CIMENTO

As poeiras de forno de cimento são produzidas durante a calcinação e coletadas por precipitadores eletrostáticos ou coletores de poeira. Essa poeira é um material parcialmente calcinado com alto teor de CaCO₃ (55,5%), que pode ser usado para substituir a alimentação do forno e reduzir emissões de CO₂. Plantas de cimento que não reciclam essa poeira apresentam proporção maior de matéria-prima/clínquer (EPA, 2013).

A poeira contém componentes alcalinos que podem afetar negativamente a operação. O processo de leito fluidizado Fuller e a tecnologia Passamaquoddy Recovery Scrubber foram desenvolvidos para o tratamento dessa poeira do forno. Ambas as tecnologias são capital-intensivas, com *payback* estimado entre seis e três anos, respectivamente (EPA, 2013).

3.3.1.6 PLANTAS HÍBRIDAS SOLARES

Esse sistema está em fase inicial de pesquisa e consiste na utilização de espelhos que concentram

¹⁰ Sua fabricação exige temperaturas na faixa de 600°C, metade da temperatura demandada para o cimento Portland (CNI, 2009).

a luz solar, que é então focada dentro do forno rotativo como fonte de energia a partir de um refletor parabólico. Esse sistema pode ser factível em áreas ensolaradas, onde pequenas plantas de cimento podem ser construídas para atender as necessidades locais.

A redução das emissões de CO₂ é equivalente às emissões que seriam geradas pela queima com combustível, visto que esse sistema solar substitui o combustível no processo de produção do clínquer. No entanto, as emissões devido à calcinação não seriam reduzidas.

3.3.1.7 CAPTURA DE CARBONO

Captura e armazenamento de carbono (CAC) consiste na separação e captura de carbono dos gases de combustão, pressurização, transporte por dutos e, finalmente, injeção em armazenamento geológico. Há também pesquisas na área de captura e utilização de carbono (CCU),¹¹ que, em vez de armazenar o CO₂, o convertem em combustíveis ou tornam-no insumos para a indústria química.

Diferentes são as rotas de captura de carbono, que se distinguem conforme o ponto de captura do carbono (antes, após ou via oxidação). A seguir, serão descritas as rotas que poderiam ser incluídas no setor de cimento, já com aplicação em plantas-piloto em termelétricas.

Dada a elevada concentração de CO₂ nos gases de combustão das plantas de cimento, a captura de pós-combustão aparece como a mais adequada ao setor (IEA/GHG, 2008). Ademais, essa rota é considerada pela literatura como a única que permite o *retrofitting* no curto prazo com baixo risco técnico (LI et al., 2013; BENHELAL et al., 2013; KURAMOCHI et al., 2012; NARANJO et al., 2011; IEA, 2009; IEA/GHG, 2008), além de apresentar baixo impacto nos processos de combustão e produzir corrente de CO₂ de alta pureza (ECRA, 2009).

A tecnologia mais promissora para a rota de pós-combustão é a absorção química, por já ser utilizada amplamente na indústria química e por sua alta eficiência de captura, podendo alcançar patamares de 95% (GARCÍA-GUSANO et al., 2015; VATOPOULOS et al., 2012; RAYNAL et al., 2011; UNIDO, 2010; BOSOGA et al., 2009; IEA/GHG, 2008; IEA/UNIDO, 2011). Também estão em pesquisa tecnologias como adsorção física e captura por membranas (IEA, 2015).

Em Oliveira (2015), realiza-se simulação para avaliar o potencial técnico-econômico da aplicação da captura de carbono por pós-combustão em plantas cimenteiras brasileiras, resultando em custo de abatimento de 114 US\$/tCO₂ para as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste e de 117 US\$/tCO₂ para as regiões Norte e Nordeste, com potencial de abatimento de 47 MtCO₂/ano.

Na rota de oxidação, a combustão com ar é substituída pela combustão com oxigênio razoavelmente puro a partir de uma unidade de separação de ar, e a corrente dos gases de combustão, rica em CO₂, é reciclada para controlar a temperatura de chama até limites aceitáveis dos materiais dos fornos (TOFTEGAARD et al., 2010). A necessidade de separação do oxigênio do ar aumenta

11 Carbon capture and utilization.

substancialmente o custo de capital e de operação da planta (ROCHEDO, 2011).

Devido à alta percentagem de CO₂ nos gases de combustão provenientes da calcinação, a oxicom-bustão aparece como opção interessante para redução de CO₂ em uma planta de cimento (LI et al., 2013; GRANADOS et al., 2014; ECRA, 2012; JRC/IE, 2010; BOSOAGA et al., 2009).

A taxa de captura para a planta com a captura em oxicom-bustão é estimada em 63% a aproxima-damente 100%, mas sua aplicação só foi realizada em escala-piloto (CSI/ECRA, 2009).

Uma das tecnologias mais promissoras para a captura de carbono proveniente de fontes industriais é o *chemical looping* (OZCAN et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2011; BOSOAGA et al., 2009). Especialmente os adsorventes baseados em CaO têm atraído maior atenção devido a alta capacidade de adsorção, baixo custo e ampla disponibilidade (LI et al., 2013). O processo de *calcium looping* (CL) ocorre entre dois leitos fluidizados circulantes (CFB¹²), operando a pressão atmosférica (LI et al., 2013; MARTÍNEZ et al., 2011), e garante baixa penalidade energética, reduzida corrosão e emissão de SOx.

Para uma planta de cimento, o óxido de cálcio pode ser reutilizado como alimentação para a plan-ta de cimento após a captura, substituindo o calcário, o que adiciona valor para o material purgado e aumenta a economia do *calcium looping* (ROMANO et al., 2013; DEAN et al., 2013; DEAN et al., 2011), reduzindo as emissões diretas de CO₂ devido à calcinação do CaCO₃, responsável por aproxi-madamente 50% do total das emissões de CO₂ no processo de produção de cimento (ROMANO et al., 2013; LI et al., 2013).

3.3.1.8 SISTEMAS DE ENRIQUECIMENTO COM OXIGÊNIO

Os sistemas de enriquecimento e injeção de oxigênio podem contribuir para aumentar a combustão no pré-calcinador, permitindo a utilização de mais combustíveis alternativos ou de resíduos, ao mes-mo tempo em que mantém ou aumenta as taxas de calcinação. Ao adicionar oxigênio relativamente puro, em vez de ar, existe a vantagem adicional de impacto mínimo na queda de pressão e tempo de permanência no pré-calcinador (CSI/ECRA, 2009). O custo de capital para essa tecnologia é estimado em 6 milhões de libras por planta, com potencial de redução das emissões de 3% (DECC, 2015).

