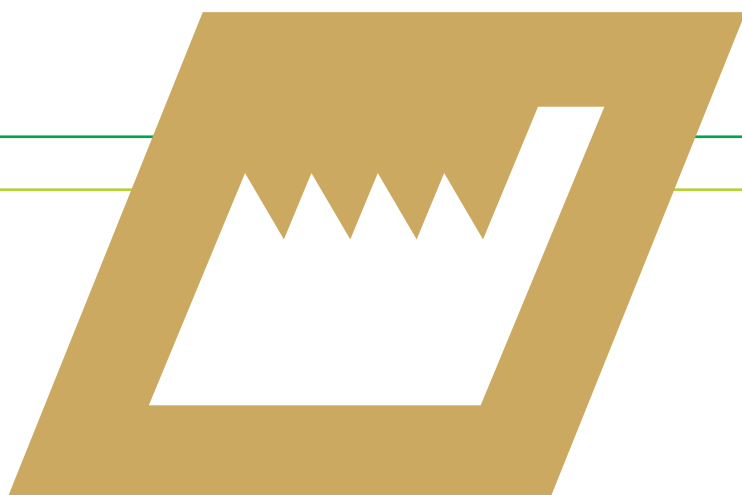




*Opções de Mitigação de Emissões
de Gases de Efeito Estufa em
Setores-Chave do Brasil*



MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR QUÍMICO

RÉGIS RATHMANN
(ORGANIZADOR)

MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR QUÍMICO

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

-
- M689 Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de químico / organizador Régis Rathmann. - Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017.
- 171 p.: il. - (Opções de mitigação de emissões de gases de efeito estufa em setores-chave do Brasil)
- ISBN: 978-85-88063-56-3
1. Mudanças climáticas. 2. Emissão de gases. 3. Setor químico. 4. Setor químico - 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

Larissa Pupo Nogueira de Oliveira

Revisão

Anna Cristina de Araújo Rodrigues

Projeto Gráfico

Capitular Design Editorial

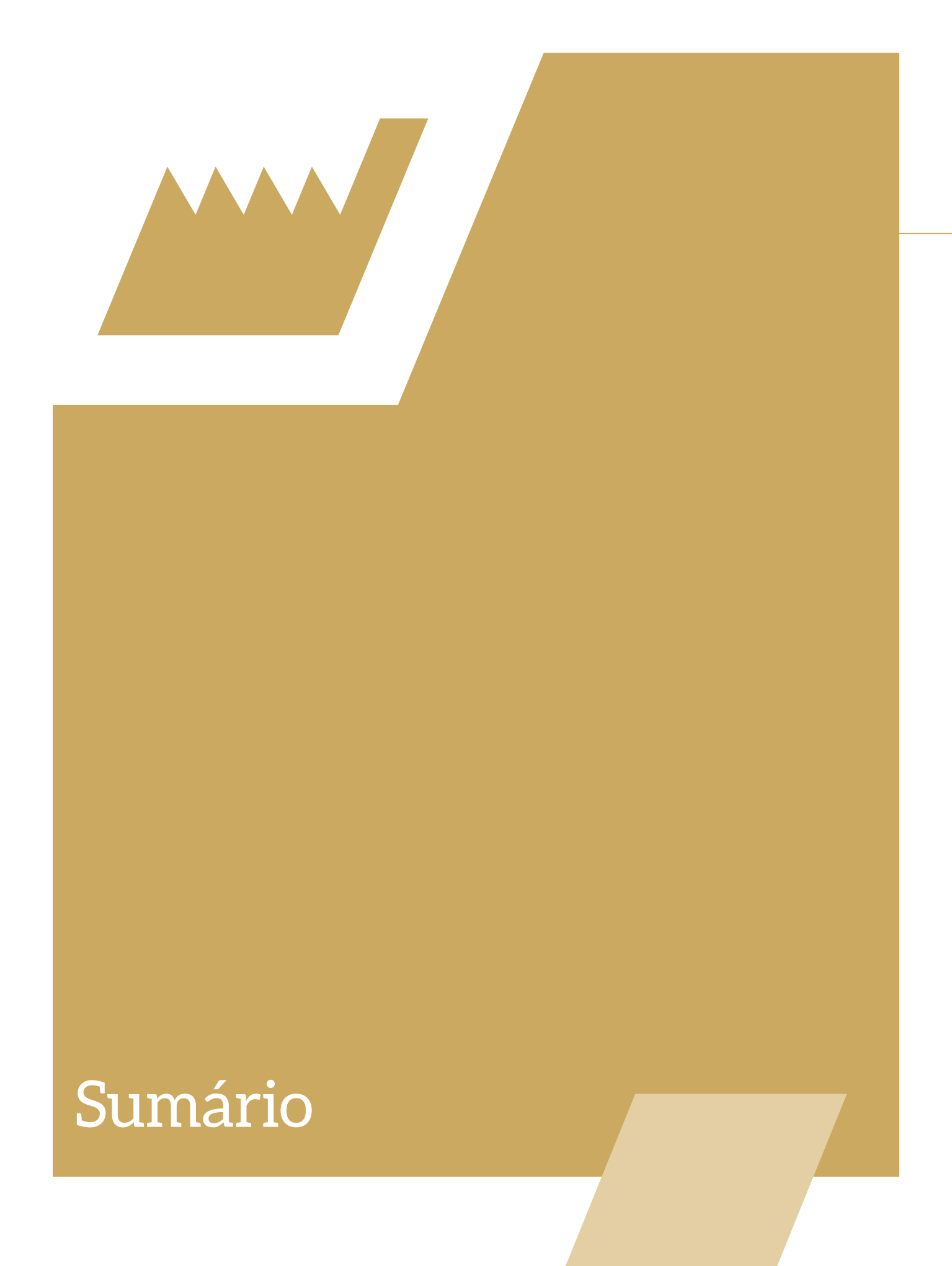
Editoração

Phábrica de Produções: Alecsander Coelho e

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

Bockmann, Kauê Rodrigues, Marcelo Macedo e

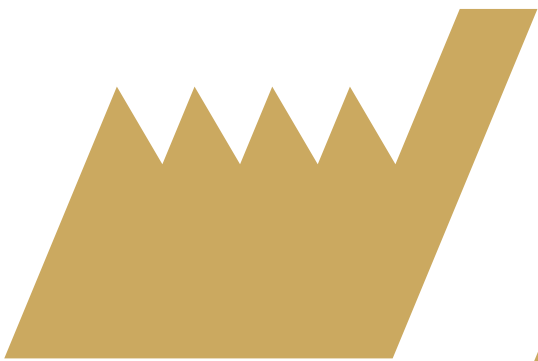
Rodrigo Alves (diagramação)

The background features a large, solid gold shape that resembles a stylized letter 'L' or a corner. In the upper left, there is a smaller gold shape with a jagged, sawtooth-like top edge. At the bottom right, a smaller, lighter tan shape is partially visible, also with a diagonal edge. The overall aesthetic is modern and minimalist.

Sumário

INTRODUÇÃO.....	18
1 CARACTERIZAÇÃO SETORIAL	22
1.1 CONSUMO DE ENERGIA NOS PROCESSOS PRODUTIVOS.....	32
1.1.1 GRUPO CLORO-ÁLCALI.....	34
1.1.2 GRUPO INTERMEDIÁRIO PARA FERTILIZANTES	37
1.1.3 GRUPO PETROQUÍMICO.....	45
1.1.4 SÍNTESE DOS PROCESSOS PRODUTIVOS	74
2 MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS APLICÁVEIS AOS PROCESSOS PRODUTIVOS DO SETOR	76
2.1 MEDIDAS TRANSVERSAIS	78
2.1.1 Monitoramento, controle e gerenciamento energético	78
2.1.2 Recuperação de calor para o sistema de vapor em caldeiras.....	79
2.1.3 Integração de processos com análise pinch	80
2.1.4 Recuperação de calor em fornalhas e fornos	81
2.1.5 Cogeração (<i>combined heat and power</i> – CHP)	82
2.1.6 Redução da temperatura de entrada de compressores	83
2.1.7 Substituição por motores elétricos mais eficientes	83
2.1.8 Otimização dos equipamentos acionados por motores.....	84
2.1.9 Emprego de separação por membranas	85
2.1.10 Controle digital e gerenciamento de compressores de ar	86
2.1.11 Monitoramento e diagnóstico de motores.....	87
2.1.12 Queimadores de baixa emissão de NOx.....	88
2.1.13 Tratamento de água de processo com membranas	88
2.1.14 Modelagem computacional de processos integrados	89
2.1.15 Maior uso de gás natural e biomassa em caldeiras e fornos.....	89

2.2 MEDIDAS ESPECÍFICAS	90
2.2.1 Novos catalisadores	90
2.2.2 Reciclagem de plásticos	90
2.2.3 Aumentar a seletividade das serpentinas do forno de craqueamento.....	91
2.2.4 Uso de torres de resfriamento e/ou bombas de calor na seção de separação.....	91
2.2.5 Craqueamento catalítico da nafta.....	92
2.2.6 Recuperação de calor de/para fluidos agressivos.....	92
2.2.7 Reforma autotérmica.....	93
2.2.8 Emprego de célula eletrolítica de membrana	94
2.2.9 Sistema de confinamento em polímeros	95
2.2.10 Substituição de bombas extrusoras por bombas de engrenagem	95
2.2.11 Uso de solventes avançados para extração de CO ₂	95
2.2.12 Utilização de resíduos com elevado poder calorífico para geração de vapor.....	96
3 CENÁRIOS DE REFERÊNCIA, BAIXO CARBONO E BAIXO CARBONO COM INOVAÇÃO.....	98
3.1 CENÁRIO REF	100
3.1.1 Premissas.....	100
3.1.2 Resultados.....	102
3.2 CENÁRIO BC.....	105
3.2.1 Premissas	105
3.2.2 Resultados	106
3.2.3 Custos marginais de abatimento	107
3.3 CENÁRIO BC+I	116
3.3.1 Tecnologias de ruptura aplicáveis no setor químico.....	116
3.3.2 Premissas.....	129
3.3.3 Resultados	130
4 SUBSÍDIOS À FORMULAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO	134
4.1 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS À IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO.....	136
4.2 SÍNTESE DE EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS E NACIONAIS COM POLÍTICAS PÚBLICAS DE BAIXO CARBONO	138
4.3 INSTRUMENTOS DE POLÍTICA PÚBLICA PARA ADOÇÃO DOS CENÁRIOS DE BAIXO CARBONO.....	142
CONSIDERAÇÕES FINAIS	154
REFERÊNCIAS.....	158



Listas de tabelas,
figuras, quadros e
siglas e acrônimos

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade Instalada e Produção dos Produtos Pré-Selecionados.....	28
Tabela 2 – Consumo Específico de Energia dos Produtos Pré-Selecionados	30
Tabela 3 – Valores de Consumo Específico de Energia na Produção de Cloro por Tecnologia.....	36
Tabela 4 – Consumo Específico de Energia por Etapas na Produção de Cloro	36
Tabela 5 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Cloro no Brasil em 2006	36
Tabela 6 – Consumo Energético Específico na Produção de Ácido Fosfórico	38
Tabela 7 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Fosfórico no Brasil em 2006.....	38
Tabela 8 – Consumo Energético Específico na Produção de Ácido Nítrico	39
Tabela 9 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Nítrico no Brasil em 2006.....	39
Tabela 10 – Consumo Energético Específico na Produção de Ácido Sulfúrico	40
Tabela 11 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Sulfúrico no Brasil em 2006	40
Tabela 12 – Consumo Energético Específico na Produção de Amônia.....	42
Tabela 13 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Amônia no Brasil em 2006	42
Tabela 14 – Consumo Energético Específico na Produção de Fosfatos de Amônio	42
Tabela 15 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Fosfatos de Amônio no Brasil em 2006	43
Tabela 16 – Consumo Energético Específico na Produção de Nitrato de Amônio	43
Tabela 17 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Nitrato de Amônio no Brasil em 2006	43
Tabela 18 – Consumo Energético Específico na Produção de Sulfato de Amônio	44
Tabela 19 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Sulfato de Amônio no Brasil em 2006	44

Tabela 20 – Consumo Energético Específico na Produção de Ureia	45
Tabela 21 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ureia no Brasil em 2006	45
Tabela 22 – Consumo Energético Específico na Produção de Eteno e Propeno	51
Tabela 23 – Consumo Energético Específico do Processo de Produção de Eteno por Etapa de Processo	51
Tabela 24 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Eteno e Propeno no Brasil em 2006	52
Tabela 25 – Consumo Energético Específico na Produção de Butadieno	53
Tabela 26 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Butadieno no Brasil em 2006	53
Tabela 27 – Consumo Energético Específico do Processo de BTX	54
Tabela 28 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de BTX no Brasil em 2006	54
Tabela 29 – Consumo Energético Específico do Processo de Estireno	56
Tabela 30 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Estireno no Brasil em 2006	56
Tabela 31 – Consumo Energético Específico do Processo de Ácido Tereftálico	57
Tabela 32 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Tereftálico no Brasil em 2006	57
Tabela 33 – Consumo Energético Específico do Processo de Dicloroetano	58
Tabela 34 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Dicloroetano no Brasil em 2006	58
Tabela 35 – Consumo Energético Específico do Processo de Cloreto de Vinila	59
Tabela 36 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Cloreto de Vinila no Brasil em 2006	59
Tabela 37 – Consumo Energético Específico do Processo de Formaldeído	60
Tabela 38 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Formaldeído no Brasil em 2006	61
Tabela 39 – Consumo Energético Específico do Processo de Metanol	62
Tabela 40 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Metanol no Brasil em 2006	62
Tabela 41 – Consumo Energético Específico do Processo de Óxido de Eteno	63
Tabela 43 – Consumo Energético Específico do Processo de Etilenoglicól	64
Tabela 44 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Etilenoglicol no Brasil em 2006	65

Tabela 45 – Consumo Energético Específico do Processo de SBR.....	67
Tabela 46 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de SBR no Brasil em 2006	67
Tabela 47 – Consumo Energético Específico do Processo de Polietileno.....	68
Tabela 48 – Consumo Energético Específico do Processo de Produção de Polietileno	69
Tabela 49 – Consumo Energético Específico do Processo de Polipropileno.....	70
Tabela 50 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Polipropileno no Brasil em 2006	70
Tabela 51 – Consumo Energético Específico do Processo de PVC.....	71
Tabela 52 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Policloreto de Vinila no Brasil em 2006.....	71
Tabela 53 – Consumo Energético Específico do Processo de PET.....	72
Tabela 54 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de PET no Brasil em 2006.....	73
Tabela 55 – Consumo Energético Específico do Processo de Poliestireno.....	74
Tabela 56 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Poliestireno no Brasil em 2006.....	74
Tabela 57 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Produção e Demanda Energética	101
Tabela 58 – Fatores de Emissão de CO ₂ do SIN.....	102
Tabela 59 – Produção Física do Setor Químico	103
Tabela 60 – Consumo Energético do Setor Químico	103
Tabela 61 – Emissões de GEE do Setor Químico	105
Tabela 62 – Consumo Energético do Setor Químico no Cenário BC.....	106
Tabela 63 – Emissões de GEE do Setor Químico no Cenário BC	107
Tabela 64 – Potenciais e Custos de Investimento e O&M das MTD.....	110
Tabela 65 – Preços dos Combustíveis	111
Tabela 66 – Preços de Petróleo Considerados para o Cálculo do Custo Marginal de Abatimento das Possibilidades de Mitigação.....	111
Tabela 67 – Preços dos Combustíveis e da Eletricidade para a Taxa de Desconto de 8% ao ano.....	112
Tabela 68 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 8% ao ano	112
Tabela 69 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 17% ao ano	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução do Faturamento Líquido da Indústria Química Brasileira entre (1995-2017).....	23
Figura 2 – Evolução da Balança Comercial de Produtos Químicos (US\$ milhões FOB)	24
Figura 3 – Consumo Energético no Setor Químico entre 2007 e 2016.....	33
Figura 4 – Fluxograma Genérico de Produção de Cloro-soda	34
Figura 5 – Fluxograma da Cadeia de Obtenção de Fertilizantes.....	37
Figura 6 – Processo de Produção de Amônia segundo o Licenciador Uhde GmbH	44
Figura 7 – Processo de Produção de Amônia segundo o Licenciador Toyo.....	45
Figura 8 – Diagrama Esquemático da Cadeia Petroquímica.....	46
Figura 9 – Processo Genérico para Produção de Petroquímicos Básicos.....	47
Figura 10 – Reator de Pirólise para Produção de Eteno	48
Figura 11 – Fluxograma de Produção de Eteno ABB Lummus Global	49
Figura 12 – Fluxograma de Produção de Eteno e Propeno Technip	50
Figura 13 – Fluxograma de Produção de 1,3-butadieno pelo Processo BASF AG/ABB Lummus Global.....	52
Figura 14 – Fluxograma de Produção de BTX pelo Processo de Reforma Catalítica Licenciado pela UOP LLC.....	54
Figura 15 – Esquema de Produção de Monômero de Estireno por Desidrogenação de Etilbenzeno, Tecnologia Badger.....	55
Figura 16 – Esquematização do Processo de Ácido Tereftálico pela Tecnologia Lurgi	56
Figura 17 – Fluxograma da Produção de Dicloroetano pela Tecnologia Uhde GmbH.....	58
Figura 18 – Fluxograma da Produção de MVC pela Tecnologia Uhde GmbH.....	59
Figura 19 – Fluxograma da Produção de Formaldeído pela Tecnologia Uhde-Inventa Fischer	60
Figura 20 – Esquema do Sistema de Processamento Interligado Utilizado na GPC Química no Estado do Rio de Janeiro	62
Figura 21 – Esquema de Produção de Óxido de Eteno, Tecnologia Scientific Design	63
Figura 22 – Esquematização do Processo de Produção de Etileno Glicol a partir de Óxido de Etileno	64
Figura 23 – Fluxograma Básico do Processo de Produção de Elastômeros.....	65
Figura 24 – Processo Unipol de Polimerização de Etileno.....	68
Figura 25 – Tecnologia Spheripol para Produção de Polipropileno	69

Figura 26 – Tecnologia Uhde GmbH para Produção de PVC	71
Figura 27 – Tecnologia Uhde-Inventa Fischer para Produção de Poliéster	72
Figura 28 – Tecnologia ABB Lummus/BP Chemicals para Produção de Poliestireno.....	73
Figura 29 – Separação da Dimetil Formamida por Destilação em Duas Etapas Energeticamente Integradas	81
Figura 30 – Diferença na Variação de Pressão Obtida com o Controle em Rede de Compressores	87
Figura 31 – Consumo Energético por Fontes no Setor Químico	104
Figura 32 – Demanda de Energia nos Cenários REF e BC	106
Figura 33 – Emissões de GEE do Setor Químico nos Cenários REF e BC.....	107
Figura 34 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto de 8% a.a.....	114
Figura 35 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto de 17% a.a.	114
Figura 36 – Consumo Global de Energia vs. Volume de Produção dos 18 Principais Produtos Químicos de Grande Volume em 2010	117
Figura 37 – Emissões Globais de GEE vs. Volume de Produção dos 18 Principais Produtos Químicos de Grande Volume em 2010.....	117
Figura 38 – Demanda Adicional de Energia vs. Economias de Energia Fóssil pela Substituição dos Atuais Processos de Amônia e Metanol pelas Rotas Baseadas em H ₂	119
Figura 39 – Economias de GEE Possibilitadas pela Produção de Amônia e Metanol com Base em Hidrogênio.....	120
Figura 40 – Uso de Energia de Biomassa vs. Fóssil das Rotas de Produção de Olefinas .	121
Figura 41 – Emissões de GEE para Rotas de Biomassa vs. Fósseis para HVC, Incluindo a Cadeia de Processos Total.....	121
Figura 42 – Biorrefinaria Lignocelulósica: Produtos da Celulose	123
Figura 43 – Biorrefinaria Lignocelulósica: Produtos da Hemicelulose	123
Figura 44 – Biorrefinaria Lignocelulósica: Produtos da Lignina.....	124
Figura 45 – Rotas Potenciais a partir do Gás de Síntese.....	124
Figura 46 – O Conceito de uma Refinaria XTL (X = gás natural, carvão ou biomassa)....	125
Figura 47 – Esquema Básico da Sucroquímica	126
Figura 48 – Esquema Básico da Oleoquímica	127
Figura 49 – Demanda de Energia nos Cenários REF, BC e BC+I.....	131
Figura 50 – Emissões de GEE do Setor Químico nos Cenários REF, BC e BC+I.....	131
Figura 51 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação da Indústria Química e Segmentos.....	24
Quadro 2 – Produtos da Indústria Química Pré-Selecionados	26
Quadro 3 – Consumo Energético Representativo na Indústria Química por Produtos, Etapas e Tecnologias.....	75
Quadro 4 – Agregação de Produtos Químicos Adotada no Cenário REF	100
Quadro 5 – Potenciais de Redução no Consumo de energia e/ou Abatimento de Emissões para as Opções Tecnológicas Consideradas no Cenário BC+I	128
Quadro 6 – Tecnologias Consideradas no Cenário BC+I	130
Quadro 7 – Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono	147

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABDI – Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABIQUM – Associação Brasileira da Indústria Química
AFOLU – Agricultura, florestas e outros usos do solo
ASU – Unidade de separação de ar
AVC – Avaliação de ciclo de vida
BEN – Balanço Energético Nacional
BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BTX – Mistura formada pelos hidrocarbonetos benzênicos benzeno, tolueno e xileno
CAPEX – Despesas de capital
CCR – Regeneração contínua do catalisador
CAC – Captura e armazenamento de carbono
CENÁRIO BC – Cenário de baixo carbono
CENÁRIO BC+I – Cenário de baixo carbono com inovação
CENÁRIO REF – Cenário de referência
CEPED – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CH₄ – Metano
CHP – Combined heat and power
Cl₂ – Gás cloro
CMA – Custo marginal de abatimento
CNAE – Classificação Nacional de Atividades Econômicas
CNI – Confederação Nacional da Indústria
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
CO₂e – Dióxido de carbono equivalente
COP21 – 21ª Conferência das Partes
CTA – Ácido tereftálico cru
DCE – 1,2-dicloroetano
DEG – Di-etilenoglicol
E&P – Exploração e produção
EB – Etilbenzeno
EDC – dicloroetano
EE – Energia elétrica
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
EUA – Estados Unidos da América
FC – Fornos ou fornalhas convencionais
FE – Forno especializado
FGV – Fundação Getúlio Vargas
FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

GEF – Global Environment Facility
GHR – Gas heating reformer
GLP – Gás liquefeito de petróleo
GNL – Gás natural liquefeito
GWh – Gigawatt-hora
GWP – Potencial de aquecimento global
 H_2 – Gás hidrogênio
 H_2SO_4 – Ácido sulfúrico
 H_3PO_4 – Ácido fosfórico
HCl – Ácido clorídrico
HFC – Hidrofluorocarbonetos
 HNO_3 – Ácido nítrico
HPPO – Peróxido de hidrogênio óxido de propileno
HVC – High value chemicals
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA – Agência Internacional de energia
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
MC – Motores elétricos para mecanismos convencionais
MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDEA – Metildietanolamina
MDL – Mecanismo de desenvolvimento limpo
ME – Motores elétricos para mecanismos especializados
MEG – Mono-etilenoglicol
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério de Minas e Energia
MR – Motores elétricos para sistema de refrigeração
MTD – Melhores tecnologias disponíveis
MTO – Metanol-to-olefins
MVC – Cloreto de vinila
MVR – Recompressão mecânica de vapor
 N_2O – Óxido nitroso
NaOH – Hidróxido de sódio
 $NH_2CO_2NH_4$ – Carbamato
 NH_3 – Amônia
 NH_4NO_3 – Nitrato de amônio
O&M – Operação e manutenção
ONU – Organização das Nações Unidas
OPEX – Despesas operacionais
OPO – Outros produtos orgânicos
P&D – Pesquisa e desenvolvimento
 P_2O_5 – Pentóxido de fósforo

PCHE – Trocadores de circuito impresso
PE – Polietileno
PEAD – Polietileno de alta densidade
PEBD – Polietileno de baixa densidade
PELBD – Polietileno linear de baixa densidade
PEM – Membrana de troca de próton
PET – Politereftalato de etileno
PFC – Compostos perfluorados
PIB – Produto Interno Bruto
PNMC – Política Nacional de Mudanças Climáticas
PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
POL – Polímeros
PP – Polipropileno
PS – Poliestireno
PVC – Policloreto de vinila
RC – Recuperação de energia
SBR – Resina de estireno butadieno
 SF_6 – Hexafluoreto de enxofre
SIN – Sistema Interligado Nacional
SM – Monômero de estireno
 SO_2 – Dióxido de enxofre
 SO_3 – Trióxido de enxofre
TCN – Terceira Comunicação Nacional
TEG – Tri-etilenoglicol
tep – Tonelada equivalente de petróleo
TIR – Taxa interna de retorno
TJLP – Taxa de juros de longo prazo
TLE – Trocadores de calor específicos
TPA – Ácido tereftálico
UFN III – Unidade de Fertilizantes Nitrogenados III
UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima
UNIDO – Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial
US DOE – Departamento de Energia dos Estados Unidos
US EIA – Agência de Administração de Informações de Energia dos Estados Unidos
USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
VBP – Valor bruto da produção
VC – Sistema de vapor convencional
VE – Sistema de vapor especial
VSD – Válvulas de controle variável

The background features a large, solid gold shape on the left and bottom, and a large, solid tan shape on the right. A smaller, jagged gold shape is positioned in the upper left. A thin horizontal line is visible on the right side. A light tan parallelogram is located at the bottom right.

Introdução

INTRODUÇÃO

O enfrentamento das mudanças climáticas é um dos principais desafios da sociedade mundial atualmente. Poderá ainda trazer oportunidades para todos os setores da sociedade em intensificar ações de proteção ambiental que venham a contribuir efetivamente com o pilar ambiental no escopo do desenvolvimento sustentável.

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

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

Avaliando-se os setores da economia brasileira, no que concerne às emissões de GEE, a maior parcela das emissões líquidas estimadas de CO₂e, segundo o GWP-100 do AR5, é proveniente do setor agropecuário e uso e mudança do uso da terra e florestas (Afolu), correspondendo a aproximadamente 61% das emissões totais no ano de 2010 (MCTI, 2015). Em segundo lugar, vem o setor de energia, com 27%, e, em seguida, processos industriais, com cerca de 7% das emissões totais de CO₂ nesse ano. Porém, ao considerar exclusivamente as emissões relacionadas com a consumo de energia, o setor

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, 2016a).

industrial passaria a ser responsável por cerca de 1/3 das emissões totais (HENRIQUES JR., 2010; MCTIC, 2016a). Nesse contexto, o setor industrial tem papel relevante para a mitigação de emissões de GEE (HENRIQUES JR., 2010; BORBA et al., 2012; CNI, 2010; 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 químico, o objetivo é identificar as possibilidades de mitigação de emissões de GEE. Adicionalmente, serão avaliados barreiras, cobenefícios e potenciais efeitos adversos à adoção das atividades de baixo carbono para, partindo disso, serem propostos instrumentos de política pública capazes de viabilizá-las.

Para responder a esse objetivo, o presente trabalho é composto por uma introdução, quatro capítulos e as considerações finais. O capítulo 1 tratará de caracterizar os principais processos produtivos do setor, bem como apresentará os consumos energéticos específicos em nível desagregado. No capítulo 2, serão detalhadas as melhores tecnologias disponíveis (MTD), visando, direta ou indiretamente, mitigar emissões de GEE. No capítulo 3, apresentar-se-ão os cenários de referência (REF), baixo carbono (BC) e baixo carbono com inovação (BC+I) construídos para o setor. No capítulo 4, serão identificados barreiras e cobenefícios à implementação das MTD e instrumentos aplicáveis, visando à adoção dos cenários de baixo carbono pelo setor químico. 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), que abrange os diferentes segmentos industriais. De fato, a avaliação setorial é relevante, sobretudo, para realizar o mapeamento das MTD, visando à mitigação setorial de emissões de GEE, para, partindo disso, constituir uma base de dados para a modelagem dos setores industriais em cenários integrados de abatimento de emissões do sistema energético e do setor de agricultura, florestas e outros usos do solo (Afolu). Deve-se enfatizar que resultarão desses cenários integrados estimativas robustas dos potenciais e custos de abatimento desses setores, as quais serão reportadas no relatório *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

Em 2017, o peso da indústria química na formação do PIB nacional foi de 2,4%, já tendo chegado a 3,6% em 2004 (DANTAS, 2013; ABIQUIM, 2017). Essa queda de posições também ocorreu na formação do PIB industrial, em que o segmento, segundo Figueiredo (2012), era o maior contribuinte em 1992, perdendo posições paulatinamente para os setores de alimentos e bebidas e energia, sendo hoje o 3º maior contribuinte (10,8% em 2017) (ABIQUIM, 2017).

A indústria química brasileira é a oitava maior do mundo no ranking de faturamento entre as nações, com US\$ 109 bilhões (ABIQUIM, 2017). O faturamento líquido em dólares cresceu 9,5% em 2017 relativamente a 2016, porém ainda não recuperou patamares observados entre 2010 e 2014 (ABIQUIM, 2017).

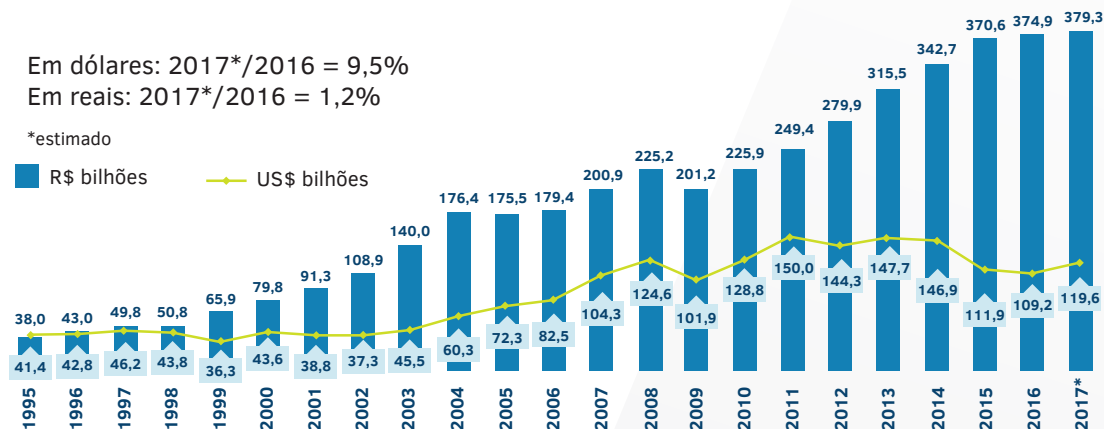


Figura 1 – Evolução do Faturamento Líquido da Indústria Química Brasileira entre (1995-2017)

Fonte: ABIQUIM, 2017

Apesar da aparente retomada de crescimento no setor, há forte preocupação quanto à atual situação da balança comercial. O déficit comercial brasileiro de produtos químicos saltou de US\$ 1,5 bilhão em 1991 para US\$ 23,2 bilhões em 2017 (ABIQUIM, 2017), o que parece revelar que o setor tem perdido competitividade no mercado internacional.

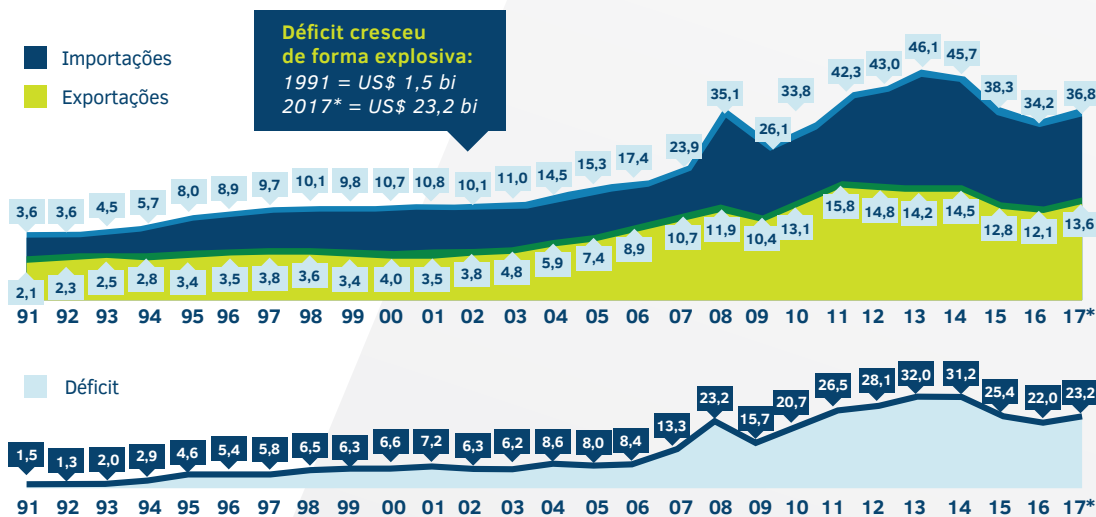


Figura 2 – Evolução da Balança Comercial de Produtos Químicos (US\$ milhões FOB)

Fonte: ABIQUIM, 2014a; 2017

O setor químico é caracterizado pela heterogeneidade de processos e produtos, não sendo possível, portanto, associar o setor a apenas um processo produtivo, tampouco adotar valores únicos para o setor como representativos. Segundo a Abiquim (2017), havia, em 2017, no país, 961 fábricas de produtos químicos de uso industrial cadastrados no *Guia da Indústria Química Brasileira*, sendo distribuídas em diversos segmentos dada a sua natureza (matéria-prima e processo produtivo). A quantidade de produtos inseridos na categoria de produtos químicos de uso industrial ultrapassa três mil e, para acompanhamento estatístico mais detalhado do setor por parte da entidade, a Abiquim toma como base apenas 200 produtos.

A classificação da indústria química e de seus segmentos foi definida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com apoio da Abiquim, tendo como base critérios de segmentação internacionais estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). A amostra monitorada pela Abiquim para fins estatísticos segue tal classificação, porém, para fins de maior precisão nos levantamentos setoriais, alguns itens foram subdivididos, segundo o Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação da Indústria Química e Segmentos

GRUPOS DE PRODUTOS, CONFORME CNAE	
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS INORGÂNICOS	
• Fabricação de cloro e álcalis • Fabricação de intermediários para fertilizantes • Fabricação de outros produtos inorgânicos	
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS QUÍMICOS ORGÂNICOS	
• Fabricação de produtos petroquímicos básicos • Fabricação de intermediários para resinas e fibras ◦ <i>Intermediários para plásticos</i> ◦ <i>Intermediários para plastificantes</i> ◦ <i>Intermediários para resinas termofixas</i> ◦ <i>Intermediários para fibras sintéticas</i> • Fabricação de outros produtos químicos orgânicos não especificados anteriormente ◦ <i>Corantes e pigmentos orgânicos</i> ◦ <i>Solventes industriais</i> ◦ <i>Intermediários para detergentes</i> ◦ <i>Plastificantes</i> ◦ <i>Outros produtos químicos orgânicos</i>	
FABRICAÇÃO DE RESINAS E ELASTÔMEROS	
• Fabricação de resinas termoplásticas • Fabricação de resinas termofixas • Fabricação de elastômeros	
FABRICAÇÃO DE PRODUTOS E PREPARADOS QUÍMICOS DIVERSOS	
• Fabricação de adesivos e selantes • Fabricação de aditivos de uso industrial	

Fonte: ABIQUIM, 2014b

Dessa forma, com base nessa subdivisão e buscando priorizar os subsetores mais energointensivos da indústria química, serão destacados os grupos de produtos petroquímicos, fertilizantes e cloro-álcalis. Nesses grupos, ainda há grande diversidade de produtos a serem considerados e, por isso, com base na literatura internacional sobre consumo energético e emissões no setor, serão priorizados os que apresentam processos de fabricação mais relevantes. Tal segmentação se baseia em Henriques Jr. et al. (2013), que adotaram esse formato para avaliação do potencial de eficiência energética do setor químico.

Apesar de existirem mais de três mil produtos classificados como produtos químicos de uso industrial, a Abiquim monitora apenas cerca de 200 produtos, buscando maior precisão nos levantamentos setoriais (ABIQUIM, 2014a). A partir desses 200 produtos considerados no anuário estatístico da associação, será proposta a seleção de produtos a serem considerados na desagregação do setor.

O setor químico é muito heterogêneo, constituído por diversos produtos de naturezas distintas, por isso produzidos de formas bem diferentes entre si. Dessa forma, ao contrário de outros setores industriais em que a desagregação se dá no processo produtivo do setor, que tende a ser similar para as diferentes unidades produtivas ou, ao menos, seguir um mesmo padrão e sequência de etapas, para o setor químico, a desagregação leva a uma seleção de processos a serem considerados no setor e que tendem a ser distintos entre si. Em cada processo, posteriormente, para a análise do potencial de mitigação e custos, será dada a devida ênfase às etapas mais energointensivas.

Posto isso, a pré-seleção inicial tem como base Bajay et al. (2010), que, dentre os 200 produtos monitorados pela Abiquim, selecionaram 63 para fins de avaliação do potencial de eficiência energética sob o critério de maior energointensividade, segundo a literatura disponível (Quadro 2).

Quadro 2 – Produtos da Indústria Química Pré-Selecionados

Fabricação de produtos inorgânicos
<i>Fabricação de cloro-álcalis</i>
Cloro
Hidróxido de sódio
<i>Fabricação de intermediários para fertilizantes</i>
Ácido fosfórico
Ácido nítrico
Ácido sulfúrico
Amônia
Fosfato de monoamônio
Nitrato de amônio
Sulfato de amônio
Ureia
<i>Fabricação de produtos químicos inorgânicos não especificados anteriormente</i>
Ácido cianídrico
Dióxido de titânio
Óxido de zinco
Fabricação de produtos orgânicos
<i>Fabricação de produtos petroquímicos básicos</i>
Benzeno
Butadieno
Eteno
Metanol
Propeno
Tolueno
Xilenos
<i>Fabricação de intermediários para resinas, plastificantes e fibras</i>
<i>Intermediários para plásticos</i>
Cloreto de vinila (MVC)
1,2-dicloroetano (DCE)
Estireno
Etilbenzeno
Metacrilato de metila
Metacrilato de etila
<i>Intermediários para plastificantes</i>
Anidrido ftálico
Butanóis

<i>Intermediários para resinas termofixas</i>
Anidrido maleico
Fenol
Formaldeído
<i>Intermediários para fibras sintéticas</i>
Ácido adípico
Ácido tereftálico
Acrilonitrila
Caprolactama
<i>Fabricação de produtos químicos orgânicos não especificados anteriormente</i>
<i>Solventes industriais</i>
Acetona
Isopropanol
<i>Outros produtos químicos orgânicos</i>
Buteno-1
Ciclohexano
Cumeno
Éter-metil terc-butílico (MTBE)
Etilenoglicóis
Negro de fumo
Óxido de eteno
Óxido de propeno
<i>Fabricação de resinas e elastômeros</i>
<i>Fabricação de resinas termoplásticas</i>
Cloretos de polivinila (PVC)
Policarbonato
Poliestireno
Polietileno de alta densidade (PEAD)
Polietileno de baixa densidade (PEBD)
Polietileno linear de baixa densidade (PELBD)
Polipropileno
Tereftalato de polietileno
<i>Fabricação de resinas termofixas</i>
Resinas fenólicas
Resinas melamínicas
Resinas ureicas
<i>Fabricação de elastômeros</i>
Borracha de estireno-butadieno (SBR)
Polibutadieno
Sbr látex

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O setor será caracterizado, a seguir, em termos de consumo energético e capacidades instaladas, tendo como foco a obtenção do consumo específico de energia dos produtos pré-selecionados anteriormente.

A Tabela 1 destaca os produtos anteriormente citados, com respectivas capacidades instaladas e produção no ano de 2006, segundo Abiquim (2006) e Bajay et al. (2010).

Tabela 1 – Capacidade Instalada e Produção dos Produtos Pré-Selecionados

Grupos	Produtos	Capacidade Instalada (t)	Produção (t)
Cloro-álcalis	Cloro	1.381.349	1.222.975
	Hidróxido de sódio líquido	1.497.305	1.325.231
Intermediários para fertilizantes	Ácido fosfórico	1.285.000	1.207.086
	Ácido nítrico	630.300	601.618
	Ácido sulfúrico	6.621.670	6.114.363
	Amônia	1.549.660	1.347.748
	Fosfato de monoamônio	n.d.	922.742
	Nitrato de amônio	559.002	470.544
	Sulfato de amônio	305.850	236.481
	Ureia	1.719.000	1.419.188
Outros inorgânicos	Ácido cianídrico	13.000	12.063
	Dióxido de titânio	96.000	79.427
	Óxido de zinco	337.940	202.254
Petroquímicos básicos	Benzeno	922.076	934.215
	Butadieno	360.000	328.126
	Eteno	3.435.000	3.135.114
	Metanol	273.460	276.789
	Propeno grau polímero	1.631.000	1.489.295
	BTX ¹	819.250	596.837
Intermediários para plásticos	Cloreto de vinila (MVC)	810.000	456.840
	1,2-dicloroetano (DCE)	660.000	547.721
	Estireno	530.000	459.839
	Etilbenzeno	486.000	446.132
	Metacrilato de etila	5.000	2.495
	Metacrilato de metila	45.000	27.789
Intermediários para plastificantes	Anidrido ftálico	148.600	103.491
	Butanol	68.400	45.128
Intermediários para resinas termofixas	Anidrido maléico	30.000	15.879
	Fenol	196.400	178.809
	Formaldeído (37%)	895.768	447.343

Intermediários para fibras sintéticas	Ácido adípico	87.000	82.614
	Ácido tereftálico	250.000	206.240
	Acrilonitrila	90.000	84.811
	Caprolactama	62.000	44.906
Solventes industriais	Acetona	115.000	108.226
	Isopropanol	17.000	12.878
	Buteno-1	75.000	68.298
	Ciclohexano	98.300	58.252
	Cumeno	210.000	n.d.
	Éter metil- terc-butílico (MTBE)	525.000	328.515
	Etilenoglicóis	315.000	203.972
	Óxido de eteno	455.000	289.724
	Óxido de propeno (metiloxi- rano)	235.000	195.637
Resinas termoplásticas	Cloretos de polivinila (PVC)	786.000	676.263
	Policarbonato	15.000	11.619
	Poliestireno	635.000	360.957
	Polietileno de alta densidade (PEAD)	1.772.000	1.018.456
	Polietileno de baixa densidade (PEBD)	785.000	681.083
	Polietileno de baixa densidade linear (PELBD)	1.200.000	635.152
	Polipropileno	1.425.000	1.234.977
	Tereftalato de polietileno (PET)	380.000	307.351
Resinas termofixas	Resinas fenólicas	430.698	155.989
	Resinas melamínicas	88.300	6.979
	Resinas ureicas	875.995	476.971
Elastômeros	Borracha de estireno-butadieno (SBR) ²	393.700	298.320
	Polibutadieno	93.000	83.522

Legenda: 1 benzeno, tolueno e xilenos; 2 inclui látexes; N.d. não disponível

Fonte: Elaboração própria a partir de ABIQUIM, 2006; BAJAY et al., 2010

Worrell et al. (2000), em estudo sobre uso da energia e intensidade energética na indústria química dos Estados Unidos, classificam como mais energointensivos os setores: i) petroquímicos e seus grupamentos de resinas e materiais plásticos; ii) fertilizantes no grupamento de inorgânicos; iii) produção de gases industriais; iv) cloro-soda. Outras referências citam tais setores como de alto consumo energético na indústria química, como Bajay et al. (2010), e suas referências secundárias, como Tolmasquim et al. (2003) e IEA (2007). Haydock e Napp (2013), em estudo sobre descarbonização do aquecimento na indústria do Reino Unido, realizaram um levantamento de literatura extenso para esse fim, concluindo que o potencial de descarbonização da indústria química se concentra principalmente nos setores petroquímico (com foco no craqueamento), no setor de fertilizantes (com foco na produção de amônia) e no setor de cloro-soda. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2013), em estudo sobre o progresso de tecnologias limpas em diversos setores, cita que, na indústria química, os principais produtos em termos de atividade e intensidade energética são eteno, propeno e BTX (petroquímicos), metanol e amônia. Bernstein et al. (2007), em estudo sobre mitigação de GEE no setor industrial global, menciona que a maior parte das emissões diretas de CO₂ pelo consumo de

insumos combustíveis se dá na produção de eteno e petroquímicos, na produção de amônia para a produção de fertilizantes nitrogenados e na produção de cloro na indústria de cloro-soda.

Dessa forma, seguindo as evidências das diversas fontes consultadas na literatura, a seleção de produtos e processos a serem analisados há de se concentrar nos setores petroquímico (desde petroquímicos básicos até seus intermediários e produtos finais), de fertilizantes e de cloro-soda. Outros produtos considerados que não façam parte dessas categorias serão agregados no grupo “outros” ao longo do trabalho. A lista de produtos relevantes e seus consumos específicos de energia se encontra na Tabela 2.

Tabela 2 – Consumo Específico de Energia dos Produtos Pré-Selecionados

Grupos	Produtos	Consumo Específico (tep/t produto)
Cloro-álcalis	Cloro	0,4368
	Hidróxido de sódio líquido	
Intermediários para fertilizantes	Ácido fosfórico	0,1161
	Ácido nítrico	0,0580
	Ácido sulfúrico	0,0162
	Amônia	0,3691
	Fosfato de monoamônio	0,0179
	Nitrato de amônio	0,0120
	Sulfato de amônio	0,2223
	Ureia	0,0600
Petroquímicos básicos	Butadieno	0,3107
	Eteno	0,4462
	Metanol	0,3023
	Propeno grau polímero	0,0753
	BTX	0,0697
Intermediários para plásticos	Cloreto de vinila (MVC)	0,1745
	1,2-dicloroetano (DCE)	
	Estireno	0,9438
	Etilbenzeno	0,0782
	Metacrilato de etila	0,0478
	Metacrilato de metila	
Intermediários para plastificantes	Anidrido ftálico	0,4780
	Butanol	0,0781
Intermediários para resinas termofixas	Anidrido maléico	0,4173
	Fenol	0,2873
	Formaldeído (37%)	0,0982

Intermediários para fibras sintéticas	Ácido adípico	0,2318
	Ácido tereftálico	0,0989
	Acrilonitrila	0,0531
	Caprolactama	0,7330
Solventes industriais	Acetona	0,2873
	Isopropanol	0,0754
	Buteno-1	0,0717
	Ciclohexano	0,0971
	Cumeno	n.a. ¹
	Éter metil-terc-butilico (MTBE)	0,0932
	Etilenoglicóis	0,1137
	Óxido de eteno	0,0951 ²
Resinas termoplásticas	Óxido de propeno (metiloxi-rano)	0,1427
	Cloreto de polivinila (PVC)	0,0693
	Poliestireno	0,1260
	Polietileno (todos)	0,0673
	Polipropileno	0,0284
Resinas termofixas	Tereftalato de polietileno (PET)	0,6742
	Resinas fenólicas	0,2390
	Resinas melamínicas	0,0597
Elastômeros	Resinas ureicas	0,0597
	Borracha de estireno-butadieno (SBR) ²	0,2136
	Polibutadieno	1,0100

Legenda: ¹ Não aplicável; ² Consumo específico referente à produção de óxido sem a etapa de purificação.

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

A partir da pré-seleção, pôde-se selecionar produtos que serão avaliados detalhadamente visando a posterior obtenção de potenciais de mitigação de GEE. Abaixo, são listados os produtos considerados de alta relevância para a avaliação de potencial e custos de mitigação.

- Grupo cloro-álcali

a) Cloro: em virtude da grande integração de processos nesse segmento da indústria química, as plantas podem ser agrupadas e os valores de consumo específico podem referir-se apenas à produção de cloro (WORRELL, 2000), mas englobam também hidróxido de sódio (soda cáustica), cloro, ácido clorídrico (ácido muriático), hipoclorito de sódio, diclorometano (cloreto de etileno, DCE), cloreto de vinila (MVC), hidróxido de potássio (potassa cáustica), clorato de sódio, dióxido de cloro.

- Grupo de intermediários para fertilizantes

a) Ácido fosfórico;

b) Ácido nítrico;

c) Ácido sulfúrico;

d) Amônia;

- e) Fosfatos de amônio;
- f) Nitrato de amônio;
- g) Sulfato de amônio;
- h) Ureia.
- Grupo de petroquímica
- a) Eteno, propeno, butadieno, BTX;
- b) Metanol;
- c) Cloreto de vinila (MVC);
- d) 1,2-Dicloroetano (DCE);
- e) Estireno;
- f) Formaldeído;
- g) Ácido tereftáico (TPA);
- h) Óxido de eteno;
- i) Etileno glicól;
- j) Polietileno;
- k) Polipropileno;
- l) Policloreto de vinila;
- m) Politereftalato de etileno;
- n) Poliestireno;
- o) Resinas fenólicas;
- p) Borracha de estireno-butadieno.

Perante a seleção dos produtos a serem caracterizados, a seguir serão fornecidos dados de consumo específico de energia dos diferentes processos produtivos do setor químico da forma mais desagregada possível.

1.1 CONSUMO DE ENERGIA NOS PROCESSOS PRODUTIVOS

De forma a dispor os valores de consumo energético específico de forma correta na segmentação tecnológica proposta, é importante entender as etapas de produção de cada produto, identificando as que mais demandam energia e identificando por que a energia é demandada, ou seja, que tipo de energia útil é necessária para o processo.

Foram utilizadas diversas referências para a obtenção de valores de consumo específico aqui relatados (BAJAY et al., 2010; THYSSENKRUP, 2010; WORRELL et al., 2000; SAYGIN et al., 2011) e tais valores podem variar significativamente para um mesmo produto devido às premissas adotadas em cada fonte. Para todos os produtos, há a divisão entre consumo específico térmico e elétrico, no

entanto não é para todos os produtos que a literatura disponibiliza a subdivisão do consumo energético específico por etapa de processo. Quando disponibilizada, a subdivisão desse consumo e/ou balanço energético do processo produtivo é exposta, devendo-se lembrar, no entanto, que muitas vezes esses valores refletem casos específicos de unidades produtivas localizadas em outra região do mundo, ou refletem uma média global que pode se desviar significativamente da realidade brasileira.

Reconhece-se que as estimativas não se baseiam em dados atualizados, porém ressalta-se que dados mais recentes para o setor estão agregados e não permitem grande sensibilidade no que tange a produtos, processos e insumos combustíveis intensivos em energia.

Em 2016, o setor químico foi o quinto maior consumidor de energia dentre as indústrias de transformação, correspondendo a 8% do consumo total de energia (EPE, 2017). A matriz energética do setor é fortemente baseada em gás natural, que representou 33% dos 6.743 mil tep consumidos pelo setor naquele ano (Figura 3).

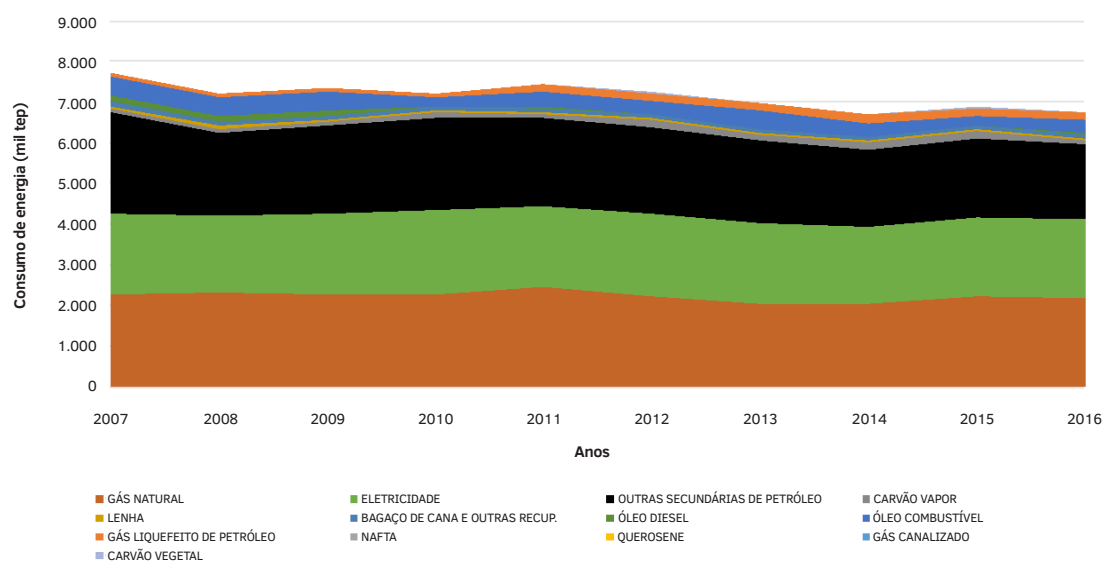


Figura 3 – Consumo Energético no Setor Químico entre 2007 e 2016

Fonte: Elaboração própria a partir de EPE, 2017

As emissões de GEE de produtos químicos para uso industrial podem ser divididas em três grandes blocos: 72,9% da combustão para geração de energia térmica; 21,5% de 12 processos industriais; e 5,6% de geração e consumo de energia elétrica, segundo a Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2012). Apesar da heterogeneidade do setor no que tange aos produtos, apenas três GEE são emitidos diretamente: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O).

Na indústria química, as emissões de GEE podem ser divididas em duas categorias: emissões de queima e emissões de processo. No primeiro caso, CO_2 é emitido devido à queima de combustíveis fósseis para fins energéticos, como geração de calor para vapor, aquecimento direto ou secagem de produtos ou de corrente elétrica. No segundo caso, as emissões se dão devido às reações químicas envolvidas na fabricação dos produtos, que podem ter como subprodutos CO_2 , CH_4 ou N_2O .

Segundo ABDI (2012), o consumo de combustíveis fósseis pelo setor representou uma emissão de 12,4 MtCO₂e em 2010. No que tange às emissões de processo, o setor como um todo emitiu 3,6 MtCO₂e em 2014, o que representou 3,9% das emissões totais relativas a processos industriais naquele ano (MCTIC, 2016b). O setor tem reduzido emissões, o que se deve, principalmente, à crescente adoção do gás natural como insumo energético em substituição às fontes fósseis mais intensivas em carbono, como derivados de petróleo e carvão.

No país, há unidades industriais do setor químico que instalaram sistemas de cogeração de energia elétrica. Estas unidades denominadas unidades combinadas para geração de vapor e eletricidade (CHP) permitem ganhos de eficiência quando o calor e a eletricidade são produzidos por cogeração em vez de gerados separadamente. Aproveita-se o calor gerado para a geração de vapor pela caldeira para acionamento de uma turbina, e como consequência, a cogeração da energia elétrica. Em diversas situações, a combinação das demandas por vapor e eletricidade traz benefícios tanto ambientais, quanto econômicos. Nestes casos, as emissões específicas da unidade são reduzidas considerando o ganho de eficiência em termos energéticos.

Este constitui um panorama geral do setor no tocante a consumo de energia e emissões de GEE, e tal nível de agregação de informações não é suficiente para uma análise mais profunda do potencial de mitigação do setor. Dessa forma, para uma análise mais consistente, faz-se necessário detalhar produtos e processos produtivos a serem considerados representativos para o setor, segundo consumos específicos de energia, para que se possam posteriormente mapear os principais pontos em que é possível avaliar o efeito da introdução de atividades de baixo carbono.

1.1.1 GRUPO CLORO-ÁLCALI

Em virtude da grande integração de processos no segmento da indústria química, as plantas podem ser agrupadas e os valores de consumo específico podem referir-se apenas à produção de cloro (WORRELL et al., 2000), mas englobam também hidróxido de sódio (soda cáustica), cloro, ácido clorídrico (ácido muriático), hipoclorito de sódio, diclorometano (cloreto de etileno, DCE), cloreto de vinila (MVC), hidróxido de potássio (potassa cáustica), clorato de sódio, dióxido de cloro.

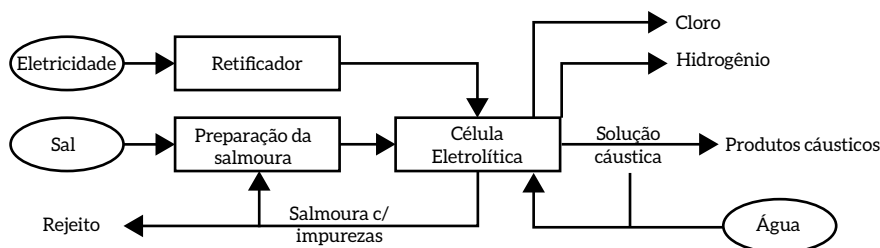


Figura 4 – Fluxograma Genérico de Produção de Cloro-soda

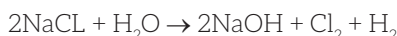
Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2000

O cloro e a soda cáustica são produzidos simultaneamente pela eletrólise de sal em solução aquosa (Figura 4), numa proporção fixa de uma tonelada de cloro para 1,12 tonelada de soda cáustica, pelo

processo eletrolítico. A energia elétrica em corrente direta age sobre a salmoura, provocando a quebra das moléculas de água misturadas com sal, que se reagrupam na forma de cloro, soda cáustica e hidrogênio (EPE, 2005). Em termos genéricos, as etapas do processo produtivo são:

- Preparação da salmoura;
- Célula eletrolítica de mercúrio, diafragma ou membrana;
- Concentração do NaOH;
- Resfriamento do NaOH;
- Resfriamento/secagem do H₂;
- Resfriamento/secagem do Cl₂;
- Compressão do Cl₂.

A reação química envolvida é a seguinte:



A quantidade de energia elétrica requerida pela reação depende do *design* da célula eletrolítica, da voltagem utilizada e da concentração da salmoura, sendo o principal consumidor de energia no processo produtivo (BAJAY et al., 2010). Para cada tonelada de cloro produzida, são produzidos também 1,1 tonelada de hidróxido de sódio e 28 quilos de hidrogênio (USEPA, 1995).

Segundo Worrell et al. (2000), os três tipos de células eletrolíticas comumente empregadas são: de mercúrio, de diafragma e de membrana iônica seletiva. Todas têm fluxo de processo semelhante, porém, por suas especificidades, têm demandas energéticas distintas, sendo a eletrólise com membrana a tecnologia menos energointensiva.

Na tecnologia a mercúrio, de acordo com Bajay et al. (2010), além do consumo de eletricidade no processo de eletrólise, há consumo significativo desse energético na purificação da salmoura, na filtração da soda cáustica, no resfriamento do hidrogênio, na compressão do gás cloro (quando aplicável). No que tange ao consumo de energia térmica, as principais etapas envolvidas são aquecimento da salmoura e passagem da solução aquosa de soda cáustica pelo evaporador (quando aplicável).

Células a diafragma têm consumo específico total de energia elétrica inferior ao das células a mercúrio, porém maior consumo específico térmico.

As células de membrana têm menor consumo específico dentre as três tecnologias devido ao maior rendimento elétrico obtido pela espessura reduzida da membrana. Além disso, devido a maior concentração de soda cáustica na saída da célula eletrolítica, seu consumo específico térmico tende a ser reduzido.

Na Tabela 3, encontram-se valores de consumo específico dos processos de produção de cloro-soda segundo a literatura consultada.

Tabela 3 – Valores de Consumo Específico de Energia na Produção de Cloro por Tecnologia

Consumo específico (GJ/t Cl ₂)	Célula de Diafragma		Célula de Mercúrio		Célula de Membrana	
	Energia Térmica	Energia Elétrica	Energia Térmica	Energia Elétrica	Energia Térmica	Energia Elétrica
BAJAY et al., 2010	7,28	11,01	4,86	12,91	5,46	10,10
EPA, 1995	-	9,9	-	11,88	-	7,56-8,82 ¹
IEA, 2007	2,2	10	0	11,8	0,6	8,6-9,2

¹ GJ/t NaOH

Fonte: Elaboração própria a partir de EPA, 1995; IEA, 2007; BAJAY et al., 2010

Worrell et al. (2000) discriminam o consumo energético mais detalhadamente, por etapa de processo,³ conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 – Consumo Específico de Energia por Etapas na Produção de Cloro

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
Retificador	-	0,28	0,28
Preparação da salmoura	0,02	-	0,02
Uso da célula	-	13,63	13,63
Concentração do NaOH	3,42	-	3,42
Resfriamento do NaOH	-	0,27	0,27
Resfriamento e secagem do H ₂	-	0,58	0,58
Resfriamento e secagem do Cl ₂	-	0,39	0,39
Compressão do Cl ₂	-	0,63	0,63
Total	3,44	15,78	19,22

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2000

Bajay et al. (2010) descrevem o consumo energético por energia útil dessa indústria no ano de 2006, conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Cloro no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade			Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	Refrigeração	Eletrólise	
Consumo de energia (GJ)	8.112.857	196.998	169.741	13.574.715	22.054.311

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

3 Representativo para a indústria americana se baseia na proporção das tecnologias de células utilizadas.

1.1.2 GRUPO INTERMEDIÁRIO PARA FERTILIZANTES

Nesse segmento, inserem-se plantas de amônia (uma das matérias-primas básicas na produção de fertilizantes), ácido fosfórico, ácido nítrico, ácido sulfúrico (matérias-primas intermediárias) e ureia (fertilizante básico nitrogenado). Tais produtos são os que apresentam maior porte e complexidade dentre os processos de produção desse setor. As demais plantas têm processos relativamente mais simples (CEPED, 2004).

De acordo com Bajay et al. (2010), as matérias-primas essenciais da cadeia de fertilizantes são gás natural, resíduos pesados de petróleo, nafta, enxofre natural, piritas, rochas fosfáticas *in situ* e rochas potássicas. A partir desses insumos são produzidos amônia, enxofre processado e rochas fosfáticas processadas que, em seguida, são utilizadas na obtenção dos ácidos nítrico, sulfúrico e fosfórico. As etapas finais consistem na obtenção dos fertilizantes básicos como ureia, nitrato de amônio, sulfato de amônio, fosfato de amônio e superfosfatos, que são granulados e misturados para formarem o fertilizante final NPK na composição desejada.

Na Figura 5, observam-se os três principais grupos de fertilizantes: fosfatados, nitrogenados e potássicos.

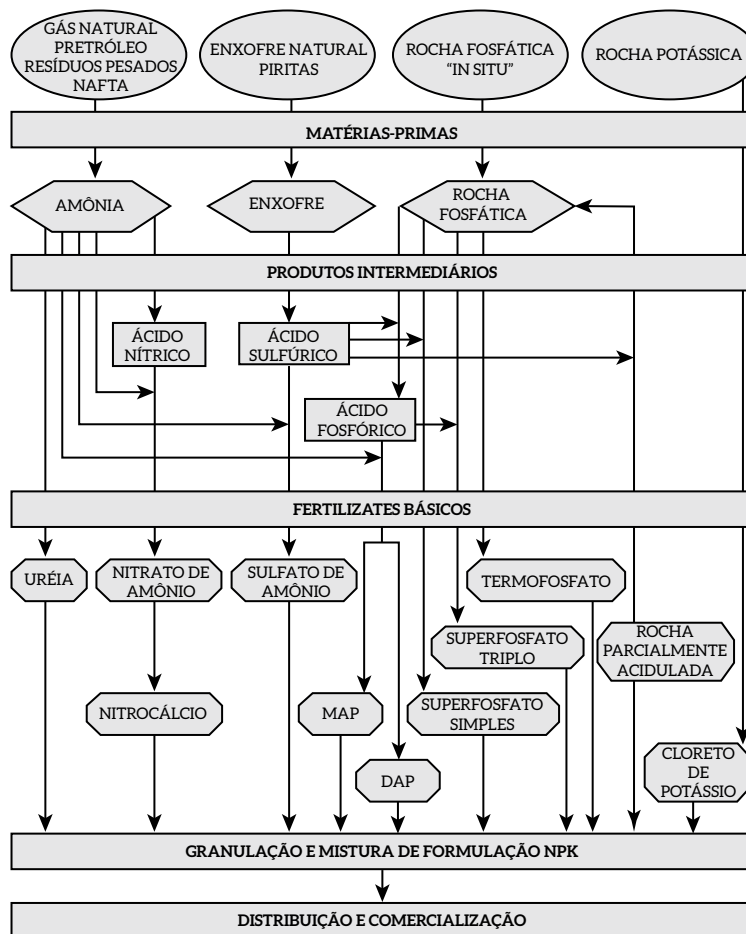


Figura 5 - Fluxograma da Cadeia de Obtenção de Fertilizantes

Fonte: FERNANDES; DIAS, 2006

No caso das matérias-primas básicas e intermediárias consideradas, suas aplicações não se restringem a produção de fertilizantes, mas estão agrupadas em “fertilizantes” para efeito de simplificação da organização deste estudo e em virtude de seu principal destino comercial no Brasil ser para esse segmento (ABIQUIM, 2005): 74,5% para amônia, 77,4% no caso do ácido sulfúrico, 80,1% para o ácido fosfórico e aproximadamente 90% no caso do ácido nítrico. Os demais insumos básicos para fertilizantes, como rochas fosfáticas, enxofre e sais potássicos, fazem parte da indústria extrativa mineral.

A produção de ácido fosfórico pode se dar por dois processos principais em função do grau de pureza desejado e necessário para cada uso. O processo térmico, ou de oxidação, do fósforo é utilizado para obter-se ácido fosfórico em elevado grau de pureza, para fabricação de derivados químicos especiais, produtos farmacêuticos, detergentes, produtos alimentícios e bebidas. O processo úmido é utilizado para a produção de ácido fosfórico em grau de pureza adequado para a produção de fertilizantes (TOLMASQUIM et al., 2003).

O processo úmido emprega a reação de rochas fosfatadas, previamente secas e moídas, com ácido sulfúrico, em reatores aquecidos a 80°C por período entre quatro e oito horas. Essa reação forma sulfato de cálcio e ácido fosfórico. Com o objetivo de minimizar os custos devido à evaporação e maximizar a produção de ácido fosfórico, utiliza-se ácido sulfúrico com concentração em torno de 93%. Após a formação dos cristais de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), o material oriundo do reator é filtrado, o que permite separá-los do ácido fosfórico. Essa solução é ainda concentrada entre 40%-55% em ácido fosfórico por meio de evaporação a vácuo. Segundo Bajay et al. (2010), a energia térmica utilizada no processo corresponde ao vapor demandado na coluna de evaporação, enquanto a energia elétrica é consumida na moagem das rochas no reator de digestão e no filtro.

O processo de oxidação envolve a sinterização de rochas fosfáticas com coque e ar, seguido de moagem e mistura dos produtos com sílica e mais coque. Essa mistura é alimentada ao forno elétrico, onde se formam gases e escória por reação exotérmica. Separa-se a escória dos gases e em seguida queimam-se os gases, formando pentóxido de fósforo (P_2O_5), que é hidratado e precipitado para a obtenção do ácido fosfórico concentrado. Tal processo demanda apenas aquecimento direto. A eletricidade é demandada na moagem e mistura das rochas, no forno elétrico e na precipitação do ácido. Esse processo requer mais energia do que a rota úmida (BAJAY et al., 2010; TOLMASQUIM et al., 2003).

Na Tabela 6, constam os consumos energéticos específicos no processo de produção de ácido fosfórico para a utilização em fertilizantes.

Tabela 6 – Consumo Energético Específico na Produção de Ácido Fosfórico

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	4,13	0,73	4,86
HENRIQUES JR. et al., 2013	4,80	1,68	6,48

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; HENRIQUES JR., 2013

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por energia útil dessa indústria no ano de 2006 está na Tabela 7.

Tabela 7 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Fosfórico no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	3.878.879	688.427	4.567.305

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Os processos de produção de ácido nítrico apresentam variações tecnológicas, principalmente na pressão de conversão. As etapas podem ser genericamente descritas: i) o ar é comprimido a aproximadamente 6,8 atm, filtrado e pré-aquecido a 300°C; ii) a seguir, é misturado com amônia gasosa em um reator que contém catalisador de platina-ródio à temperatura de 750°C e pressão de 6,8 atm; iii) o óxido nitroso e o excesso de ar são resfriados e introduzidos em uma coluna de absorção, na qual é adicionado mais ar para oxidação do óxido nitroso em dióxido de nitrogênio, sendo adicionada pequena quantidade de água; iv) o gás que sai pelo topo pode ser aquecido e expandido para auxiliar a recuperação de vapor; v) pelo fundo da coluna é expelido ácido nítrico a 61%-65% de concentração, que pode ser ainda maior (CEPED, 2003).

A demanda de energia é essencialmente térmica e ainda assim reduzida em função de ser um processo acoplado, em sua maioria, ao de produção de amônia (CEPED, 2003). A demanda de eletricidade também é pequena, se concentrando no acionamento de bombas e compressores de ar (BAJAY et al., 2010). O consumo específico torna-se relevante em função do consumo no reator, na separação, preaquecimento e compressão de ar.

Tabela 8 – Consumo Energético Específico na Produção de Ácido Nítrico

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	2,28	0,15	2,43
HENRIQUES JR. et al., 2013	0,54	0,01	0,55
BOSCH; KEUNEN, 2009	-	-	6,7-9,3

Fonte: Elaboração própria a partir de BOSCH; KEUNEN, 2009; BAJAY et al., 2010; HENRIQUES JR et al., 2013

O consumo energético por energia útil no processo produtivo no ano de 2006 consta na Tabela 9.

Tabela 9 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Nítrico no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Processo	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz		
Consumo de energia (GJ)	1.370.321	90.690	-	1.461.012

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

De acordo com Tolmasquim et al. (2003), a principal rota de obtenção do ácido sulfúrico é pelo processo de oxidação, em que enxofre elementar é queimado em presença de ar seco ou em que a pirita é queimada. O enxofre é extraído de pedras de enxofre ou de ácido sulfídrico (processo Klaus) ou a partir de gases de refinaria.

A maioria dos produtores nacionais de ácido sulfúrico utiliza o processo de contato, no qual enxofre, em sua maioria importado, é oxidado com o ar atmosférico em reatores específicos. A mistura seca de gases, contendo de 7% a 10% de SO_2 e de 10% a 14% de oxigênio, é preaquecida e conduzida para um reator, no qual se processa a oxidação, em presença de pentóxido de vanádio, que age como catalisador. Os gases efluentes são resfriados bruscamente a 100°C e levados para uma torre onde são lavados com óleo. O produto de cauda da torre vai para a estocagem de óleo. O gás passa para outra torre, no qual é resfriado, e o SO_3 remanescente é lavado com H_2SO_4 a 97%, o que permite obter aumento de 1% em peso do ácido, ou seja, H_2SO_4 a 98% (CEPED, 2004).

O processo todo é bastante exotérmico, por isso caldeiras de recuperação de calor são instaladas para gerar vapor de alta pressão superaquecido, e é, como um todo, exportador de energia (WORRELL et al., 2000; BAJAY et al., 2010, TOLMASQUIM et al., 2003).

Vapor é utilizado na fusão do enxofre e no compressor de ar, enquanto eletricidade é consumida também na fusão do enxofre, durante a combustão, na caldeira de recuperação, no filtro, nos conversores, secadores e resfriadores de ácido (BAJAY et al., 2010).

Tabela 10 – Consumo Energético Específico na Produção de Ácido Sulfúrico

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	0,607	0,071	0,678

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Na Tabela 11, observam-se o consumo energético por energia útil desse processo produtivo no ano de 2006.

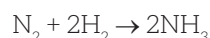
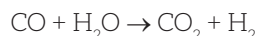
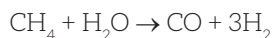
Tabela 11 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Sulfúrico no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	3.763.987	441.310	4.205.297

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

A amônia é produzida pelo processo Haber-Bosch, que utiliza hidrogênio e nitrogênio como matérias-primas em presença de catalisador à base de ferro.

Os principais processos de produção de hidrogênio são a reforma a vapor do gás natural e a oxidação parcial de resíduos de petróleo. O hidrogênio é reformado a partir de hidrocarbonetos, formando gás de síntese, uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio. O monóxido de carbono, então, reage com água na reação de *shift*, produzindo dióxido de carbono e mais hidrogênio. Em seguida, o CO₂ pode ser removido da corrente gasosa principal e recuperado para a produção de ureia. Por fim, o hidrogênio reage com o nitrogênio na reação final de síntese (*final synthesis loop*) para formar amônia.



ThyssenKrup (2010) descreve com detalhes o fluxograma de produção de amônio segundo a licenciadora Uhde GmbH (Figura 6), em que amônia pode ser produzida a partir de gás natural, GNL, GLP, nafta, carvão, petróleo, resíduos⁴ ou gás de purga do processo de produção de metanol. O processo utiliza reforma a vapor convencional para a formação de gás de síntese, seguida de síntese *loop* de amônia a média pressão e é adequado para unidades de até 2.000 ton/dia de capacidade.

⁴ Insumos mais pesados necessitam de adaptação nas etapas *upstream* do processo.

O insumo (gás natural, por exemplo) é dessulfurizado, misturado com vapor e convertido a gás de síntese sobre catalisador de níquel no reformador primário. No reformador secundário, ar de processo é misturado com o gás de síntese na proporção correta para que, em seguida, a geração de vapor de alta pressão e superaquecimento garanta o melhor aproveitamento energético do processo.

CO é convertido a CO_2 na reação catalítica de *shift* e o CO_2 é removido em *scrubber*. CO remanescente é reconvertido a metano por metanação catalítica.

A síntese *loop* de amônia utiliza dois conversores com três leitos catalíticos. Calor recuperado é usado na geração de vapor a montante do segundo e terceiro leitos. Os conversores têm leitos catalíticos radiais à base de ferro que minimizam a queda de pressão na síntese e maximizam o rendimento de amônia.

Amônia líquida é separada por condensação e pode ser subresfriada para estocagem ou transportada a temperaturas moderadas para os consumidores finais.

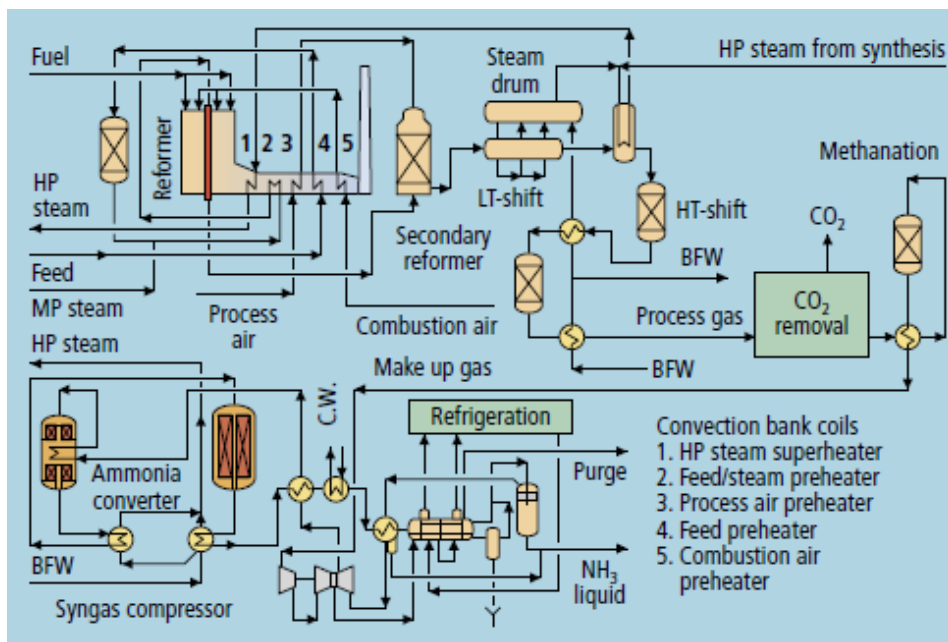


Figura 6 – Processo de Produção de Amônia segundo o Licenciador Uhde GmbH

Fonte: THYSSENKRUPP, 2010

De acordo com Bajay et al. (2010), entre 50% e 60% do consumo do gás natural no processo de fabricação da amônia são sob a forma de matéria-prima para a produção de hidrogênio, enquanto o restante é consumido como combustível no reformador primário e no preaquecimento do metano. Eletricidade é consumida na coluna de absorção de CO_2 , nos compressores, no conversor e no resfriador de amônia. Naturalmente, o consumo energético tende a ser maior quanto mais pesada for a matéria-prima.

O consumo energético específico da produção de amônia pode variar entre 15 e 35 GJ/t segundo a literatura consultada, conforme a Tabela 12. Tal discrepância é função da metodologia de contabilização do consumo, que nem sempre é clara na literatura. Em suma, o processo utiliza insumo combustível (gás natural) como matéria-prima e como energético, e a contabilização da quantidade

utilizada como matéria-prima no consumo específico do processo eleva o seu valor. Por sua vez, a Tabela 13 detalha o consumo energético por utilidade em 2006.

Tabela 12 – Consumo Energético Específico na Produção de Amônia

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010 ¹	13,98	1,47	15,45
IEA, 2013 ¹	-	-	15,38
IEA, 2007 ²	-	-	41,6
BOSCH & KEUNEN, 2009	-	-	34-43,6
WORRELL et al., 2000	35,6	0,5	36,10

Legenda: ¹Inclui matéria-prima; ²Exclui matéria-prima

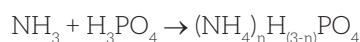
Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2000; IEA, 2007; 2013; BOSCH; KEUNEN, 2009; BAJAY et al., 2010

Tabela 13 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Amônia no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica			Eletricidade		Total
	Aquecimento Direto	Calor de Processo	Força Motriz	Força Motriz	Refrigeração	
Consumo de energia (GJ)	13.057.536	1.903.033	3.881.475	1.489.776	496.578	20.828.399

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

No que se refere aos fosfatos de amônio, tanto o fosfato de monoamônio (MAP, n=1) quanto o de diamônio (DAP, n=2) são fabricados a partir da reação de neutralização da amônia com ácido fosfórico:



Em uma primeira etapa, realizada em um tambor rotativo que age como pré-misturador, amônia gasosa é neutralizada com uma solução aquosa de ácido fosfórico (a concentração é um dos fatores que determinam o favorecimento de MAP ou de DAP na reação). O calor da reação evapora a maior parte da água, formando uma lama cuja secagem é concluída em um secador rotativo, o qual pode receber mais amônia para completar a neutralização. Após o resfriamento (tambor rotativo com circulação de ar), o pó é purificado em ciclones, peneirado e ensacado. O consumo significativo provém do consumo de combustível no secador (CEPED, 2004; TOLMASQUIM et al., 2003).

São relevantes os consumos para neutralização da amônia, secagem e purificação do produto. A Tabela 14 lista os consumos específicos da produção de fosfatos de amônio segundo a literatura.

Tabela 14 – Consumo Energético Específico na Produção de Fosfatos de Amônio

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	0,561	0,188	0,749
HENRIQUES JR. et al., 2013	0,546	0,185	0,731

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; HENRIQUES JR et al., 2013

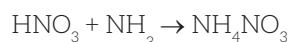
Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 15.

Tabela 15 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Fosfatos de Amônio no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	618.964	207.885	826.849

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O nitrato de amônio é obtido pela reação de neutralização de ácido nítrico com amônio. O processo convencional de fabricação de nitrato de amônio ocorre em reator inoxidável, no qual a amônia em fase vapor reage com o ácido nítrico, desprendendo grande quantidade de calor. Esse calor permite a concentração da solução a 85% de nitrato de amônio. Uma concentração mais elevada, a 95%, é obtida com posterior evaporação a vácuo. Essa solução quente é seca, em contracorrente com o ar, em uma torre tipo *spray*. Efetua-se o peneiramento e adiciona-se argila como antiaglomerante (CEPED, 2004).



Em outro processo, o nitrato de amônio é obtido sob a forma de cristais. Da reação entre amônia e ácido nítrico, obtém-se uma solução a 60%, que é concentrada a 75%-80%. Aplica-se cristalização a vácuo, com posterior centrifugação, moagem e adição de argila (CEPED, 2004).

As demandas de energia são maiores no resfriamento da solução no reator, centrifugação e secagem (TOLMASQUIM et al., 2003).

As etapas finais de concentração e separação da ureia determinam a energointensidade da planta.

Tabela 16 – Consumo Energético Específico na Produção de Nitrato de Amônio

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	0,373	0,133	0,506

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Bajay et al. (2010) descrevem o consumo energético por energia útil dessa indústria no ano de 2006.

Tabela 17 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Nitrato de Amônio no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	175.352	61.088	236.440

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O sulfato de amônio é um sal obtido a partir da neutralização do ácido sulfúrico com amônia anidra por meio de reação exotérmica ou como subproduto de outros processos produtivos, como a produção de caprolactama, produção de coque ou do nylon-6,6 (BAJAY et al., 2010; WORRELL et al., 2000).

Tabela 18 – Consumo Energético Específico na Produção de Sulfato de Amônio

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Tabela 19 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Sulfato de Amônio no Brasil em 2006

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Nesse processo, amônia e CO₂ reagem a 150 bar para a formação do carbamato a uma razão N/C de 3,7 e temperatura de 182°C-185°C. O material não reagido na solução de síntese é separado por *stripping* de CO₂ e o gás do *stripper* é condensado em condensadores de carbamato. A solução de ureia, então, é enviada para decompositores de média e baixa pressão para maior purificação e o evaporador a vácuo produz ureia fundida na concentração requerida para a granulação ou pelletização.



Fonte: THYSSENKRUP, 2010

A demanda de energia térmica se dá principalmente na produção de vapor utilizado na síntese da ureia e é relativamente pequena. O consumo de eletricidade se dá nas etapas de centrifugação e separação do produto sólido (BAJAY et al., 2010).

Tabela 20 – Consumo Energético Específico na Produção de Ureia

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	2,294	0,218	2,512
THYSSENKRUP, 2010 ¹	2,110	0,072	2,182

¹Em eletricidade, exclui demanda na formação de água de resfriamento.

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; THYSSENKRUP, 2010

Na Tabela 21, o consumo energético por energia útil nesse processo produtivo, em 2006, é listado segundo Bajay et al. (2010).

Tabela 21 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ureia no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	3.256.314	309.001	3.565.314

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

1.1.3 GRUPO PETROQUÍMICO

Os produtos petroquímicos, segundo a Abiquim (2012), se inserem no grupo de produtos orgânicos, representado tanto pelo subgrupo de produtos petroquímicos básicos quanto pelo subgrupo de intermediários para resinas e fibras. São considerados petroquímicos também as resinas e os elastômeros, por serem polímeros fabricados a partir de petroquímicos básicos e intermediários.

A indústria petroquímica pode ser dividida em produtos de primeira, segunda e terceira geração (Figura 8) com base na fase de transformação de várias matérias-primas derivadas de petróleo e gás natural em insumos petroquímicos (BRASKEM, 2013). Os produtos de primeira geração são os petroquímicos básicos, olefinas⁵ e aromáticos,⁶ que resultam do craqueamento da nafta, fração obtida na destilação do petróleo, ou do gás natural.

Os produtos de segunda geração são resultantes dos petroquímicos básicos e são chamados de petroquímicos intermediários (BRASKEM, 2013). Dentre eles, destacam-se os polímeros de eteno e propeno, como polietileno, polipropileno, PVC, acrilonitrila e outros.

Por fim, os de terceira geração são os produtos finais obtidos a partir da transformação dos produtos intermediários de segunda geração e resultam plásticos, fibras e borrachas, que chegam ao consumidor final sob a forma de recipientes, embalagens, garrafas, pneus etc.

⁵ Eteno, propeno e butadieno.

⁶ Benzeno, toluene e xileno (BTX).

Cadeia Petroquímica

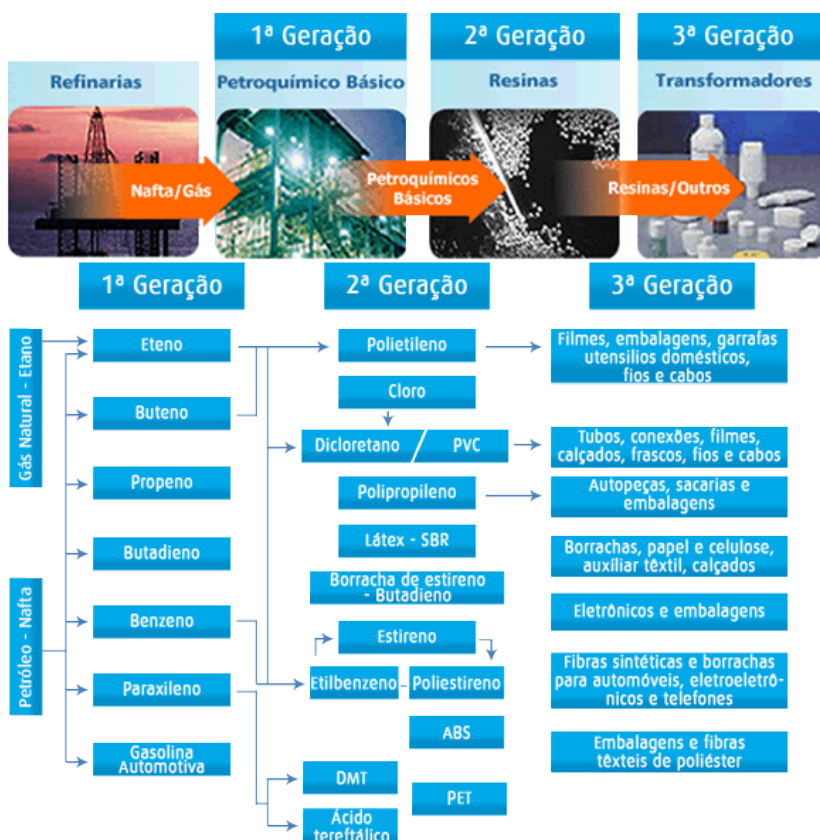


Figura 8 – Diagrama Esquemático da Cadeia Petroquímica

Fonte: BRASKEM, 2013

A indústria petroquímica é uma cadeia de produção que compreende poucas unidades industriais com elevadíssima capacidade de produção, as quais produzem a maior parte da matéria-prima empregada pelas indústrias de produtos químicos orgânicos e praticamente todos os insumos químicos para as indústrias de polímeros (termoplásticos, elastômeros e resinas).

As centrais petroquímicas podem converter, por meio de processos de craqueamento e pirólise, nafta e gás natural (etano e outras frações condensadas) em insumos petroquímicos básicos: eteno, propeno, butenos (1,3-butadieno e 1-butenos) e aromáticos (benzeno, tolueno e xilenos ou, simplesmente, BTX).