3.3.2 PREMISSAS

Nesta seção, são apresentados os potenciais de economia de energia e/ou de redução de emissões de CO₂ quando disponíveis das tecnologias inovadoras consideradas no BC+I (Tabela 35). 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.

12 Circulating fluidized bed.

Tabela 35 – Potenciais de Economia de Energia/Redução de Emissões no Setor de Cimento

Tecnologias	Redução das Emissões	Economia de Energia
Leito fluidizado avançado	-	20%
Cimento geopolimérico	40% - 90%	59%
Cimento de sulfoaluminato de cálcio	25% - 50%	-
Cimento Aether	25% - 30%	-
Cimento Celitement	50%	-
Cimentos a base de magnésio	-	30%
CAC	Até 95%	-

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 cimento, além da penetração de cada tecnologia inovadora a partir da fórmula a seguir para cada ano (i), conforme equação 4:

$$\text{Redução de energia}_i (\text{Mtep}) = \frac{\text{Consumo de energia}_i (\text{Mtep})}{\text{Emissões}_i (\text{MtCO}_2)} \times \text{Redução das emissões} (\text{MtCO}_2) \quad (\text{Eq. 4})$$

A Tabela 36 apresenta as tecnologias inovadoras, com seus respectivos potenciais e custos de investimento por planta, quando disponíveis.

Tabela 36 – Tecnologias Inovadoras para o Setor de Cimento com Seus Respectivos Potenciais de Abatimento

Tecnologia inovadora	Redução de energia (Gt/t clínquer)	Investimento por planta (US\$)	Fonte
Leito fluidizado avançado	0,3	-	CIS/ECRA, 2009
Cimento geopolimérico	2,17	-	DAVIDOVITS, 2013
Cimento de sulfoaluminato de cálcio	1,38	343.200	CLIMATE STRATEGIES, 2014; DECC, 2015
Cimento Aether	1,00	343.200	CLIMATE STRATEGIES, 2014; DECC, 2015
Cimento Celitement	1,84	343.200	CLIMATE STRATEGIES, 2014; DECC, 2015
Cimentos a base de magnésio	1,10	343.200	CLIMATE STRATEGIES, 2014; DECC, 2015
CAC	-	156.000.000	DECC, 2015; IEA, 2009; IMPERIAL COLLEGE, 2013; VATOPOULOS, 2012; DEAN et al., 2011; OLIVEIRA, 2015

Fonte: Elaboração própria

A redução das emissões está atrelada ao potencial de mitigação e à taxa de penetração anual de cada tecnologia inovadora. Foi considerado que tais tecnologias entrariam em operação a partir de 2035, com exceção da tecnologia “leito fluidizado avançado”, que se tornaria operacional em 2045.

Tabela 37 – Penetração (%) das Tecnologias Consideradas no Cenário BC+I

Tecnologia/Anos	Penetração das tecnologias								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Leito fluidizado avançado	-	-	-	-	-	-	-	2%	3%
Cimento geopolimérico	-	-	-	-	-	5%	7%	9%	10%
Cimento de sulfoaluminato de cálcio	-	-	-	-	-	5%	7%	8%	9%
Cimento Aether	-	-	-	-	-	5%	7%	8%	9%
Cimento Celitement	-	-	-	-	-	5%	7%	8%	9%
Cimentos à base de magnésio	-	-	-	-	-	5%	7%	8%	9%
CAC	-	-	-	-	-	10%	15%	20%	25%

Fonte: Elaboração própria

No que se refere ao potencial de redução no consumo de energia e/ou emissões de GEE, foram considerados:

- Leito fluidizado avançado: redução de energia de 0,3 Gt/t cliquer com consequente redução das emissões energéticas;
- Cimento geopolimérico: redução de energia em 40% com consequente redução das emissões energéticas;
- Cimento de sulfualuminato de cálcio: redução das emissões de processo em 49%, redução de energia de 1,38 Gt/t cliquer com consequente redução das emissões energéticas;
- Cimento Aether: redução das emissões de processo em 30%, redução de energia de 1,00 Gt/t cliquer com consequente redução das emissões energéticas;
- Cimento Celitement: redução das emissões de processo em 50%, redução de energia de 1,84 Gt/t cliquer com consequente redução das emissões energéticas;
- Cimentos à base de magnésio: redução de energia de 1,10 Gt/t cliquer com consequente redução das emissões energéticas;
- Sistemas de enriquecimento com oxigênio: redução das emissões energéticas em 3%;
- Captura e armazenamento de carbono: redução das emissões energéticas em 90% (OLIVEIRA, 2015).

3.3.3 RESULTADOS

A partir de informações sobre potencial de redução de energia e emissões das tecnologias inovadoras consideradas para o setor de cimento, foi possível projetar o consumo de energia e emissões de CO₂ no cenário BC+I. A Tabela 38 sintetiza essas informações.

Tabela 38 – Consumo de Energia e Emissões de GEE no Cenário BC+I

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Consumo de energia (Mtep)	4,25	3,57	3,73	4,00	4,24	4,25	4,36	4,46	4,54
Emissões (MtCO ₂ e)	35,01	33,14	34,76	36,29	37,80	34,21	33,32	32,28	31,05

Fonte: Elaboração própria

Finalmente, as figuras 18 e 19 apresentam, respectivamente, os consumos de energia e as emissões de CO₂ do cenário REF, BC e BC+I. Consta-se que a implementação das tecnologias de ruptura implicaria redução no consumo de energia e emissões de GEE de 13,9% e 35,3% com relação ao cenário REF em 2050, respectivamente. Ou seja, a implementação desse cenário implica reduções adicionais, com relação ao cenário BC, de 6,9% e 25,6%.

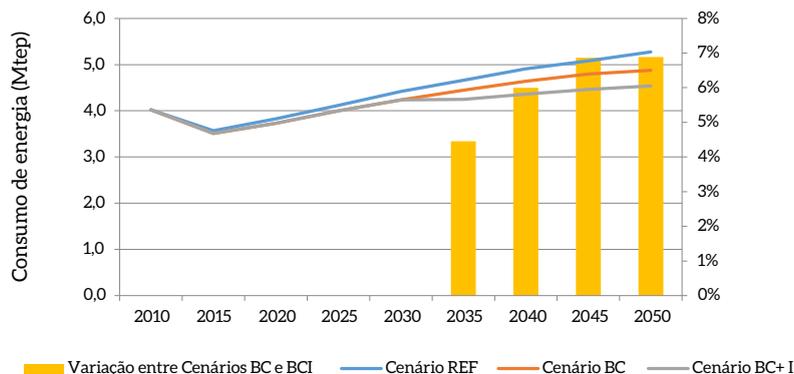


Figura 18 – Consumo de Energia nos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

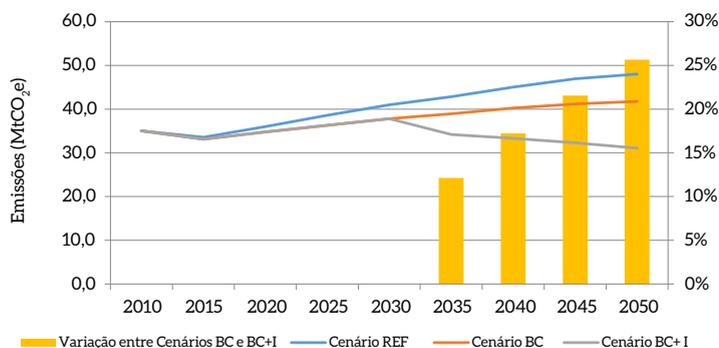


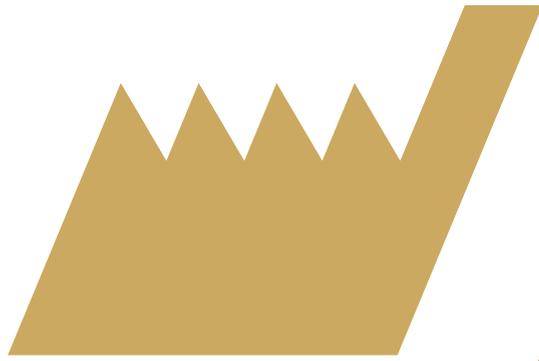
Figura 19 – Emissões Totais de CO₂e nos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

A tecnologia inovadora com maior impacto na redução de GEE é a CAC, responsável pelo abatimento de 90% das emissões oriundas do processo produtivo de cimento. É importante destacar que existem diversas rotas de captura e sua escolha está associada à possibilidade de aplicação, pressão parcial de CO₂ no gás de exausto, taxa de captura a ser atingida, regeneração do solvente, custos, sensibilidade a impurezas etc.

Para o cálculo do abatimento das emissões no setor de cimento, foi considerada a rota de pós-combustão, cuja taxa de captura de 90% foi a mesma usada em Oliveira (2015). Apesar de essa tecnologia reduzir significativamente as emissões, implica uma penalidade energética devido à necessidade de regeneração do solvente utilizado nessa rota de captura. Dessa forma, a captura implica aumento do consumo energético de aproximadamente 30%, ora refletido na Figura 18 (OLIVEIRA, 2015; GARCÍA-GUSANO et al., 2015; BENHELAL et al., 2013).

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.



Instrumentos de política pública aplicáveis para implementação dos cenários de baixo carbono

Capítulo

4

4 INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA APLICÁVEIS PARA IMPLEMENTAÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO

Em face do mapeamento das oportunidades de mitigação disponíveis e inovadoras para o setor de cimento, 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.

Pôde-se constatar um potencial acumulado de abatimento de 90,2 MtCO₂e no cenário BC, com 48% desse montante apresentando custos de abatimento positivos, segundo a taxa de desconto de mercado praticada no setor.

No entanto, aspectos que não foram avaliados no estudo poderiam levar a resultados distintos. Tipicamente, análises setoriais de oportunidades de mitigação tendem a desconsiderar aspectos que afetam significativamente a análise de sua custo-efetividade: 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/ou 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 significativamente maior, qual seja de 35,3% de redução nas 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. Em face da representatividade da CAC para o potencial de mitigação nesse cenário, a análise de barreiras e instrumentos de política pública para adoção do cenário BC+I focará nessa tecnologia.

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;
- ii)** Exemplos internacionais e nacionais de políticas públicas de baixo carbono;

- iii) Instrumentos de política pública aplicáveis ao setor para promover o abatimento de emissões de GEE;
- iv) Síntese da proposta de instrumentos de política pública para a implementação dos cenários de baixo carbono.

4.1 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS À IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO NO SETOR

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 cimento. 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.

Se, por um lado, grande parte das medidas apresenta viabilidade econômica, tendo em vista os custos de abatimento negativos, por outro, são necessários relevantes custos de capital para sua implementação. A atual situação econômica do país leva a que o governo realize ajustes fiscais que dificultam o acesso a crédito para implementação das tecnologias pelo setor. Esse aspecto afeta a capacidade financeira das empresas e do governo de conceder 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, sobretudo, 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 derivados da cadeia, o que dificulta a realização de investimentos em eficientização dos processos produtivos.

Ainda que a barreira de acesso ao capital possa ser removida, não necessariamente os recursos seriam integralmente destinados para esse propósito, em face da competição com outros investimentos, como os necessários para expandir a capacidade de produção. Em geral, todos os acionistas estão inclinados a seguir o *status quo*, que tende a ser menos eficiente e conservador, respondendo em termos de eficiência energética apenas em situações críticas, como escassez de recursos. Por isso, investimentos no incremento da capacidade de produção e na penetração de mercado tendem a ser priorizados (UNIDO, 2011a; 2011b; 2013).

No caso das medidas viáveis sob o ponto de vista econômico e menos complexas, como é o caso de melhorias no sistema de combustão e controle e otimização de processos, também é necessária a disponibilização de capital para instalação da tecnologia *gyro-therm* e analisadores *on-line*, respectivamente. Ademais, e em linha com DECC (2015), essas medidas demandam menor prazo de retorno de capital, aspecto que frequentemente impede a sua adoção.

Em termos institucionais e regulatórios, 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 de carbono constituem barreiras à implementação de atividades de baixo carbono.

No particular da adição de carboneto de escória na produção de cimento, observa-se como entrave a falta de garantia de suprimento do resíduo. E, no caso da CAC, inexistente arcabouço regulatório para o transporte de do CO₂ capturado.