Eteno pode ser “extraído”, com relativamente pouco processamento, da corrente C3 dos gases de refinaria, e os BTX são obtidos como subproduto de outros processos. Hoje, a Braskem é a principal produtora de petroquímicos básicos no país, estando presente nos quatro polos petroquímicos. Em todos os polos, é feito o craqueamento térmico da nafta ou do gás natural (no caso do polo de Caxias), obtendo-se, como produto principal, o eteno e, como secundários, o propeno, o butadieno e o BTX, que são separados em processos posteriores ao craqueamento.⁷

⁷ No caso dos BTX, a etapa principal é a reforma catalítica das frações médias da nafta, podendo-se, entretanto, extraí-los do óleo oriundo dos processos de craqueamento e pirólise supracitados e dos gases de refinaria, bem como podem ser obtidos em rota carboquímica (Gerdau Açominas). Esta última envolve um processo diferente, porém, para efeito de simplificação, não serão considerados neste trabalho devido à pouca representatividade em termos de capacidade instalada.

Em todos os processos principais mencionados, o objetivo é impor à matéria-prima (condensados de gás natural, nafta e óleos não pesados) condições severas o suficiente para romper ligações químicas (800°C a 2000°C, 10 atm a 32 atm), com ou sem a presença de coadjuvantes (vapor, hidrogênio, catalisadores etc.), e assim gerar uma mistura de substâncias derivadas, a qual será submetida a processos de separação (extração por solvente, destilação fracionada, condensação por meio de compressão e resfriamento etc.), recirculação de frações reaproveitáveis e remoção das frações indesejáveis (purificação).

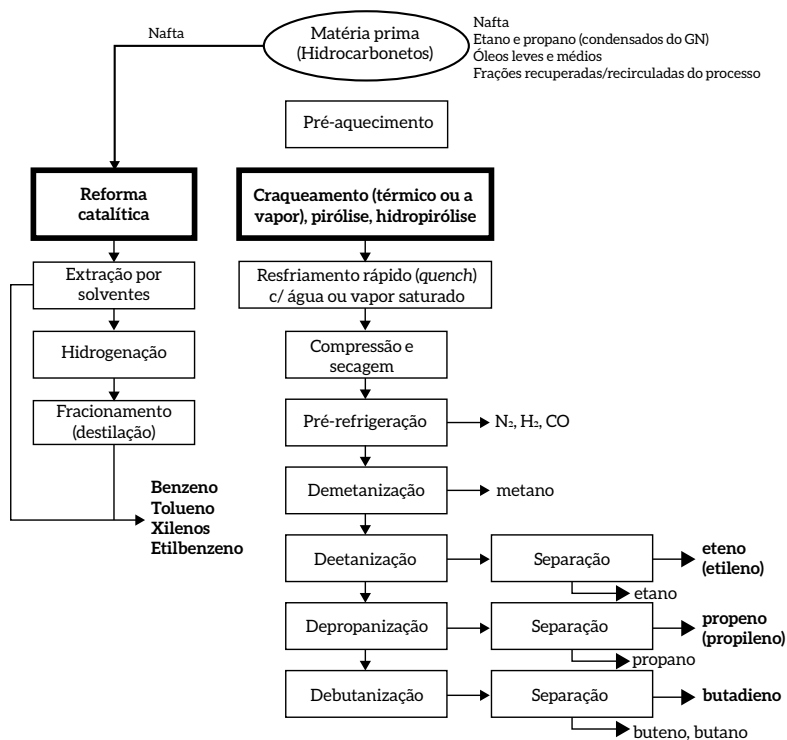


Figura 9 – Processo Genérico para Produção de Petroquímicos Básicos

Fonte: Adaptado de WORRELL et al., 2000

A tecnologia envolvida no processo global da planta e as condições operacionais variam conforme a matéria-prima empregada, bem como existem várias opções de tecnologias proprietárias (citadas em CEPED, 2006), mas é possível traçar um processo genérico e estabelecer consumos específicos globais a partir de uma planta de produção de eteno por craqueamento a vapor, que é o processo mais comum no mundo (WORRELL et al., 2000), sendo que propeno e BTX são obtidos através do craqueamento da nafta. É por isso que o uso de etano como matéria-prima praticamente não produz propeno, butadieno e aromáticos, motivo pelo qual a contribuição da unidade da Braskem em Duque de Caxias na produção desses petroquímicos básicos é mínima ou nula. Este também é o motivo do consumo específico térmico para a produção de eteno ser seis vezes superior ao demandado na produção de propeno e BTX.

Inicialmente serão detalhados fluxogramas e etapas do processo produtivo dos petroquímicos básicos.

1.1.3.1 PETROQUÍMICOS BÁSICOS

1.1.3.1.1 ETENO E PROPENO

O craqueamento a vapor é o processo mais utilizado para a produção de olefinas, a partir de nafta petroquímica ou de gás natural. O reator consiste em tubos (serpentina) aquecidos a alta temperatura na presença de vapor de água por onde passam hidrocarbonetos misturados que sofrem reação de cisão, sendo quebrados em moléculas mais leves (COELHO et al., 2011). No entanto, chama-se de *steam cracking* todo o sistema de craqueamento que vai além do reator de pirólise, incluindo as etapas de separação primária do produto e recuperação.

A Figura 10 mostra o reator de pirólise para a geração de eteno sem considerar as etapas seguintes de fracionamento. Em suma, a diferença no sistema *cracking* de processamento de etano em relação ao de nafta se dá principalmente nas etapas seguintes à pirólise. Segundo Ren et al. (2006), o *cracking* de etano requer temperaturas um pouco mais altas nos fornos de pirólise, maior capacidade de separação no *splitter* de C_2 , porém menor infraestrutura de equipamentos, uma vez que tanques de estocagem e recuperação de propileno, butadieno e BTX não são necessários, mas são necessárias etapas para a vaporização do etano residual e superaquecimento.

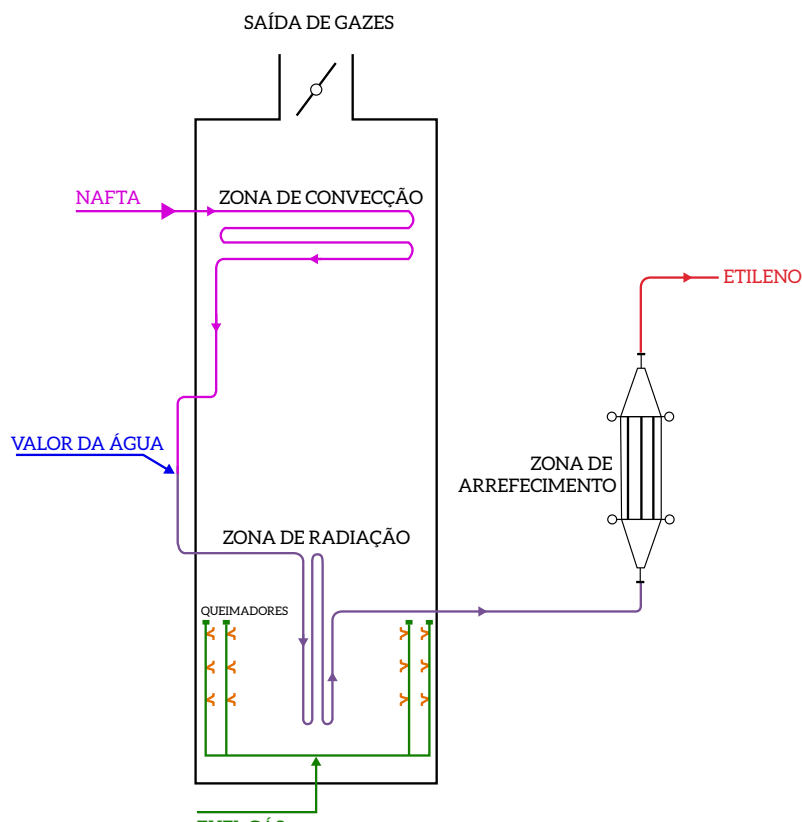


Figura 10 – Reator de Pirólise para Produção de Eteno

Fonte: COELHO et al., 2011

O processo de produção de etileno por meio da tecnologia ABB Lummus deve ocorrer com preaquecimento da matéria-prima (etano), e o craqueamento deve ocorrer em reator tubular de baixo tempo de residência (reator SRT) (etapa 1). Em seguida, o produto deve ser rapidamente resfriado em trocadores (etapa 2), gerando vapor de alta pressão. Um maior resfriamento dos efluentes do forno de pirólise pode ser alcançado pelo banho de água na torre de resfriamento (etapa 4), e os gases restantes na torre sofrem compressão em um compressor centrífugo multiestágios (etapa 5), sendo depois secado e resfriado (etapa 6). O hidrogênio deve ser recuperado (etapa 7) e depois direcionado para o demetanizador (etapa 8), operando a 100 psia, o que otimiza a eficiência energética do processo. Os resíduos de fundo do demetanizador são encaminhados para o deetanizador (etapa 9), sendo o acetileno resultante nessa etapa hidrogenado ou recuperado (etapa 10). Em seguida, o eteno e o etano são fracionados (etapa 11), obtendo-se eteno grau polimérico. O etano restante na torre de fracionamento deve ser reciclado ao processo para sofrer craqueamento. A próxima etapa do processo passa pela depropanização, em que metil-acetileno e propadieno são hidrogenados por destilação catalítica. Os resíduos de fundo do depropanizador são separados em correntes C4 e de gasolina leve (etapa 14), enquanto propileno grau polimérico é recuperado no fracionadores de propileno (etapa 13).

A Figura 11 mostra o fluxograma de produção de etileno, devendo-se observar, no entanto, que, ao se aplicarem as melhores práticas para o caso do estado do Rio de Janeiro, por exemplo, deve-se particularizar o fluxograma para o caso em que a matéria-prima é o gás natural. Nesse sentido, a etapa 3 do processo, por exemplo, em que há um fracionador de gasolina, não é necessária e provavelmente as cargas do depropanizador serão menores no caso em que se adota gás natural do que no caso em que se adota nafta petroquímica.

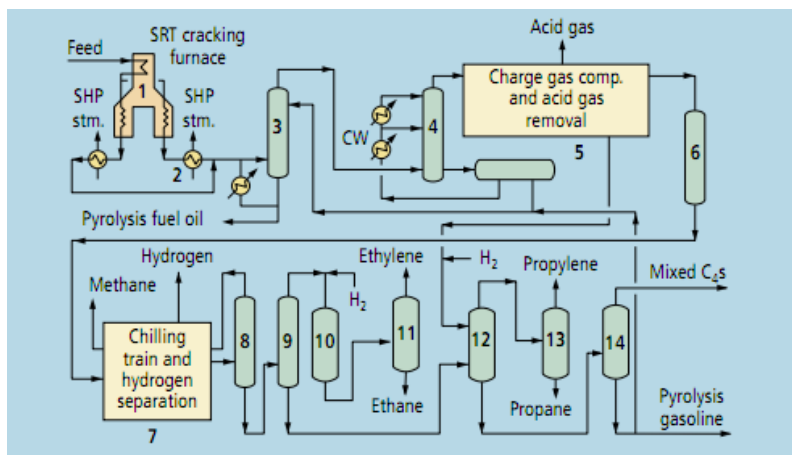


Figura 11 – Fluxograma de Produção de Etileno ABB Lummus Global

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

O processo produtivo licenciado pela Technip tem um fluxograma mais simples, em que o craqueamento térmico ocorre em presença de vapor e alta temperatura em serpentinas seletivas a eteno e propeno. As temperaturas de saída variam até 880°C, dependendo da qualidade da nafta craqueada. Os gases de saída do forno atravessam um sistema de troca térmica onde o calor é recuperado para gerar vapor de alta pressão. O calor dos gases de combustão é recuperado na seção de convecção para preaquecer os insumos e o vapor de processo, além de superaquecer o vapor de alta pressão gerado. A produtividade em eteno e propeno desse processo depende das características da nafta utilizada e da severidade do reator.

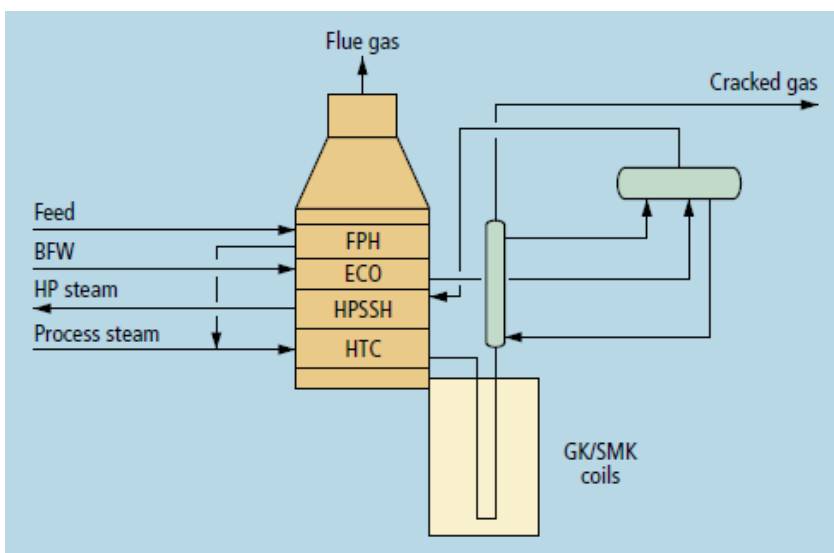


Figura 12 – Fluxograma de Produção de Eteno e Propeno Technip

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

O desempenho energético do processo de craqueamento em muito depende da matéria-prima utilizada. Ao se utilizar etano como insumo, o consumo energético líquido tende a ser menor. No entanto, ao se utilizarem matérias-primas de maior peso molecular, como a nafta, apesar da demanda energética ser maior, há a possibilidade de se produzirem excedentes de energia pelo aproveitamento da energia térmica formada ao se resfriar abruptamente o efluente gasoso craqueado.

Conforme se observa pelos processos descritos, a produção de eteno e propeno por craqueamento térmico é bastante energointensiva devido à alta demanda de energia térmica no processo de pirólise.⁸ No entanto, é possível aproveitar subprodutos e correntes secundárias do processo para a geração de energia, conforme citado. Além do aproveitamento térmico da corrente de efluente do reator de craqueamento, pode-se aproveitar a corrente gasosa de metano e hidrogênio originária da demetização do efluente do reator e a corrente gasosa de etano proveniente das colunas de de-etanização (TOLMASQUIM et al., 2003).

No tocante à energia elétrica, o consumo energético do processo é marginal e se deve, principalmente, ao bombeamento de água e óleo e à compressão de metano (BAJAY et al., 2010). A Tabela 22 lista os valores de consumo específico para fins energéticos do processo de produção de eteno e propeno por craqueamento térmico, divididos em consumo específico térmico e elétrico, quando disponível.

⁸ Bajay et al. (2010) mencionam que, na etapa de craqueamento, consome-se 65% de todo o combustível utilizado no processo quando a matéria-prima é nafta e 47% quando a matéria-prima é etano.

Tabela 22 – Consumo Energético Específico na Produção de Eteno e Propeno

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010 ¹	28,14	0,502	28,65
IEA, 2013 ²	-	-	16,5
IEA, 2007 ²	-	-	12,5-23
SAYGIN et al., 2011 ^{2,3}	16,9	-	16,9
NEELIS et al., 2008 ¹	-	-	26,9
THYSSENKRUP, 2010	-	-	13,8-20,9
WORRELL et al., 2000 ²	-	-	14-27

¹ GJ/t eteno² GJ/t HVC (High Value Chemicals)³ Saygin et al. (2011) lista apenas consumo térmico

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; IEA, 2007; 2013; SAYGIN et al., 2011; NEELIS et al., 2008; THYSSENKRUP, 2010; WORRELL et al., 2000

É importante ressaltar duas questões que devem ser consideradas ao se analisarem os números de consumo específico disponíveis na literatura. A primeira se relaciona ao fato de que, nesse processo, assim como ocorre na produção de amônia, utiliza-se insumo combustível para fins energéticos (geração de energia térmica) e como matéria-prima. Dessa forma, valores elevados de consumo disponibilizados na literatura podem estar contabilizando a quantidade consumida de combustível como matéria-prima. A segunda diz respeito ao denominador do indicador de consumo: uma vez que o produto principal do craqueamento é o eteno, mas propeno, butadieno e BTX também são gerados, algumas referências consideram equivocado alocar o consumo energético apenas em um produto. Dessa forma, a partir de uma ponderação entre todas as correntes de produtos gerados, muitas publicações utilizam o termo *high value chemicals* (HVC) como forma de contornar o problema de alocação energética. Nesse caso, o número dado tende a ser inferior ao número de consumo energético alocado apenas ao eteno.

Worrell et al. (2000), em tabela mais detalhada (Tabela 23), explicitam o consumo de energia por etapa do processo produtivo de eteno, fornecendo uma ideia melhor da distribuição do consumo ao longo do processo e das etapas mais energointensivas.

Tabela 23 – Consumo Energético Específico do Processo de Produção de Eteno por Etapa de Processo

Etapa de processo	Consumo específico (GJ/t)
Craqueamento	11
Calor de reação	5,4
Diluição do vapor	1,4
Aquecimento + perdas	4,2
Compressão	5,2
Separação	7,3
Chiller	5
Condensador	3,8
Separador do etano	1,2
Vapor	2,3
Remoção de acetileno	0,7
Separação de pesados	1,6
Consumo específico total	23,5

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2000

Na Tabela 24 tem-se o consumo energético por utilidade na produção de eteno e propeno em 2006.

Tabela 24 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Eteno e Propeno no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica		Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	56.088.675	223.251	3.801.168	60.113.094

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

1.1.3.1.2 BUTADIENO

O butadieno pode ser obtido a partir dos subprodutos do craqueamento térmico, devendo, no entanto, passar por processos de separação e extração.

A corrente de C4 proveniente do *cracking* de etano é alimentada a uma coluna de destilação extrativa (Figura 13 – etapa 1) que produz uma corrente de topo essencialmente livre de butanos e acetilenos. A corrente de fundo deve seguir para um retificador para a separação dos butanos (etapa 2). Uma corrente média, contendo butadienos e compostos acetilênicos, é retirada do retificador e levada a uma segunda coluna de destilação extrativa (etapa 3). Nessa etapa, os acetilenos são solúveis no solvente utilizado e retornam ao retificador, enquanto o butadieno cru da corrente de topo é levado a um trem de purificação.

Os compostos de fundo do retificador, contendo butadienos, acetilenos C4 e hidrocarbonetos C5, são preaquecidos e alimentados a um desgaseificador (etapa 4) em que os hidrocarbonetos leves são removidos do solvente que, em seguida, vai para um trem de trocadores de calor e retorna às colunas de destilação extrativa. Os hidrocarbonetos livres no topo do desgaseificador são resfriados e alimentados novamente ao retificador.

Na etapa 5, acetileno C3 é removido como resíduo, enquanto as correntes de fundo são direcionadas para uma terceira coluna de destilação (etapa 6) que produz butadieno puro na corrente de topo e 1,2-butadieno e hidrocarbonetos C5 na corrente de fundo.

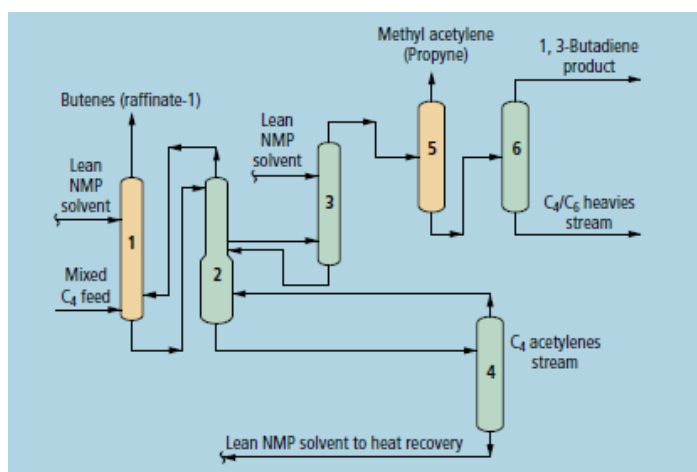


Figura 13 – Fluxograma de Produção de 1,3-butadieno pelo Processo BASF AG/ABB Lummus Global

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

A Tabela 25 lista o consumo energético específico do processo segundo as referências consultadas. As sucessivas etapas de destilação extrativa com solventes requerem a parcela mais significativa de energia do processo.

Tabela 25 – Consumo Energético Específico na Produção de Butadieno

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	13,01	-	13,01
SAYGIN et al., 2011 ²	7,3	-	7,3

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por energia útil dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 26.

Tabela 26 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Butadieno no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica
	Vapor de Processo
Consumo de energia (GJ)	4.268.605

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

1.1.3.1.3 BENZENOS, TOLUENOS E XILENOS – BTX

Os chamados BTX – benzenos, toluenos e xilenos – são produzidos em diferentes proporções como subprodutos do craqueamento da nafta. A tecnologia UOP LLC (Figura 14) produz reformados concentrados em benzeno, tolueno e xilenos por meio da reforma severa de nafta e de condensados, obtendo também hidrogênio como subproduto. O processo consiste em uma seção de reação, uma de regeneração contínua do catalisador (CCR) e uma de recuperação de produto. O reator de fluxo radial (etapa 1) facilita a transferência de catalisador para e da seção CCR (etapa 2). Aquecedores de carga (etapa 3) são utilizados para alcançar a conversão e seletividade ótimas para a reação endotérmica.

O efluente do reator é separado em frações líquidas e vapor (etapa 4). Enquanto a fração líquida segue para o estabilizador (etapa 5) para a remoção de leves, a fração de vapor é comprimida e levada à seção de recuperação (etapa 6) para separar o hidrogênio (a 90% de concentração).

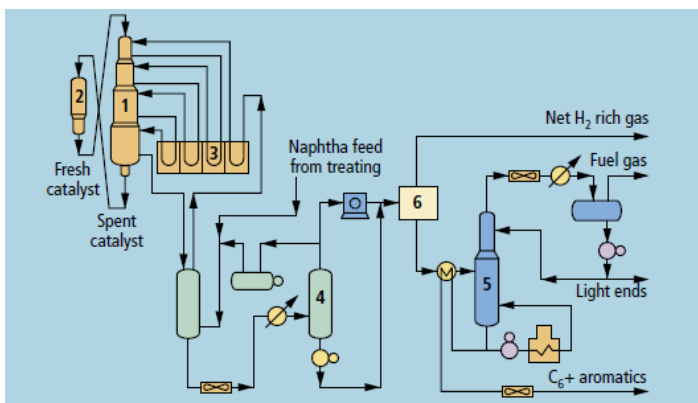


Figura 14 – Fluxograma de Produção de BTX pelo Processo de Reforma Catalítica Licenciado pela UOP LLC

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

Considera-se que a etapa com maior demanda energética desse processo produtivo é a separação de hidrogênio na etapa final do processo. A razão potência/calor situa-se em torno de 0,06, ou seja, o uso de energia térmica é amplamente dominante em relação ao consumo de eletricidade em ambos os processos. A Tabela 27 indica o consumo energético específico segundo a literatura consultada.

Tabela 27 – Consumo Energético Específico do Processo de BTX

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	2,73	0,19	2,92
SAYGIN et al., 2011	3,2	-	-
NEELIS et al., 2008	-	-	2,9

Fonte: Elaboração própria a partir de NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011

Bajay et al. (2010) descrevem o consumo energético por energia útil dessa indústria no ano de 2006.

Tabela 28 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de BTX no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	4.179.673	288.484	4.468.157

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

1.1.3.2 PETROQUÍMICOS INTERMEDIÁRIOS

Este segmento compreende uma grande variedade de produtos, havendo uma fronteira difusa entre este segmento e outros, como termoplásticos. Neste segmento, são produzidos insumos químicos (intermediários) para praticamente todos os demais segmentos tratados neste estudo, sendo a escala de produção muito elevada, tanto do ponto de vista dos produtos individuais quanto do segmento como um todo.

O processo para a fabricação de monômero de estireno (SM) por desidrogenação de etilbenzeno (EB) a estireno, com uso de EB produzido por alquilação de benzeno com etileno (processo Mobil/Badger EBMax), está esquematizado na Figura 15.

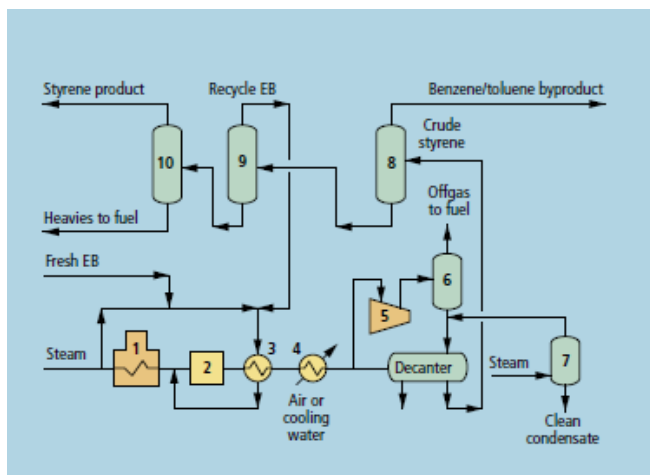


Figura 15 – Esquema de Produção de Monômero de Estireno por Desidrogenação de Etilbenzeno, Tecnologia Badger

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

Etilbenzeno (EB) é desidrogenado a estireno com uso do catalisador de potássio, óxido de ferro e potássio na presença de vapor. A reação endotérmica é feita em condições de vácuo e de alta temperatura. Subprodutos, benzeno e tolueno, são recuperados por meio de destilação com a fração de benzeno sendo reciclado para a unidade de EB.

EB vaporizados e reciclados são misturados com vapor superaquecido (etapa 1) e levados a um sistema de reator adiabático multiestágio (etapa 2). Entre os estágios de desidrogenação, o calor é adicionado para levar a conversão da matéria-prima a níveis econômicos, normalmente entre 60% e 75%. O calor pode ser acrescentado tanto indiretamente por meios convencionais, como um trocador de calor a vapor, quanto diretamente, utilizando uma tecnologia de aquecimento direto.

O reator de efluentes é resfriado em uma série de trocadores (etapa 3) para recuperar calor residual e condensar (etapa 4) hidrocarbonetos e vapor. Gás de saída não condensado – principalmente hidrogênio – é comprimido (etapa 5) e, em seguida, levado a um sistema (etapa 6) para recuperação de resquícios de compostos aromáticos. Após a recuperação de aromáticos, gás de combustão rico em hidrogênio é consumido como combustível em processos de aquecimento. Hidrocarbonetos condensados e estireno bruto são enviados para a seção de destilação, enquanto condensados de processo são separados em *strippers* (etapa 7) para remoção de gases dissolvidos e compostos aromáticos. Os condensados de processo são devolvidos como fluidos aquecidos para utilização em caldeiras *offsite*.

A sequência de destilação primeiramente separa o subproduto benzeno/tolueno do fluxo principal de corrente de estireno bruto (etapa 8). EB não convertidos são separados do estireno (etapa 9) e reciclados para a seção de reação. Vários esquemas de recuperação de calor são utilizados para recuperação de energia do sistema de colunas de EB/SM. Na etapa de purificação final (etapa 10), resquícios de componentes C_9 e pesados são separados do estireno. Para minimizar a polimerização em equipamentos de destilação, um inibidor tipo dinitrofenólico é coalimentado com o alimento bruto da seção de reação. A pureza de SM típicos varia entre 99,9% e 99,95%.

A demanda térmica do processo se deve, essencialmente, à geração de vapor para o processo. A Tabela 29 lista os consumos específicos de energia disponibilizados na literatura.

Tabela 29 – Consumo Energético Específico do Processo de Estireno

Consumo específico (GJ/t)	Total
SAYGIN et al., 2011	9,2
IEA, 2013	8,34
NEELIS et al., 2008	8,8

Fonte: Elaboração própria a partir NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; IEA, 2013

Bajay et al. (2010) descrevem o consumo energético por energia útil dessa indústria no ano de 2006.

Tabela 30 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Estireno no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	15.373.868	92.407	15.466.276

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Segundo Ceped (2006), o ácido tereftálico é obtido pela oxidação do p-xileno. A tecnologia licenciada pela Lurgi (Figura 16) envolve três seções básicas para a obtenção desse produto: obtenção de ácido cru, obtenção de ácido nível polimérico e recuperação de catalisador.

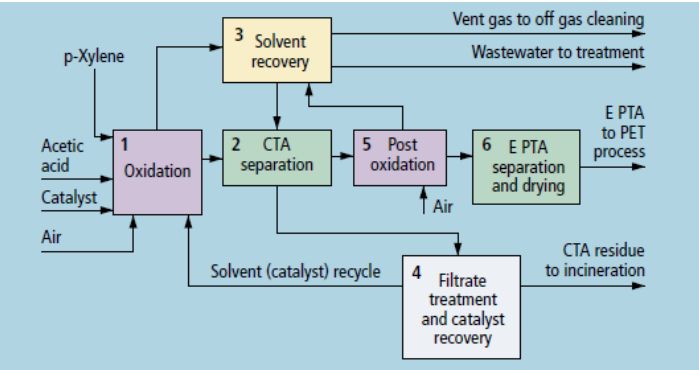


Figura 16 – Esquematização do Processo de Ácido Tereftálico pela Tecnologia Lurgi

Fonte: CEPED, 2006

O ácido tereftálico cru (CTA) é produzido por oxidação catalítica do p-xileno em fase líquida, sendo o ácido acético o solvente (etapa 1). P-xileno, solvente e catalisador são continuamente alimentados ao reator juntamente com ar comprimido. O reator opera à temperatura moderada. Na fase de separação do CTA (etapa 2), as impurezas são removidas efetivamente pela troca do licor de reação pelo solvente puro advindo do sistema de recuperação do solvente. O vapor de topo do reator, composto por água de reação, ácido acético e nitrogênio, é enviado ao sistema de recuperação de solvente (etapa 3), onde a água é separada do solvente por destilação. Após a recuperação de sua energia, o gás residual é enviado para oxidação térmica regenerativa para maior purificação.

Na etapa 5 do processo, o ácido cru é purificado para obtenção de ácido tereftálico grau polímero em uma etapa pós-oxidação realizada a temperaturas elevadas, sendo em seguida separado do solvente (etapa 6) e seco para o processamento e produção posterior de poliéster.

Por fim, os sólidos em suspensão do CTA são separados e removidos como resíduos, que podem ser incinerados. As impurezas solúveis são removidas por filtração, quando então o catalisador dissolvido pode ser recuperado (etapa 4).

As etapas mais energointensivas do processo são a compressão de ar previamente a reação catalítica, etapa que consome 86% da demanda de energia elétrica do processo, e a etapa de hidrogenação, que consome 83% da demanda térmica total do processo. A Tabela 31 lista o consumo energético específico fornecido na literatura.

Tabela 31 – Consumo Energético Específico do Processo de Ácido Tereftálico

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	2.70	1.44	4,14
IEA, 2013	-	-	7,27
NEELIS et al., 2008	-	-	5,2

Fonte: Elaboração própria a partir NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; IEA, 2013

A Tabela 32 expõe o consumo energético por utilidade para esse processo produtivo, de acordo com os dados de Bajay et al. (2010).

Tabela 32 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Ácido Tereftálico no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	556.955	297.068	854.022

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

No caso do dicloroetano, se aplica o processo de oxicloração, que é exotérmico e tem como insumos principais eteno, ácido clorídrico anidro e oxigênio. Enquanto o HCl anidro pode ser proveniente de plantas de produção de cloreto de vinila (MVC) e de isocianatos (MDI, TDI), o oxigênio deve vir de uma unidade de separação de ar, como plantas de adsorção do tipo PSA.⁹

A reação exotérmica é catalisada por catalisador de cobre em reator de leito fluidizado a temperatura de 220°C. Calor de reação é recuperado, produzindo-se vapor ou aquecendo outros fluidos. O catalisador é separado do produto em um ciclone e qualquer resíduo adicional é removido por um filtro de gás quente ou em um sistema de tratamento de efluentes. Por fim, o EDC cru é purificado em uma coluna de destilação (Figura 17).

⁹ Pressure Swing Adsorption.

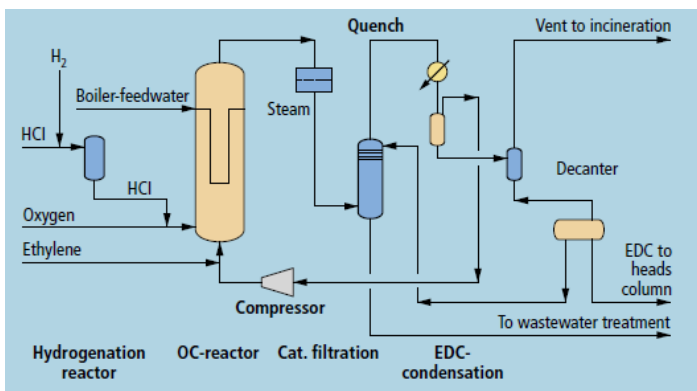


Figura 17 – Fluxograma da Produção de Dicloroetano pela Tecnologia Uhde GmbH

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

As etapas mais energointensivas desse processo são a separação de ar para suprir a demanda de oxigênio e a purificação final do EDC por destilação. Abaixo, são listados os consumos de energia específicos do processo, segundo a literatura (Tabela 33).

Tabela 33 – Consumo Energético Específico do Processo de Dicloroetano

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	4,42	-	4,42
SAYGIN et al., 2011	5,3	-	5,3

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 34.

Tabela 34 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Dicloroetano no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica
	Aquecimento Direto
Consumo de energia (GJ)	401.826

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O cloreto de vinila (MVC) é produzido por cloração direta e oxicloração do eteno, sendo usado o cloreto de hidrogênio gerado no craqueamento térmico do dicloroetano.

Conforme mostra a Figura 18, dicloroetano (EDC) é alimentado ao forno de craqueamento, formando cloreto de vinila e ácido clorídrico a uma temperatura aproximada de 490°C e 1,5 Mpa. Antes disso, no entanto, o EDC é preaquecido em trocadores de calor localizados adiante do processo, aproveitando-se, assim, o calor de processo que sai do forno. Os gases quentes de reação são resfriados no evaporador de EDC. Resfriamento adicional dos gases ocorre na torre de *quench*. A corrente de topo dessa torre é condensada em um gerador, o mesmo que aquece o EDC alimentado ao forno. A corrente de fundo da torre é filtrada e levada a um sistema de *flash* para a remoção de coque.

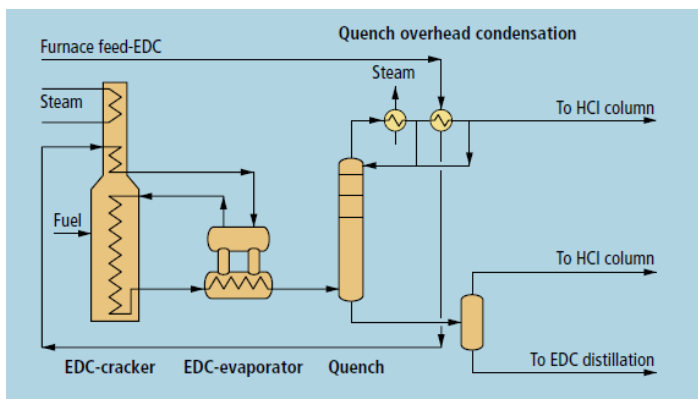


Figura 18 – Fluxograma da Produção de MVC pela Tecnologia Uhde GmbH

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

A etapa mais energointensiva nesse processo é o craqueamento térmico, dada a necessidade de condições agressivas de temperatura e pressão. A Tabela 35 lista os consumos energéticos específicos para o processo encontrados na literatura.

Tabela 35 – Consumo Energético Específico do Processo de Cloreto de Vinila

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	5,79	0,79	6,58
IEA, 2013	-	-	5,75
NEELIS et al., 2008	-	-	4,90

Fonte: Elaboração própria a partir NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; IEA, 2013

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 36.

Tabela 36 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Cloreto de Vinila no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	2.647.314	361.506	3.008.820

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O principal licenciador da tecnologia de produção de formaldeído a concentração entre 37% e 52% é a Uhde-Inventa Fischer (Figura 19).

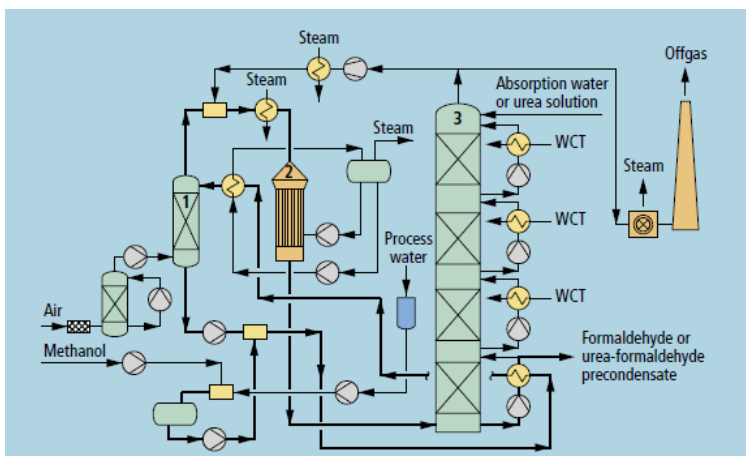


Figura 19 – Fluxograma da Produção de Formaldeído pela Tecnologia Uhde-Inventa Fischer

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

O formaldeído é produzido por oxidação com metanol e ar. A reação ocorre na superfície do catalisador a temperaturas entre 620°C e 680°C, onde o metanol é desidratado e parcialmente oxidado.

A mistura água/metanol é alimentada continuamente ao evaporador de metanol (etapa 1). O ar de processo requerido é sugado para dentro do evaporador por um ventilador com filtro e *scrubber* de ar. Então, a mistura água/metanol/ar segue para o reator (etapa 2), onde a conversão de metanol e formaldeído realmente ocorre. Como a reação é exotérmica, a temperatura do reator é autoajustada pela reação.

Os gases de reação que emergem do catalisador contêm formaldeído, água, nitrogênio hidrogênio de dióxido de carbono, além de metanol não convertido. Eles são resfriados em um *boiler* de resíduos aquosos até 150°C diretamente conectado ao reator, sendo que a quantidade de calor liberada no *boiler* é suficiente para aquecimento do evaporador de metanol.

Em seguida, os gases de reação vão para uma torre de absorção de quatro estágios (etapa 3), onde a absorção de formaldeído ocorre em contracorrente via solução aquosa de formaldeído e água desmineralizada fria. A solução final de produto é removida no primeiro estágio de absorção.

Os gases residuais da torre de absorção têm elevado poder calorífico e podem ser queimados para produzir vapor de alta pressão e/ou reciclados ao reator, o que tende a aumentar a concentração do produto final em solução.

Considera-se como etapa mais demandante de energia nesse processo o craqueamento catalítico devido à necessidade de altas temperaturas para a ocorrência da reação.

Tabela 37 – Consumo Energético Específico do Processo de Formaldeído

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	4,11	-	4,11
THYSSENKRUP, 2010	-	-	0,14

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; THYSSENKRUP, 2010

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 38.

Tabela 38 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Formaldeído no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica		Total
	Aquecimento Direto	Vapor de Processo	
Consumo de energia (GJ)	833.213	1.006.094	1.839.307

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

1.1.3.3 OUTROS PRODUTOS ORGÂNICOS (OPO)

O processo de produção do metanol baseado em tecnologia ICI de baixa pressão utiliza gás natural como matéria-prima (COSTA et al., 2005).

A planta recebe gás natural, que é comprimido, dessulfurizado e aquecido. Este é misturado com vapor de alta pressão e alimenta dois fornos de reforma. O gás de síntese reformado é resfriado em uma série de trocadores de calor. Esse gás é, então, comprimido e aquecido na unidade de síntese de metanol. O metanol e a água são produzidos nos reatores e são separados dos gases não condensáveis por resfriamento e em seguida condensação. O gás restante é reciclado e o metanol cru é enviado à unidade de purificação, onde, por meio de destilação, é obtido o produto do metanol, separado da água, de gases dissolvidos e de compostos oxigenados leves.

Principais reações químicas envolvidas:

- Reação de reforma de vapor: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3 \text{H}_2$
- Reação de troca: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- Reação de síntese: $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
- Reação de troca: $\text{CO} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

O processo descrito é complementado por dois sistemas auxiliares: sistema de combustível, que fornece energia térmica para os fornos e para uma caldeira de gás natural, e um sistema de vapor, que recebe o vapor produzido/recuperado em vários pontos da planta (como na caldeira de gás natural, em fornos, nos rejeitos das caldeiras etc.) e o distribui para várias unidades demandantes (como processo de vapor, reaquecedores de destilação e turbinas) de duas formas principais (alta e baixa pressão). Esses três sistemas acoplados estão ligados a outra estrutura descrita na Figura 20, e o processo do fluxograma é altamente integrado, com objetivo de garantir boa eficiência térmica.

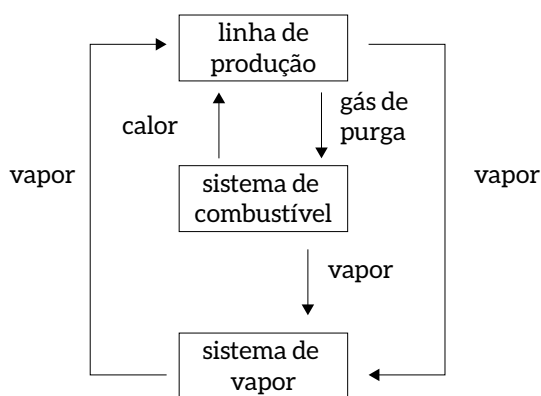


Figura 20 – Esquema do Sistema de Processamento Interligado Utilizado na GPC Química no Estado do Rio de Janeiro

Fonte: Elaboração própria a partir de COSTA et al., 2005

O processo produtivo é energointensivo, requerendo grande quantidade de energia térmica para geração de vapor. No que tange ao consumo energético específico disponível na literatura, conforme a Tabela 39, há consumo de insumo combustível para fins energéticos e como matéria-prima, por isso, dependendo da metodologia adotada na obtenção desses valores de consumo, os números na literatura podem variar consideravelmente.

Tabela 39 – Consumo Energético Específico do Processo de Metanol

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	10,01	2,65	12,66
IEA, 2013	-	-	13,9
SAYGIN et al., 2011	10	-	10
NEELIS et al., 2008	-	-	31
THYSSENKRUP, 2010	-	-	30
WORRELL et al., 2000 ²	-	-	38,4

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2000; NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; THYSSENKRUP, 2010; SAYGIN et al., 2011; IEA, 2013

Segundo Bajay et al. (2010), o consumo energético por energia útil na produção de nitrato de amônio no país, em 2006, reflete os valores da Tabela 40.

Tabela 40 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Metanol no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	2.769.784	733.604	3.503.389

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O processo produtivo de óxido de etileno (Figura 21), é iniciado em um reator tubular catalítico que recebe eteno e oxigênio em um gás diluente, composto basicamente de metano, nitrogênio, CO₂ e argônio (etapa 1). A temperatura de reação é controlada pelo ajuste da pressão do vapor gerado no reator, removendo o calor de reação. O EO produzido é removido, segue para um trocador de calor e depois para um *scrubber* (etapa 2), onde é removido do gás de reação. CO₂ é removido como subproduto nas etapas 3 e 4, antes de ser recomprimido e retornar ao sistema de reação.

O EO é conduzido a um *stripper* a vapor (etapa 5) para ser separado da solução de saída do *scrubber* e ser recuperado em solução aquosa concentrada (etapa 6). Então, segue para um sistema de purificação (etapas 7 e 8), onde o produto final é obtido.