Em termos comportamentais e informacionais, muitos atores do setor industrial 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 inovadoras, como é o caso da CAC (CURRÁS, 2010).

Ainda no que se refere à CAC, em sentido amplo às tecnologias inovadoras mapeadas no cenário BC+I, existem barreiras referentes à adequação a padrões, normas e regulamentações e ao alto custo em pesquisa e desenvolvimento, visando à implantação de um produto ou serviço inovador (BELTRAME et al., 2013). Outra barreira à inovação é o tempo médio de análise para concessão de patentes pelo Instituto Nacional de Propriedade Industrial (Inpi), que, na maioria dos casos, varia de 7 a 11 anos, enquanto em países da União Europeia, assim como China, Coreia do Sul, EUA e Japão, o período médio é inferior a 3 anos (LICKS, 2017).

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;
- Diminuição na disposição de resíduos, como o carboneto de escória;
- 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 DE EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS COM POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO

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

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

Na Figura 20, nota-se a participação, por países selecionados, dos instrumentos de política pública implementados para promover atividades de baixo carbono. Deve-se destacar que, percentualmente, o Brasil é o país que mais políticas relacionadas com informação e educação tem, enquanto na China predominam os instrumentos regulatórios.

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

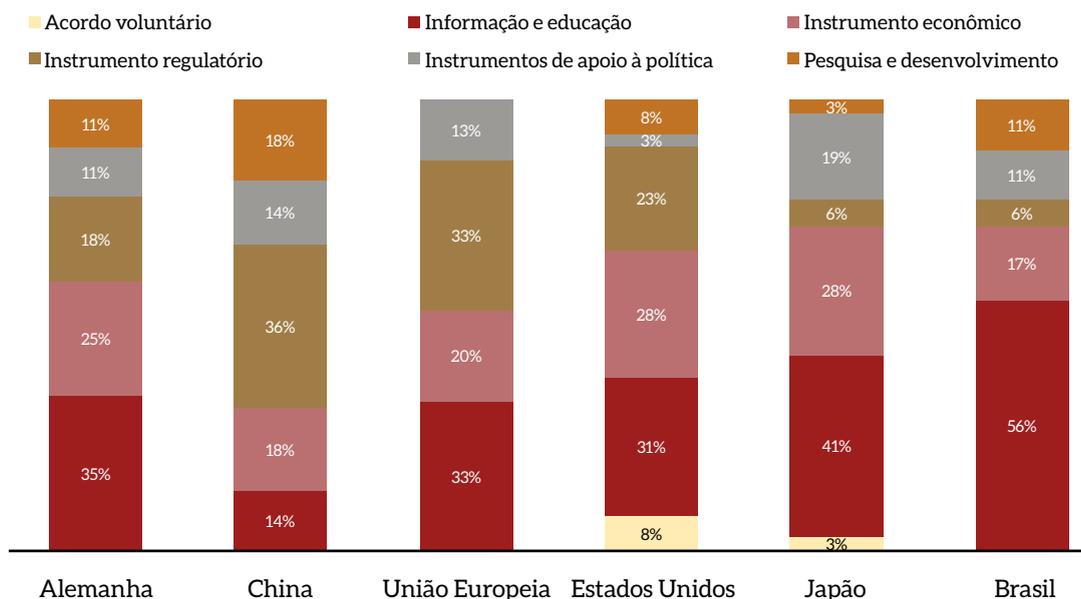


Figura 20 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria

Fonte: Elaborado a partir de WORLD ENERGY COUNCIL, 2013

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

No caso específico do setor de cimento, deve ser destacada a Cement Sustainability Initiative (CSI), criada no âmbito da World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), a qual congrega 23 dos maiores produtores em âmbito mundial, responsáveis por 30% da produção mundial de cimento. A iniciativa destaca que a mitigação de emissões no setor tem como imperativo o monitoramento e reporte das emissões. Ainda no âmbito da WBCSD, deve-se ressaltar o Cement Action Plan of the Low Carbon Technology Partnerships initiative (LCTPi), que visa acelerar o desenvolvimento de soluções de baixo carbono e reduzir emissões do setor entre 20% e 25% até 2030. Interessantemente, a iniciativa destaca a importância de ações que foram mapeadas neste estudo, como eficientização energética de fornos e aproveitamento de resíduos (UNFCCC, 2017).

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

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

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

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

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

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

Para remover a barreira relacionada a tecnologias importadas, como é o caso da CAC e refrigeradores de grelha de alta eficiência, e por isso estão sujeitas à volatilidade cambial e taxas alfandegárias,

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

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

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

Com vistas a promover uma cultura organizacional voltada para ações de eficiência energética, poderiam ser implementados mecanismos de auditoria energética. Este seria um incentivo para empresas que desejam acessar condições diferenciadas de crédito oferecidos por bancos públicos de fomento, e sua implementação seria regulamentada pelo MF e monitorada pelo MDIC e Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), com suporte do SNIC. Adicionalmente, é importante a criação de instrumento voltado à substituição de equipamento no final da vida útil. Nesse sentido, poderia ser elaborado um programa de depreciação obrigatória de fornos, com contrapartida relacionada a condições facilitadas de taxa de juros e análise simplificada de crédito no âmbito da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”. Para tanto, é relevante o envolvimento do MDIC, de associações representativas dos setores industriais e do BNDES. Os dois instrumentos poderiam ser implementados a partir de 2020.

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

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

No particular da adição de carboneto de escória na produção de cimento, deve-se criar, em linha com os objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), um programa de aproveitamento energético do resíduo. Mais que isso, é relevante garantir o suprimento da fonte por meio de contratos e seguros celebrados entre plantas cimenteiras, cooperativas de reciclagem e seguradoras.

No caso das tecnologias inovadoras, é extremamente importante diminuir o tempo de análise para a concessão de patentes, o que fomentaria o desenvolvimento de conteúdo local por meio de plantas-piloto de CAC em âmbito nacional. 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.

Ainda no que se refere à CAC, é preciso propor estrutura regulatória que contenha um conjunto de informações e procedimentos (etapas de um projeto, agentes atuantes e órgãos fiscalizadores) para a implementação segura e eficaz de técnicas de CAC no Brasil com o foco principal nas etapas de transporte e armazenamento geológico de CO₂. Trata-se de uma proposta de longo prazo, que necessariamente deve ser liderada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), MME e EPE.