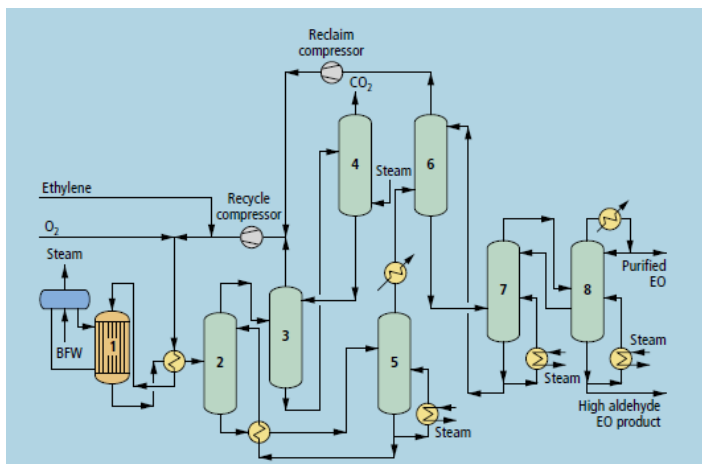


Figura 21 – Esquema de Produção de Óxido de Eteno, Tecnologia Scientific Design

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

As etapas de destilação e esgotamento são as que demandam mais energia térmica no processo (BAJAY et al., 2010). Os consumos energéticos específicos do processo, segundo a literatura, são listados na Tabela 41.

Tabela 41 – Consumo Energético Específico do Processo de Óxido de Eteno

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	2,09	0,84	2,93
SAYGIN et al., 2011	3,10	-	3,10
IEA, 2013	-	-	10,00
NEELIS et al., 2008	-	-	4,50

Fonte: Elaboração própria a partir de NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011; IEA, 2013

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por energia útil do processo produtivo, no ano de 2006, está na Tabela 42.

Tabela 42 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Óxido de Etileno no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	605.315	243.809	849.124

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O processo produtivo de etilenoglicol pode ser descrito basicamente a partir da reação, catalítica ou não, do óxido de eteno com água.

O etilenoglicol, juntamente com o propilenoglicol, é utilizado na produção de anticongelantes, poliéster, fibra de vidro, plásticos reforçados para uso em cascos de barcos e canos de construção.

O processo que reflete as melhores práticas para a produção desse composto, é licenciado pela Shell International Chemicals B.V. e consiste na combinação de óxido de etileno purificado (misturado à água ou não) com água de reciclo para aquecimento até as condições de reação. No reator tubular (Figura 22 – etapa 1), essencialmente, todo óxido é termicamente convertido em mono-etilenoglicol (MEG), di-etilenoglicol (DEG) e tri-etilenoglicol (TEG) como coprodutos em quantidades menores. O excesso de água, necessária para alcançar uma alta seletividade para MEG, é evaporado em um evaporador de múltiplos estágios (etapas 2, 3, 4). O último evaporador produz vapor de baixa pressão, que é usado como meio de aquecimento em vários locais na planta. A mistura bruta de glicóis resultante é, em seguida, purificada e fracionada em uma série de colunas de vácuo (etapas 5, 6, 7, 8).

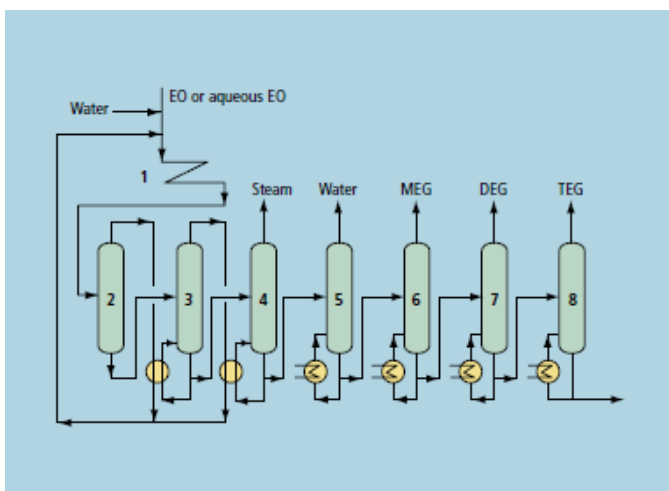


Figura 22 – Esquematização do Processo de Produção de Etileno Glicol a partir de Óxido de Etileno

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

A seletividade ao MEG pode ser influenciada pelo ajuste da composição de alimentação do reator de glicol, e a maioria das plantas de MEG é integrada com plantas de óxido de etileno. Devido à facilidade da integração óxido de etileno/MEG, o sistema de vapor pode ser otimizado para explorar totalmente os benefícios da alta seletividade do catalisador aplicado na planta EO.

Os estágios de fracionamento desse processo são os mais significativos em termos da demanda de energia. A Tabela 43 lista os consumos energéticos específicos encontrados na literatura.

Tabela 43 – Consumo Energético Específico do Processo de Etilenoglicól

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	2,61	0,88	3,49
SAYGIN et al., 2011	-	-	5,30
IEA, 2013	-	-	5,94

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011; IEA, 2013

Bajay et al. (2010) descrevem o consumo energético por energia útil dessa indústria no ano de 2006.

Tabela 44 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Etilenoglicol no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica		Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	94.166	437.876	179.329	711.371

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

1.1.3.4 POLÍMEROS (POL)

Apenas duas classes de polímeros são consideradas neste trabalho, em virtude de sua relevância produtiva, energética e econômica: elastômeros (borrachas sintéticas) e termoplásticos.

São diversos os tipos de borracha sintética e ainda maiores as variedades resultantes da diferenciação, deliberada ou não, dos parâmetros de produção adotados por cada fabricante. Ainda assim, os processos de fabricação existentes guardam muito em comum (SHREVE, 1977), podendo-se definir um processo produtivo básico (Figura 23).

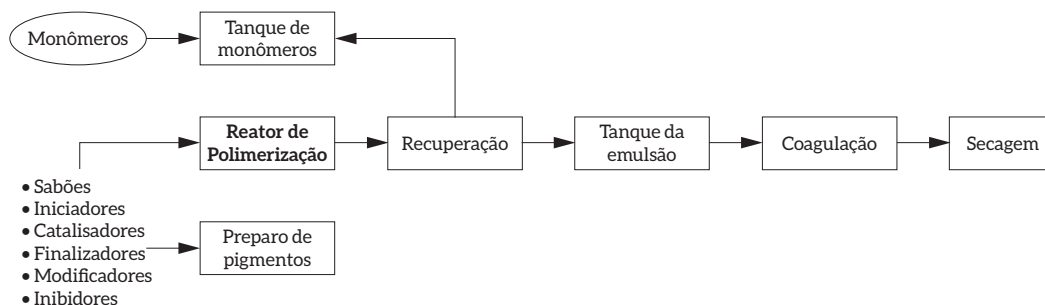


Figura 23 – Fluxograma Básico do Processo de Produção de Elastômeros

Fonte: Elaboração própria a partir de SHREVE, 1977

Os termoplásticos são polímeros que podem ser moldados por ação do calor e, por essa razão, têm ampla aplicação em diversos segmentos da sociedade, havendo centenas de indústrias que utilizam os *pellets* de termoplástico (ou outra apresentação destes) como matéria-prima para a fabricação de peças feitas de plástico.

Numa visão geral, a produção de termoplásticos segue um conjunto de etapas de produção semelhante ao dos elastômeros (Figura 23), guardadas algumas especificidades, como é o caso das pressões relativamente altas empregadas na produção do polietileno, cuja matéria-prima (eteno) encontra-se em fase gasosa. Ainda assim, os fluxogramas de processo guardam muito em comum.

A resina de estireno butadieno (SBR) é obtida por polimerização em emulsão. É o mais tradicional processo de produção de borrachas sintéticas no mundo, já que o material obtido por esse processo é mais padronizado, com menos possibilidades de modificação. Pode ocorrer em diversas temperaturas,

apresentando diferentes propriedades, de acordo com a temperatura utilizada. O processo de polimerização em emulsão a frio é o mais utilizado e representa 90% da capacidade da produção mundial (NAKASATO et al., 2007).

O processo se divide em três estágios: polimerização, recuperação de monômeros e acabamento (coagulação/secagem de borracha). Geralmente, ocorrem em processo contínuo, o que promove melhor eficiência e um produto mais consistente, embora o processo em batelada seja apropriado para a produção de linhas especiais que têm consumo reduzido.

Quanto à capacidade, a reação nunca atinge 100%, pois, para conversão acima de 60%-75%, o polímero obtém propriedades indesejáveis. A polimerização a frio, por exemplo, é parada normalmente com 60% de conversão (NAKASATO et al., 2007).

O processo se inicia com a mistura simultânea de butadieno pressurizado, estireno, água, emulsificantes e iniciadores e com a formação de um sistema *redox* que catalisa o início da reação de polimerização. Com a reação de copolimerização prosseguindo na bateria de reatores, ocorre a formação de cadeias poliméricas, que por ação do modificador não atingem elevado peso molecular. Para efetuar o término da polimerização e assim manter a conversão em 60%, utiliza-se um terminador.

Os parâmetros utilizados variam conforme o tipo de borracha do processo, mas, de modo geral, para as SBR produzidas a frio, utiliza-se temperatura entre 6°C e 12°C e, para as SBR produzidas a quente, utiliza-se temperatura por volta de 50°C. O resfriamento é realizado por um sistema de amônia. A pressão é mantida entre 45 e 60 lb in⁻². No processo em batelada, o sistema é mantido por cerca de dez horas, quando a conversão alcança 70% (NAKASATO et al., 2007).

Após a polimerização, é adicionado antiespumante ao látex produzido para evitar a formação de espumas. O látex passa por expansão, destilação *flash* e coluna de *stripping* para a recuperação dos monômeros que não reagiram. A mistura segue para dois tanques em série, onde é aquecida a 50°C, e a pressão é ajustada a 4 bar para vaporização do butadieno. A emulsão é então conduzida para vasos de pressão reduzida (0,2 bar) para retirada do butadieno residual (destilação *flash*). A mistura isenta de butadieno é bombeada do topo de uma coluna de separação com fluxo de vapor em contracorrente a 5 bar. O vapor arrasta o estireno, que é condensado, tratado e enviado para a reutilização no processo. O látex é misturado com o antioxidante (quando não manchante), para proteção contra degradação, e óleo aromático ou naftênico (somente para determinados tipos de SBR). A última etapa é o acabamento, reunindo coagulação, secagem e embalagem.

A coagulação é realizada em um tanque agitado, onde são adicionados coagulante, floculante e antioxidante manchante (quando for o caso). Em seguida, a borracha passa pelo tanque de lavagem, por uma peneira rotativa, e pela desintegradora. A secagem ocorre em diversas zonas com diferentes temperaturas (em ordem decrescente), sendo a borracha conduzida por esteiras pelo secador. Após passar por todas essas etapas, as partículas são pesadas e uma massa definida do material é prensada, formando blocos definidos (fardos), que são embrulhados em um filme de polietileno e passam por um detector de metais para identificação de possível contaminação metálica. São então inspecionados e encaixotados, prontos para serem enviados ao seu destino.

Praticamente toda a energia elétrica é usada no acionamento de motores (força motriz) e todo o combustível é utilizado para geração de vapor, sendo cerca de 60% deste utilizados diretamente no aquecimento de carga e 40% nos processos de separação e outros usos (TOLMASQUIM et al., 2003). Como algumas reações são exotérmicas, é comum a recuperação de calor nas plantas de grande porte, inclusive em caldeiras de recuperação. A Tabela 45 discrimina os consumos energéticos específicos para os processos de produção de SBR, segundo as referências consultadas.

Tabela 45 – Consumo Energético Específico do Processo de SBR

Consumo específico (GJ/t)	SBR (processo emulsão)			SBR (processo solução)		
	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	8,08	0,86	8,94	-	-	-
EC, 2007	3-8	1-2	4-10	9-21,6	1,3-2,7	10,3-24,3
SAYGIN et al., 2011	-	-	-	22,9	-	22,9

Fonte: Elaboração própria a partir de EC, 2007; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por energia útil dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 46.

Tabela 46 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de SBR no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica		Eletricidade		Total
	Aquecimento Direto	Vapor de Processo	Força Motriz	Refrigeração	
Consumo de energia (GJ)	182.972	1.495.722	111.919	66.280	1.856.893

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Segundo Bajay et al. (2010), os três tipos de polietileno mais utilizados globalmente – polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno linear de baixa densidade (PELBD) – são obtidos em função da pressão de reação. Reação em alta pressão resulta em produto de menor densidade (PEBD), enquanto reação a baixa pressão e em presença de catalisadores gera produtos de maior densidade, como o PEAD e o PELBD. Segundo Tolmasquim et al. (2003), por causa da menor pressão utilizada, a produção de PEAD e PELBD tende a ter menor consumo específico. Apesar de o consumo energético específico do PEBD ser em torno de 83% maior, o processo permite gerar entre 0,3 e 0,8 t de vapor para cada t de polietileno produzido.

O processo Unipol (licenciado pela Univation Technologies) de produção de polietileno, por exemplo, é adotado na unidade da Braskem localizada no Rio de Janeiro, conforme Schaeffer et al. (2011). Tal processo consiste em um reator de leito fluidizado com uma zona de seção expandida e catalisadores sólidos ou em lama. A reação se dá em fase gasosa e temperatura em torno de 100°C e deve ser controlada para evitar coqueamento do produto. A distribuição de peso molecular do produto é ajustada de acordo com as condições operacionais, e a densidade do polímero é controlada ajustando-se o conteúdo de comonômero do produto. A alta produtividade do catalisador convencional e de metaloceno elimina a necessidade de posterior remoção. O calor de reação do gás de reciclo, para fins de controle de temperatura, é removido por um trocador de calor e, após compressão e resfriamento, o gás de reciclo é misturado à alimentação para reinjeção na base do reator. O catalisador sólido é dosado e carregado pelo fluxo de nitrogênio, enquanto o produto é removido por um sistema de vasos de descarga (SALAU et al., 2005). Para a produção de polietileno a partir de eteno, utilizam-se pressões elevadas entre 1.000 atm e 3.400 atm devido à natureza gasosa da matéria-prima.

A Figura 24 mostra o fluxograma do processo Unipol para produção de polietileno.

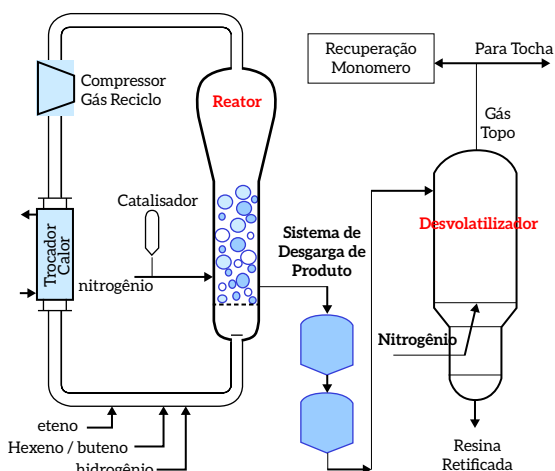


Figura 24 – Processo Unipol de Polimerização de Etileno

Fonte: JIANG, 2008

O produto principal, o polietileno, é uma resina termoplástica comum, geralmente comercializada sob a forma de *pellets*. O PE pode ser de alta densidade (PEAD) ou de baixa densidade (PEBD), com ramificações ou não (PELBD). Após a polimerização, o polímero fundido resultante é resfriado e encaminhado para máquina extrusora, sendo em seguida cortado para tomar a forma de *pellets*.

Há outros processos produtivos disponíveis para a produção de PE, como polimerização em solução e em lama. Em suma, os maiores consumos de energia térmica ocorrem na geração de vapor (quando necessário), enquanto os maiores consumos de energia elétrica ocorrem nas etapas mecânicas, como misturação da matéria-prima, compressão e resfriamento do produto, centrifugação, agitação, pele- tização.¹⁰ A Tabela 47 lista os consumos energéticos específicos da produção de polietileno, segundo a literatura consultada.

Tabela 47 – Consumo Energético Específico do Processo de Polietileno

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	0,38	1,10	1,48
SAYGIN et al., 2011	2,9	-	2,9
IEA, 2013	-	-	2,25-3,78
NEELIS et al., 2008	-	-	2,8
IEA, 2007	-	-	5,43-8,53
WORRELL et al., 2000	-	-	9,3

Fonte: Elaboração própria a partir de NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011; IEA, 2013; 2007

¹⁰ O processo de produção de PEBD tende a consumir muito mais energia elétrica proporcionalmente à térmica do que os processos de produção de PEAD e PELBD.

Na Tabela 48, constam os consumos energéticos no processo de produção de polietileno a partir do eteno, subdivididos por demanda útil, de acordo com Bajay et al. (2010).

Tabela 48 – Consumo Energético Específico do Processo de Produção de Polietileno

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	847.658	2.440.477	3.288.135

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O processo de produção de polipropileno (PP) pode se dar em fase líquida ou gasosa, em diversos tipos de reatores (leito fluidizado, lama, horizontal, tubular etc.). O processo de produção de polipropileno, utilizando a tecnologia Spheripol, produz polímeros de base propileno, incluindo, além de homopolímero, PP e muitas famílias de copolímeros, conforme a Figura 25.

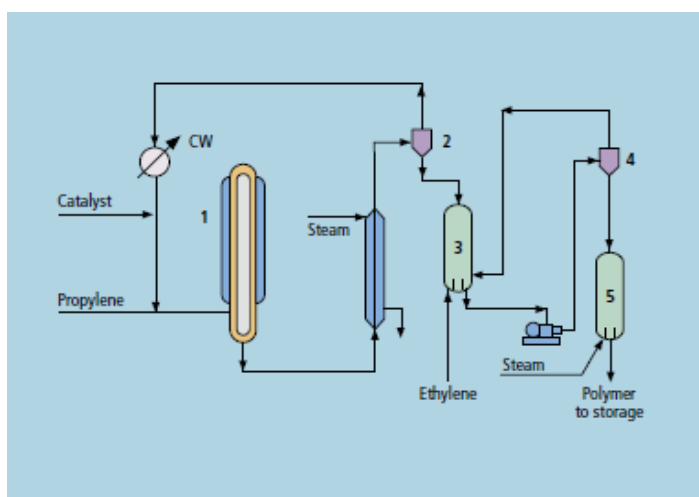


Figura 25 – Tecnologia Spheripol para Produção de Polipropileno

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

No processo Spheripol, a polimerização de homopolímero e copolímero ocorre em fase líquida dentro de um reator tubular em loop (Figura 25: etapa 1), e a copolimerização heterofásica pode ser alcançada pela adição de um reator de fase gasosa (etapa 3) em série. A remoção de resíduos de catalisador e de polímeros amorfos não é necessária. Os monômeros que não reagiram são retirados em um sistema de pressão de dois estágios (etapas 2 e 4) e reciclados de volta para os reatores para melhoria do rendimento e minimização do consumo de energia. Os monômeros dissolvidos são removidos do polímero por spray de vapor (etapa 5), e o processo pode usar propileno de grau químico (94%) ou o típico grau de polimerização (99,5%).

Essa tecnologia é usada para cerca de 50% da capacidade total global de PP, e existem 94 plantas de processo operacional Spheripol em todo o mundo, com capacidade total de cerca de 17 milhões de toneladas por ano.

Parte da energia térmica do processo é consumida sob a forma de aquecimento direto nos equipamentos de extrusão e secagem, enquanto a outra parte se destina a geração de vapor também para extrusão e fusão do polímero. A energia elétrica é consumida nas etapas de centrifugação, lavagem, fusão, extrusão e corte (BAJAY et al., 2010). A Tabela 49 discrimina os valores de consumo energético específico do processo de produção de polietileno, segundo as diversas fontes consultadas.

Tabela 49 – Consumo Energético Específico do Processo de Polipropileno

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	0.75	0.44	1.19
SAYGIN et al., 2011	1	-	1
IEA, 2013	-	-	2.4-3.32
NEELIS et al., 2008	-	-	2
IEA, 2007	-	-	3.56
WORRELL et al., 2000	-	-	10.5

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2000; NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011; IEA, 2013; 2007

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 50.

Tabela 50 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Polipropileno no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	795.069	466.390	1.261.459

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O policloreto de vinila (PVC), por meio da tecnologia licenciada pela Uhde GmbH (Figura 26), produz PVC em suspensão. O processo utiliza um reator em batelada (etapa 1) a partir de cargas em solução de agentes dispersantes, aditivos químicos, monômeros (MVC) e água. A conversão de MVC em PVC é exotérmica, e a lama de PVC e os resíduos de MVC são levados a um tanque de purga, que intermedeia a batelada da polimerização e o processo contínuo de secagem no desgaseificador.

No tanque de purga (etapa 2), os monômeros são separados da lama de PVC por *flash*, e a lama purificada é conduzida a um recuperador de calor (etapa 3) e ao desgaseificador (etapa 4). MVC residual é retirado por vapor, reduzindo ainda mais sua concentração na lama de PVC. O MVC recuperado é liquefeito antes de retornar ao reator de polimerização. Por fim, retira-se água da suspensão de PVC por centrifugação (etapa 5) e por um sistema de secagem por ciclones (etapa 6), que separam as partículas sólidas do ar (etapa 7).

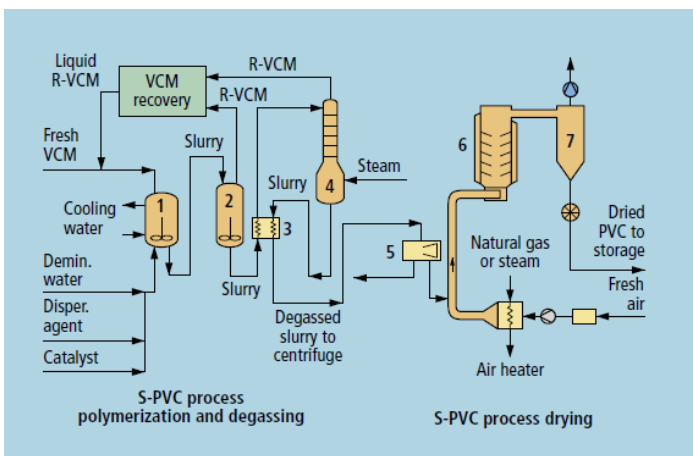


Figura 26 – Tecnologia Uhde GmbH para Produção de PVC

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

As demandas térmicas do processo se dão essencialmente na polimerização, separação, destilação, nos tanques de mistura e secagem. A demanda elétrica se dá para acionamento dos agitadores dos tanques de mistura, centrífugas, separadores e peletização. (BAJAY et al., 2010). Os consumos específicos térmico e elétrico para esse processo, segundo a literatura consultada, são listados na Tabela 51.

Tabela 51 – Consumo Energético Específico do Processo de PVC

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	2,05	0,60	2,65
SAYGIN et al., 2011	2	-	2
NEELIS et al., 2008	-	-	3,4
IEA, 2007	-	-	3,8
WORRELL et al., 2000	-	-	11,6

Fonte: Elaboração própria a partir de WORRELL et al., 2000; NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011; IEA, 2007

De acordo com Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 52.

Tabela 52 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Policloreto de Vinila no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Vapor de Processo	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	1.387.446	404.925	1.792.371

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

Para obtenção do politereftalato de etileno (PET) pode-se utilizar ácido tereftálico ou dimetil tereftalato, além de dióis como o etileno glicol, e a reação se dá em uma sequência de reatores em cascata. Primeiramente, um reator de esterificação é alimentado com uma lama de reagentes, ocorrendo em si a reação principal a elevadas temperaturas (200°C-270°C) e pressão. Vapores de reação – água e metanol – são levados para uma coluna de separação e a corrente de topo é reutilizada no reator principal.

O oligômero é levado ao segundo reator em cascata (etapa 2), que opera em agitação, pressão mais baixa e temperatura mais alta, de forma a dar continuidade a maximizar a conversão da reação. Os vapores de reação seguem para uma coluna de processo (etapa 5), enquanto os oligômeros são pré-polymerizados em um terceiro reator em cascata a pressão subatmosférica e temperatura aumentada, de forma a aumentar o grau de policondensação. A policondensação final é realizada no quarto reator, do tipo finalizador (etapa 4). A peletização ou a conversão fluida direta é convencional (Figura 27).

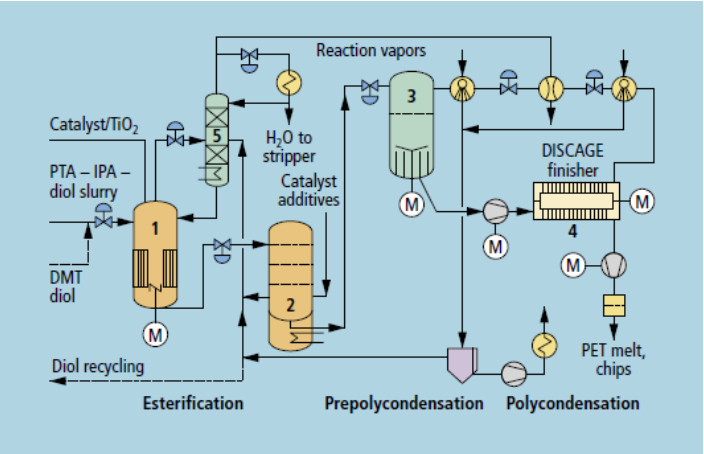


Figura 27 – Tecnologia Uhde-Inventa Fischer para Produção de Poliéster

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

Segundo Bajay et al. (2010), a produção de PET é energointensiva devido à alta pressão utilizada no bombeamento do efluente do reator para as extrusoras para a produção de fibras de poliéster. Nessa etapa, a temperatura do polímero deve ser mantida alta para manutenção da viscosidade adequada. A demanda de energia elétrica advém principalmente das operações de bombeamento, filtração e cristalização, além do acionamento das máquinas de corte e sopro de ar quando se produzem fibras. A Tabela 53 lista os consumos energéticos específicos disponíveis na literatura para esse processo.

Tabela 53 – Consumo Energético Específico do Processo de PET

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	23,07	2,38	25,45
SAYGIN et al., 2011	-	-	4,9
EC, 2007	-	-	2,5-18,5 ¹

¹ O consumo energético mais alto se refere à produção de PET de alta viscosidade.

Fonte: Elaboração própria a partir de EC, 2007; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011

Conforme Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 54.

Tabela 54 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de PET no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	5.042.404	520.612	5.563.016

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

O poliestireno (PS) pode ser obtido por meio da polimerização do monômero estireno em processo via suspensão, semelhante ao utilizado para o PVC. Entretanto, o processo predominante é a polimerização contínua em massa, em que um diluente (geralmente etilbenzeno) é misturado ao monômero para reduzir sua viscosidade e permitir a ação de iniciadores, finalizadores e outros aditivos, bem como para permitir sua passagem pelos múltiplos reatores em série, continuamente resfriados para manter um meio reacional altamente exotérmico entre 120°C e 220°C (CEPED, 2004).

Poliestireno de uso geral e de alto impacto pode ser produzido pela tecnologia licenciada pela ABB Lummus Global e BP Chemicals (Figura 28). Nesse processo, borracha moída e aditivos são dissolvidos no monômero de estireno (etapa 1) e transferidos para um tanque de estocagem (etapa 2) para a obtenção de PS de alto impacto. Caso se queira somente PS de uso geral, os insumos podem ser alimentados diretamente ao preaquecedor (etapa 3). Após o preaquecimento, a mistura segue para um pré-polimerizador (etapa 4), onde a morfologia da borracha é estabilizada. Em seguida, a mistura polimérica é bombeada para o reator de polimerização (etapa 5). Na saída do reator, a polimerização está praticamente completa, e a mistura segue para preaquecimento (etapa 6) e preparação para a devolatilização (etapa 7).

A devolatilização é conduzida em vácuo para remoção de monômeros e solventes. O monômero é recuperado por destilação (etapa 8) e reciclado de volta ao pré-polimerizador. O polímero fundido é bombeado para a etapa 9 (*die head*), para o banho de água (etapa 10) para resfriamento e para o peletizador.

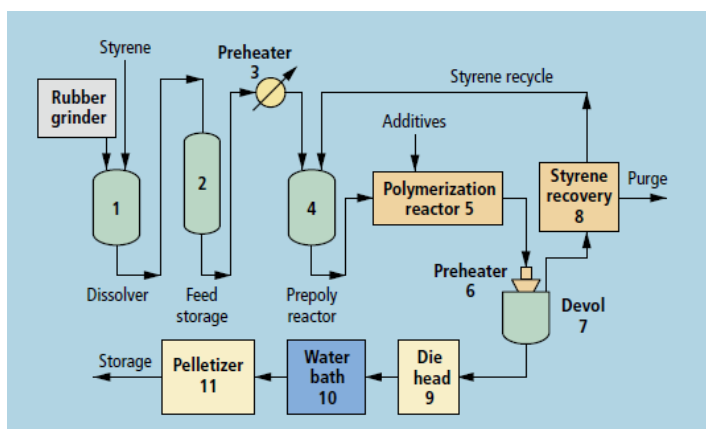


Figura 28 – Tecnologia ABB Lummus/BP Chemicals para Produção de Poliestireno

Fonte: THYSSENKRUP, 2010

Nesse processo, a necessidade de calor para preaquecimento e as etapas que demandam pressões elevadas e calor (como a destilação) são energointensivas.

A demanda de energia térmica se dá, principalmente, devido à necessidade de aquecimento de óleo usado nas operações de transferência de calor durante o processo, além da formação de vapor de processo. O consumo elétrico é bem inferior ao consumo térmico no processo e se deve à extrusão e ao acabamento final do produto (BAJAY et al., 2010). A Tabela 55 lista os consumos energéticos específicos para o processo, segundo a literatura consultada.

Tabela 55 – Consumo Energético Específico do Processo de Poliestireno

Consumo específico (GJ/t)	Energia Térmica	Energia Elétrica	Total
BAJAY et al., 2010	0,5	0,20	0,70
SAYGIN et al., 2011	0,5	-	0,5
NEELIS et al., 2008	-	-	5,3

Fonte: Elaboração própria a partir de NEELIS et al., 2008; BAJAY et al., 2010; SAYGIN et al., 2011

De acordo com Bajay et al. (2010), o consumo energético por utilidade dessa indústria, no ano de 2006, consta na Tabela 56.

Tabela 56 – Consumo Energético por Utilidade na Produção de Poliestireno no Brasil em 2006

Consumo energético por utilidade	Energia Térmica	Eletricidade	Total
	Aquecimento Direto	Força Motriz	
Consumo de energia (GJ)	181.339	72.561	253.900

Fonte: Elaboração própria a partir de BAJAY et al., 2010

1.1.4 SÍNTESE DOS PROCESSOS PRODUTIVOS

A partir das descrições dos processos e consumos energéticos específicos, é possível identificar os produtos mais energointensivos e que, por isso, requerem maior atenção ao se avaliar o potencial de abatimento de emissões.

É possível também, por meio do conhecimento do processo produtivo, identificar quais as etapas mais demandam energia em cada processo e, assim, focar nessas etapas ao se avaliarem formas de reduzir as emissões de GEE no âmbito do cenário BC.

O Quadro 3 resume o trabalho feito neste capítulo em termos de mapeamento de consumo energético, listando as etapas mais energointensivas em cada processo descrito e como a energia é demandada.

Quadro 3 – Consumo Energético Representativo na Indústria Química por Produtos, Etapas e Tecnologias

Segmentos/Produtos		Etapas do processo produtivo	Tecnologias por fontes de energia									
			Combustíveis				RC	Eletricidade				
			FC	FE	VC	VE		MC	ME	MR	EE	
Petroquímicos	Eteno, Propeno ¹ , Butadieno, BTX	Craqueamento a vapor (nafta)		X		X	X			X		
		Destilação extrativa	X									
	Metanol	Reforma a vapor				X	X					
	MVC (cloreto de vinila)	Craqueamento de EDC	X									
	DCE (1,2-dicloroetano)	Unidade de separação de ar	X		X		X		X			
		Destilação										
	Estireno	Calor para desidrogenação	X			X			X			
	Formaldeído (37%)	Reator catalítico				X	X		X			
	TPA (ácido tereftálico)	Compressão	X						X			
		Hidrogenação										
	Óxido de etileno	Destilação e esgotamento			X				X			
	Etileno glicol	Evaporador			X				X			
		Separação (destilação a vácuo)										
	SBR (resina de estireno butadieno)	Pressurização de reagentes										
		Geração de vapor			X				X	X	X	
		Resfriamento										
		Separação/destilação de emulsão			X				X			
	PE (polietileno) ² PP (polipropileno)	Pressurização								X		
		Aquecimento	X		X							
		Resfriamento do reator							X			
		Purificação/separação			X				X			
		Extrusão			X				X			
	PVC (policloreto de vinila)	Preaquecimento			X				X			
	PET (politereftalato de etileno)	Purificação/separação			X				X	X		
	PS (poliestireno)	Extrusão/resfriamento							X			
Fertilizantes e seus intermediários	Amônia	Reformador primário				X						
		Preaquecimento do metano				X						
		Coluna de Absorção de CO ₂								X		
		Compressores							X			
		Resfriamento da amônia									X	
	Ácido nítrico	Compressão de ar							X			
		Preaquecimento	X									
		Reator		X								
		Separação					X	X				
	Ácido sulfúrico	Fusão do S e compressão de ar		X								
		Resfriamento e secagem								X		
		Caldeira de recuperação					X					
	Ácido fosfórico	Coluna de evaporação			X							
		Moagem da rocha							X			
	MAP/DAP (fosfatos de amônio)	Misturador (neutralização)							X			
		Secador	X						X			
		Purificação							X			
	Ureia	Síntese de ureia			X							
	Sais de amônio (nitrato e sulfato)	Separação/Secagem			X				X			
Cloro álcalis	Cloro ³ Soda cáustica Ácido clorídrico Hipoclorito de sódio DCE (1,2-dicloroetano) MVC (cloreto de vinila) Potassa cáustica Clorato de Sódio Dióxido de cloro	Retificação de corrente									X	
		Preparação da salmoura			X							X
		Célula eletrolítica										X
		Concentração			X				X			
		Resfriamento/secagem							X			
		Compressão							X			
		Resfriamento do H ₂									X	

¹ Grau polímero e grau químico

² Alta densidade, baixa densidade e linear de baixa densidade (PEAD, PEBD, PELBD)

³ Os indicadores disponíveis referem-se ao consumo global da cadeia de cloro álcalis pela produção de cloro

Legenda:

FE: aquecimento direto de vazo/câmara construída especificamente p/ o processo

VE: geração de vapor em pressões muito elevadas e/ou utilizado in vivo

RC: recuperação de calor em grande escala e "compulsória"

ME: motobomba ou motocompressor especificamente projetado p/ o processo

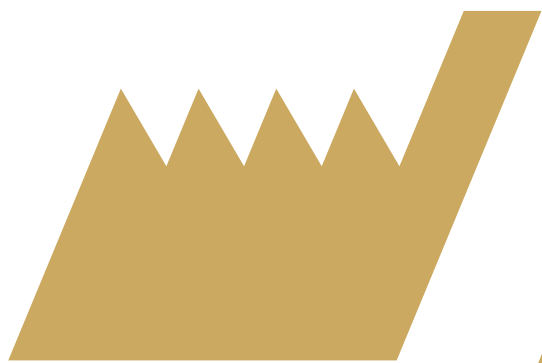
FC: fornos/fornalhas convencionais

VC: sistema de vapor convencional

MC: acionamento mecânico para dispositivos convencionais

MR: acionamento mecânico para sistemas de refrigeração convencionais

EE: uso não mecânico da eletricidade, diretamente relacionado ao processo



Melhores tecnologias disponíveis aplicáveis aos processos produtivos do setor

Capítulo

2

2 MELHORES TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS APLICÁVEIS AOS PROCESSOS PRODUTIVOS DO SETOR

A seguir são relacionadas melhores práticas e tecnologias disponíveis (MTD) para aplicação na indústria química visando a eficiência energética e/ou mitigação de emissões de GEE.

As MTD são classificadas em medidas transversais, que se aplicam a todas as cadeias do setor químico, e específicas:

a) Medidas transversais:

- Equipamentos convencionais: substituição de equipamentos convencionais por unidades mais eficientes ou intervenções para melhoria da eficiência (*retrofit*). Para o primeiro caso, exemplos clássicos são a troca de motores elétricos convencionais pelos de alto rendimento (MC, MR) e a substituição de uma caldeira antiga por uma de alta eficiência (VC). Para o segundo caso, é comum o *retrofit* de sistemas de refrigeração (MR) e a melhoria do isolamento térmico em fornos e tubulações;
- Fluxo: refere-se a medidas de otimização energética em uma planta por meio de intervenções nos fluxos de transporte de massa e energia entre os equipamentos. Exemplos comuns são a recuperação de calor de gases exaustos para preaquecimento (matéria-prima, combustível, ar de combustão, água de reposição etc.) e o aproveitamento da diferença de temperatura entre os fluxos para esfriá-los ou aquecê-los de forma passiva (*pinch*);
- Operação: consiste na interferência em parâmetros operacionais de equipamentos/processos ou tempos e movimentos dos insumos e pessoal. Essa categoria inclui, por exemplo, medidas para redução das perdas de produção (automação e controle, aditivos na matéria-prima etc.), monitoramento e ajuste inteligente de queimadores, redução da capacidade ociosa, entre outras.

b) Medidas específicas:

- Equipamentos: trata da intervenção profunda no processo produtivo, associada à substituição ou melhoria (*retrofit*) de equipamentos-chave, como fornos especificamente projetados e reatores (FE, EE), motobombas, motocompressores e sistemas de geração de vapor altamente especializados (ME, VE);
- Processo: abrange a alteração da rota tecnológica por uma com menor consumo específico de energia, modificando algumas reações químicas e/ou a matéria-prima.

A seguir, as medidas serão descritas qualitativamente, de acordo com a subdivisão acima. Optou-se por listar o potencial relativo de economia de energia, e não o potencial de mitigação, porque as emissões a serem abatidas com as medidas dependem do combustível a ser utilizado e economizado, principalmente no que tange às medidas de mitigação transversais. Dessa forma, o potencial de

abatimento varia em cada planta e só poderia ser medido ao se analisar especificamente cada caso de acordo com a caracterização do setor e a aplicabilidade das medidas no Brasil.

2.1 MEDIDAS TRANSVERSAIS

Em estudo realizado em 2005, Worrell et al., 2009 afirmam que, de modo geral, os processos industriais consomem pelo menos 50% mais energia que a teoricamente necessária. Isso significa que há ampla possibilidade de aumentar a eficiência dos processos, mesmo em um parque industrial moderno como o da indústria química brasileira.

As medidas citadas neste capítulo são aplicáveis, de forma geral, ao setor industrial de química como um todo. São apresentadas apenas aquelas que se mostram mais promissoras em termos da frequência de sua aplicabilidade e da magnitude relativa do ganho energético proporcionado, seja pelo que é apontado na literatura, seja pela experiência dos autores. É importante, entretanto, enfatizar que o setor químico em geral, mas em especial o grupo de segmentos selecionado, é muito organizado em termos de planejamento técnico e de gestão, sendo esperado que, em grande parte, tais medidas transversais já tenham sido aplicadas ou pelo menos avaliadas.

2.1.1 MONITORAMENTO, CONTROLE E GERENCIAMENTO ENERGÉTICO

Fonte/categoria: combustíveis/operacional

Aplicabilidade no Brasil: já é/foi adotada, em maior ou menor grau, em diversas indústrias químicas, mas ainda há ampla oportunidade, principalmente no tocante a implementação de metodologias de gestão para melhoria contínua.

Objetivo específico: usar combinação de sensores, microcontroladores, *hardware* e *software* de gerenciamento para garantir a operação eficiente de equipamentos individuais e da planta em geral.

Descrição técnica: o consumo de energia não costuma ser uma prioridade na maioria das indústrias. Pode-se, entretanto, considerar que, pelo seu nível de organização e necessidade inerente de controle das condições de processo, a indústria química é uma exceção. Ainda assim, há bastante espaço para ganhos com o monitoramento específico do desempenho energético (MARTIN et al., 2000, ISU-CIRAS, 2005):

- Controle do excesso de ar em queimadores (perdas na exaustão, relação ar/combustível no queimador), resultam em até 8% de economia;
- Ganhos de 10% em economia de energia em face do monitoramento e manutenção de caldeiras (NEELIS et al., 2008);
- Otimização energética por meio da adoção de pré-reformador na produção de amônia e metanol, que reduz o consumo de combustível no reformador entre 8-12%;
- Temperatura na parede de áreas termicamente isoladas (perdas para o ambiente);

- Capacidade ociosa de equipamentos (otimização da operação);
- Sub ou sobrecarregamento de motores elétricos;
- Controle da infiltração de ar em fornos e fornalhas;
- Recuperação de hidrogênio na produção de amônia e metanol, que resultam em redução de até 8% no consumo de energia;
- Manutenção adequada dos equipamentos, tal qual fornos, podem resultar em 2%-10% de economia (NEELIS et al., 2008);
- Dimensionamento adequado de motores levam a 1,2% de redução no consumo de eletricidade, em média, para motores em geral. Pode chegar a 25% no caso de bombas (NEELIS et al., 2008);
- Limpeza e conservação das superfícies de troca térmica levam a redução de depósitos em trocadores de calor, diminuindo em 2% o consumo de energia;
- Reciclo de condensado em caldeiras, diminuindo o consumo de combustível em aproximadamente 10%;
- Eliminação de vazamentos em linhas de vapor, retorno de condensado e ar comprimido;
- Otimização de transformadores e sistemas de distribuição de energia elétrica, medida relatada por Tian et al. (2012) como particularmente importante para indústrias de química fina.

A gestão de energia compreende grande variedade de medidas, como reconhecimento da importância da gestão de energia, planejamento, monitoramento e implementação de estratégias de controle ótimo. Geralmente, os custos são baixos.

Neelis et al. (2008) relatam que um programa de gerenciamento da energia pode ser bem-sucedido uma vez delegando-se para um diretor de energia funções específicas de gerenciamento, estabelecendo-se uma política energética a ser seguida pela empresa e criando-se uma equipe de energia multifuncional para que, dessa forma, etapas e procedimentos de avaliação de performance sejam executados regularmente. Tal avaliação pode se dar por meio de análise de informações sobre consumo energético e comparação com melhores práticas (*benchmarking*) para que, a partir dos resultados, seja possível estabelecer uma referência para o uso da energia, bem como um plano de ação para o cumprimento de metas de aprimoramento.

Potencial de redução: 3% a 20% da energia total (MARTIN et al., 2000; ISU-CIRAS, 2005; NEELIS et al., 2008).

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos.

2.1.2 RECUPERAÇÃO DE CALOR PARA O SISTEMA DE VAPOR EM CALDEIRAS

Fonte/categoria: combustíveis/fluxos

Aplicabilidade no Brasil: já é/foi adotada amplamente em diversas indústrias químicas.

Objetivo específico: reduzir a demanda de combustível para a geração de vapor a partir do aproveitamento de correntes de processo a alta temperatura. Em alguns processos, tal aproveitamento

está previsto nas especificações da planta/processo.¹¹ Essa medida não se aplica a esses casos, a não ser que seja possível ampliar a recuperação de calor original.

Descrição técnica: o calor dos gases exaustos da combustão pode ser aproveitado para preaquecer a água a ser alimentada à caldeira. É uma medida de eficiência bem comum, porém Neelis et al. (2008) afirmam que ainda há potencial de implementação. A maior limitação nesse caso é a temperatura das paredes do trocador de calor, que não deve ser superior ao ponto de orvalho dos ácidos contidos nos gases de exaustão para evitar a corrosão.

O propósito desses trocadores de calor (*economizers*) é reduzir a temperatura dos gases de combustão que deixam a zona de superaquecimento da caldeira, o que aumenta sua eficiência. Esses economizadores são localizados a jusante da zona de superaquecimento, no canal dos gases de exaustão, de forma que estes sejam resfriados pela água de alimentação da caldeira que, dessa forma, é preaquecida. O preaquecimento é feito até a temperatura de saturação da água, de forma que não haja ebulição antes da entrada no evaporador.

Outra forma de preaquecer a água de alimentação da caldeira é utilizando o vapor produzido devido à queda de pressão quando a água é purgada do tanque de alta pressão. Esse vapor é de baixa qualidade, mas pode ser aproveitado para esse fim.

Potencial de redução: 1,0% a 1,3% do consumo de combustível total.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: eteno, propeno, butadieno, BTX, metanol e quaisquer produtos que demandem vapor no processo produtivo.

2.1.3 INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS COM ANÁLISE *PINCH*

Fonte/categoria: combustíveis/fluxos

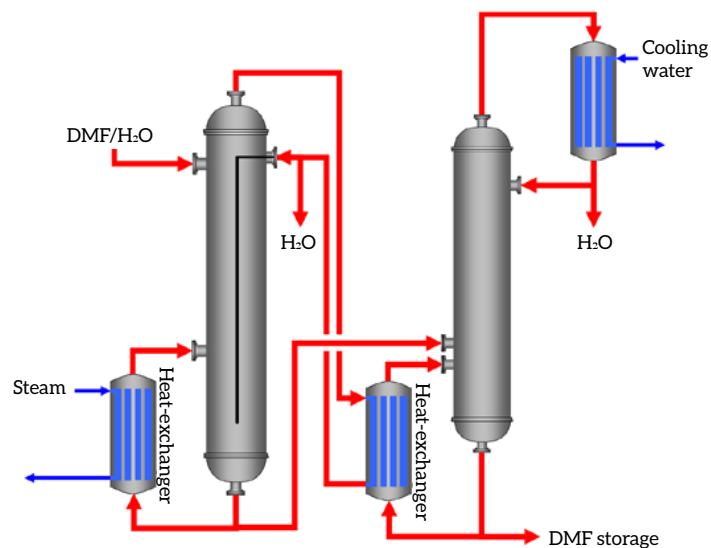
Aplicabilidade no Brasil: já é/foi adotada amplamente em diversas indústrias químicas.

Objetivo específico: explorar as potenciais sinergias inerentes a determinado sistema composto por correntes frias e quentes de processo.

Descrição técnica: a metodologia de análise *pinch* consiste em integrar correntes frias e quentes de processo de forma termodinamicamente ideal. Por meio de abordagem sistemática, identificam-se e corrigem-se os limites de performance do processo produtivo, de forma que se atinjam as exigências operacionais do processo com o mínimo consumo de energia. Dessa forma, os trocadores de calor do processo são corretamente dimensionados e aproveitam ao máximo a energia disponível nas correntes de processo (EBRAHIM; KAWARI, 2000).

11 Classificado com RC (recuperação de calor) na segmentação tecnológica dos processos (capítulo 1).

Um exemplo, mostrado na Figura 29, é o acoplamento das duas etapas da destilação da dimetil formamida. Não se trata do emprego clássico da análise *pinch*, mas de uma integração de processos mais arrojada.



Fonte: EC, 2006

Aplicável na produção dos seguintes produtos: eteno, propeno, butadieno, BTX, metanol, estireno, amônia.

Fonte/categoria: combustíveis/fluxos

81 ///

Objetivo específico: reduzir a demanda de combustível para aquecimento por meio do aproveitamento do calor residual de fornos e fornalhas.

Descrição técnica: a medida é semelhante ao seu equivalente para sistemas de produção de vapor, mas a opção de preaquecimento da água de reposição não mais existe, sendo substituída por secagem e/ou preaquecimento de materiais diversos, incluindo a própria carga admitida ao forno (ISU-CIRAS, 2005).

Potencial de redução: até 10% do consumo de combustível do equipamento. ISU-CIRAS (2005) aponta 10%-25% de economia, o que é incompatível com os segmentos selecionados da indústria química.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos os processos nos quais um forno/fornalha convencional (FC) é usado.

2.1.5 COGERAÇÃO (COMBINED HEAT AND POWER – CHP)

Fonte/categoria: combustíveis/fluxos e equipamentos convencionais

Aplicabilidade no Brasil: já é adotada em, relativamente, poucas indústrias químicas, como a GPC (metanol), segundo Schaeffer et al. (2011). Atualmente, a adoção não é economicamente favorável na maioria dos casos em que é tecnicamente interessante, em especial quando não há calor/combustível residual a ser usado diretamente para cogeração.

Objetivo específico: melhorar a eficiência energética na indústria por meio da geração combinada de calor e eletricidade.

Descrição técnica: onde calor ou vapor de processo, refrigeração e eletricidade são utilizados, plantas de cogeração se mostram mais eficientes do que plantas de geração normais por utilizarem o calor perdido de processo. A cogeração permite o uso de combustíveis gerados ao longo do processo para a produção de energia elétrica, reduzindo os custos de aquisição de eletricidade. Em alguns casos, é possível, inclusive, gerar energia elétrica em quantidades superiores à demanda interna da unidade industrial, levando a receitas por exportação ao *grid*.

A cogeração ainda pode ser otimizada ou tornar-se viável em plantas com demanda de calor variável, adotando-se turbinas a gás mais inovadoras, como as do tipo STIG e de expansão: as turbinas STIG podem absorver vapor em excesso no processo, aumentando o rendimento em energia elétrica. Justamente por isso são convenientes em processos com demanda intermitente de calor, em que não há gás combustível residual em regime constante. As turbinas de expansão são capazes de recuperar a energia perdida quando o vapor sofre redução de pressão para ser utilizado em diferentes pontos da planta. Outra opção ainda é a cogeração de alta temperatura (HTCHP). Nesse caso, toda a carga térmica exigida em um forno é garantida por uma planta de cogeração, podendo, inclusive, substituir fornos existentes. A justificativa é que a transferência de calor por radiação do exausto da turbina é muito maior que os gases exaustos da combustão devido à menor temperatura (NEELIS et al., 2008).

Potencial de redução: depende do dimensionamento da planta de cogeração. Pode suprir até 100% da demanda de eletricidade de uma unidade industrial. Nos casos em que não há calor/combustível residual disponível, haverá aumento do consumo de combustíveis.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: metanol, DCE, estireno, formaldeído, óxido de etileno, etileno glicol, amônia, visto que os processos para esses produtos geram calor residual, o qual pode estar disponível para cogeração.

2.1.6 REDUÇÃO DA TEMPERATURA DE ENTRADA DE COMPRESSORES

Fonte/categoria: eletricidade/operacional

Aplicabilidade no Brasil: já é/foi adotada amplamente em diversas indústrias químicas.

Objetivo específico: aumentar a eficiência de compressão de ar.

Descrição técnica: a redução da temperatura de entrada de compressores reduz o consumo energético, pois, a temperaturas menores, a densidade do ar é maior e, assim, a massa aspirada pelo compressor por unidade de tempo aumenta. Pode-se reduzir a temperatura de entrada do ar em compressores apenas pela mistura de ar da atmosfera, succionado do ambiente externo para o sistema de compressão.

Potencial de redução: Neelis et al. (2008) sugerem que, para cada 3°C de redução de temperatura de entrada, 1% do consumo energético do compressor é economizado.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: óxido de etileno, ácido tereftálico, SBR, PE, PP, cloro e ácido nítrico.

2.1.7 SUBSTITUIÇÃO POR MOTORES ELÉTRICOS MAIS EFICIENTES

Fonte/Categoria: eletricidade/equipamento convencional

Aplicabilidade no Brasil: já é/foi adotada amplamente em diversas indústrias químicas.

Objetivo específico: reduzir o consumo de eletricidade por meio da substituição direta de um motor elétrico convencional por um equipamento de alto rendimento.

Descrição técnica: o motor elétrico de alto rendimento produz a mesma potência mecânica de saída do motor *standard* com menor potência elétrica absorvida, resultando na redução do custo de operação e no aumento da vida útil. Esse melhor desempenho é conseguido em função das características técnicas diferenciadas (SCHNEIDER, 2011; SIEMENS, 2005; WORRELL et al., 2009):

- Maior quantidade de cobre, que reduz as perdas por efeito Joule (perdas no estator);

- Chapa magnética com baixas perdas, a qual reduz a corrente magnetizante e, conseqüentemente, as perdas no ferro;
- Enrolamento em dupla camada, resultando em melhor dissipação de calor;
- Redução das tolerâncias, maior precisão construtiva e tratamento térmico dos rotores, para reduzir o desgaste, atrito entre as partes móveis e alterações do desempenho ao longo do tempo;
- Menor região de entreferro, que reduz as perdas suplementares;
- Redução do atrito com o ar por meio de melhorias aerodinâmicas no rotor e, principalmente, na ventoinha.

Tal medida será mais comumente aplicada a sistemas motrizes convencionais (MC e MR) relativamente antigos, pois aqueles com menos de dez anos, muito provavelmente, já empregam motores de alto rendimento.

Os sistemas motrizes especiais (ME) também podem beneficiar-se da medida, apesar de ser menos comum, seja porque a curva de carga do motor é diferenciada, seja porque os parâmetros operacionais e construtivos são muito específicos, seja porque seu porte muito elevado não permite encontrar equivalente de alto rendimento no mercado. Frequentemente, seu fornecimento está vinculado ao detentor da tecnologia e pode não haver alternativas mais eficientes.

O uso de inversores de frequência, normalmente indicado para otimização da resposta do motor a uma carga variável (ver Otimização dos equipamentos acionados por motores), pode também ser empregado para reduzir o consumo de energia e tensão na partida do motor, além de ajustar a curva de rendimento do motor ao equipamento mecânico acionado (bomba, compressor etc.). Martin et al. (2000), entretanto, afirmam que os ganhos são pequenos para uma operação convencional de motores (menos de dois pontos percentuais no rendimento).

Deve-se estudar ainda a opção pelos motores de indução de relutância variável (*switched reluctance*) quando for exigida a operação em velocidade variável com torque elevado, pois estes se mostram mais adequados e/ou eficientes em várias situações (MARTIN et al., 2000; AHN, 2011).

Potencial de redução: 1% a 4% do consumo de eletricidade para acionamento mecânico, ou cerca de 0,5% a 2,5% do consumo total de eletricidade.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos.

2.1.8 OTIMIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS ACIONADOS POR MOTORES

Fonte/categoria: eletricidade/equipamentos convencionais

Aplicabilidade no Brasil: já é/foi adotada na indústria química. Acredita-se existir amplo campo de aplicação dado o grau de complexidade e especificidade dessa medida.

Objetivo específico: reduzir a potência mecânica requerida nos sistemas motrizes (bombas, compressores, recirculadores, esteiras rolantes etc.), permitindo o uso de motores elétricos de menor potência.

Descrição técnica: conforme Worrell et al. (2009), trata-se de atuar nos componentes que são acionados pelos motores elétricos, reduzindo as perdas mecânicas ou mesmo a demanda total de energia. A natureza das alterações depende do dispositivo mecânico acionado, sendo possível citar:

- Na transmissão mecânica, a melhoria na lubrificação (óleo sintético especializado), bem como a substituição por uma mais moderna ou mesmo troca do sistema por um conjunto motor com inversor de frequência;
- Troca da bomba por equipamento com melhor projeto hidrodinâmico ou com menos tolerâncias construtivas. No caso de instalações antigas, é viável a substituição de bombas de deslocamento positivo, como alternativas (alta pressão) e diafragma (fluidos viscosos e suspensão de sólidos), por uma bomba centrífuga equivalente (WORRELL et al., 2009; GANGHIS, 2000);
- Remoção de válvula/damper para controle de fluxo de um fluido pressurizado por meio da instalação de inversor de frequência (COPEL, 2005);
- O dimensionamento adequado das tubulações pode proporcionar até 3% de redução do consumo de energia elétrica nas bombas (NEELIS et al., 2008).

O uso de inversores de frequência para controlar a velocidade do motor tem potencial de redução de 7% a 60% do consumo de eletricidade (NEELIS et al., 2008). Os sistemas motrizes especiais (ME) também podem beneficiar-se dessa medida, mas isso é incomum, visto que implica alterar equipamentos que afetam diretamente o processo e a produtividade da planta. Quando se opta por esse caminho, normalmente, o aumento da eficiência energética, quando ocorre, é apenas um efeito adicional desejável, tendo as motivações sido de outra natureza.

Potencial de redução: até 30% do consumo de eletricidade no equipamento, ou 19% do consumo total de eletricidade da planta.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos.

2.1.9 EMPREGO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Fonte/categoria: combustíveis e eletricidade/processo

Aplicabilidade no Brasil: ampla, mas no longo prazo, pois depende de pesquisa e desenvolvimento (P&D). No mundo inteiro, a situação é a seguinte:

- Diversos segmentos utilizam alguma etapa de separação;
- Muitas dessas etapas de separação, particularmente quando se trata de extração por solventes, podem tecnicamente ser realizadas com menor custo energético, usando uma membrana de adsorção, mas esta precisa ser desenvolvida caso a caso;
- Atualmente, apenas dois processos específicos de separação por membranas são empregados comercialmente em grande escala: tratamento de água e separação metanol/água.

Objetivo específico: substituir ou aprimorar processos tradicionais de separação pelo uso de membranas (peneiras moleculares).

Descrição técnica: uma das operações unitárias mais intensivas em energia na indústria química é a separação. Quando a destilação ou condensação fracionada atinge seu limite (mistura azeotrópica), costuma-se empregar em seguida a extração por solventes em fase líquida, muitas vezes levada a cabo em condições extremas para liquefazer a mistura e obter a solubilidade desejada, consumindo eletricidade (pressurização, evacuação, refrigeração) e/ou combustíveis (aquecimento).

Membranas adsorventes oferecem alternativa menos energointensiva à extração líquido-líquido, complementando e, mais raro, substituindo a destilação. Essa tecnologia pode ser conduzida em fase gasosa ou líquida (remoção de álcool isopropílico de uma solução aquosa), sendo necessário o uso de materiais específicos para os componentes presentes na mistura, o que demanda intensa P&D para cada caso particular de aplicação (MARTIN et al., 2000).

Com base nas peneiras moleculares, uma das barreiras tecnológicas enfrentadas para sua ampla disseminação é o aumento no custo operacional em função da necessidade de troca frequente, pois a capacidade adsorvente das membranas tende a reduzir rapidamente com o uso continuado, ou mesmo inativar-se em função de impurezas como enxofre e compostos sulfurados. Sua penetração tem sido lenta, mas progressiva.

Potencial de redução: entre 10% (fase gasosa) e 60% (fase líquida) do consumo de energia da etapa de separação.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: aplicável no longo prazo a todos os processos de separação por extração com solventes.

2.1.10 CONTROLE DIGITAL E GERENCIAMENTO DE COMPRESSORES DE AR

Fonte/categoria: eletricidade/operacional

Aplicabilidade no Brasil: alta. Não está tão difundida, pois envolve não apenas eletrônica (sensores, atuadores, controle), mas frequentemente também a alteração das linhas de ar comprimido e mesmo de compressores.

Objetivo específico: reduzir o consumo de energia em sistemas de ar comprimido.

Descrição técnica: permite faixas de controle muito mais estreitas, bem como menor pressão no sistema, beneficiando principalmente sistemas com múltiplos compressores, os quais são controlados individualmente e ajustados via processamento dos dados obtidos da rede de controladores.

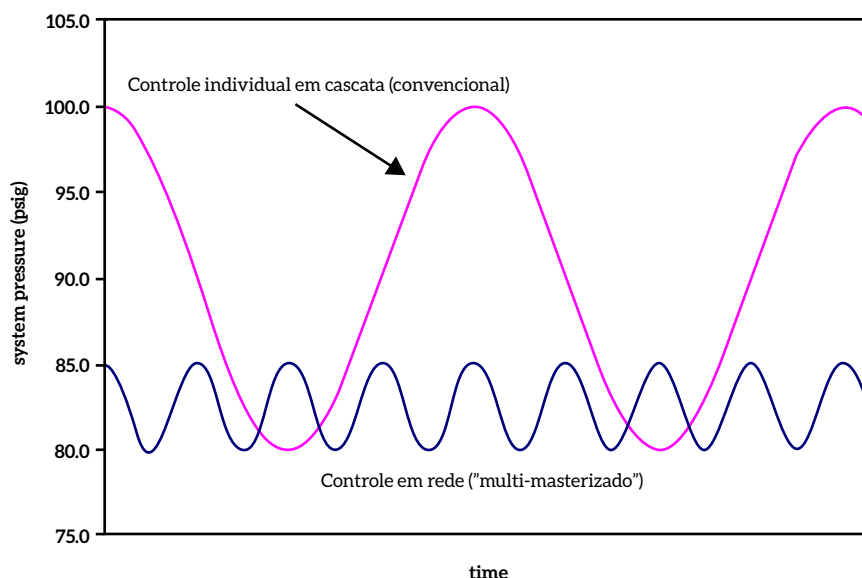


Figura 30 – Diferença na Variação de Pressão Obtida com o Controle em Rede de Compressores

Fonte: MARTIN et al., 2000

A operação permite que os compressores trabalhem em sua condição de maior eficiência possível, dentro do regime operacional exigido da rede de compressores (MARTIN et al., 2000). Segundo Martin et al. (2000), para alcançar o pico de desempenho do sistema de ar comprimido, não basta ajustar todos os compressores para seu melhor desempenho. É necessário ajustar o desempenho dos componentes individuais, analisando oferta e demanda de ar comprimido, bem como a interação entre os componentes. Essa abordagem sistêmica desloca o foco de componentes para o desempenho do sistema. No nível do sistema, as oportunidades de economias resultam da minimização de vazamentos, usos inadequados e nível de pressão do sistema.

Potencial de redução: até 25% do consumo de eletricidade com ar comprimido.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos.

2.1.11 MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE MOTORES

Fonte/categoria: eletricidade/equipamento convencional

Aplicabilidade no Brasil: moderada. Em função de programas como o Procel Indústria e do surgimento de prestadores de serviço na área, já houve razoável penetração dessa medida.

Objetivo específico: monitorar e gerenciar a operação dos motores de uma planta, otimizando seu emprego.

Descrição técnica: durante a última década, novos dispositivos de diagnóstico foram introduzidos, tornando o diagnóstico de motores mais simples e rápido, para realizar testes que fazem uso de

sensores avançados *on-board* e *software* especializado a fim de determinar e comparar temperatura, tensão, corrente, harmônicas e densidade do fluxo. Esses dados permitem determinar eficiência, eficácia e detectar problemas antes de estes levarem a uma parada do equipamento (MARTIN et al., 2000).

Potencial de redução: pode variar entre 2% e 30% do uso de eletricidade em motores, e de 2%-7% em bombas. A manutenção de compressores de ar que apresentem vazamentos pode reduzir em 20% o consumo em sistemas de compressão (NEELIS et al., 2008; SCHAEFFER et al., 2011).

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos os produtos nos quais se empreguem motores para uso convencional (uso final de energia MC). Assume-se a premissa de que, dada sua natureza tecnológica e seu porte elevado, os motores especializados (ME) sejam constantemente monitorados e diagnosticados.

2.1.12 QUEIMADORES DE BAIXA EMISSÃO DE NO_x

Fonte/categoria: combustíveis/equipamento convencional

Aplicabilidade no Brasil: pequena, em função de o maior estímulo ser de natureza ambiental e, no momento, a legislação brasileira ser pouco restritiva. Segundo Schaeffer et al. (2011), a Lanxess, no estado do Rio de Janeiro, emprega esses queimadores.

Objetivo específico: muitos queimadores *low NO_x* disponíveis no mercado para atender exigências ambientais proporcionam condições mais eficientes para o equipamento térmico.

Descrição técnica: técnicas como combustão estagiada, melhorias na mistura ar-combustível (operação com baixíssimo excesso de ar) e recirculação parcial dos produtos da combustão (FGR), sozinhas ou em conjunto com o uso de regeneradores/recuperadores, foram desenvolvidas como resposta a restrições legais à emissão industrial de NO_x. Ainda que no Brasil tais restrições estejam limitadas à legislação ambiental de alguns estados, as indústrias podem se beneficiar da redução de custo e aumento da disponibilidade dessas tecnologias no mundo.

Potencial de redução: 3% do consumo de combustível dos queimadores substituídos.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos que utilizem fornos, fornalhas e caldeiras convencionais (FC, VC).

2.1.13 TRATAMENTO DE ÁGUA DE PROCESSO COM MEMBRANAS

Fonte/categoria: combustíveis/operacional

Aplicabilidade no Brasil: moderada.

Objetivo específico: substituir a destilação de água para processo pela purificação, empregando membranas (peneiras moleculares).

Descrição técnica: o processo de purificação é semelhante ao descrito em outras técnicas, usando membranas adsorventes. O consumo de energia elétrica é elevado em virtude da alta pressão requerida, mas não há consumo de combustíveis, podendo ser vantajoso para plantas com elevada demanda de água de processo (reagente ou solvente) que empregam destilação ou outros processos energointensivos.

Potencial de redução: 100% do consumo de combustível para purificação da água, mas eleva em até 1,5 vez o consumo de eletricidade. Os valores, entretanto, variam muito com a forma original de tratamento da água.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: processos como reforma com vapor e extração com água: eteno, propeno, butadieno, BTX, metanol, etilenoglicol, SBR, amônia.

2.1.14 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PROCESSOS INTEGRADOS

Fonte/categoria: combustíveis/operacional

Aplicabilidade no Brasil: alta.

Objetivo específico: obter de maneira não invasiva, mas abrangente e detalhada, dados diversos sobre os vários processos da planta industrial e da forma como estes interagem entre si, permitindo a otimização do uso de energia e matéria-prima.

Descrição técnica: diversas empresas no mundo e algumas no Brasil se especializaram no uso de *softwares* de CFD e CAE para criar modelos computacionais de equipamentos e processos térmicos ou químicos. Trata-se de recurso empregado com bastante frequência no setor para modelar reatores com o objetivo de otimizar a produção. A proposta é modelar como os diversos processos interagem entre si para otimizar o uso de energia.

Potencial de redução: até 5% da energia total (ISU-CIRAS, 2005).

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos.

2.1.15 MAIOR USO DE GÁS NATURAL E BIOMASSA EM CALDEIRAS E FORNOS

Fonte/categoria: combustíveis/operacional

Aplicabilidade no Brasil: alta.

Objetivo específico: substituir combustíveis com maior intensidade de carbono por gás natural e biomassa.

Descrição técnica: consiste na substituição de combustíveis com maior fator de emissão por gás natural e biomassa em caldeiras e fornos. Tem-se mitigação de emissões, embora possa aumentar o consumo de energia em massa, tendo em vista a menor densidade energética da biomassa perante combustíveis fósseis.

Potencial de redução: entre 15-50% nas emissões totais em caldeiras e fornos.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: todos.

2.2 MEDIDAS ESPECÍFICAS

2.2.1 NOVOS CATALISADORES

Fonte/categoria: combustíveis/equipamento-chave

Aplicabilidade no Brasil: moderada. A pesquisa de novos catalisadores é contínua e intensa no Brasil e no mundo, mas é esparsa o surgimento daqueles que motivam o deslocamento dos tradicionalmente empregados. Na produção em grande escala, geralmente, não basta trocar o catalisador, sendo necessário alterar profundamente ou substituir o reator ou mesmo o processo.

Objetivo específico: aumentar a taxa de conversão e/ou seletividade das reações químicas, reduzindo indiretamente o consumo específico de energia.

Descrição técnica: em um parque químico moderno como o brasileiro, cerca de 80% da produção total depende de catalisadores para manter sua competitividade, como aponta Martin et al. (2000) especificamente para os EUA. O mesmo autor destaca a especificidade ao segmento e a imprevisibilidade dos ganhos a serem obtidos pelo avanço na tecnologia de catalisadores, boa parte na direção dos materiais nanoestruturados. Fornece como exemplo os 20% de redução no consumo de energia térmica que devem ser obtidos pelos novos processos de produção de eteno durante os próximos anos, como apontado por resultados de P&D obtidos na última década do século XX. Conforme o caso, pode tratar-se de tecnologia de ponta ou a substituição de um processo catalítico ultrapassado por uma tecnologia já bem difundida em plantas com menos de dez anos.

Potencial de redução: Cerca de 20% do consumo de energia total (eletricidade e combustíveis) para a produção de eteno, segundo Martin et al. (2000), e 6% utilizando, na produção de amônia, a tecnologia da KBR (KAAP) no lugar do catalisador de ferro (RAFIQUL et al., 2005).

Aplicável na produção dos seguintes produtos: quase todos, com maior significância na petroquímica básica e amônia.

2.2.2 RECICLAGEM DE PLÁSTICOS

Fonte/categoria: combustíveis e eletricidade/processo

Aplicabilidade no Brasil: pequena, em função de já estar bem difundida, para PET e PEAD, e ampla para PP, PE.

Objetivo específico: reciclar materiais plásticos para evitar o gasto de energia da produção de produto novo.

Descrição técnica: apesar da evidente redução no consumo de energia, nem sempre o benefício econômico para a indústria é compensador, motivo pelo qual os processos de coleta e aproveitamento mais bem-sucedidos não estão ligados aos produtores. Termoplásticos que podem ser diversas vezes fundidos para a construção de peças novas e distintas, como polipropileno, polietileno, policarbonato, nylon e poliuretano, já têm iniciativas pontuais de reaproveitamento (indústria automobilística). Resinas termofixas e outros polímeros ainda dependem de muito esforço de P&D para entrar nesse nicho. Por enquanto, no Brasil, apenas as garrafas retornáveis de PET e PEAD são larga e estruturadamente reaproveitadas.

Potencial de redução: 84% do consumo de combustível e 20% do de eletricidade da planta.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: PET, PEAD, PP, PE.

2.2.3 AUMENTAR A SELETIVIDADE DAS SERPENTINAS DO FORNO DE CRAQUEAMENTO

Fonte/categoria: combustíveis/equipamento-chave

Aplicabilidade no Brasil: moderada em médio/longo prazo.

Objetivo específico: melhorar a transferência de calor dentro do reator de craqueamento, minimizando o consumo energético específico do processo.

Descrição técnica: a melhoria do forno de craqueamento é o ponto crucial de economia energética no processo de produção de eteno, visto que essa etapa é altamente energointensiva e demanda grandes quantidades de vapor e combustível. Dessa forma, o desenvolvimento de melhores *designs* de serpentinas e o uso de melhores materiais (a exemplo de materiais cerâmicos e/ou com revestimentos inibidores à base de enxofre) devem garantir a otimização de troca de calor durante a reação, minimizando as incrustações e o coqueamento nas paredes da serpentina (o que dificulta a transferência de calor).

Potencial de redução: 10% do consumo energético específico do processo. A substituição do equipamento deve ocorrer naturalmente ao longo dos próximos 20 anos.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: eteno, propeno, butadieno e BTX.

2.2.4 USO DE TORRES DE RESFRIAMENTO E/OU BOMBAS DE CALOR NA SEÇÃO DE SEPARAÇÃO

Fonte/categoria: combustíveis/equipamento-chave

Aplicabilidade no Brasil: baixa, em função do elevado investimento.

Objetivo específico: adicionar equipamentos ao processo produtivo de forma a otimizar a integração energética e recuperação de calor.

Descrição técnica: as seções de resfriamento e fracionamento do gás craqueado é um sistema complexo que contém unidades de destilação, refrigeração e absorção, e a sequência desses processos varia de acordo com o *design* de cada licenciador e com o insumo utilizado no craqueamento (gás natural ou nafta). Dada a grande diferença de temperatura ao longo do processo (o craqueamento do gás se dá a mais de 800°C enquanto a refrigeração ocorre abaixo de -150°C), há diversas oportunidades de integração energética. A recuperação de calor ótima da temperatura do forno de craqueamento pode ser obtida adotando-se torres de resfriamento para melhorar a recuperação de calor em trocadores de calor específicos (TLE). Outra possibilidade é o uso de sistemas de bombas de calor, como a recompressão mecânica de vapor (MVR) para acoplar adequadamente os requerimentos de aquecimento e resfriamento. Nesse caso, a saída de topo da destilação é comprimida, seguida de condensação a fim de prover calor para o reboiler. Esse tipo de tecnologia é aplicável, por exemplo, em *splitters* de propeno/propano (PHYLIPSEN et al., 1997).

Potencial de redução: economia de até 0,95 GJ/t de eteno (REN et al., 2006).

Aplicável na produção dos seguintes produtos: eteno, propeno, butadieno e BTX.

2.2.5 CRAQUEAMENTO CATALÍTICO DA NAFTA

Fonte/categoria: combustíveis/equipamento-chave

Aplicabilidade no Brasil: baixa e no longo prazo, em função do elevado investimento.

Objetivo específico: aumentar a taxa de reação e seletividade do craqueamento, reduzindo indiretamente o consumo específico de energia.

Descrição técnica: O craqueamento térmico, principalmente pela alta demanda de calor para geração de vapor, é altamente energointensivo. A utilização de catalisadores específicos para o processo de craqueamento permite que o processo produtivo se dê em condições mais brandas de temperatura e pressão, além de flexibilizar o uso de materiais de alta resistência nos equipamentos (IEA, 2013). O craqueamento catalítico da nafta ainda apresenta alto custo e algumas licenciadoras ainda estão em fase piloto de suas tecnologias, não havendo perspectiva de curto prazo para uso no Brasil.

Potencial de redução: 10% a 20% de redução do consumo específico do processo de produção de olefinas (REN et al., 2006).

Aplicável na produção dos seguintes produtos: eteno, propeno, butadieno e BTX (PQB).

2.2.6 RECUPERAÇÃO DE CALOR DE/PARA FLUIDOS AGRESSIVOS

Fonte/categoria: combustíveis/fluidos

Aplicabilidade no Brasil: moderada para alta.

Objetivo específico: empregar trocadores de calor especiais para recuperar energia térmica, aquecendo ou resfriando fluidos corrosivos, abrasivos, intensamente pressurizados e/ou com temperatura muito elevada.

Descrição técnica: conforme Martin et al. (2000), avanços construtivos e de materiais, desde o final da década de 1990, permitiram o uso de trocadores de calor em condições extremas de pressão, temperatura, abrasividade e corrosividade. Apesar de ser uma tecnologia transversal, o custo muito elevado desses equipamentos limita os segmentos em que possa ser aplicado com atratividade econômica, tendo os autores destacado dois deles.

A produção de hidróxido de sódio (soda cáustica) inicia-se com a eletrólise de salmoura para gerar cloro e uma solução aquosa de hidróxido de sódio, extremamente corrosiva, que precisa ser evaporada (até 195°C). Permutadores de calor convencionais são rapidamente danificados. Podem ser substituídos por trocadores de circuito impresso (PCHE), nos quais os canais são quimicamente desgastados em baixo relevo em placas planas (níquel ou ligas de níquel, em geral), posteriormente fundidas por difusão metálica.

Na produção de ácido nítrico, o produto da combustão da amônia com ar deve ser resfriado de cerca de 900°C para 60°C antes da absorção em água. O calor é recuperado para outras partes da planta apenas até 200°C, pois abaixo dessa temperatura há condensação e intensa corrosão. Esse problema pode ser evitado, e o restante da energia ser captada, se o trocador de calor for construído em liga especial de níquel-cromo.

Potencial de redução: 6% do consumo de combustível total da planta.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: hidróxido de sódio (cloro-álcalis, subproduto da produção de cloro) e ácido nítrico.

2.2.7 REFORMA AUTOTÉRMICA

Fonte/categoria: combustíveis/processo

Aplicabilidade no Brasil: baixa para moderada.

Objetivo específico: utilizar a reforma autotérmica no lugar da reforma em duas etapas para a produção de gás de síntese.

Descrição técnica: para a produção de gás de síntese (mistura de CO e H₂ em diversas proporções, fundamental para a produção de diversos produtos químicos orgânicos em larga escala), emprega-se

normalmente a reforma em duas etapas separadas, uma endotérmica (reforma com vapor) e outra exotérmica (combustão parcial com ar), de forma que a energia gerada nesta possa ser aproveitada para alimentar a primeira. Exemplos são as tecnologias ICI-AMV e Braun para produzir amônia.

A reforma autotérmica utiliza reator, catalizador e, principalmente, um controle do processo que vêm sendo apurados desde a década de 1960 para tirar proveito do balanço energético das reações em uma única etapa, sem componentes intermediários para a transferência de calor. Empresas como Haldor Topsoe, Lurgi, Kellogg e Uhde vêm propondo a tecnologia a indústrias de amônia. Rafiqul et al. (2005) chamam de *gas heating reformer* (GHR) e, em menor escala, de metanol os dois segmentos com maior emprego e dependência da produção de gás de síntese.

Potencial de redução: 44% do consumo de combustível total da planta de amônia. Não foram encontrados dados para aplicação em plantas de metanol.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: amônia (FPI) e metanol (PQB), sendo que para este último o uso é comum em plantas novas.

2.2.8 EMPREGO DE CÉLULA ELETROLÍTICA DE MEMBRANA

Fonte/categoria: eletricidade/processo

Aplicabilidade no Brasil: alta. Em uso e com tendência de penetração lenta, porém constante (SCHAEFFER et al., 2011).

Objetivo específico: substituir as tecnologias de mercúrio e diafragma por células eletrolíticas de membrana na produção de cloro e soda.

Descrição técnica: existem, essencialmente, três processos de produção de soda-cloro:

- Tecnologia de mercúrio: é a mais antiga, a menos eficiente energeticamente e a mais sujeita a restrições ambientais; foi eliminada no Japão, é utilizada em proporções relativamente pequenas nos EUA e no Brasil, mas ainda prevalece na Europa, em virtude de ser uma das áreas produtoras mais antigas, pelo elevado custo de substituição e porque já foram realizados investimentos em controle ambiental que reduziram as emissões de poluentes nas plantas de mercúrio em mais de 90% nos últimos anos;
- Tecnologia de diafragma: ocupa a segunda posição em antiguidade e restrição ambiental; é a mais utilizada nos EUA e no Brasil (70% da produção), não é empregada no Japão e ocupa posição minoritária na Europa; é especialmente apropriada para plantas abastecidas com sal de minas de sal-gema, uma vez que pode ser abastecida diretamente com a salmoura extraída das minas, o que já não ocorre com as tecnologias de mercúrio e de membrana;
- Tecnologia de membrana: é a mais nova dentre as tecnologias já estabelecidas no mercado; não sofre qualquer restrição de ordem ambiental; é a tecnologia que deve prevalecer no futuro próximo e já vem sendo a preferida para uso em plantas novas; é a única tecnologia empregada no Japão e ocupa posição minoritária nos EUA, Europa Ocidental e Brasil.

Potencial de redução: 10% do consumo de eletricidade total da planta, pressupondo a mudança de diafragma para membrana, visto que as células de mercúrio estão naturalmente sendo desativadas.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: cloro-álcali.

2.2.9 SISTEMA DE CONFINAMENTO EM POLÍMEROS

Fonte/categoria: combustíveis/equipamento-chave

Aplicabilidade no Brasil: alta.

Objetivo específico: reaproveitar correntes residuais de processo para geração de calor.

Descrição técnica: a adição de um sistema de contenção de emissões no processo produtivo de polímeros permite a captura de monômeros não reagidos, solventes e polímeros que, em alguns casos, podem ser utilizados como combustíveis. Um exemplo dessa técnica é a recuperação de monômeros de compressores recíprocos em plantas de polietileno de alta pressão. A complexidade não é muito elevada e a tecnologia já está disponível comercialmente.

Potencial de redução: não encontrado.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: polímeros (petroquímica).

2.2.10 SUBSTITUIÇÃO DE BOMBAS EXTRUSORAS POR BOMBAS DE ENGRENAGEM

Fonte/categoria: eletricidade/equipamento-chave

Aplicabilidade no Brasil: moderada para alta.

Objetivo específico: adotar práticas mais eficientes de peletização.

Descrição técnica: bombas de engrenagem são mais eficientes energeticamente no acúmulo de pressão para peletização de polímeros.

Potencial de redução: não encontrado.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: polímeros (petroquímica).

2.2.11 USO DE SOLVENTES AVANÇADOS PARA EXTRAÇÃO DE CO₂

Fonte/categoria: combustíveis/equipamento-chave

Aplicabilidade no Brasil: alta.

Objetivo específico: reduzir o consumo de energia na extração por solventes do CO₂ na produção de amônia.

Descrição técnica: na produção de amônia, a remoção de CO₂ do efluente do reator é tradicionalmente feita por condensação fracionada e/ou extração por solventes (absorção), sendo uma etapa que envolve grande consumo de energia térmica (perdas durante a condensação) e elétrica (pressurização e despressurização dos absorventes). Rafiqul et al. (2005) relatam ganhos significativos pela substituição dos solventes convencionais por misturas proprietárias como nos processos aMDEA (BASF) e LoHeat (Benfield). São tecnologias já bem estabelecidas e comprovadas no mercado.

Potencial de redução: 1% a 4% do consumo energético específico do processo de separação.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: amônia.

2.2.12 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COM ELEVADO PODER CALORÍFICO PARA GERAÇÃO DE VAPOR

Fonte/categoria: combustíveis/fluxos

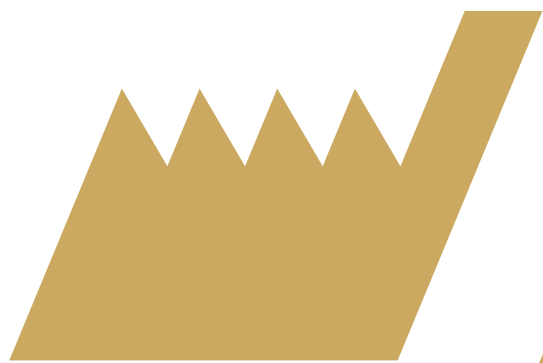
Aplicabilidade no Brasil: moderada, visto que já é aplicada na unidade da BASF em Camaçari, Bahia.

Objetivo específico: reduzir o consumo de energia por meio do aproveitamento de resíduos de processo.

Descrição técnica: consiste na aplicação de caldeira HRB (Heat Recovery Boiler), a qual queima os resíduos gasosos e líquidos do processo aproveitando seu poder calorífico para geração de vapor, que é tanto utilizado internamente nos processos, quanto exportado para uso em outras unidades fabris do polo industrial.

Potencial de redução: não encontrado.

Aplicável na produção dos seguintes produtos: polímeros (petroquímica).



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 químico. 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 e usos finais de energia, aspectos sintetizados no capítulo 1. Em seguida, foram determinados critérios e premissas que auxiliaram na projeção do cenário em questão, a qual se tratou de uma abordagem *bottom-up*, ou, como o próprio nome diz, de baixo para cima. De acordo com o então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2010), esse tipo de abordagem permite detectar onde e como ocorrem as emissões, favorecendo o estabelecimento de medidas de mitigação.

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

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

3.1 CENÁRIO REF

3.1.1 PREMISSAS

Inicialmente, partiu-se da caracterização do setor que se baseou em produtos distribuídos entre os subsetores de cloro-soda, fertilizantes e petroquímica, selecionados a partir dos indicadores de atividade e intensidade energética reportados no capítulo 1.

A produção e a demanda energética foram estimadas em oito blocos principais que guardam afinidades de processo e, portanto, podem ser alocados em um mesmo bloco tecnológico (Quadro 4). Posteriormente, a cada um desses blocos serão aplicadas medidas de mitigação compatíveis.

Quadro 4 – Agregação de Produtos Químicos Adotada no Cenário REF

Cloro-soda
1. Cloro-soda
Fertilizantes
2. Amônia
3. Intermediários para fertilizantes: ácidos
Ácido fosfórico
Ácido nítrico
Ácido sulfúrico
4. Intermediários para fertilizantes: sais
MAP e DAP
Nitrato de amônio
Sulfato de amônio
Ureia
Petroquímica
5. Metanol
6. Petroquímicos básicos
Eteno
Propeno
Butadieno
BTX
7. Petroquímicos intermediários
Cloreto de vinila
Dicloroetano
Estireno
Formaldeído
Ácido tereftálico
Etilenoglicol
8. Polímeros
Cloreto de polivinila
Poliestireno
Polietileno
Polipropileno
Tereftalato de polietileno

Fonte: Elaboração própria

Além disso, foi adicionada a demanda energética remanescente não considerada na análise, para fins de ajuste e de compatibilidade com EPE (2017). Sobre tal demanda, entretanto, não incidirão medidas de mitigação no cenário BC.

O ano-base de 2010 foi considerado a partir de dados de produção e capacidade constantes em Abiquim (2015; 2017), somados de acordo com a agregação proposta. Para a projeção de demanda, assumiram-se as taxas de crescimento obtidas por Haddad (2015). Tais taxas foram obtidas para setores específicos, constituindo a base da projeção do PIB setorial em milhões de reais e, para produtos selecionados, constituindo a base da projeção do valor bruto da produção (VBP), também em milhões de reais.

Os grupos de produtos e setores estabelecidos em Haddad (2015) estão em linha com a classificação Cnae. Dessa forma, foi possível identificar em quais grupos os produtos químicos considerados estão alocados. Assim, foram adotadas taxas de crescimento para produtos orgânicos,¹² inorgânicos¹³ e resinas e elastômeros¹⁴ (Tabela 57).

Tabela 57 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Produção e Demanda Energética

Produtos/ Período	Crescimento médio anual (%)							
	2010- 2015	2015- 2020	2020- 2025	2025- 2030	2030- 2035	2035- 2040	2040- 2045	2045- 2050
Químicos inorgânicos	1,97	2,86	3,64	2,82	2,16	1,67	1,29	0,99
Químicos orgânicos	1,91	2,79	3,58	2,78	2,14	1,65	1,29	0,98
Resina e elastômeros	0,03	1,13	2,07	1,70	1,37	1,11	0,91	0,74

Fonte: Elaborado a partir de HADDAD, 2015

No âmbito da modelagem integrada dos cenários de emissões de GEE, que tem seus resultados publicados 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 por certo afetarão negativamente o crescimento do setor químico, reduzindo o consumo de energia e as emissões de GEE em relação aos níveis deste cenário REF.

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 (IPCC, 2006), que também foram utilizados na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima – TCN (MCTIC, 2016a). Mais que isso, foram contabilizadas emissões de processo do setor

¹² Grupos: petroquímicos básicos, petroquímicos intermediários, metanol.

¹³ Grupos: cloro-soda e fertilizantes.

¹⁴ Grupo polímeros.

(MCTIC, 2016a). Por fim, foram desconsideradas emissões do carvão vegetal e lenha, 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.

Para a eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN), foram utilizados os fatores de emissão informados pelo MCTI (2015) (Tabela 58). Para o período de 2017 a 2050, os valores são oriundos da modelagem integrada dos cenários de emissões do projeto. Esses fatores de emissão serão apresentados em valores médios por períodos, entre 2017 e 2050 (MCTIC, 2017a; 2017b).

Tabela 58 – 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, o qual decorre do deplecionamento do potencial hidrelétrico remanescente. Assim, a geração elétrica excedente, em um cenário REF, no qual inexistem políticas adicionais de baixo carbono, passa a ser atendida por fontes de energia mais baratas e com maior intensidade carbônica, em particular carvão mineral (MCTIC, 2017a; 2017b).