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 e ao aprimoramento dos processos produtivos. Em particular, a barreira associada à falta de informação dos benefícios das ações de eficientização energética poderia ser superada por meio da realização de ações de sensibilização, informação e capacitação. O monitoramento de emissões de GEE também seria necessário, o que permitiria verificar, por exemplo, se os pré-requisitos exigíveis para obtenção de financiamento estão sendo cumpridos. O presente projeto, no qual este estudo está inserido, vem desenvolvendo uma série de atividades com esse propósito, as quais poderiam ser ampliadas ao setor por meio do estabelecimento de acordo de cooperação técnica entre MDIC, MCTIC, SNIC, CNI e Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI).

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

A aplicação de instrumentos de políticas públicas voltados para a remoção de barreiras tecnológicas, em particular, deve estar voltada para acelerar a penetração de tecnologias de baixo carbono ainda não maduras no mercado. No caso da CAC, poderiam ser implementados os seguintes instrumentos:

- Criação de laboratórios para testar em menor escala os impactos do armazenamento de CO₂ em sumidouros geológicos e projetos de rede de dutos para coleta de CO₂ a partir das fontes estacionárias;
- Cursos de formação técnica que permitam que profissionais tenham a capacidade de desenvolver e dar assistência a produtos relacionados com a implantação de rede de carbodutos e armazenamento geológico no Brasil;
- Associações que possibilitem espaços abertos para que os agentes interessados (entidades e agentes do governo; institutos de pesquisa, desenvolvimento e inovação; universidades; indústria de TIC em *hardware*, *software* e equipamentos; e empresas do setor energético) possam compartilhar experiências, opiniões e informações técnicas;
- Divulgação de estudos e trabalhos técnicos no tema, visando à informação da população e consequente aceitação por parte da opinião pública de que é uma grande barreira a implementação de redes de dutos, por exemplo, de acordo com experiências internacionais;
- Implementação de unidades-piloto de CAC nos setores avaliados neste estudo.

Nesse sentido, deve ser 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 CAC, sendo o lançamento de editais para o financiamento de projetos específicos junto à Financiadora de Estudo e Projetos (Finep) um instrumento relevante para o setor.

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

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

A seguir, no Quadro 2, 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

de cimento 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 2 – Quadro-resumo de Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Adição de carboneto de escória na produção de cimento</p>	<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 e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da adoção da medida; • Falta de garantia de suprimento do carboneto de escória; • Inexistência de padrões de eficiência energética e/ou limites de emissões para instalações industriais; • Inviabilidade econômica; • Restrições à instalação pelo <i>layout</i> 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 mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas e financiamento para empresas que atinjam <i>benchmark</i> de eficiência energética; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Criação, no âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos, de um programa de aproveitamento energético do carboneto de escória; • 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; <ul style="list-style-type: none"> • Definição de <i>benchmark</i> para novas plantas; • 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 para atender pequenas, médias e grandes empresas; <ul style="list-style-type: none"> • Elaboração de contratos e seguros de suprimento entre plantas cimenteiras, cooperativas de reciclagem e seguradoras; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; <ul style="list-style-type: none"> • Estabelecimento de padrões mínimos de eficiência para equipamentos (criação de Selo de Eficiência Industrial); • Inclusão de todos os setores de indústria no Plano Indústria, ou naquele que vier a sucedê-lo no âmbito da NDC brasileira; <ul style="list-style-type: none"> • 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; <ul style="list-style-type: none"> • Precificação de carbono a partir de 2025; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Inserção de refratário no forno de clinquerização		
Controle e otimização de processo		<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; <ul style="list-style-type: none"> • 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;
Melhorias no sistema de combustão	<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 e alto custo de transação nas operações de financiamento; <ul style="list-style-type: none"> • Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficiência energética; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar a medida; <ul style="list-style-type: none"> • Inexistência de padrões de eficiência energética e/ou limites de emissões para instalações industriais; • Inviabilidade econômica; <p>Restrições à instalação pelo layout das plantas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 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; <ul style="list-style-type: none"> • Diversificação das linhas de crédito existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; <ul style="list-style-type: none"> • 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 de todos os setores de indústria no Plano Indústria, ou naquele que vier a sucedê-lo no âmbito da NDC brasileira; <ul style="list-style-type: none"> • 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; <ul style="list-style-type: none"> • Precificação de carbono a partir de 2025; • 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; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Adoção de refrigeradores de grelha de alta eficiência	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e assimetria, falta e custos de transação do crédito; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Dificuldade de acesso e alto custo de transação nas operações de financiamento; <ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo de importação da tecnologia; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficiência energética; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar a medida; • Inexistência de padrões de eficiência energética e/ou limites de emissões para instalações industriais; • Inviabilidade econômica; • Restrições à instalação pelo <i>layout</i> 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; <ul style="list-style-type: none"> • 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; <ul style="list-style-type: none"> • Desoneração de impostos de importação das tecnologias; • Diversificação das linhas de crédito existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; <ul style="list-style-type: none"> • Financiamento, por meio de agências de fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • Inclusão de todos os setores de indústria 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; <ul style="list-style-type: none"> • Precificação de carbono a partir de 2025; • 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; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono.
Adoção do processo de via seca com múltiplos estágios de ciclone		