3.1.2 RESULTADOS

Inicialmente, chegou-se à produção física para cada grupo de produtos no período de 2010 a 2050 (Tabela 59).¹⁵

¹⁵ Conforme explicado, o setor foi analisado com base em processos e produtos selecionados, não varrendo a indústria como um todo. Assim, para contabilizar o consumo energético relativo à fração da indústria não considerada no estudo, considerou-se a diferença entre o consumo final energético da indústria química em 2010 (EPE, 2017) e o consumo energético obtido a partir dos dados de produção considerados para o estudo. A projeção foi obtida segundo os dados de crescimento de Haddad (2015).

Tabela 59 – Produção Física do Setor Químico

Produtos	Produção (mil toneladas)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cloro-soda	1.289	1.421	1.636	1.956	2.248	2.501	2.716	2.896	3.042
Amônia	1.191	1.313	1.512	1.808	2.077	2.311	2.510	2.676	2.811
Intermediários ácidos	8.483	9.353	10.767	12.877	14.795	16.462	17.879	19.062	20.023
Intermediários sais	3.147	3.469	3.994	4.777	5.488	6.106	6.632	7.071	7.427
Petroquímicos básicos	7.303	8.034	9.223	10.995	12.607	14.009	15.200	16.196	17.004
Petroquímicos intermediários	3.245	3.570	4.098	4.886	5.602	6.225	6.755	7.197	7.556
Polímeros	5.549	5.552	5.868	6.495	7.062	7.554	7.980	8.348	8.664
Metanol	167	184	211	252	288	321	348	371	389

Fonte: Elaboração própria

A partir da produção física, foi estimada a demanda energética do setor (Tabela 60 e Figura 31). Percebe-se um incremento no consumo energético de 117% no período. Cumpre ressaltar que a diferença relativa ao ano-base com relação a EPE (2017) decorre do consumo energético em processos, motivo pelo qual também foi listado o consumo excluindo o mesmo na produção de amônia, metanol e petroquímicos básicos.

Tabela 60 – Consumo Energético do Setor Químico

Produtos	Consumo de Energia (TJ)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cloro-soda	22.666	24.756	25.400	23.970	27.096	31.809	35.863	39.140	42.277
Amônia	42.701	47.083	54.200	64.820	74.478	82.867	90.000	95.958	100.793
Intermediários ácidos	12.610	13.904	16.005	19.142	21.993	24.471	26.577	28.337	29.764
Intermediários sais	6.945	7.657	8.815	10.542	12.113	13.477	14.637	15.606	16.392
Petroquímicos básicos	673.172	735.633	844.064	1.002.342	1.073.292	1.200.809	1.145.444	1.231.899	1.389.843
Petroquímicos intermediários	18.231	20.056	23.023	27.447	31.472	34.970	37.945	40.431	42.448
Polímeros	29.052	29.067	30.724	34.008	36.975	39.553	41.781	43.708	45.360
Metanol	5.180	5.699	6.542	7.799	8.942	9.936	10.781	11.488	12.061
Demais produtos	25.857	32.347	45.381	63.863	89.378	97.096	140.012	146.316	140.112
Total	836.414	916.202	1.054.154	1.253.933	1.375.739	1.534.988	1.543.040	1.652.883	1.819.052
Total excluindo processos	302.036	331.972	381.004	454.258	520.949	578.989	628.446	669.880	703.626

Fonte: Elaboração própria

Há significativo crescimento na demanda por gás natural e eletricidade, que aumentam sua participação na matriz energética do setor. De fato, grande parte dos setores industriais encontra no gás natural uma oportunidade de suprimento energético associada com redução de emissões, mesmo em um cenário referencial. Todavia, uma análise setorial não observa a disponibilidade de gás natural para todos os setores, competição que, inclusive, afeta os seus preços. Trata-se de uma limitação da análise setorial, superada pela integração de cenários de demanda energética e emissões nos modelos MSB8000, Otimizagro e Efes (MCTIC, 2017b).

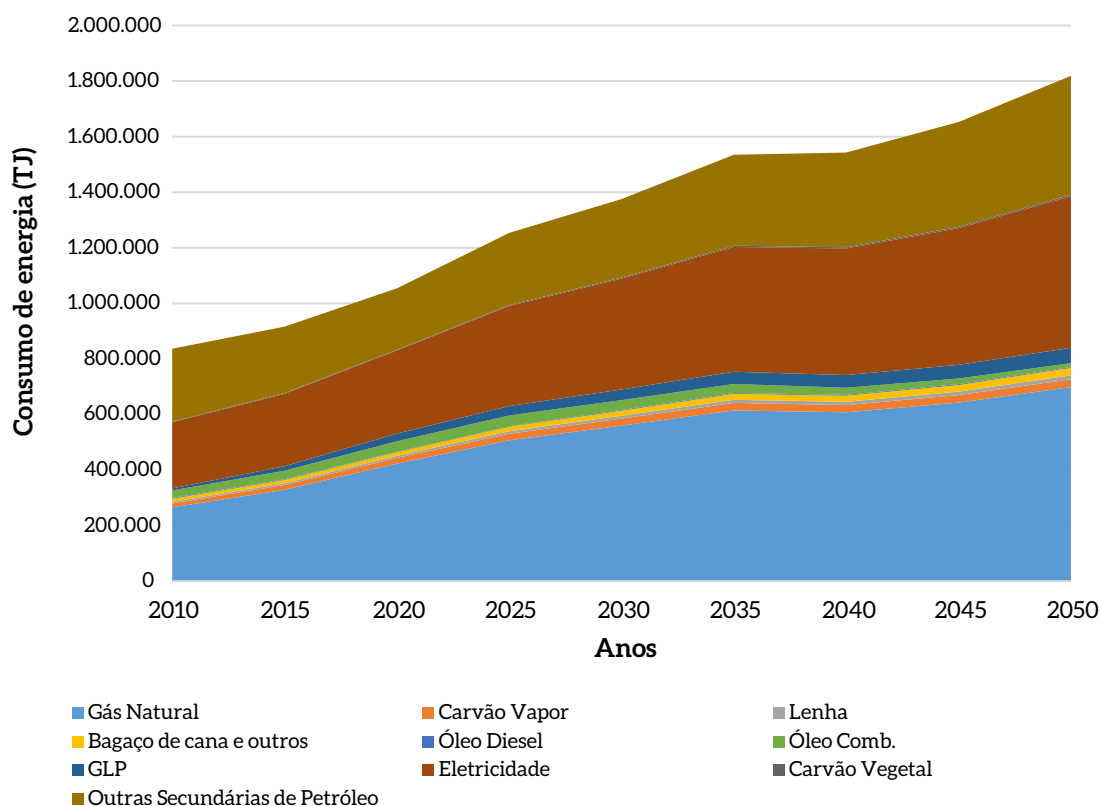


Figura 31 – Consumo Energético por Fontes no Setor Químico

Fonte: Elaboração própria

A partir do consumo energético, foram aplicados os fatores de emissão constantes em IPCC (2006), MCTIC (2016) e Tabela 58 para projetar as emissões totais de GEE do setor químico.

Observa-se um incremento nas emissões de 183% no período de 2010 a 2050 no cenário REF. Grande parte desse aumento ocorre a partir de 2035, devido ao aumento do fator de emissão do *grid*, conforme motivos explicitados na seção 3.1.1.

Tabela 61 – Emissões de GEE do Setor Químico

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissões de GEE (MtCO ₂ e)	18,8	20,9	21,8	27,2	32,6	38,9	41,0	48,0	53,5

Fonte: Elaboração própria

3.2 CENÁRIO BC

3.2.1 PREMISSAS

O cenário BC foi construído a partir da penetração de algumas MTD descritas no capítulo 2. Para a seleção das MTD, foram considerados dois critérios: i) tecnologias que apresentem nível de prontidão tecnológica (TRL) igual ou superior a 7 (EIPPCB, 2013); ii) tecnologias que tenham maior potencial de redução de emissões de GEE.

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

- Adoção de queimadores *low NOx* em fornos;
- Monitoramento e manutenção de caldeiras;
- Recuperação de calor em caldeiras;
- Monitoramento e manutenção de sistemas motores;
- Recuperação de hidrogênio na produção de amônia;
- Recuperação de hidrogênio na produção de metanol;
- Integração de processos com análise *pinch* na petroquímica básica;
- Integração de processos com análise *pinch* na produção de amônia;
- Reciclo de condensado em caldeiras;
- Adoção de pré-reformador na produção de amônia;
- Adoção de pré-reformador na produção de metanol;
- Maior uso de gás natural em caldeiras;
- Maior uso de gás natural em fornos;
- Maior uso de biomassa em caldeiras;
- Maior uso de biomassa em fornos.

As medidas de substituição de combustíveis, além de refletir as diferenças nos fatores de emissões de GEE entre os combustíveis considerados, se baseiam no diferencial de custos entre equipamentos dedicados a queimar os combustíveis substituídos.

Todas as tecnologias listadas foram comprovadas e implantadas no setor químico em âmbito internacional e/ou nacional. Ainda assim, optou-se por considerar a penetração das MTD somente a partir de 2020, com vida útil variando entre 20 e 30 anos.¹⁶

As medidas consideradas não foram aplicadas a todo o parque instalado, considerando que parte desse parque é moderno e/ou já sofreu modernizações em anos recentes. Essa premissa encontra-se em linha com o que foi discutido em reunião presencial com agentes do setor (FIESP, 2015).

Por fim, adotaram-se os mesmos procedimentos e taxas de crescimento do PIB relativas ao cenário REF para projetar a demanda de energia e emissões de GEE no cenário BC.

3.2.2 RESULTADOS

Aplicando-se os potenciais de economia da energia das MTD, pôde-se chegar ao consumo energético até 2050 no cenário BC. Verifica-se que o crescimento no período de 2010 a 2050 é de 111% (Tabela 62) e que há redução, com relação ao cenário REF, de 3% em 2050 (Figura 32).

Tabela 62 – Consumo Energético do Setor Químico no Cenário BC

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Consumo de energia (TJ)	836.414	916.202	1.028.379	1.219.689	1.337.141	1.491.357	1.497.042	1.603.044	1.765.194

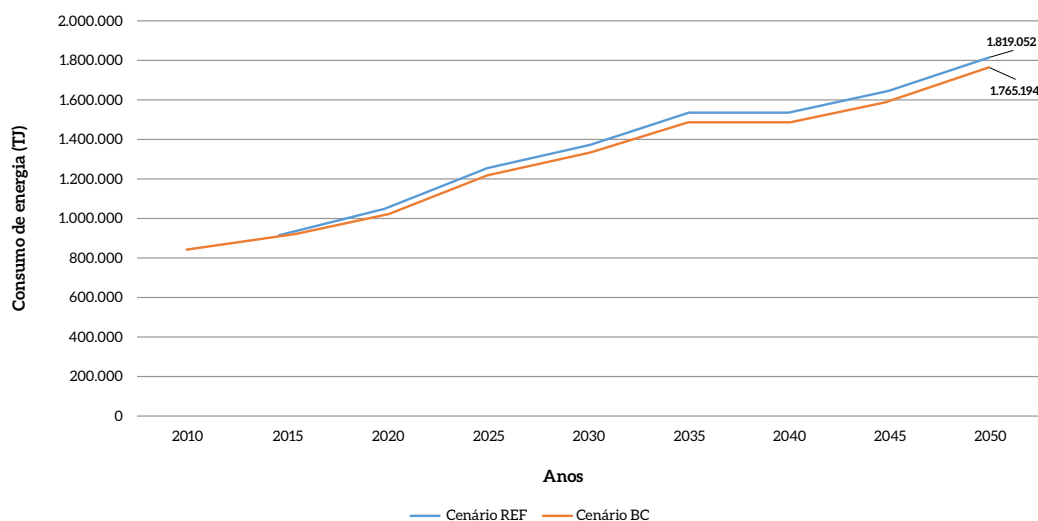


Figura 32 – Demanda de Energia nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

16 A maioria das medidas de mitigação que constituem pequenas mudanças de operação e de componentes tem vida útil aproximada de 20 anos. Medidas que constituem troca de equipamento (caldeiras, fornos etc) ou instalação de novas plantas têm vida útil superior.

A partir da projeção da demanda de energia, foram mensuradas as emissões de CO₂ do setor no cenário BC. Foram utilizados os mesmos fatores de emissão utilizados para o cenário REF. As emissões totais de CO₂ são apresentadas na Tabela 63 e, na Figura 33, tem-se a projeção de emissões nos cenários REF e BC. Pode-se constatar que a implementação das MTD diminui a taxa de crescimento das emissões para 135% no período, implicando redução, com relação ao cenário REF, de 17% em 2050.

A substituição de combustíveis representa o conjunto de medidas com maior potencial de mitigação, embora implique em pequeno ganho em termos de redução no consumo de energia. Isso pode ser explicado, particularmente, pela menor densidade energética da biomassa perante combustíveis fósseis substituídos.

Tabela 63 – Emissões de GEE do Setor Químico no Cenário BC

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissões de GEE (MtCO ₂ e)	18,8	20,9	20,4	21,5	26,1	31,5	33,4	39,7	44,3

Fonte: Elaboração própria

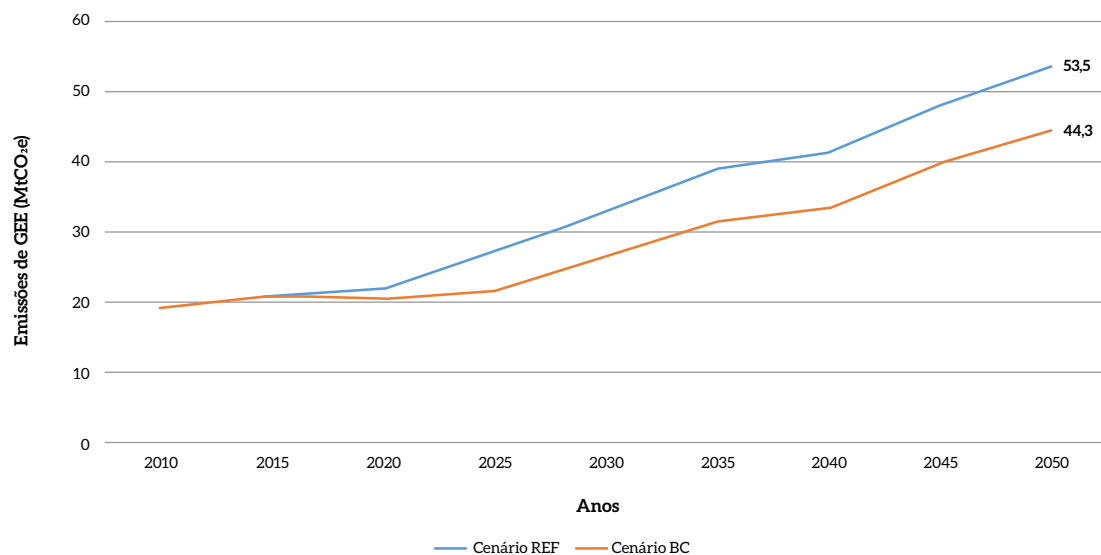


Figura 33 – Emissões de GEE do Setor Químico nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

3.2.3 CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO

Nesta seção, são calculados os custos marginais de abatimento (CMA) das MTD listadas anteriormente. 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 químico. 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 CO₂e 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 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 1:

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

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

O custo anual líquido (CAL) representa a diferença do custo de investimento anualizado e do resultado financeiro anual da implantação de opção de mitigação. Esse resultado financeiro é dado pela receita total e pelos gastos com operação e manutenção com a implantação da opção, conforme equação 2:

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

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

3.2.3.1 PREMISSAS

Para mensurar os custos marginais de abatimento das MTD, inicialmente, fez-se necessário identificar taxas de desconto consideradas pelo setor químico. 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 empregadas para o seu cálculo utiliza o custo do capital próprio da empresa, que é comparado à rentabilidade de diferentes ativos nos quais o setor poderia investir. Nesse cálculo, parte-se, normalmente, de uma taxa livre de risco, à qual se aplicam prêmios de risco para cada opção de investimento.

Além de pesquisa na literatura, buscou-se obter informações junto à Abiquim sobre taxas de desconto praticadas pelo setor. A partir disso, foram selecionadas duas taxas a serem utilizadas no cálculo dos custos de abatimento das MTD: uma social, de 8% ao ano, e outra de mercado, de 17% ao ano. A taxa social é compatível com estudos da literatura que mensuraram custos de abatimento para setores industriais (HENRIQUES JR., 2010; SCHAEFFER; SZKLO, 2009; RATHMANN, 2012), enquanto a taxa de mercado está alinhada com a visão de especialistas do setor acerca da atratividade de investimentos nas MTD para o investidor privado.

O levantamento de custos de investimento é etapa fundamental para a obtenção dos custos marginais de abatimento das MTD. Os investimentos iniciais em determinada tecnologia, equipamento ou processo têm peso grande nesse indicador por refletir grande desembolso financeiro no tempo presente. Dessa forma, são listados valores de investimento segundo informações disponíveis na literatura.

É importante ressaltar que dados de investimento em plantas industriais constituem informações em geral consideradas estratégicas para a empresa que a adota. Por isso, referências acadêmicas e/ou consideradas públicas muitas vezes omitem esse tipo de informação ou fornecem dados de forma incompleta. Isso justifica o fato de não haver dados disponíveis para todas as medidas descritas e consideradas neste estudo.

Ainda nesse contexto, muitas vezes, as informações encontradas, além de incompletas, diferem entre si em sua apresentação, a exemplo das unidades utilizadas para expressar os custos.¹⁷ Tais discrepâncias advêm da escolha dos autores no que tange à apresentação, seja por conveniência ou por adequação à finalidade da publicação, e podem derivar da natureza da medida de mitigação considerada MTD: o custo de uma medida que reflete uma troca de equipamento, por exemplo, é dado pelo preço desse equipamento, enquanto uma medida MTD de caráter operacional ou de monitoramento pode ser dada pelo custo de se implementar tal medida por unidade de energia que tal medida possa vir a economizar.¹⁸ Em ambos os casos, buscou-se referenciar custos e grandezas de produção ou energia (consumida ou economizada), de maneira a facilitar a obtenção de valores de referência que permitam a comparação entre as medidas.

Deve-se ressaltar ainda que, em muitas das publicações consultadas (NEELIS et al., 2008; DOE, 2005; US DOE, 2011; IPCC, 2014), os custos expostos refletem casos específicos de unidades produtoras de químicos que aplicaram medidas para melhorar o desempenho de seus processos produtivos. Isso explica por que alguns valores de custo para medidas mais comuns podem diferir de uma referência para outra. É importante ter em mente que cada planta é única em termos de tempo de vida e layout de equipamentos, consumo de insumos energéticos e não energéticos e disponibilidade de ferramentas de operação, controle e monitoramento. Por isso, os custos de investimento de uma medida específica podem variar significativamente quando aplicáveis a diferentes plantas industriais e, portanto, deve-se ter ponderação ao aplicar custos de literatura ao caso brasileiro. Visando

17 Há de se observar que há custos dados por unidade de energia economizado, por unidade de produto produzido ou por unidade de gás carbônico abatido, por exemplo.

18 A exemplo da necessidade de contratação de novos funcionários em uma empresa para que haja um monitoramento mais adequado do sistema de vapor que possa economizar uma parcela de energia utilizada.

adequar o custo das MTD à realidade nacional, será adotado um sobre-custo (contingência) de 20% nos custos de investimento.

Os custos de investimento e de operação e manutenção (O&M) adotados se encontram listados na Tabela 64 (IPCC, 2014).

Tabela 64 – Potenciais e Custos de Investimento e O&M das MTD

Medida	Potencial de economia de energia (%)	Custo de investimento (US\$/GJ ano)	Custo de O&M (US\$/GJ ano)
Adoção de queimadores <i>low NOx</i> em fornos	2,0	0,2	0,02
Monitoramento e manutenção de caldeiras e motores	10,0	2,3	0,23
Recuperação de calor em caldeiras	1,3	3,4	0,50
Reciclo de condensado	10,0	9,3	0,90
Recuperação de hidrogênio na produção de amônia	8,0	22,7	0,47
Recuperação de hidrogênio na produção de metanol	4,0	5,7	-
Integração de processos com análise <i>pinch</i> na petroquímica básica	3,0	26,1	-
Integração de processos com análise <i>pinch</i> na produção de amônia	4,0	19,6	0,78
Adoção de pré-reformador na produção de amônia	4,0	8,5	0,50
Adoção de pré-reformador na produção de metanol	4,0	7,5	1,21

Fonte: Elaboração própria a partir de DOE, 2005; NEELIS et al., 2008; US DOE, 2011; IPCC, 2014

Tendo em vista os dados necessários para aplicação nas equações 1 e 2, bem como para mensuração do custo de abatimento das medidas de substituição de energéticos, fez-se necessário obter os preços de combustíveis constantes na Tabela 65.

Tabela 65 – Preços dos Combustíveis

Combustíveis	Unidade	Preço
Gás natural	US\$/m ³	0,65
Carvão mineral	US\$/t	180,00
Carvão vegetal	US\$/m ³	47,70
Óleo combustível	US\$/litro	0,53
Óleo diesel	US\$/litro	1,06
Nafta	US\$/barril	78,00
Coque de petróleo	US\$/barril	70,00
Eletricidade	US\$/MWh	147,85
Lenha	US\$/m ³	30,00

Fonte: Elaborado a partir de EPE, 2017; ANP, 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).

A Tabela 66 resume os preços de petróleo considerados para o cálculo do CMA das possibilidades de mitigação, segundo taxas de desconto pelas óticas de mercado e social.

Tabela 66 – Preços de Petróleo Considerados para o Cálculo do Custo Marginal de Abatimento das Possibilidades de Mitigação

Taxa de Desconto	Preço do Petróleo (US\$/barril)							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
17% ao ano (Ótica de mercado)	75	75	75	75	75	75	75	75
8% ao ano (Ótica social)	55	75	90	105	120	135	140	145

Fonte: Elaboração própria a partir de EIA, 2015

Perante os cenários de preços do petróleo, foram projetados preços dos insumos energéticos para mensuração dos CMA segundo a taxa de desconto social (Tabela 67). 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 65.

Tabela 67 – 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
Carvão mineral	US\$/t	180,00	180,00	214,61	234,24	257,89	289,32	301,25	334,69	378,02
Carvão vegetal	US\$/m ³	47,7	47,7	56,3	58,2	53,7	55,0	54,4	54,5	56,4
Óleo combustível	US\$/litro	0,53	0,53	0,73	0,87	1,02	1,16	1,31	1,35	1,40
Óleo diesel	US\$/litro	1,06	1,06	1,45	1,74	2,02	2,31	2,60	2,70	2,80
Nafta	US\$/barril	78,0	78,0	81,4	83,7	85,9	89,4	92,7	95,9	99,8
Coque de petróleo	US\$/barril	70,0	70,0	72,4	74,9	77,9	81,4	87,4	89,8	92,3
Lenha	US\$/m ³	30,0	30,0	35,7	35,6	35,9	36,2	35,3	27,3	24,2
Eletricidade	US\$/MWh	147,85	147,85	201,61	241,94	282,26	322,58	362,90	376,34	389,78

Fonte: Elaboração própria a partir de EIA, 2015; EPE; 2017

3.2.3.2 RESULTADOS

Os custos de abatimento foram obtidos em linha com informações de custos de investimento e custos operacionais reportados. Aos custos de investimento foi acrescentado um sobrecusto de 20% relativo aos custos de contingência, em linha com Hoffmann (2010). A Tabela 68 e a Tabela 69 apresentam custos e potenciais acumulados de abatimento das MTD com taxas de desconto de 8% e de 17%, respectivamente.

Tabela 68 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 8% ao ano

MTD	Custo de abatimento (US\$/tCO ₂)	Potencial de abatimento (MtCO ₂)
Adoção de pré-reformador na produção de metanol	-70	0,11
Recuperação de hidrogênio na produção de metanol	-69	0,17
Monitoramento e manutenção de caldeiras	-69	3,84
Recuperação de calor em caldeiras	-65	1,94
Adoção de queimadores <i>low NOx</i> em fornos	-54	0,82
Adoção de pré-reformador na produção de amônia	-47	0,38
Reciclo de condensado em caldeiras	-27	2,74
Maior uso de biomassa em fornos	-22	2,43
Maior uso de biomassa em caldeiras	-20	3,52
Integração de processos com análise <i>pinch</i> na petroquímica básica	4	2,36
Monitoramento e manutenção de sistemas motores	4	9,06
Integração de processos com análise <i>pinch</i> na produção de amônia	24	0,22
Recuperação de hidrogênio na produção de amônia	25	0,79
Maior uso de gás natural em caldeiras	78	5,31
Maior uso de gás natural em fornos	81	12,96

Fonte: Elaboração própria

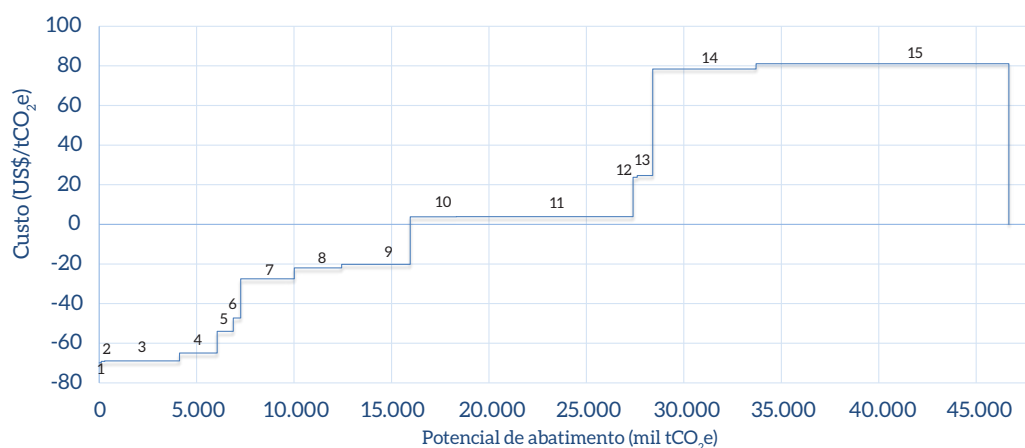
Tabela 69 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de desconto de 17% ao ano

MTD	Custo de abatimento (US\$/tCO ₂)	Potencial de abatimento (MtCO ₂)
Recuperação de hidrogênio na produção de metanol	-14	0,17
Maior uso de biomassa em fornos	-13	2,43
Recuperação de calor em caldeiras	-11	1,94
Monitoramento e manutenção de caldeiras	-10	3,84
Maior uso de biomassa em caldeiras	-2	3,52
Adoção de queimadores <i>low NOx</i> em fornos	-1	0,82
Adoção de pré-reformador na produção de amônia	-1	0,38
Monitoramento e manutenção de sistemas motores	7	9,06
Maior uso de gás natural em caldeiras	9	5,31
Adoção de pré-reformador na produção de metanol	10	0,11
Maior uso de gás natural em fornos	14	12,96
Recuperação de hidrogênio na produção de amônia	27	0,79
Reciclo de condensado em caldeiras	31	2,74
Integração de processos com análise <i>pinch</i> na petroquímica básica	87	2,36
Integração de processos com análise <i>pinch</i> na produção de amônia	89	0,22

Fonte: Elaboração própria

É possível notar que, com exceção do maior uso de gás natural em caldeiras e fornos, os custos de abatimento calculados com a taxa de 17% são maiores do que os custos calculados com a taxa de 8%. Esse aspecto já era esperado, dado que o fator de recuperação de capital para o primeiro caso é maior, o que consequentemente aumenta o valor presente do investimento a ser realizado, bem como o custo da medida. Além disso, nota-se que grande parte das medidas possuem custos de abatimento negativos com taxa de desconto social, o que demonstra viabilidade econômica das atividades de baixo carbono. Todavia, isso não significa que as medidas possam ser implementadas, uma vez que barreiras não econômicas, como deficiências regulatórias, aspectos comportamentais, entre outras, podem estar presentes. Mais que isso, até mesmo barreiras econômicas não captadas nos custos de abatimento podem impedir a adoção das atividades, como é o caso da disponibilidade de crédito para realização dos investimentos. Tais aspectos serão analisados no capítulo 4.

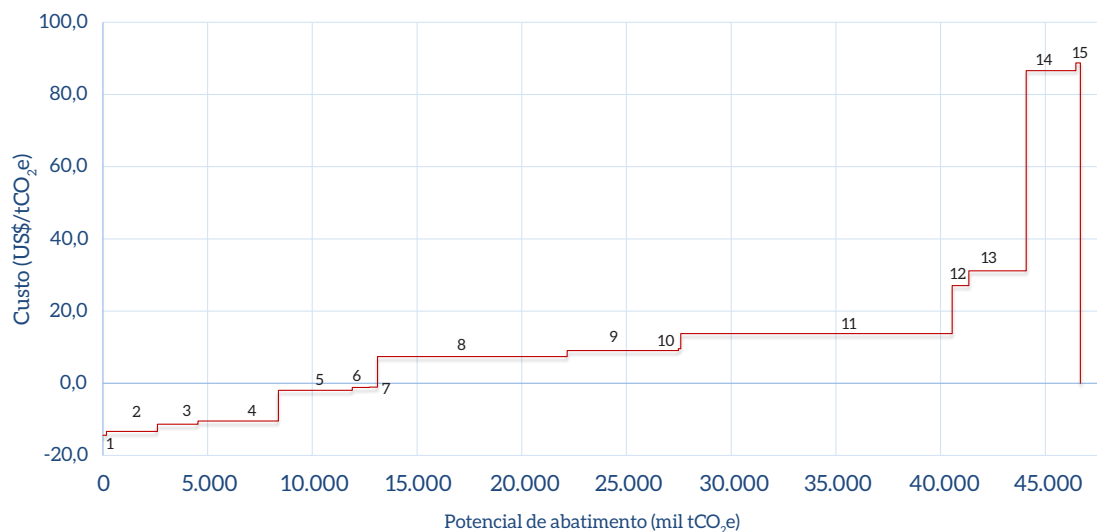
As curvas de custos de abatimento podem ser construídas no nível de tecnologia/atividade ou setor/programa. As curvas no nível de tecnologia/atividade são mais simples e avaliam cada opção de mitigação separadamente, com base nos seus custos e emissões evitadas. Assim, os efeitos de uma medida não afetam as demais. Para as curvas no nível de setor/programa, as medidas avaliadas têm influência umas sobre as outras (SCHAEFFER et al., 2015). As curvas obtidas neste trabalho foram construídas no nível de tecnologia/atividade (Figura 34 e Figura 35).



Legenda: (1) Adoção de pré-reformador na produção de metanol; (2) Recuperação de hidrogênio na produção de metanol; (3) Monitoramento e manutenção de caldeiras; (4) Recuperação de calor em caldeiras; (5) Adoção de queimadores low NOx em fornos; (6) Adoção de pré-reformador na produção de amônia; (7) Reciclo de condensado em caldeiras; (8) Maior uso de biomassa em fornos; (9) Maior uso de biomassa em caldeiras; (10) Integração de processos com análise *pinch* na petroquímica básica; (11) Monitoramento e manutenção de sistemas motores; (12) Integração de processos com análise *pinch* na produção de amônia; (13) Recuperação de hidrogênio na produção de amônia; (14) Maior uso de gás natural em caldeiras; (15) Maior uso de gás natural em fornos.

Figura 34 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto de 8% a.a.

Fonte: Elaboração própria



Legenda: (1) Recuperação de hidrogênio na produção de metanol; (2) Maior uso de biomassa em fornos; (3) Recuperação de calor em caldeiras; (4) Monitoramento e manutenção de caldeiras; (5) Maior uso de biomassa em caldeiras; (6) Adoção de queimadores low NOx em fornos; (7) Adoção de pré-reformador na produção de amônia; (8) Monitoramento e manutenção de sistemas motores; (9) Maior uso de gás natural em caldeiras; (10) Adoção de pré-reformador na produção de metanol; (11) Maior uso de gás natural em fornos; (12) Recuperação de hidrogênio na produção de amônia; (13) Reciclo de condensado em caldeiras; (14) Integração de processos com análise *pinch* na petroquímica básica; (15) Integração de processos com análise *pinch* na produção de amônia.

Figura 35 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto de 17% a.a.

Fonte: Elaboração própria

O potencial demonstrado representa a redução acumulada das emissões das medidas aplicadas até 2050, que é de 46,7 MtCO₂e.

Observa-se que, pela ótica social, há um potencial significativo de aproximadamente 16 MtCO₂e de redução de GEE na indústria química a custos iguais ou inferiores a zero. Medidas de efficientização e maior uso de biomassa em caldeiras e fornos, apresentaram custos negativos e bons potenciais de mitigação. Pela ótica de mercado, o potencial de mitigação a custos negativos se reduz a aproximadamente 13 MtCO₂e, devendo-se destacar que efficientização de caldeiras se mantém vantajosas, à exceção do reciclo de condensado, que nesse caso apresentou custo de abatimento superior a US\$ 30/tCO₂e.

A adoção de queimadores *low NOx* em fornos se mostrou opção de baixo custo em ambas as óticas de análise, porém com baixo potencial de abatimento muito em função de parte do potencial de adoção da medida já estar inserido no cenário REF. As medidas de integração energética, em contrapartida, se mostraram caras em relação a outras medidas de processo consideradas em função das premissas de investimento para petroquímica básica e amônia, significativamente altas.

O monitoramento e manutenção de motores se mostrou uma opção de potencial de abatimento significativo. Isso se deve, no entanto, ao fato de que essa medida é, na verdade, um pacote de medidas de efficientização de todo o sistema motor de unidades industriais (compressão, bombeamento, ventilação etc.), apresentando como um valor alto, portanto, de economia energética. Os resultados mostram que esse pacote de medidas, apesar de apresentar custos positivos, não seriam caros de implementar, podendo ser adotados a custos inferiores a US\$ 10/tCO₂e a taxa de mercado.

Quanto às medidas de troca de combustível, a adoção de gás natural em caldeiras e fornos em substituição a combustíveis mais carbonointensivos como coque, carvão, óleo diesel e óleo combustível resultaram em alto potencial de abatimento, porém com custos positivos, o que indica a inviabilidade econômica da medida. Mais do que isso, cumpre ressaltar que pressupõe a disponibilidade de gás natural, aspecto o qual não foi avaliado sob uma lógica integrada de oferta e demanda do insumo energético (MCTIC, 2017b).

Por fim, vale comentar que o potencial de abatimento não representa o potencial líquido de redução de emissões do setor químico. 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 químico, 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 químico.

A tecnologias consideradas neste cenário focam dois temas importantes relativos ao desenvolvimento tecnológico da indústria química no que tange à sustentabilidade. O primeiro deles é a catálise. Visto que as rotas produtivas da indústria química se baseiam em reações químicas, o desenvolvimento de novos catalisadores que reduzam a energia de ativação necessária a essas reações se torna uma oportunidade de redução de demanda energética, emissões e custos. O segundo assunto diz respeito à química verde, muito debatida em função da importância crescente da questão ambiental nas discussões que tangem economia e desenvolvimento. Sua principal vantagem em relação à química convencional é a reduzida emissão de GEE, além de outros aspectos importantes, como redução da dependência de fósseis e, conseqüentemente, da vulnerabilidade a seus preços (CGEE, 2010).

3.3.1 TECNOLOGIAS DE RUPTURA APLICÁVEIS NO SETOR QUÍMICO

Catalisadores são vistos como grandes promotores de eficiência energética e redução de emissões de GEE na indústria química por promoverem reações químicas de produção a partir de demanda energética reduzida. A IEA (2014) realizou um estudo global de investigação de grau de melhoramentos de processos catalíticos e como tais processos podem contribuir para a redução de energia e emissões de GEE. Foram considerados 18 dos principais produtos químicos, selecionados a partir do volume de produção global de cada um.

As ações mais eficazes, segundo o estudo, se concentram em quatro grupos de produtos: olefinas (etileno e propileno), amônia, aromáticos BTX e metanol. A Figura 36 e a Figura 37 mostram que estes são os produtos mais representativos em termos de consumo energético global e volume de produção em 2010 (IEA, 2014).

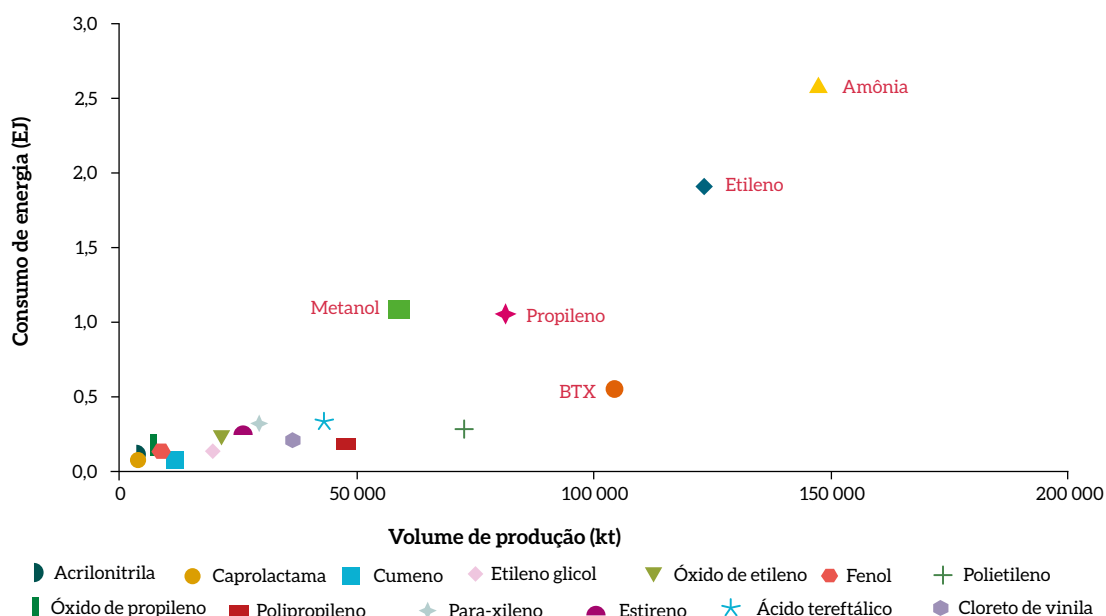


Figura 36 – Consumo Global de Energia vs. Volume de Produção dos 18 Principais Produtos Químicos de Grande Volume em 2010

Fonte: IEA, 2014

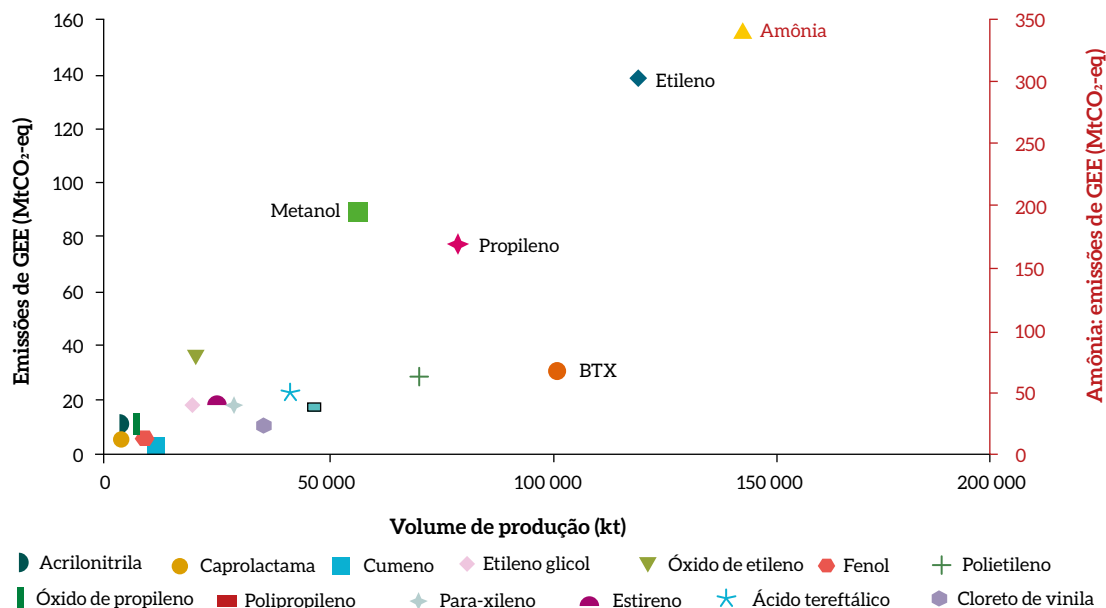


Figura 37 – Emissões Globais de GEE vs. Volume de Produção dos 18 Principais Produtos Químicos de Grande Volume em 2010

Fonte: IEA, 2014

Segundo a IEA (2014), o modelo desenvolvido por Dechema e que faz parte do estudo define tecnologias emergentes como aquelas inovações que permitem grandes saltos de progresso nas atuais rotas de fabricação dos principais produtos químicos. O estudo dá como principal exemplo de tecnologia emergente o craqueamento catalítico da nafta em substituição ao craqueamento a vapor,¹⁹ mostrando que, nas premissas consideradas, a adoção dessa tecnologia pode promover reduções de consumo energético de até 2,3 EJ até 2050 e redução de emissões de até 143 MtCO₂e no mesmo período. De fato, tecnologias catalíticas de produção de olefinas a partir de nafta consomem de 10% a 20% menos energia, segundo estudo de Ren et al. (2006). Ren (2009) afirma que, enquanto o craqueamento a vapor da nafta apresenta consumo energético específico na faixa de 14 a 17 GJ/t HVC, o craqueamento catalítico apresenta SEC de 10 GJ/t HVC. O estudo de IEA cita apenas uma planta com essa rota tecnológica em operação comercial, localizada na China.

O estudo da IEA (2014) cita também a rota MTO (metanol-to-olephyns) para produção de olefinas a partir do metanol como alternativa ao craqueamento a vapor de nafta ou etano. No entanto, a análise resultou em nenhum potencial de economia de energia e mitigação por parte dessa rota pelo fato de a produção de metanol resultar em quase o dobro do consumo energético reportado para a rota convencional de craqueamento.

Outros produtos mais representativos também podem se beneficiar do desenvolvimento de tecnologias emergentes. Porém, o estudo cita apenas mais um exemplo: a produção de óxido de propileno pela rota HPPO (peróxido de hidrogênio óxido de propileno). O processo oxida o propileno com peróxido de hidrogênio e tem como subproduto a água. Seu consumo de energia é 35% menor do que a rota convencional, porém gasta energia para produzir peróxido, resultando em economia energética líquida de 10% a 12%. Segundo o estudo, existem hoje apenas três plantas comerciais no mundo com essa rota.

Um *roadmap* elaborado especificamente para a Alemanha (GECATS, 2010) menciona como tecnologia emergente a eletrocatalise, mais especificamente a combinação de célula combustível alcalina com célula eletrolítica convencional. Essa combinação reduz a voltagem requerida para operação para aproximadamente 1 Volt e nenhum hidrogênio é produzido no processo. Em vez disso, o oxigênio fornecido é consumido e convertido a íons hidróxido. Essa tecnologia tem sido desenvolvida com base nos componentes da célula a combustível de membrana de troca de próton (PEM) e apenas 5% da produção de cloro no mundo utilizam essa combinação.

As tecnologias de ruptura são definidas como aquelas que mudam paradigmas e, por isso, reinventam rotas de produção. O desenvolvimento dessas tecnologias é bem mais complexo do que o de tecnologias emergentes e necessitam de avanços tecnológicos sistêmicos. Espera-se que tragam benefícios significativamente maiores do que MTD e tecnologias emergentes. No entanto, os riscos envolvidos em investimentos dessa natureza também são significativos e em parte justificam o atraso com o qual tais tecnologias evoluem.

19 Hoje é a principal rota de produção de olefinas no mundo.

A IEA (2014) considera como tecnologias de ruptura importantes o uso de hidrogênio de fontes renováveis para a produção de amônia e metanol e o uso de biomassa como matéria-prima. Quanto ao uso de hidrogênio, três esferas de estudos podem ser consideradas: i) produção de H_2 por decomposição eletrolítica da água, utilizando-se eletricidade de fontes renováveis; ii) síntese de amônia a partir de H_2 e N_2 gasoso, omitindo-se a reforma a vapor; iii) síntese do metanol a partir do H_2 , usando-se carvão ou CO_2 como fonte de carbono.

A decomposição eletrolítica da água é hoje a etapa mais energointensiva da rota convencional de produção de H_2 , e rotas alternativas, na verdade, requereriam energia adicional: a síntese de amônia a partir de H_2 de fontes renováveis requer mais $26 \text{ GJ/t}_{\text{amônia}}$, enquanto a síntese de metanol a partir de H_2 e carvão requer mais $15,7 \text{ GJ/t}_{\text{metanol}}$ em relação à reforma a vapor de gás natural e $5,6 \text{ GJ/t}_{\text{metanol}}$ em relação à oxidação parcial do carvão. Conclui-se, portanto, que o maior interesse no desenvolvimento dessa tecnologia advém de potencial de redução de emissões de GEE, não do potencial de redução de demanda energética do processo. A Figura 48 e a Figura 49 mostram as perspectivas de consumo energético e emissões globais até 2050 para uma taxa de implementação de 30% dessas tecnologias no horizonte de tempo considerado.

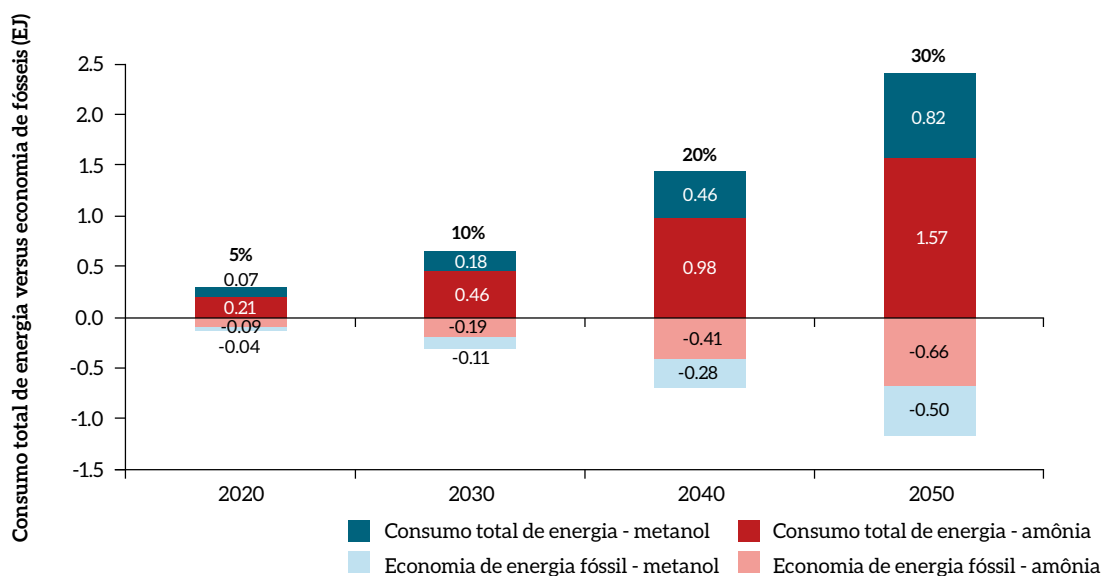


Figura 38 – Demanda Adicional de Energia vs. Economias de Energia Fóssil pela Substituição dos Atuais Processos de Amônia e Metanol pelas Rotas Baseadas em H_2

Fonte: IEA, 2014

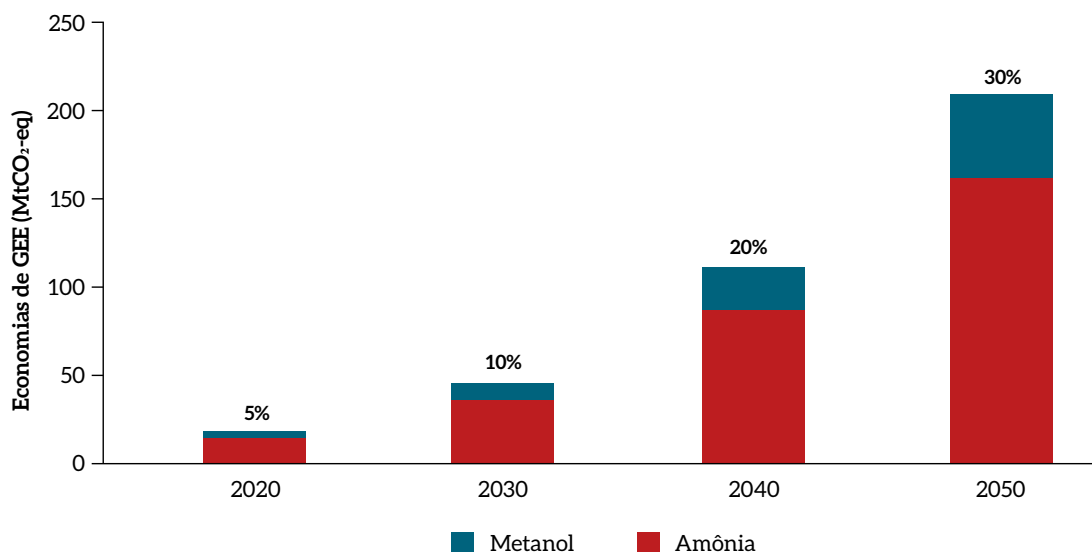


Figura 39 – Economias de GEE Possibilitadas pela Produção de Amônia e Metanol com Base em Hidrogênio

Fonte: IEA, 2014

É importante observar que, dado que a demanda energética é significativamente aumentada pela adoção dessa tecnologia, esforços em inovação no sentido de reduzir essa requisição energética podem tornar a produção de H₂ renovável uma tecnologia emergente. O desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de H₂ em grande escala também pode viabilizar isso (IEA, 2014).

No tocante à utilização de biomassa como matéria-prima, o estudo de IEA (2014) enfatiza as vantagens dessa tecnologia em termos ambientais (redução do uso de fósseis) e de segurança energética (menor dependência de fósseis e vulnerabilidade aos preços) e não deixa de mencionar a experiência pioneira do Brasil com a unidade industrial da Braskem, primeira no mundo a produzir eteno e polietileno a partir do etanol. O estudo considerou as rotas que se baseiam na gaseificação e as que se baseiam na fermentação da biomassa, ressaltando que todas dependem do desenvolvimento de catalisadores específicos para a conversão em químicos de interesse. No caso da gaseificação, gera-se um gás sintético que é convertido a metanol, e este, posteriormente, segue a rota MTO. A rota fermentativa é a adotada pela Braskem e já detalhada em outros relatórios, devendo-se apenas ressaltar que outras matérias-primas podem ser utilizadas além da cana-de-açúcar, como milho ou beterraba.

O que se deve destacar no tocante a essas rotas é que o processo é, de fato, muito intensivo em energia se comparado às rotas convencionais, apresentando consumo específico de 3,5 a 5 vezes superior. A motivação para a adoção dessas rotas advém, no entanto, do fato de que a maior parcela desse consumo é suprida pela própria biomassa, sendo, portanto, renovável e ambientalmente amigável. Segundo o estudo, as rotas de produção de olefinas via etanol de cana e via lignoceluloses de metanol precisam de 20% a 200% menos energia fóssil, apesar de o consumo energético total aumentar substancialmente.

A Figura 40 e a Figura 41 ilustram o que foi dito, comparando o uso da energia e as emissões de GEE das rotas discutidas.

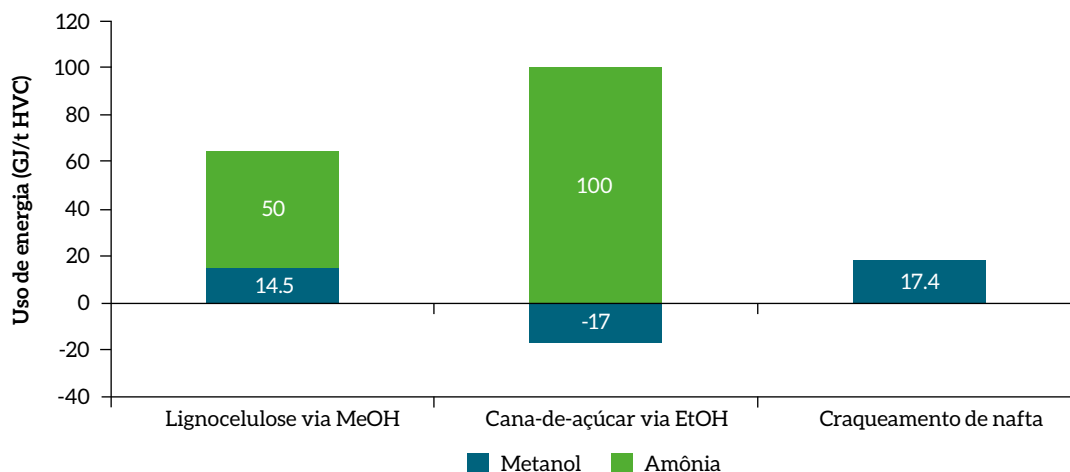


Figura 40 – Uso de Energia de Biomassa vs. Fóssil das Rotas de Produção de Olefinas

Fonte: IEA, 2014

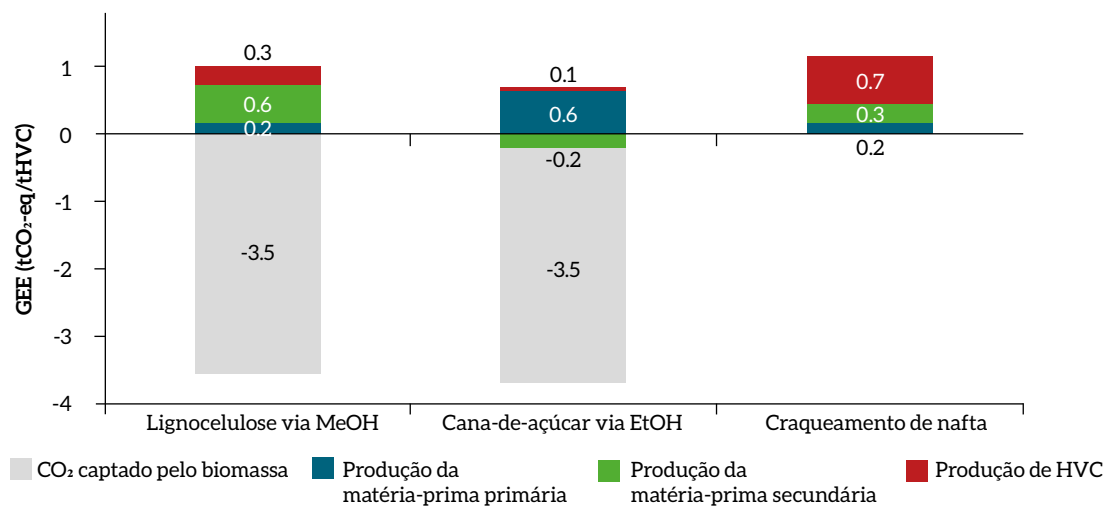


Figura 41 – Emissões de GEE para Rotas de Biomassa vs. Fósséis para HVC, Incluindo a Cadeia de Processos Total

Fonte: IEA, 2014

A contabilização de emissões exposta na Figura 41 tem como fronteira de análise apenas a indústria, excluindo os GEE associados ao uso da terra, agricultura, colheita e transporte de biomassa. Tais etapas podem tornar as tecnologias discutidas mais carbonointensivas e, por isso, uma análise do tipo ciclo de vida deve ser considerada (IEA, 2014). Além disso, a própria questão de uso da terra para biomassa e competição com alimentos pode se colocar como obstáculo à viabilização dessas tecnologias, devendo-se considerar esses diversos elementos em paralelo ao desenvolvimento tecnológico.

Por sua vez, a química verde é definida como aquela que conduz ações científicas e/ou processos

industriais ecologicamente corretos, acoplando-se, assim, os interesses da inovação química com os interesses da sustentabilidade ambiental (CGEE, 2010). É importante considerar o potencial de inovação da dita química verde no país principalmente porque é a partir dela que o desenvolvimento tecnológico na indústria química nacional deve se dar. Tal afirmação é encontrada na nota técnica de demanda publicada pela EPE (2014) e foi publicada no estudo sobre potencial de diversificação da indústria química divulgado em 2015, financiado pelo BNDES (BAIN & COMPANY, 2014) e discutido em reunião presencial com representantes da Abiquim e da Braskem em maio de 2015.

Segundo Bain & Company (2014), o Brasil dispõe de matérias-primas de diferentes naturezas, como cana-de-açúcar e milho, que poderiam ser utilizadas para mitigar emissões de GEE. O Brasil detém 30% da produção mundial de cana-de-açúcar; 40% da produção mundial de resíduos agroindustriais como bagaço e palha de cana; e 18% da produção de óleos e gorduras, como o óleo de soja. Ainda, o CGEE (2010) afirma que o Brasil tem um dos maiores estoques de biodiversidade do planeta, grande disponibilidade de culturas agrícolas, além de intensa radiação solar, água em abundância e diversidade de clima, indicando, portanto, o grande potencial nacional para a química sustentável.

O estudo desenvolvido pelo consórcio entre Bain & Company (2014) propõe, nesse contexto, foco em investimentos em que há oportunidade de investimento local. São eles: instalação de biorrefinarias de biomassa, palha e bagaço de cana, localizadas prioritariamente próximas a usinas sucroalcooleiras, e produção de bioquímicos, como glicerina e propilenoglicol, aproveitando-se a estrutura existente da cadeia de óleos.

Tais oportunidades se baseiam nos arcabouços tecnológicos que o estudo de CGEE (2010) divide em biorrefino – bioquímica e termoquímica, alcoolquímica e sucroquímica e oleoquímica, brevemente descritos a seguir.

As biorrefinarias constituem instalações nas quais os processos utilizam como matéria-prima insumos renováveis e resíduos – biomassa – para coproduzir biocombustíveis, bioprodutos de alto valor agregado, além de energia e alimentos.

A rota bioquímica de processo é uma alternativa para a produção de etanol de segunda geração a partir de matéria lignocelulósica, que deve ser devidamente hidrolisada em processos microbiológicos, como hidrólise ácida ou sacarificação enzimática, para disponibilizar açúcares para fermentação, no caso da produção de etanol. No entanto, a hidrólise total da celulose, por exemplo, gera glicose, que pode ser convertida em uma série de produtos químicos de valor agregado além do etanol, como ácidos orgânicos, glicerol, sorbitol etc. O mesmo vale para a fração hemicelulósica e para a lignina, também presentes nos resíduos de biomassa hidrolisados por enzimas (CGEE, 2010). A Figura 42, a Figura 43 e a Figura 44 contextualizam o conceito de biorrefinaria lignocelulósica e suas aplicações em torno da agroindústria.

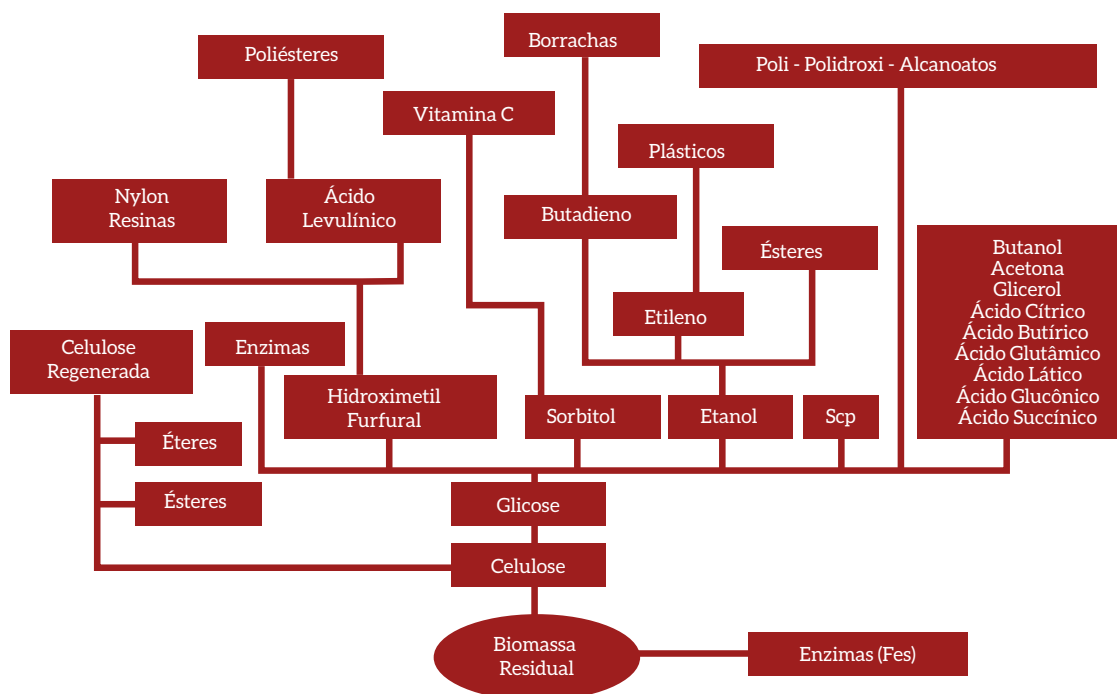


Figura 42 – Biorrefinaria Lignocelulósica: Produtos da Celulose

Fonte: CGEE, 2010

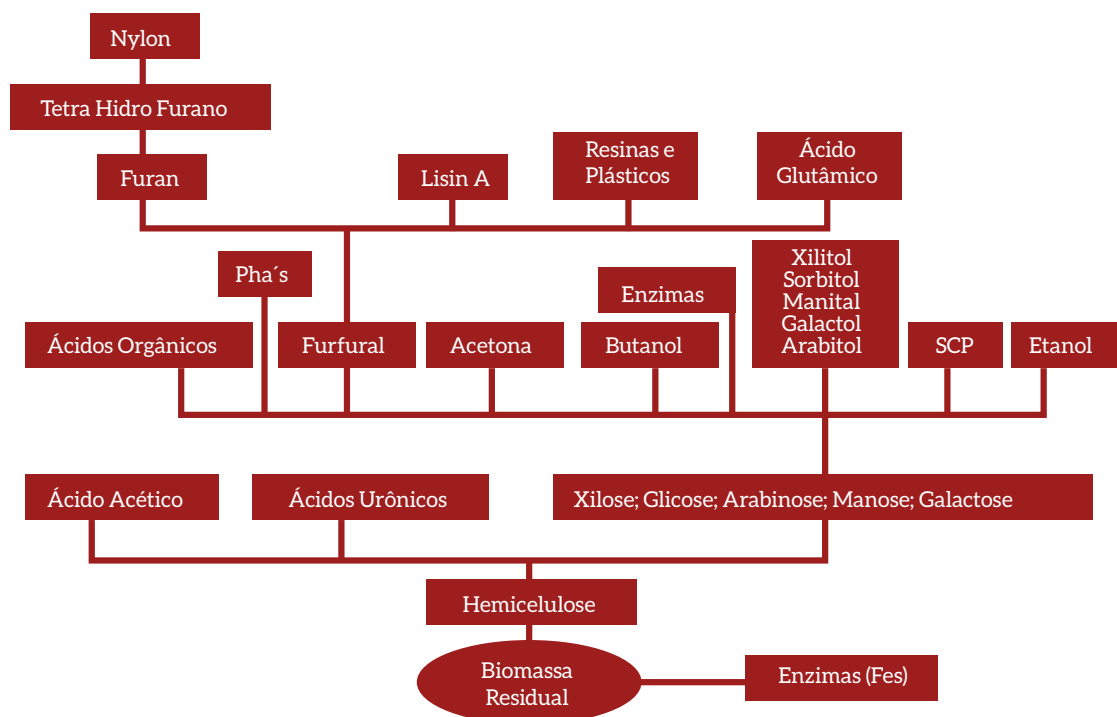


Figura 43 – Biorrefinaria Lignocelulósica: Produtos da Hemicelulose

Fonte: CGEE, 2010

Segundo o CGEE (2010), a concepção de uma biorrefinaria de rota termoquímica no Brasil pode vir como um complemento a uma refinaria convencional dentro de um conceito XTL, conforme mostra a Figura 46. As etapas de produção envolvidas na rota termoquímica de biorrefino incluem diferentes níveis de maturidade tecnológica, a exemplo do processo Fischer-Tropsch, já consolidado em contrapartida à rota de dimetiléter.

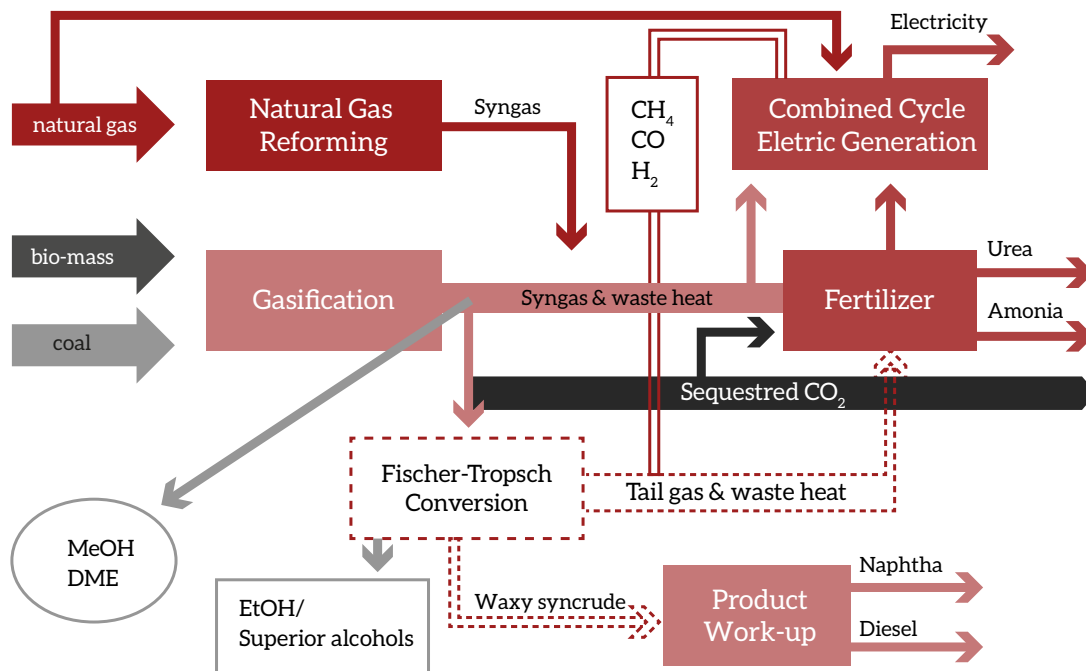


Figura 46 – O Conceito de uma Refinaria XTL (X = gás natural, carvão ou biomassa)

Fonte: CGEE, 2010

A alcoolquímica consiste no uso do álcool como insumo para a fabricação de outros produtos químicos. A alcoolquímica voltou²⁰ a ganhar espaço no Brasil com a consolidação da Braskem como pioneira na produção de eteno e polietileno verde a partir do etanol de cana-de-açúcar e com as perspectivas de expansão dessa rota no país.²¹ Esse processo produtivo foi descrito em relatórios anteriores e o perfil energético detalhado no item anterior.

O potencial da alcoolquímica no país é alto em muito devido ao baixo custo de produção do etanol nacional, no entanto grande parte das rotas produtivas potenciais para geração de produtos orgânicos ainda se encontra em estágio embrionário ou de crescimento de pesquisa. Dentre eles, podem-se citar: i) obtenção de propeno via etanol empregando o menor número possível de etapas reacionais; ii) obtenção de acetato de etila a partir de etanol via oxidativa ou via desidrogenativa em reator único; iii) obtenção de ácido acético a partir de etanol em reator único; iv) obtenção de 1-butanol a partir de etanol em reator único; v) obtenção de 1,3-butadieno a partir de etanol em reator único (CGEE, 2010).

20 A alcoolquímica teve espaço nos anos 1970, na época do Proálcool.

21 A Dow Brasil tem dois projetos de alcoolquímica em andamento e a Braskem tem um projeto em andamento de polipropileno verde (ABIQUIM, 2013).

No que tange à sucroquímica, a principal distinção em relação à alcoolquímica advém do fato de que a sucroquímica gera químicos a partir de derivados e resíduos da cana-de-açúcar. A Figura 47 mostra os desdobramentos de produtos derivados dos açúcares sacarose, pentoses e hexoses.

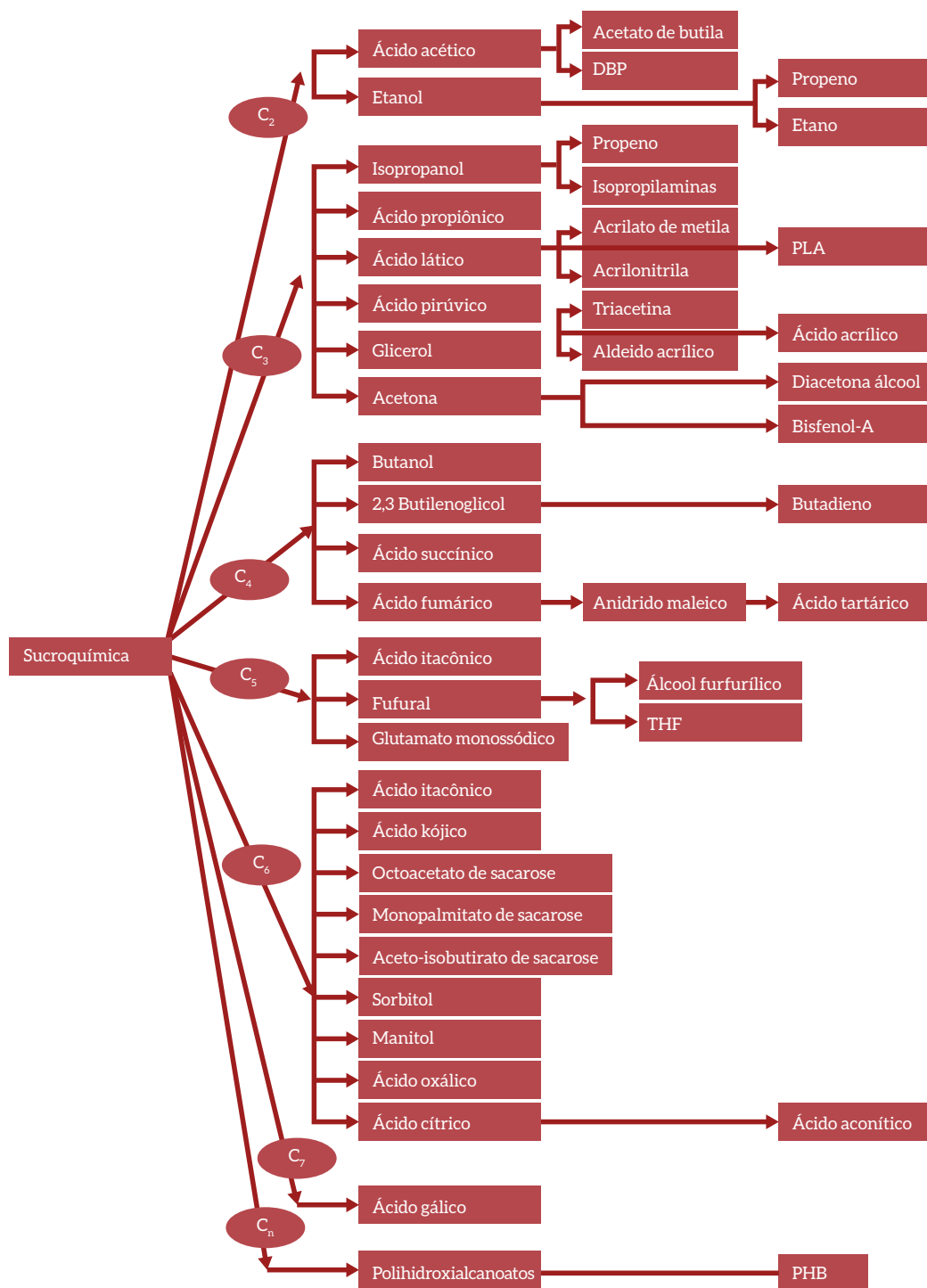


Figura 47 – Esquema Básico da Sucoquímica

Fonte: CGEE, 2010

A oleoquímica consiste no conjunto de processos que converte óleos vegetais e gorduras animais em produtos químicos de alto valor agregado, principalmente ésteres metílicos e etílicos de ácidos graxos para fins energéticos, o biodiesel. Os oleoquímicos principais são derivados de ácidos graxos, compostos nitrogenados graxos, álcoois graxos e glicerol, conforme mostra a cadeia da Figura 48.

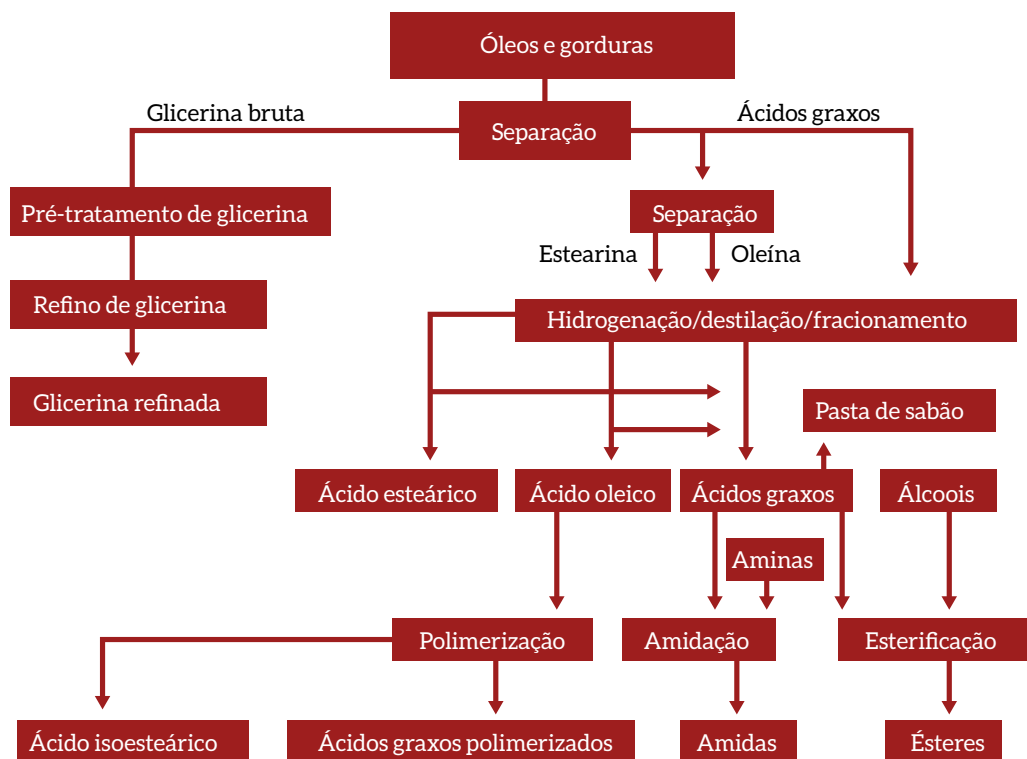


Figura 48 – Esquema Básico da Oleoquímica

Fonte: CGEE, 2010

O uso principal da matéria-prima oleaginosa utilizada na oleoquímica, como milho, soja, girassol e dendê, é a alimentação humana e animal, o que tem levantado o debate relativo a segurança alimentar. Nesse contexto, têm-se buscado matérias-primas alternativas, e, no contexto de proteção ao meio ambiente, têm-se buscado técnicas mais sustentáveis de produção das matérias-primas.

No que tange a novas rotas de produção de químicos, o CGEE (2010) indica que já foram propostas transformações químicas para converter glicerina em petroquímicos e aditivos de combustíveis. Acroleína e ácido acrílico, intermediários na produção de polímeros, por exemplo, podem ser obtidos por desidratação, e propeno pode ser obtido por hidrogenólise. Em suma, do ponto de vista químico, é possível gerar uma série de ácidos graxos com diversos tamanhos de cadeia, grupos funcionais e posição e quantidade de dupla ligação.

O estudo afirma também que, além dos ácidos graxos mais conhecidos e disponíveis em grande variedade de diferentes óleos vegetais, existem os óleos vegetais que são ponto de partida para a conversão catalítica em matérias-primas orgânicas ou poliméricas. Polímeros podem ser preparados de triacilgliceróis como óleos oxipolimerizados, poliésteres, poliéteres, poliuretanas, poliamidas, resinas epóxi, poliesteramidas, entre outros.

A captura de carbono na indústria química pode ocorrer em processos em que há como efluente correntes com alta concentração de CO₂, de forma que o processo de separação não é tão custoso.

A captura na petroquímica é muito atrelada às unidades de geração de hidrogênio e, assim, integradas a unidades de refino de petróleo. Dessa forma, a captura de carbono em UGH foi alocada no setor energético, não fazendo, portanto, parte da indústria química na subdivisão adotada no projeto.

No caso da amônia, a captura de carbono para esse processo produtivo foi estudada e detalhada na publicação *Opções transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa: captura, transporte e armazenamento de carbono* (MCTIC, 2017c).

A partir dos dados levantados, o Quadro 5 resume as opções tecnológicas levantadas e seus respectivos potenciais e referências.

Quadro 5 – Potenciais de Redução no Consumo de energia e/ou Abatimento de Emissões para as Opções Tecnológicas Consideradas no Cenário BC+I

Opções Tecnológicas		Potencial		Referência
		Base energética	Base emissões	
Biomassa como matéria-prima	MeOH via lignocelulose	SEC 3,5 a 5x superior a rotas convencionais; demanda de energia fóssil 20% a 200% inferior	2,4 tCO ₂ e/t HVC capturado	IEA, 2014
	EtOH via cana-de-açúcar		2,8 tCO ₂ e/t HVC capturado	IEA, 2014
Uso de H ₂ obtido a partir de fontes renováveis para produção de amônia e metanol		Amônia: +26 GJ/t Metanol: + 15,7 GJ/t	Mitigação mundial > 200 MtCO ₂ e até 2050 a taxa de penetração de 30% a.a.	IEA, 2014
Produção de olefinas via tratamento catalítico da nafta		10%-20% menos energia	-	IEA, 2014 REN, 2009
Produção de olefinas a partir da rota MTO		Não apresenta potencial de abatimento		IEA, 2014
Aplicação da rota HPPO para produção de óxido de propileno		Economia líquida de 10% a 12%	-	IEA, 2014
Eletrocatalise		Redução da voltagem para 1 Volt	-	GECATS, 2010
Captura e armazenamento de carbono		-	1,2 MtCO ₂ /ano	MCTIC, 2017c

Fonte: Elaboração própria

3.3.2 PREMISSAS

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

Logo, o cenário BC+I contempla não apenas as MTD, mas também as tecnologias com alto grau de incerteza, ainda não disponíveis comercialmente e em diferentes níveis de desenvolvimento. Tais tecnologias apresentam, segundo literatura consultada (IEA, 2014; UK DECC, 2011; RICARDO AEA, 2011; FARLA et al., 2005; SEA/RJ, 2012), estimativas preliminares de potencial de redução de consumo energético e de abatimento de emissões de GEE. A partir desses potenciais disponíveis, foi possível realizar uma estimativa de consumo energético e emissões do setor químico uma vez dispondo-se, no futuro, dessas tecnologias para mitigação.

Ressalta-se mais uma vez que se trata de um cenário de alto grau de incerteza por não ser possível garantir que todas as tecnologias consideradas vão, de fato, se tornar disponíveis como medidas de mitigação no futuro. Vale notar também que, justamente por serem tecnologias em nível de desenvolvimento muito preliminar, não estão disponíveis na literatura dados econômicos, como custo de investimento e O&M.

Por serem tecnologias que ainda têm um longo caminho de desenvolvimento a percorrer até a viabilidade comercial, considerou-se implementação somente a partir de 2026.

O Quadro 6 lista as tecnologias consideradas para estimativa do cenário BC+I. Os cálculos se baseiam nas previsões de redução (ou aumento) de consumo energético e redução de emissões de cada medida. As medidas foram somadas quando possível, mas vale observar que algumas não são aditivas, a exemplo do craqueamento catalítico da nafta. Ademais, deve-se destacar que foram consideradas tecnologias mencionadas no capítulo 2, quais sejam integração de turbinas a gás em fornos de craqueamento e eletrólise a vapor.

Quadro 6 – Tecnologias Consideradas no Cenário BC+I

Tecnologia	Redução de CO ₂ (C) ou de energia (E)	Referência
Metanol lignocelulósico (biomassa como matéria-prima – química verde)	2,4 tCO ₂ eq/t HVC capturado SEC 3,5 a 5x superior a rotas convencionais; demanda de energia fóssil 20% a 200% inferior	IEA, 2014
Uso de H ₂ obtido a partir de fontes renováveis para produção de amônia e metanol	100% (C) Amônia: +26 GJ/t (E) Metanol: + 15,7 GJ/t (E)	UK DECC/UK BIS, 2015 IEA, 2014
Produção de olefinas via craqueamento catalítico de nafta	15% (C) 15% (combustíveis fósseis)	UK DECC/UK BIS, 2015 CEFIC/ECOFYS, 2013 IEA, 2014
Novas tecnologias de separação por membrana	8% (C); 8% (eletricidade); 8% (combustíveis fósseis)	UK DECC/UK BIS, 2015 IEA, 2008
Recuperação de calor de/para fluidos agressivos	100% (C); 17% (eletricidade); 100% (combustíveis fósseis)	UK DECC/UK BIS, 2015 CEFIC/ECOFYS, 2013
Captura e armazenamento de carbono (CCS)	~70% (C) ~410 MJ/tCO ₂ (E)	FARLA et al., 1995 MCTIC, 2017c

Fonte: Elaboração própria

As tecnologias que ocasionam substituição de fósseis por biomassa e/ou resíduos também não foram consideradas no cenário BC+I porque a substituição de fósseis por renováveis já foi considerada no cenário BC, evitando-se, assim, dupla contagem.

3.3.3 RESULTADOS

A partir de informações sobre potencial de redução de energia das tecnologias inovadoras, foi possível projetar o consumo de energia e emissões no cenário BC+I. A Figura 49 e a Figura 50 sintetizam essas informações.

Inicialmente, verifica-se que uma queda de no consumo de energia de 16%, em 2050, com relação ao cenário REF. A química verde e o uso de hidrogênio a partir de fontes renováveis representam um aumento no consumo de energia, que é sobrepujado pelo potencial de economia energética decorrente, sobretudo, da utilização de novas tecnologias de separação por membrana.

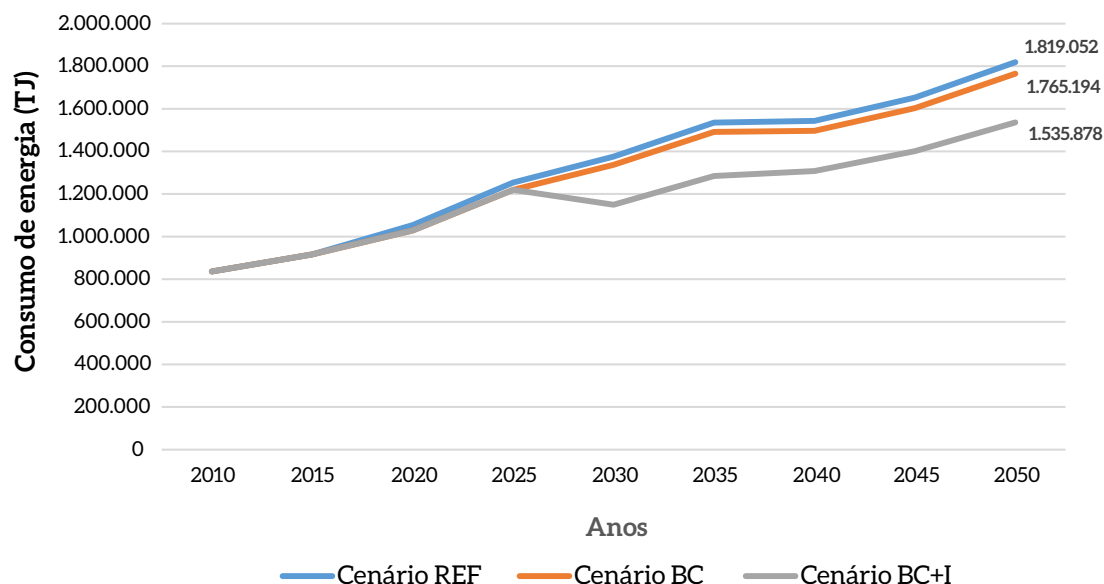


Figura 49 – Demanda de Energia nos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

Se por um lado o aumento no consumo de biomassa leva a perda em termos do consumo de energia, por outro favorece a mitigação de emissões de GEE. Esse aspecto pode ser verificado pelo potencial de redução de emissões no cenário BC+I, que é de 36% relativamente ao cenário REF.

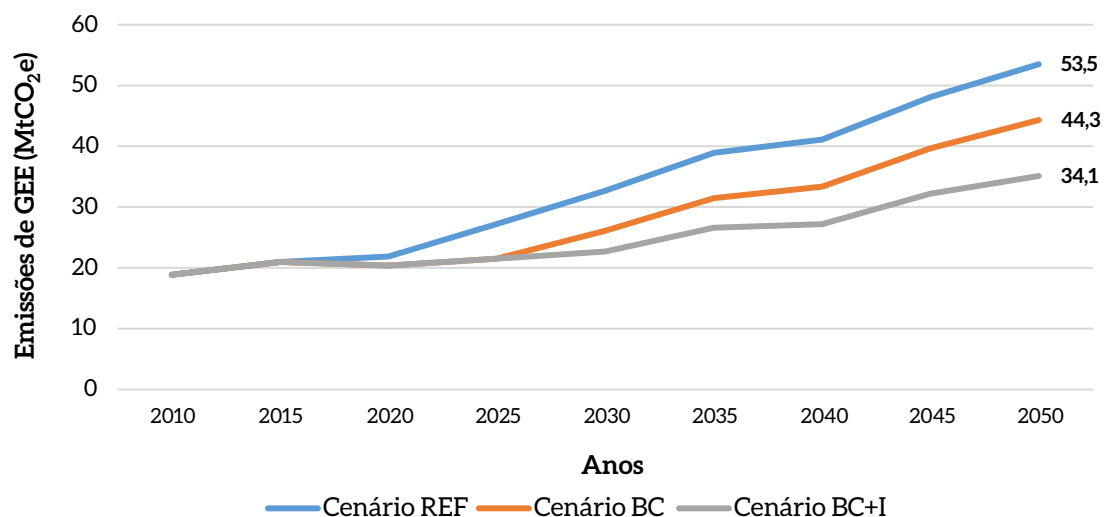
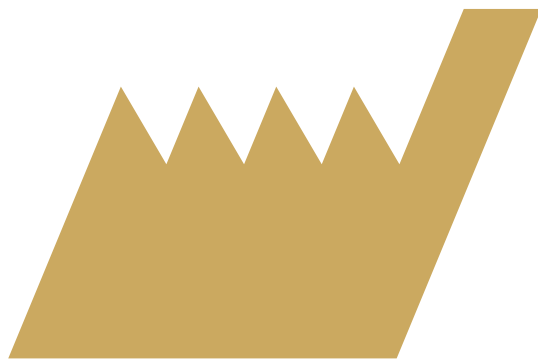


Figura 50 – Emissões de GEE do Setor Químico nos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

Dentre as tecnologias consideradas para a construção do cenário BC+I, o uso de hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis de energia pode ser considerado a mais relevante para o alcance de redução expressiva de emissões de CO₂ em relação ao cenário REF.