Medidas	Barreiras	Instrumentos
<p>Captura e armazenamento de carbono</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo de capital e de O&M da tecnologia de captura; • Aplicabilidade de equipamentos, considerando a configuração das plantas industriais; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial; • Elevado tempo de análise para concessão de patentes; <ul style="list-style-type: none"> • Falta de aceitação da tecnologia; • Falta de conteúdo local da tecnologia; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar a medida; <ul style="list-style-type: none"> • Incerteza acerca da disponibilidade comercial; • Inexistência de arcabouço regulatório para o transporte de CO₂ capturado; <ul style="list-style-type: none"> • Inexistência de padrões de eficiência energética e/ou limites de emissões para instalações industriais; • Inexistência de redes de dutos para transporte de CO₂; • Inviabilidade econômica; • Restrições à instalação pelo layout das plantas; <ul style="list-style-type: none"> • Risco do sobre ou subdimensionamento da captura e transporte de CO₂; 	<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; <ul style="list-style-type: none"> • Criação da linha de crédito “Financiamento a plantas-piloto – Captura de carbono”; • Cursos de capacitação técnica para implementação e manutenção de componentes da CAC; • Criação de laboratórios para testar em menor escala os impactos do armazenamento de CO₂ em sumidouros geológicos e projetos de rede de dutos para coleta de CO₂ a partir das fontes estacionárias; <ul style="list-style-type: none"> • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Cursos de formação técnica que permitam que profissionais tenham a capacidade de desenvolver e dar assistência a produtos relacionados com a implantação de rede de dutos e armazenamento geológico no Brasil; • Desoneração de impostos de importação de componentes-chave da tecnologia de CAC; <ul style="list-style-type: none"> • Divulgação de estudos e trabalhos técnicos no tema, visando à informação da população e consequente aceitação por parte da opinião pública de que é uma grande barreira a implementação de redes de dutos, por exemplo, de acordo com experiências internacionais; • Elaboração e implementação de projetos-piloto de captura de CO₂; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de CAC e estudos de aplicabilidade da tecnologia no setor cimenteiro; • Inclusão do setor no Plano Indústria, ou naquele plano que vier a sucedê-lo; • Obrigatoriedade da adoção das melhores tecnologias disponíveis (MTD) em novas plantas industriais; • 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; <ul style="list-style-type: none"> • Proposta de estrutura regulatória que contenha um conjunto de informações e procedimentos (etapas de um projeto, agentes atuantes e órgãos fiscalizadores) para a implementação segura e eficaz de técnicas de CAC no Brasil com o foco principal nas etapas de transporte e armazenamento geológico de CO₂; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono.



Considerações
finais

CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

Considerando os resultados obtidos, nota-se que o setor apresenta relevante potencial de abatimento de emissões. O potencial nos cenários BC e BC+I, com relação ao cenário REF, em 2050, é de 13%. O potencial de abatimento de emissões de GEE acumulado até 2050, no cenário BC, é de aproximadamente 90 MtCO₂e, sendo as medidas mais representativas: i) adoção do processo de via seca com múltiplos estágios de ciclone; ii) uso de carboneto de escória na produção de cimento.

A adoção de múltiplos estágios de ciclone acarreta barreira econômica: custos de abatimento positivo à taxa de desconto praticada pelo setor. Mais que isso, trata-se de uma medida que demanda significativo investimento, o que leva a que entre em competição com outras prioridades, tal qual a expansão da capacidade produtiva. No caso da aplicação do carboneto de escória, o principal desafio é garantir o suprimento constante às plantas industriais que optem por utilizar a matéria-prima. Ademais, podem ser citadas barreiras comuns à adoção das atividades de baixo carbono: i) dificuldade de acesso e alto custo de transação nas operações de financiamento; ii) falta de conhecimento acerca das vantagens da adoção das medidas; iii) restrições à instalação pelo *layout* das plantas; iv) ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; v) conjuntura econômica e setorial.

A remoção das barreiras exige a implementação de uma série de instrumentos de política pública. Quanto ao uso do carboneto de escória, o suprimento poderia ser garantido por meio da elaboração de contratos e seguros de suprimento entre plantas cimenteiras, cooperativas da reciclagem e seguradoras. Como o resíduo é destinado a aterros, o governo federal, no âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em parcerias com prefeituras, poderia criar um programa de aproveitamento energético do carboneto de escória que preveja atividades de capacitação para coleta e transporte controlado às plantas cimenteiras. No caso da tecnologia de múltiplos estágios de preaquecedores e pré-calcinadores, a remoção das barreiras exige a implementação dos seguintes instrumentos: i) criação da linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”; ii) diversificação das linhas de crédito existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; iii) 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; iv) 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; v) precificação de carbono a partir de 2025; vi) criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; vii) 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; viii) estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; ix) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; x) 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.

No caso das tecnologias de rupturas avaliadas no cenário BC+I, destaca-se o potencial da captura e armazenamento de carbono (CAC) pela rota de pós-combustão. A tecnologia precisa de incentivo em pesquisa e desenvolvimento (P&D) com vistas a tornar-se disponível comercialmente. Pressupõe-se que sua adoção seria possível somente a partir de 2035, condicionada a uma série de políticas públicas, entre as quais se destacam: i) desoneração de importações de componentes-chave da tecnologia da CAC; ii) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de CAC; iii) precificação do carbono a partir de 2025; iv) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidade da tecnologia no setor cimenteiro; v) criação de laboratórios para testar em menor escala os impactos do armazenamento de CO₂ em sumidouros geológicos e projetos de rede de dutos para coleta de CO₂ a partir das fontes estacionárias; vi) promover cursos de formação técnica para implementação e manutenção dos componentes-chave da CAC; vii) criação do arcabouço regulatório de CAC.

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 MTD mundialmente para atividades de mineração e pelletização, 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 que fazem parte da publicação *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono* (MCTIC, 2017b).



Referências

REFERÊNCIAS

ASIAN-PACIFIC PARTNERSHIP – APP. *Energy efficiency and resource saving technologies in cement industry*. Cement Task Force. 2008. Disponível em: <http://asiapacificpartnership.org/pdf/Projects/Cement/APP_Booklet_of_Cement_Technology.pdf>. Acesso em: 15 out. 2014.

AVAMI, A.; SATTARI, S. Energy Conservation Opportunities: Cement Industry in Iran. *International Journal of Energy*, v.1, Issue 3, 2007.

BARKER, D. J. et al. CO₂ capture in the cement industry. *Energy Procedia*, v.1, Issue 1, p. 133-140, 2009.

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.

BENHELAL, E. et al. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, v.1, p. 142-161, 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.

BOSOAGA, A.; MASEK, O.; OAKEY, J. E. CO₂ capture technologies for cement industry. *Energy Procedia*, v.1, p. 133-140, 2009.

BRASIL. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI. *Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono*. Caderno 4 – Nota Técnica Cimento. 2012. Disponível em: <<http://www.abdi.com.br>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Balanço Energético Nacional 2011*. Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2014.

_____. *Balanço Energético Nacional 2013*. Brasília: EPE, 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2014.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *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 de Minas e Energia – MME. *Balanço de Energia Útil – BEU*. Brasília: MME, 2005.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC. *Plano Setorial de Mitigação à Mudança do Clima para Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação*. Brasília: MDIC, 2013. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/>>. Acesso em 13 nov. 2015.

CANADA. Canadian Industry Program for Energy Conservation – CIPEC. *Canadian cement industry. Energy Benchmarking. Summary Report*. Canada, 2009.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE – CSI. 2014. Disponível em: <<http://www.wbcsdcement.org/>>. Acesso em: 22 set. 2014.

CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE. EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY – CSI/ECRA. *Development of state of the art-techniques in cement manufacturing: Trying to look ahead*. Genebra: CSI/ECRA, 2009.

CEMENT TASK FORCE – CTF. *Energy efficiency and resource saving technologies in cement industry*. Asia – Pacific Partnership on Clean Development & Climate, 2008.

CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS – C2ES. *Policies in key countries*. 2015. Disponível em: <<http://www.c2es.org/international/key-country-policies/policies-key-countries>>. Acesso em: 10 nov. 2015.

CICCOZZI, E.; CHECKENYA, R.; RODRIGUEZ, A.V. Recent experiences and challenges in promoting cleaner production investments in developing countries. *Journal of Cleaner Production*, n. 11, p. 629-638, 2002.

CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM – CDM. *Project design document form (CDM-PDD)*. Nanning Shizuo non-carbonated raw material for cement production renovation project. 2009. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1218618890.63/view>>. Acesso em: 15 out. 2014.

_____. *Simplified project design document for small-scale project activities (SSC-CDM-PDD)*. Version 02. 2008. Disponível em: <<http://cdm.unfccc.int/Projects/DB/SGS-UKL1175340468.27/view>>. Acesso em: 15 out. 2014.

CLIMATE STRATEGIES. *Carbon control and competitiveness post 2020: The cement report*. Final Report. Berlin, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI (Brasil). *Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento*. Brasília: CNI, 2012.

_____. *Novas tecnologias para processos industriais: Eficiência energética na indústria*. Brasília: CNI, 2009.

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

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA MUDANÇAS DO CLIMA – UNFCCC. *Bigger Climate Action Emerging in Cement Industry*. Disponível em: <<http://newsroom.unfccc.int/unfccc-newsroom/bigger-climate-action-emerging-in-cement-industry/>>. Acesso em: 18 jan. 2018.

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

DAVIDOVITS, J. *Cimento geopolimérico – Uma revisão*. GEO-POL. 2013. Disponível em: <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/GPCimento2013.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

DEAN, C. C. et al. Integrating calcium looping CO₂ capture with the manufacture of cement. *Energy Procedia*, v. 37, p. 7078- 7090, 2013.

DEAN, C. C. et al. The calcium looping cycle for CO₂ capture from power generation, cement manufacture and hydrogen production. *Chemical Engineering Research and Design*, v.89, p. 836-855, 2011.

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.

DORILEO, I. L.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. *Oportunidades de eficiência energética na indústria*. Relatório setorial: setor cimenteiro. Brasília: CNI, 2010.

EUROPEAN CEMENT RESEARCH ACADEMY – ECRA. *ECRA CCS Project e Report about Phase II*. TR-ECRA-106/2009. Düsseldorf, Alemanha: ECRA, 2009.

_____. *Technical Report*. ECRA CCS Project – Report on Phase III. Düsseldorf, Alemanha: ECRA, 2012.

EUROPEAN COMISSION. *The EU emissions trading system (EU ETS)*. 2015. Disponível em: <http://ec.europa.eu/clima/policies/ets/index_en.htm>. Acesso em: 13 nov. 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.

FLAME, COMBUSTION, TECHNOLOGY – FCT. 2014. Disponível em: <http://www.fctinternational.com/splash/about_fct/fct_combustion/products_fct_combustion/gyrotherm/body.htm>. Acesso em: 15 out. 2014.

FLSMIDTH. *Cement Plant Pyro-technology* – Presentation to the IEA-WBCSD. Workshop “Energy Efficiency and CO₂ Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry”. Paris: IEA, 2006.

FUJIMOTO, S. *Modern technology impact on power usage in cement plants*, proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference. Toronto, Ontario, Canada, May 1993.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS – FGV (Brasil). *Propostas para implementação do plano indústria de baixo carbono – Eficiência energética na indústria*. São Paulo: CES/FGV, 2015.

GAMA e SOUZA, M. F. L. *Descrição das novas tecnologias, estimativas de redução de consumo energético e de emissões de GEE e custos de investimento*. Produto 3. Projeto Opções de Mitigação de Gases de Efeito Estufa em Setores Chave no Brasil. Brasília: MCTIC/Pnuma, 2015.

GARCÍA-GUSANO, D. et al. Life Cycle Assessment of applying CO₂ post-combustion capture to the Spanish cement production. *Journal of Cleaner Production*, Madri, v.104, p. 328-338, 2015.

GRANADOS, D. et al. Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln. *Energy*, v. 64, p. 615-625, 1 January 2014.

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

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. *Economics of greenhouse gas limitations – Methodological guidelines*. Roskilde, Denmark: UNEP Collaborating Centre on Energy and Environmental/Risø National Laboratory, 1998.

HENRIQUES JR. M. F. *Potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro*. 2010. 340 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Coppe/PPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

HOLDERBANK CONSULTING. *Present and future energy use of energy in the cement and concrete industries in Canada*. Ottawa, Ontario, Canada: CANMET, 1993.

HOLLINGSHEAD, A.; VENTA, G. *Carbon dioxide reduction technology effectiveness assessment – Initial Evaluation*. PCA R&D Series No. SN3125, Portland Cement Association, Skokie, IL. Id. 2009. Disponível em: <<http://www.cement.org/bookstore/profile.asp?store=&pagenum=&pos=0&catID=&id=16964>>. Acesso em: 15 out. 2014.

IMPERIAL COLLEGE. *Decarbonisation of heat in industry*. A review of the research evidence. Report for the Department of Energy & Climate Change. 2013. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/230949/D13_951813__Ricardo_AEA_Industrial_Decarbonisation_Literature_Review_201___.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2015.

INSTITUTE FOR INDUSTRIAL PRODUCTIVE – IIP. *Industrial efficiency technology database*. 2014. Disponível em: <<http://ietd.iipnetwork.org/>>. Acesso em: 22 set. 14.

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

_____. *Integrated pollution prevention and control. reference document on best available techniques in the cement, lime and magnesium oxide manufacturing industries*. *Official Journal of the European Union*, v. 56, April, 2013.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *CCS in industrial applications*. A workshop of the CCUS Action Group in preparation for the 4th Clean Energy Ministerial. Workshop Report 2013. London, UK: IEA, 2013.

_____. *Cement production*. ETSAP – Energy Technology Systems Analysis Programme. Technology Brief IO3. Paris: OECD/IEA, June 2010.

_____. *Cement technology roadmap*. Carbon Emissions Reductions up to 2050. Paris: OECD/IEA, 2009.

_____. *Technology roadmap. Low-Carbon Technology for the Indian Cement Industry*. Paris: OECD/IEA, 2012.

_____. *Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions*. Paris: OECD/IEA, 2007, 321p.

_____. *What lies in store for CCS? Insight Series 2014*. Paris: OECD/IEA, 2014.

_____. *World Energy Outlook 2015*. Paris: OECD/IEA, 2015.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. GREENHOUSE GAS R&D PROGRAMME – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA/GHG. *CO₂ capture in the cement industry*. Cheltenham, UK: OECD/IEA/GHG, 2008.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. GREENHOUSE GAS R&D PROGRAMME – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION – IEA/UNIDO. *Technology roadmap. Carbon capture and storage in industrial applications*. Paris: OECD/IEA/Unido, 2011.

JOINT RESEARCH CENTRE AND INSTITUTE FOR ENERGY – JRC/IE. *Energy efficiency and CO₂ emissions: Prospective scenarios for the cement industry*. Holanda: JRC/IE, 2010.

KARAMARKOVIĆ, V. et al. Recuperator for waste heat recovery from rotary kilns, *Applied Thermal Engineering*, v.54, p. 470-480, 2013.

KURAMOCHI, T. et al. Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 38, Issue 1, p. 87-112, February 2012.

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.

LI, J. et al. Technological, economic and financial prospects of carbon dioxide capture in the cement industry. *Energy Police*, v.61, p.1377-1387, 2013.

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.

MARTÍNEZ, I. et al. Integration of a Ca-looping system for CO₂ capture in an existing power plant. *Energy Procedia*, v.4, p. 1699-1706, 2011.

NARANJO, M.; BROWNLOW, D.; GARZA, A. CO₂ capture and sequestration in the cement industry. *Energy Procedia*, v.4, p.2716-2723, 2011.

NÚCLEO DE ESTUDOS DE ECONOMIAS DE BAIXO CARBONO – EBC. *Indústria de cimento. Relatório Final*. Ribeirão Preto: EBC, 2012.

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY – OEE. *Energy consumption benchmark guide: Cement clinker production*. Canada: OEE, 2001.

OLIVEIRA, C. C. N. *Potencial técnico e econômico da aplicação de rotas de capturas de carbono em processos industriais brasileiros*. 2015. 155 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Coppe/PPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – UNIDO. *Carbon capture and storage in industrial applications: Technology synthesis report*. Working Paper. Viena: Unido, 2010.

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

_____. *Barriers to industrial energy efficiency: A literature review*. Viena: Unido, 2011b.

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

OZCAN, D.; AHN, H.; BRANDANI, S. Process integration of a Ca-looping carbon capture process in a cement plant. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v.9, p.530-540, 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.

RAYNAL, L. et al. From MEA to demixing solvents and future steps, a roadmap for lowering the cost of post-combustion carbon capture. *Chemical Engineering Journal*, p. 742-752, 2011.

ROCHEDO, P. *Análise econômica sob incerteza da captura de carbono em termelétricas a carvão: Retrofitting e capture-ready*. 2011. 362 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Coppe/PPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

ROMANO, M. et al. The calcium looping process for low CO₂ emission cement and power. *Energy Procedia*, v.37, p.7091-7099, 2013.

SCHAEFFER, R. 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.

SILVA, A. A. *Potencial de conservação de energia na indústria cimenteira no Brasil*. 2013. 89 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do ABC. Santo André, São Paulo, 2013.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO – SNIC (Brasil). *Press kit 2007*. Rio de Janeiro: SNIC, 2007.

_____. *Relatório Anual 2012*. Rio de Janeiro: SNIC, 2012.

_____. *Comunicação pessoal*. 2017.

SIQUEIRA, L. *Laboratório de materiais de construção – I. 1ª Parte – Cimento*. Joinville: Udesc, 2008.

SOARES, J. B. *Potencial de conservação de energia e de mitigação das emissões de gases de efeito estufa para a indústria brasileira de cimento Portland até 2015*. 1998. 184 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) – Coppe/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R.; LUCENA, A. et al. *Medidas transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa – Captura, transporte e armazenamento de carbono*. Rio de Janeiro: PPE/COPPE/UFRJ, 2015.

TOFTEGAARD, M. et al. Oxy-fuel combustion of solid fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, v.36, Issue 3, p. 581-625, 2010.

UK. Department of Energy and Climate Change and the Department of Business, Innovation and Skills – DECC. *Industrial decarbonisation and energy efficiency roadmaps to 2050: Cement*. London: UK DECC. UK BIS, 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. Environmental Protection Agency – EPA. *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the Portland cement industry*. Washington DC: EPA, 2010.

_____. *Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making*. Washington DC: EPA, 2013.

VATOPOULOS, K.; TZIMAS, E. Assessment of CO₂ capture technologies in cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, v.32, p.251-261, 2012.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT CEMENT SUSTAINABILITY INITIATIVE – WBCSD-CSI. *Cement industry energy and CO₂ performance: Getting the numbers right*. Genebra, Suíça, 2008.

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

WORREL, E. et al. *World best practice energy intensity values for selected industrial sectors*. Environmental Energy. Technologies Division. Berkely, California: Berkely Lab., February 2008.

WORRELL, E.; GALITSKY, C. *Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making*. Ernest Orlando Lawrence. Berkeley National Laboratory. Na Energy Star Guide for Energy and Plant Managers. Environmental Energy Technologies Division. California, 2008.

ZEMENT KALK GIPS – ZKG. *Grinding trends in the cement industry*. Alemanha, 2010. Disponível em: <http://www.zkg.de/en/artikel/zkg_2010-04_Grinding_trends_in_the_cement_industry_886612.html>. Acesso em: 15 out. 2014.

WORLD BANK. *Overview Brazil*. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/en/country/brazil/overview>>. Acesso em: 15 out. 2016.

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



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