Ainda que o potencial de mitigação no cenário BC+I seja significativo, não devem ser desconsideradas as barreiras à adoção das tecnologias inovadoras, que são tecnológicas e econômicas, sobretudo. No próximo capítulo, serão tratados de forma mais detalhada barreiras existentes para a entrada das tecnologias e seus cobenefícios, assim como instrumentos de política capazes de removê-las e potencializá-los, respectivamente.



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

Capítulo

4

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

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

Pôde-se constatar um potencial acumulado de abatimento de 46,7 MtCO₂ no cenário BC, com 65% e 72% desse montante com taxa de desconto de 8% e 17% ao ano, respectivamente, apresentando custos de abatimento positivos. Entretanto, mesmo que todas as atividades de baixo carbono fossem atrativas sob o ponto de vista econômico, aspectos que não foram avaliados no estudo poderiam levar a resultados distintos. Tipicamente, análises setoriais de oportunidades de mitigação de emissões de GEE tendem a desconsiderar variáveis que afetam significativamente a mensuração de potenciais e custos de abatimento: i) competição por tecnologias de baixo carbono com outros setores; ii) adequação dos custos de capital e O&M, obtidos na literatura científica, à realidade econômico-tributária do país; iii) impactos de deficiências regulatórias, refletidos em custos de transação que não capturados pela metodologia de CMA; iv) não aditividade e aplicabilidade de medidas em face de restrições técnico-operacionais; entre outras.

No caso das tecnologias de ruptura avaliadas no cenário BC+I, o potencial de mitigação seria maior, qual seja de 36% de redução de emissões com relação ao cenário REF, em 2050. Todavia, são medidas mitigadoras de emissão distantes da aplicabilidade no setor, sendo o objetivo da análise demonstrar os efeitos que trariam mediante a remoção de substanciais barreiras por meio de instrumentos de política pública variados, mas em particular voltados a pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D).

As lacunas associadas à não aditividade e à competição por tecnologias de baixo carbono são superadas por meio da técnica de integração de cenários adotada pelo projeto (MCTIC, 2017b). Seus resultados permitem obter informações precisas em termos de potenciais e custos de mitigação de emissões de GEE. Por exemplo, constatou-se que somente a recuperação de calor em caldeiras, recuperação de hidrogênio na produção de metanol e amônia e o maior uso de biomassa em fornos e caldeiras, perante o conjunto de medidas com custo de abatimento negativo (Tabela 68 e Tabela 69), são verdadeiramente custo-efetivas no horizonte de implementação até 2050 (MCTIC, 2017b). E, mesmo que tenham custo-efetividade, exigem a remoção de barreiras para sua adoção, pois não fazem parte, em sentido amplo, do *baseline* setorial.

Com o objetivo de fornecer elementos para que os formuladores de política pública possam implementar, efetivamente, instrumentos que permitam abater emissões do setor, serão discutidos os seguintes tópicos neste capítulo:

- i) Identificação de barreiras e cobenefícios à adoção de medidas de baixo carbono no setor;
- ii) Exemplos internacionais e nacionais de políticas públicas de baixo carbono;
- iii) Instrumentos de política pública aplicáveis ao setor para promover o abatimento de emissões de GEE;
- iv) Síntese da proposta de instrumentos de política pública para a implementação do cenário BC.

4.1 BARREIRAS E COBENEFÍCIOS À IMPLEMENTAÇÃO DAS ATIVIDADES DE BAIXO CARBONO

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

Existem problemas específicos para cada setor industrial e problemas específicos relacionados ao porte das empresas que são aplicáveis ao setor químico. 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.

Conforme se pôde verificar no cenário BC, relevante parte das medidas aplicáveis para mitigar emissões de GEE tem CMA positivos. Além dessa barreira econômica, a atual situação econômica do país leva a que o governo realize ajustes fiscais que dificultam o acesso a crédito por parte do setor. Esse aspecto influencia até mesmo a realização de investimento em medidas viáveis economicamente, pois a conjuntura econômica recessiva afeta a capacidade financeira das empresas. Essas restrições são percebidas em termos da disponibilidade de capital no mercado de crédito, bem como do aumento da taxa de juros para a concessão de financiamentos. Existe assimetria no acesso ao crédito associado ao porte das empresas, o que inibe a realização de investimentos em ações de eficiência energética por médias e pequenas empresas, bem como custos de transação que precisariam ser removidos para a realização de investimentos. Finalmente, a recessão afeta a renda das famílias e, conseqüentemente, a demanda por bens duráveis derivados das cadeias química e petroquímica, o que dificulta a realização de investimentos em efficientização 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, por exemplo, da recuperação de calor em caldeiras e recuperação de hidrogênio na produção de metanol, também é necessária a disponibilização de capital para instalação das tecnologias. Ademais, e em linha com UK DECC (2015), essas medidas demandam menores prazos de retorno de capital, aspecto que frequentemente impede a sua adoção.

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

Ao nível institucional e regulatório, a obtenção de crédito para o financiamento em atividades de baixo carbono, em particular aquelas com custos de abatimento positivos, está condicionada a uma série de exigências burocráticas, dentre as quais se destaca a elaboração de projetos para o acesso a linhas de crédito de programas governamentais. Além do custo de transação relacionado às inúmeras exigências processuais e documentais para acesso ao crédito, em particular por bancos de fomento, médias e pequenas empresas do setor têm dificuldade na elaboração de projetos, com restrição de mão de obra qualificada para esse propósito (SORREL et al., 2004).

A questão do suprimento de biomassa, em face da proposta de aumento na participação da fonte na matriz energética do setor, constitui entrave relevante. O mesmo problema ocorre no caso do aumento na demanda por gás natural, adicionado-se que atualmente a rede de gasodutos não atende todas as plantas químicas. No caso da captura de carbono, inexistem redes de carodutos para transporte do CO₂, tendo em vista a indisponibilidade comercial e inviabilidade econômica da tecnologia. Esses aspectos dão origem a entrave adicional, qual seja a inexistência de arcabouço regulatório para o transporte de do CO₂ capturado.

Ainda no âmbito regulatório, a inexistência de padrões de eficientização energética e/ou limites de emissões se constituem em barreiras à implementação de atividades de baixo carbono.

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

Em termos comportamentais e informacionais, muitos atores do setor industrial desconhecem a relação custo-benefício das medidas que resultam em 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. É o caso, por exemplo, do monitoramento e manutenção de sistemas motores e caldeiras. 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 pode constituir barreira a sua adoção. Tecnologias importadas têm restrições de manutenção e comumente não estão adaptadas para atender as especificidades dos processos produtivos locais, o que pode retardar ou impedir sua introdução, inviabilizando ganhos em termos de produtividade e economia de energia (CURRÁS, 2010).

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

- Desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono em âmbito nacional;
- 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;
- Melhoria na conversão de energia em serviços energéticos;
- Melhoria na saúde da população em face da mitigação de poluentes globais e locais;
- Promoção ao uso de fontes menos energointensivas de energia;
- Redução de custos de expansão do sistema elétrico;
- Redução nos custos variáveis associados ao consumo de energia;
- Utilização eficiente dos recursos naturais.

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

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

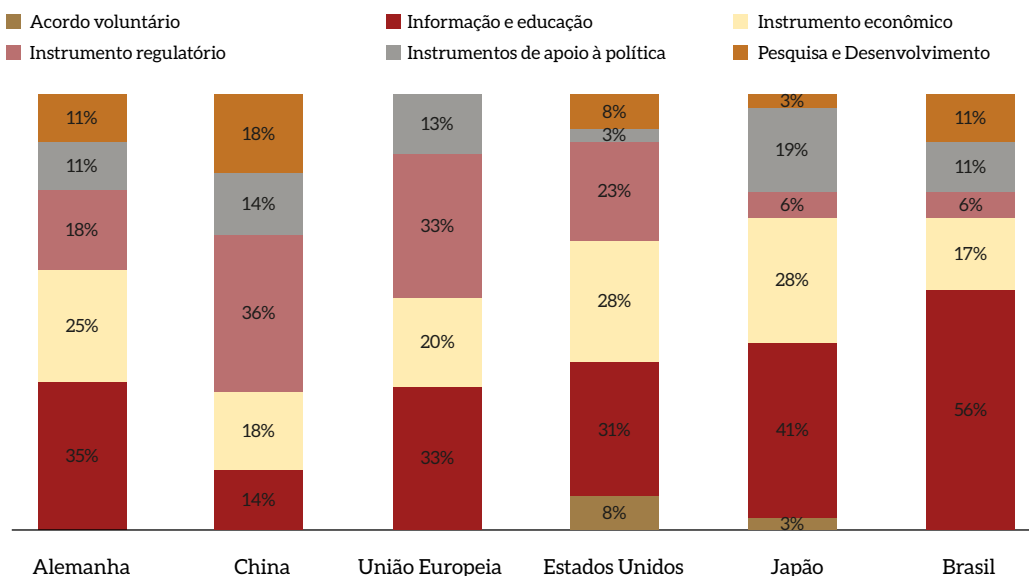


Figura 51 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria

Fonte: Elaborado a partir de WORLD ENERGY COUNCIL, 2013

A partir de pesquisa bibliográfica em documentos internacionais como World Energy Council (2013) e IEA (2015), tornou-se possível a identificação de políticas públicas criadas para remover

as barreiras apresentadas. Entre os mecanismos utilizados, encontram-se incentivos fiscais, disponibilização de financiamentos e fundos para investimento em tecnologias de eficiência energética, exigência do monitoramento relativo às emissões de CO₂, iniciativas de pesquisa com forte ênfase na eficiência energética, desenvolvimento de sistemas para fornecer aos consumidores informações relacionadas à eficiência energética, como certificação de produtos, taxaço de carbono e créditos de carbono.

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

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

— Ações Eixo 2: Reciclagem e 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 a adoção de tecnologias de baixo carbono requer fluxos significativos e constantes de crédito para a realização de investimentos, é preciso ampliar a estrutura de captação de recursos por bancos públicos de fomento. Para tanto, os organismos gestores do Fundo Clima, e/ou aqueles que vierem a ser criados visando ao cumprimento da NDC, deveriam procurar recursos junto ao Green Climate Fund (GCF), ao Global Environmental Facility (GEF) e ao Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), entre outros. Mais que isso, os portfólios de crédito das instituições financeiras devem ser diversificados para pequenas, médias e grandes empresas, visando estabelecer igualdade na aquisição de financiamentos. No particular das pequenas empresas, que enfrentarem dificuldade de mão de obra qualificada para adoção de tecnologias de baixo carbono, também cabe o acesso a recursos de assistência técnica do Climate Technology Centre Network (CTCN).

A linha de financiamento do Finem – Eficiência Energética do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), com recursos do Fundo Clima e demais fontes de alavancagem mencionadas, poderia custear, com taxas subsidiadas de juros, a aquisição de equipamentos de baixo carbono. Em virtude do patamar de recursos necessário para adoção das medidas, poderia ser criada, pelo BNDES, a linha de crédito “Finem – Eficiência Energética na Indústria”, com portfólios subdivididos por porte de empresa. E, finalmente, a partir de 2025, a precificação de carbono poderia servir de incentivo à viabilização das atividades com custo marginal de abatimento positivo e, sobretudo,

tecnologias emergente e de ruptura. Nesse caso, optando-se pela taxação de carbono enquanto instrumento de internalização do preço de carbono na economia, seria desejável a reciclagem de parte dos recursos para incentivo de P&D.

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

Para remover a barreira relacionada a tecnologias importadas, que estão sujeitas à volatilidade cambial e taxas alfandegárias, poderia ser implementado um instrumento econômico com vistas a desonerar impostos. Para tornar o instrumento eficiente, o MF poderia prever, com atribuições para o MDIC, que a desoneração fosse acompanhada de contrapartidas tecnológicas e sociais pelas empresas beneficiadas, quais sejam: i) estabelecimento de metas de efficientização energética e/ou redução de emissões; 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 Abiquim. 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 estejam correlacionadas a atividades-chave mapeadas no âmbito deste estudo. Todavia, os procedimentos burocráticos visam proteger o setor financeiro do risco de inadimplência, motivo pelo qual a desburocratização deve respeitar limites mínimos de análise de crédito.

Uma maneira de gerar reciprocidade na concessão de crédito seria a exigência de contrapartidas para contratação por meio da linha “Finem – Eficiência Energética na Indústria”, como realização de auditorias energéticas, apresentação de inventários corporativos para médias e grandes empresas e cumprimento de metas de efficientização energética e/ou emissões de GEE. Tais instrumentos poderiam ser implementados em parceria entre o MMA, MF, MDIC e empresas do setor, com horizonte de implementação de médio prazo.

Como citado, é necessário estabelecer padrões máximos (metas) de efficientização energética e/ou 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. Por sua vez, as metas de efficientização energética poderiam ser avaliadas no âmbito do Balanço Energético Nacional. Assim, seria possível acompanhar, anualmente, o nível de implementação setorial das tecnologias de mitigação propostas no cenário BC.

Os instrumentos regulatórios anteriormente mencionados poderiam ser pré-requisito para obtenção de um selo que seria criado, visando incentivar a adoção de medidas mitigadoras de emissão no

setor. No caso, propõe-se criar o “Selo de Eficiência Energética Industrial”, que seria critério para acesso a condições privilegiadas de crédito junto a bancos públicos de fomento. Mais que isso, seria exigido para participação de empresas do setor nos processos licitatórios. Tais instrumentos poderiam ser aplicados a partir de 2020 e seriam liderados por MDIC, MMA, MME e bancos públicos de fomento.

Com vistas a promover uma cultura organizacional voltada para ações de efficientização 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 da Abiquim. Adicionalmente, é importante a criação de instrumento voltado à substituição de equipamentos no final da vida útil. Poderia ser elaborado um programa de depreciação obrigatória de caldeiras e 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”. Mais do que isso, faz-se necessário condicionar o acesso para investimento em novas plantas à adoção de *benchmark* em termos de MTD. Para tanto, é relevante o envolvimento do MDIC, MF, BNDES, Abiquim e empresas associadas. Os instrumentos poderiam ser implementados a partir de 2023.

Um instrumento que fomentaria, transversalmente, a efficientização energética, seria o incentivo à implementação da norma ISO 50.001 para gestão da eficiência energética nas indústrias químicas em geral. A implementação desta norma possibilitaria à cada unidade identificar *gaps* e diversos potenciais para efficientização nas unidades industriais. Portanto, deve estar associada à realização de atividades de capacitação de técnicos, visando a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos e monitoramento de ações de que promovam redução no consumo de energia.

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

No que se refere à captura de carbono, 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 da medida 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.

No caso da garantia de suprimento de biomassa para fornos e caldeiras, faz-se necessária elaboração de contratos e seguros. Também é preciso incentivar os setores de Afolu e gestão de resíduos, visando a expansão das áreas dedicadas a florestas energéticas e a coleta de resíduos agropecuários, respectivamente. Essa proposta está em linha com as premissas e os resultados do cenário de baixo carbono destes setores, reportados em MCTIC (2017e; 2017f), e com os objetivos do Projeto Siderurgia

Sustentável (MMA, 2017). Por sua vez, o suprimento de gás natural também deve ser garantido através da contratação de seguros e contratos cativos de fornecimento, assim como mediante a expansão dos gasodutos. A implementação desses instrumentos exige a mobilização do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), MMA, MDIC, MME, ANP, Abiquim, Petrobras e seguradoras. Sua discussão, visando ao aprimoramento dessa proposta, poderia iniciar em 2018, para implementação a partir de 2020.

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

A aplicação de instrumentos de política pública 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 captura e armazenamento de carbono, 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 dutos 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 captura.

Nesse sentido, deve ser reforçado o papel do MDIC e do MCTIC como agentes indutores da inovação. Deve ser fomentada a P&D voltada para tecnologias de ruptura e emergentes, sendo o lançamento de editais para o financiamento de projetos específicos de baixo carbono, junto à Financiadora de

Estudo e Projetos (Finep), um instrumento relevante para o setor. Ademais, a oferta de estudos conjunturais, estratégicos e tecnológicos voltada para o desenvolvimento sustentável do setor, pela ABDI, deve ser incentivada.

Para superar a barreira relativa à especificidade das plantas industriais, que muitas vezes limita a adoção de tecnologias de baixo carbono, poderiam ser elaborados estudos detalhados da aplicabilidade das atividades mapeadas pelo projeto para as plantas químicas e petroquímicas 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 a ABDI e a Abiquim servirem de suporte para elaboração das propostas e acompanhar, em conjunto com a Embrapii, a implementação dos projetos.

A seguir, no Quadro 7, 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 químico 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 7 – Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política Pública para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Adoção de pré-reformador na produção de amônia	• Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficiência energética; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas; • Resistência à substituição de equipamentos; • Restrições à instalação pelo <i>layout</i> das plantas; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias.	• Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Criação da linha de crédito “Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria”; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • 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 existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • Incentivo à implementação da ISO 50.001 nas empresas do setor; • Obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas e elaboração de inventários de emissões como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos e monitoramento de ações de eficiência energética.
Recuperação de calor em caldeiras		
Adoção de queimadores <i>low NOx</i> em fornos		
Monitoramento e manutenção de caldeiras		
Recuperação de hidrogênio na produção de metanol		

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Reciclo de condensado em caldeiras	• Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Elevado custo de importação de pré-reformadores; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da efficientização energética; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas; • Inviabilidade econômica; • Resistência à substituição de equipamentos; • Restrições à instalação pelo <i>layout</i> das plantas; • Risco do sobre ou subdimensionamento das tecnologias.	• Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Criação da linha de crédito “Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria”; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • 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; • Desoneração de impostos de importação de pré-reformadores; • Diversificação das linhas de crédito existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • Incentivo à implementação da ISO 50.001 nas empresas do setor; • 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; • 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.
Adoção de pré-reformador na produção de amônia		
Monitoramento e manutenção de sistemas motores		
Recuperação de hidrogênio na produção de amônia		

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Maior uso de biomassa em fornos e caldeiras	• Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficiência energética; • Falta de garantia de suprimento de biomassa; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas; • Inviabilidade econômica; • Resistência à substituição de equipamentos; • Restrições à instalação pelo layout das plantas.	• Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Criação da linha de crédito “Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria”; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • 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 existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de biomassa; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • Incentivo à implementação da ISO 50.001 nas empresas do setor; • 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; • 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.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Maior uso de gás natural em fornos e caldeiras	• Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficiência energética; • Falta de garantia de suprimento de gás natural; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas; • Inviabilidade econômica; • Resistência à substituição de equipamentos; • Restrições à instalação pelo layout das plantas.	• Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Criação da linha de crédito “Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria”; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • 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 existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Elaboração de contratos e seguros de fornecimento de gás natural; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Expansão da rede de gasodutos; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • Incentivo à implementação da ISO 50.001 nas empresas do setor; • 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; • 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.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Integração de processos com análise <i>pinch</i> na produção de amônia e petroquímica básica	• Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Competição com outros investimentos; • Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Elevado custo de importação de tecnologias para integração energética; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficiência energética; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas; • Inviabilidade econômica; • Resistência à substituição de equipamentos; • Restrições à instalação pelo <i>layout</i> das plantas; • Risco do sobre ou subdimensionamento da tecnologia.	• Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID, e CTCN para pequenas empresas; • Criação da linha de crédito “Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria”; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • 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; • Desoneração de impostos de importação de tecnologias de integração de processos e análise <i>pinch</i>; • Diversificação das linhas de crédito existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • Incentivo à implementação da ISO 50.001 nas empresas do setor; • 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; • 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.

Medidas	Barreiras	Instrumentos
Tecnologias de ruptura e emergentes do cenário BC+I	• Alto custo de capital e de O&M da tecnologia de captura; • Aplicabilidade da captura de carbono, considerando a configuração das plantas de amônia; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Dificuldade de acesso a crédito para realização de investimentos em P&D; • Elevado tempo de análise para concessão de patentes; • Falta de aceitação da tecnologia de captura de carbono; • Falta de adequação aos padrões, normas e regulamentações; • Falta de capacidade financeira para custear P&D; • Falta de conteúdo local da tecnologia de captura de carbono; • Inexistência de arcabouço regulatório para o transporte de CO₂ capturado; • Inexistência de redes de carbidutos para transporte de CO₂; • Inviabilidade econômica e comercial; • Necessidade de importação perante a falta de conteúdo local das tecnologias; • Restrição à instalação pelo layout da planta; • Risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias.	• Captação de recursos para investimento em ações inovadoras de mitigação no GCF, GEF e BID; • Contratação de servidores e aprimoramento do sistema e-Patentes para diminuir o tempo médio de análise de patentes pelo Inpi; • Criação de 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; • Criação da linha de crédito “Financiamento a plantas-piloto – Captura de carbono”; • Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações inovadoras que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Desoneração de impostos de importação de tecnologias de baixo carbono; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de PD&D das tecnologias inovadoras de baixo carbono; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidade das tecnologias emergentes e de ruptura; • Incentivo à implementação da ISO 50.001 nas empresas do setor; • Precificação de carbono a partir de 2025, com retorno dos recursos captados mediante possibilidade de taxaço para investimento em P&D de tecnologias emergentes e de ruptura; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; • 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 captura de carbono no Brasil com o foco principal nas etapas de transporte e armazenamento geológico de CO₂.

Fonte: Elaboração própria

The background features a large, solid gold shape that resembles a stylized letter 'L' or a corner. In the upper left, there is a smaller gold shape with a jagged, sawtooth-like top edge. A thin, horizontal gold line extends from the right edge of the main gold shape. In the bottom right corner, there is a light beige parallelogram shape.

Considerações
finais

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo objetivou identificar possibilidades de mitigação de emissões para o setor químico, 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.

O setor apresenta significativo potencial para abatimento de emissões de GEE. O potencial nos cenários BC e BC+I, com relação ao cenário REF, em 2050, é de 17% e 36%, respectivamente. O potencial de abatimento acumulado até 2050, no cenário BC, é de aproximadamente 46,7 MtCO₂e, sendo as principais medidas: i) efficientização de sistemas motores, por meio do monitoramento e manutenção; ii) maior uso de gás natural em caldeiras e fornos em substituição a combustíveis mais carbonointensivos, como coque, carvão, óleo diesel e óleo combustível.

A efficientização de sistemas motores se mostrou uma opção de potencial de abatimento de emissões significativa. Isso se deve, no entanto, ao fato de que a mesma é um pacote de medidas de efficientização de todo o sistema motor de unidades industriais (compressão, bombeamento, ventilação etc.). Logo, é inviável economicamente à taxa de desconto praticada pelo setor, e apresenta alto custo de capital. O maior uso de gás natural em caldeiras e fornos, também apresenta custo de abatimento positivo, em função principalmente do custo do combustível, que torna o fluxo de caixa bastante positivo. Vale notar que, no caso de caldeiras, o investimento em caldeiras a gás é menor do que em caldeiras a outros combustíveis, mas ainda assim significativo.

Além das barreiras econômicas anteriormente citadas, a atual situação econômica do país leva a que o governo realize ajustes fiscais que dificultam o acesso a crédito por parte do setor. Esse aspecto influencia até mesmo a realização de investimento em medidas viáveis economicamente, pois a conjuntura econômica recessiva afeta a capacidade financeira das empresas. Essas restrições são percebidas em termos da disponibilidade de capital no mercado de crédito, bem como do aumento da taxa de juros para a concessão de financiamentos. Existe assimetria no acesso ao crédito associado ao porte das empresas, o que inibe a realização de investimentos em ações de eficiência energética, bem como custos de transação que precisariam ser removidos para a realização de investimentos.

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).

Ao nível institucional e regulatório, a obtenção de crédito para o financiamento em atividades de baixo carbono, em particular aquelas com custos de abatimento positivos, está condicionada a uma série de exigências burocráticas, dentre as quais se destaca a elaboração de projetos para o acesso a linhas de crédito de programas governamentais. Além do custo de transação relacionado às inúmeras exigências processuais e documentais para acesso ao crédito, em particular por bancos de fomento, médias e pequenas empresas do setor têm dificuldade na elaboração de projetos, com restrição de mão de obra qualificada para esse propósito.

A questão do suprimento de gás natural se constitui em entrave relevante, visto que a rede de gasodutos não atende todas as plantas químicas. Ainda no âmbito regulatório, a inexistência de padrões de eficiência energética e/ou emissões de carbono constitui barreira adicional, tendo em vista que consumidores de produtos do setor tomam decisões baseadas em preços, e não em emissões de carbono (UK DECC, 2015).

Finalmente, podem ser citados as seguintes barreiras informacionais e tecnológicas: i) restrição à instalação pelo *layout* da planta; ii) falta de conhecimento técnico para identificar, implementar e operar a medida, em particular em empresas de médio e pequeno porte; iii) resistência à substituição de equipamentos por aversão a mudança, risco de desemprego e complexidade operacional; iv) risco do sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias.

Perante as inúmeras barreiras citadas, faz-se necessário implementar uma série de instrumentos de política visando sua remoção. Um instrumento que fomentaria, transversalmente, a eficiência energética, seria o incentivo à implementação da ISO 50.001 para gestão da eficiência energética nas indústrias químicas em geral. A implementação desta norma possibilitaria à cada unidade identificar *gaps* e diversos potenciais para aumento na eficiência energética nas unidades industriais.

Ademais, devem ser implementados os seguintes instrumentos: i) criação da linha de crédito “Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria”; ii) desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE; iii) criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; iv) criação de um programa de depreciação obrigatória de fornos; v) promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos de eficiência energética; vi) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade da tecnologia ao nível das plantas industriais; vii) fomento à ampliação dos gasodutos, e elaboração de contratos e seguros de fornecimento de gás natural; viii) precificação de carbono a partir de 2025; ix) obrigatoriedade da realização de auditorias energéticas como incentivo para acesso a condições diferenciadas de crédito em bancos públicos de fomento; x) estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis.

No caso das tecnologias de rupturas avaliadas no cenário BC+I, os principais entraves são: incerteza acerca da viabilidade comercial; dificuldade de acesso a crédito para investimentos em P&D; e

elevado tempo de análise para concessão de patentes. Para maturação dessas tecnologias em âmbito nacional, é fundamental a formulação dos seguintes instrumentos: i) desoneração de importações de componentes de tecnologias inovadoras de baixo carbono; ii) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de PD&D das tecnologias inovadoras de baixo carbono; iii) precificação do carbono a partir de 2025; iv) ampliação do quadro de funcionários e aprimoramento do sistema e-Patentes do Inpi.

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

Além disso, este estudo destaca opções tecnológicas de mitigação de GEE que muitas vezes são consideradas tecnologias de ponta que podem não terem sido difundidas no Brasil. Sendo assim, questões como a aplicabilidade dessas tecnologias no cenário nacional e o custo-Brasil não foram consideradas aqui. Devido à necessidade de importação de diversas tecnologias, ou mesmo de componentes para que se inicie uma indústria local, às altas taxas de juros para a realização de financiamentos e às constantes variações cambiais, a implementação dessas tecnologias de mitigação se torna difícil. Visando contornar essas questões, procurou-se elencar as principais barreiras e propor políticas públicas que fomentem a implementação dessas tecnologias. Procurou-se destacar as melhores tecnologias disponíveis mundialmente para o setor químico, 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 considera os efeitos de curto e médio prazo do recente contexto econômico nacional. Esta tem resultados reportados no documento *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono* (MCTIC, 2017b)

The background features abstract geometric shapes in gold and tan. A large gold shape occupies the upper right and middle sections. A smaller gold shape with a serrated top edge is in the upper left. A tan parallelogram is in the bottom right corner.

Referências

REFERÊNCIAS

AEA TECHNOLOGY. *Review of technical information on renewable heat technologies*. 2011. Disponível em: <http://www.rhincentive.co.uk/library/regulation/1103AEA_Update.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2015.

AHN, J. W. *Switched reluctance motor*. 2011. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/torque-control/switched-reluctance-motor>>. Acesso em: 21 ago. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA – ABIQUIM (Brasil). *A indústria química brasileira*. 2014a. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

_____. *A indústria química – Conceitos*. 2014b. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

_____. *Anuário da indústria química brasileira*. São Paulo: Abiquim, 2005.

_____. *Anuário da indústria química brasileira*. São Paulo: Abiquim, 2006.

_____. *Anuário da indústria química brasileira*. São Paulo: Abiquim, 2012.

_____. *Anuário da indústria química brasileira*. São Paulo: Abiquim, 2015.

_____. *O desempenho da indústria química brasileira em 2017*. São Paulo: Abiquim, 2017.

_____. *Produtos químicos apresentam desempenho ruim no primeiro trimestre*. 2015. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/comunicacao/noticia/detalhe/1868/produtos-quimicos-apresentam-desempenho-ruim-no-primeiro-trimestre>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

BAIN & COMPANY. *Potencial de diversificação da indústria química brasileira*. Chamada Pública de Seleção BNDES/FEP PROSPECÇÃO n. 03/2011 – Relatório 4 – Químicos com base em fontes renováveis. Rio de Janeiro: BNDES, 2014.

BAJAY, S. V. et al. *Oportunidades de eficiência energética para indústria: setor químico*. Brasília: CNI, 2010.

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

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

BERNSTEIN, L. et al. Industry. In: METZ, B. et al. (Eds.). *Climate Change 2007: Mitigation*. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.

BORBA, B. S. M. C. et al. Energy-related climate change mitigation in Brazil: Potential, abatement costs and associated policies. *Energy Policy*, n. 49, p. 430-441, 2012.

BOSCH, P., KEUNEN, J. *Greenhouse gas efficiency of industrial activities in EU and Non-EU*. TNO Built Environment and Geosciences. Report for European Commission, DG Environment. Utrecht: TNO, 2009.

BRASIL. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI. *Subsídios para a elaboração de uma estratégia industrial brasileira para economia de baixo carbono*. Brasília: MDIC, 2012.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP. *Preços*. 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos>>. Acesso em 15 ago. 2017.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Balanco Energético Nacional 2014: Ano-base 2013*. Brasília: EPE, 2013.

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

_____. *Nota Técnica DEA 12/14 – Cenário econômico 2050*. Série Estudos Econômicos. Rio de Janeiro: EPE, 2014.

_____. *Balanco de energia útil – BEU 2005*. 2005. Disponível em: <<http://www.feng.pucrs.br/~eberson/Balan%E7o%20de%20Energia%20DATil%202005.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2015.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. *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.

_____. *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.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações – MCTIC. *Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima*. Brasília: MCTIC, 2016a.

_____. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 3ª edição, 2016b. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706227/LIVRO_MCTIC_EstimativaDeGases_Publica%C3%A7%C3%A3o_210x297mm_FINAL_WEB.pdf/61e78a4d-5ebe-49cd-bd16-4ebca30ad-6cd>. Acesso em: 17 jan. 2018.

_____. *Contribuição do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações para a elaboração da estratégia de implementação da Contribuição Nacionalmente Determinada do Brasil ao Acordo de Paris*. 2017a. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/2098519/Subsi%C3%A7%C3%A3o_MCTIC_para_elaborac%C3%A7%C3%A3o+NDC_210217.pdf/c3c4bbbd-8656-4d-1c-b2fb-c9abfb44f552>. Acesso em: 18 mar. 2017.

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

_____. *Opções transversais para mitigação de emissões de gases de efeito estufa: captura, transporte e armazenamento de carbono*. Brasília: MCTIC, 2017c.

_____. *Análise de sensibilidade a variáveis críticas do setor industrial*. Brasília: MCTIC, 2017d.

_____. *Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de agricultura, florestas e outros usos do solo*. Brasília: MCTIC, 2017e.

_____. *Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de gestão de resíduos*. Brasília: MCTIC, 2017f.

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

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

BRASKEM. *O setor petroquímico. Relação com investidores*. 2013. Disponível em: <<http://www.braskem-ri.com.br/show.aspx?idCanal=YlvXIS7BgoLxL7WvVwvP5A==>>. Acesso em: 29 jul. 2013.

BROWN, H. L., HAMEL, B. B., HEDMAN, B. A. *Energy analysis of 108 industrial processes*. Washington DC: Fairmont Press Editions, 1985.

CEFIC. *European chemistry for growth: unlocking a competitive, low carbon and energy efficient future*. 2013. Disponível em: <<http://www.cefic.org/Documents/RESOURCES/Reports-and-Brochure/Energy-Roadmap-The%20Report-European-chemistry-for-growth.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. *Química verde no Brasil: 2010-2030*. Brasília: CGEE, 2010.

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO – CEPED. *Manual econômico da indústria química*. 8. ed. Vol. I (Produtos Orgânicos). Camaçari/BA: Ceped, 2006.

_____. *Manual econômico da indústria química*. 7. ed. Vol. II (Produtos Inorgânicos). Camaçari/BA: Ceped, 2003.

_____. *Manual econômico da indústria química*. 7. ed. Vol. III (Matérias-primas e Grupos Químicos). Camaçari/BA: Ceped, 2004.

COELHO, G., SERRANO, J., NUNO, L. *Otimização de controlo de temperatura numa fornalha de steam cracking*. 2011. Disponível em: <http://users.isr.ist.utl.pt/~pjcro/cadeiras/api0405/pdf_files/G35_SEM.pdf>. Acesso em: 11 set. 2011.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. *Manual de eficiência energética na indústria*. Curitiba: Copel, 2005.

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

_____. *Novas tecnologias para processos industriais: Eficiência energética na indústria*. Brasília: CNI, 2010.

COSTA, A. et al. An integrated system based on a flowsheet simulator for processing engineering: an industrial application. 2ND MERCOSUR CONGRESS ON CHEMICAL ENGINEERING & 4TH MERCOSUR CONGRESS ON PROCESS SYSTEMS ENGINEERING. Cancun, Mexico, 2005.

CSLFORUM. *A report on CO₂ utilization technologies assessment in China*. 2015. Disponível em: <<http://www.cslforum.org/>>. Acesso em: 14 set. 2015.

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

DANTAS, E. G. *A indústria química no Brasil em 2013*. Apresentação no Seminário dos Trabalhadores Químicos do Estado de São Paulo, ILAEE. São Paulo, março de 2013.

DE GOUVELLO, C. *Brazil low-carbon country case study*. World Bank, Sustainable Development Department of the Latin America and Caribbean Region. 2010.

EBRAHIM, M., KAWARI, A. Pinch technology: an efficient tool for chemical-plant energy and capital-cost saving. *Applied Energy*, n. 65, p. 45-49, 2000.

ELEMENT ENERGY. *A techno-economic study of the potential for CO₂ capture and utilisation in UK energy intensive industries in the period to 2025*. 2014. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/311482/>

Element_Energy_DECC_BIS_Industrial_CCS_and_CCU_final_report_14052014.pdf>. Acesso em: 21 ago. 2015.

EUROPEAN ASSOCIATION FOR THE CO-ORDINATION OF CONSUMER REPRESENTATION IN STANDARDISATION – ANEC. *Environmental assessment goes astray. A critique of environmental footprint methodology and its ingredients*. ANEC-ENV-2012-G-008final. Bruxelas: ANEC, 2012.

EUROPEAN COMISSION – EC. *Reference document on best available techniques in the production of polymers*. Madrid: EC, 2007.

_____. *Reference document on best available techniques for the manufacture of organic fine chemicals*. Relatório conjunto da EC e indústria referente ao tema integrated pollution prevention and control. Madrid: EC, 2006.

FANTI, O. D. *Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais: indústria química*. São Paulo: Abiquim, 2010.

FARLA, J., HENDRIKX, C., BLOK, K. *Carbon dioxide recovery from industrial processes*. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University, 1995.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – FIESP. *Workshop de inovação no âmbito do projeto Opções de Mitigação de Gases de Efeito estufa em setores-chave no Brasil*. Realizado em São Paulo, agosto de 2015.

FERNANDES, E., DIAS, V. P. Fertilizantes: uma visão global sintética. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 24, p. 97-138, setembro 2006.

FIGUEIREDO, F. As perspectivas futuras da indústria química. 7º FÓRUM ABRAFATI DA INDÚSTRIA DE TINTAS, São Paulo, agosto de 2012.

FRENCH ENVIRONMENT & ENERGY MANAGEMENT AGENCY – ADEME. *Valorisation chimique du CO₂*. 2014. Disponível em: <<http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/valorisation-chimique-co2-etat-lieux-2014-synthese.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2015.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS – FGV. *Proposta para implementação do Plano Indústria de Baixo Carbono*. Rio de Janeiro: FGV, 2015.

GANGHIS, D. *Apostila de bombas industriais*. Produzida pelo CEFET/BA, 2000.

GECATS. *Roadmap for catalysis research in Germany*. Catalysis: a key technology for sustainable economic growth. Frankfurt: GeCatS, 2010.

GLOBAL SUBSIDIES INITIATIVE. *Biofuels – at what cost? Government support for ethanol and biodiesel in selected OECD countries*. Genebra: IISD, 2007.

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/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.

HASLER, P. Investment considerations for industrial biotechnology. Perspectives from a venture capitalist. *Industrial Biotechnology*, n. 6, p. 340-345, 2010.

HAYDOCK, H., NAPP, T. *Decarbonisation of heat in industry – A review of the research evidence*. Ricardo-AEA reference contract ED58571 – Issue 1. To Department of Energy & Climate Change, United Kingdom, 2013.

HENRIQUES Jr., M. F., NOGUEIRA, L. P., DANTAS, F. S. S. M. R. V. *Descrição da segmentação e dos indicadores para o setor industrial de química*. Rio de Janeiro: INT, 2013.

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.

HOFFMANN, S. B. *O ciclo combinado com gaseificação integrada e a captura de CO₂: Uma solução para mitigar as emissões de CO₂ em termelétricas a carvão em larga escala no curto prazo?* 2010. 143 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Coppe/ Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Climate change 2014: Mitigation of climate change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

_____. *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Energy technology perspectives 2008*. Paris: IEA, 2008.

_____. *Energy technology perspectives 2015*. Paris: IEA, 2015.

_____. *Roadmap de tecnologia: Reduções de energia e GEE na indústria química via processos catalíticos*. Paris: IEA, 2014.

_____. *Tracking clean energy progress 2013*. IEA input to the clean energy ministerial. Paris: IEA, 2013.

_____. *Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions*. Paris: IEA, 2007.

IOWA STATE UNIVERSITY – Center for Industrial Research and Service – ISU-CIRAS. *Energy-related best practices: a sourcebook for the chemical industry*. Ames: ISU-CIRAS, 2005.

JIANG, P. D. S. K. D. *Influence of height of fluidized catalyst bed on operation period of gas phase PE plant*. 2008. Disponível em: <http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-HCSZ200803020.htm>. Acesso em: 15 ago. 2017.

KHAMLIHI, A., THYBAUD, N. *Chemical conversion of CO₂: Overview. Quantification of energy and environmental benefits and economic evaluation of three chemical routes. Study carried out for the ADEME (French Environment and Energy Management Agency) by ENEA Consulting and EReIE and the support of ICPEES. University of Strasbourg, 2014.*

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

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

MARTIN, N. et al. *Emerging energy-efficient industrial technologies*. Berkeley: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

MAYFIELD, C. A. et al. Opportunities, barriers, and strategies for forest bioenergy and bio-based product development in the Southern United States. *Biomass and Bioenergy*, n. 31, p. 631-637, 2007.

NAKASATO, J. et al. *Produção de borracha de estireno-butadieno: Aspectos históricos, econômicos e tecnológicos*. Trabalho Final de Tecnologia de Processos Orgânicos. Escola de Química, UFRJ, 2007.

NEELIS, A. et al. *Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the petrochemical industry*. An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers. Environmental Energy Technologies Division. Sponsored by the U.S. Environmental Protection Agency, 2008.

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

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

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

PHYLIPSEN, G. J. M., BLOK, K., WORRELL, E. International comparisons of energy efficiency-Methodologies for the manufacturing industry. *Energy Policy*, v. 25, n. 7-9, p. 715-725, 1997.

RAFIQUL, I. et al. Energy efficiency improvements in ammonia production – perspectives and uncertainties. *Energy*, n. 30, p. 2487-2504, 2005.

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.

REN, T. *Petrochemicals from oil, natural gas, coal and biomass: Energy use, economics and innovation*. Utrecht: Utrecht University, 2009.

REN, T., PATEL, M., BLOK, K. Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy use in steam cracking and alternative processes. *Energy*, v. 31, n. 4, p. 425-51, 2006.

RICARDO-AEA; IMPERIAL COLLEGE. *Decarbonisation of heat in industry: a review of the research evidence*. 2013. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/decarbonisation-of-heat-in-industry-a-review-of-the-research-evidence>>. Acesso em: 1 set. 2015.

RIO DE JANEIRO. Secretaria de Estado do Ambiente – SEA/RJ. *Impactos da adoção de metas de redução de emissão de gases de efeito estufa sobre setores energointensivos do estado do rio de janeiro, alternativas e custos de mitigação*. 2012 Disponível em: <<http://www.rj.gov.br/web/sea/exibeConteudo?article-id=373573>>. Acesso: 15 ago. 2015.

SALAU, N. P. G. et al. Comportamentos dinâmicos em um reator industrial de polimerização em fase gasosa. *Revista Controle e Automação*, v. 16, n. 4, p. 381-406, 2005.

SAYGIN, Y. et al. Potential of best practice technology to improve energy efficiency in the global chemical and petrochemical sector. *Energy*, n. 36, p. 5779-5790, 2011.

SCHAEFFER, R. et al. *Cenário integrado de baixo carbono*. Subprojeto de modelagem integrada. Projeto Opções de Mitigação de Emissões de GEE em Setores-Chave do Brasil. Brasília: MCTI, 2015.

_____. *Impactos da adoção de metas de redução de emissão de gases de efeito estufa sobre setores energointensivos do estado do Rio de Janeiro – Alternativas e custos de mitigação*. Feito por COPPE/UFRJ para a Secretaria de Estado de Ambiente, Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2011.

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.

SCHNEIDER. Eficiência energética e acionamento de motores. WORKSHOP INSTALAÇÕES ELÉTRICAS DE BAIXA TENSÃO, Instituto Procobre, São Paulo, 2011.

- SHOTT, I. The rocky road from lab to industry. *Food and Bioproducts Processing*, n. 88, p. 1-2, 2010.
- SHREVE, N., BRINK JR., J. *Chemical process industries*. 4. ed. McGraw-Hill Inc., 1977.
- SIEMENS. *Motores elétricos Siemens e a economia de energia*. Apresentação oral no evento "Mundo em Movimento 2005", parte "Jornadas Técnicas SIEMENS". 2005. Disponível em: < <https://www.eletricidade.net/download/file.php?id=7347>>. Acesso em: 14 set. 2014.
- SORRELL, S. et al. *The economics of energy efficiency: Barriers to cost-effective investment*. Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing Ltd, 2004.
- SOUZA, M. F. L. G. *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 do Brasil". Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2015.
- THYSSENKRUPP. *Aromatics*. 2010. Disponível em: < <http://www.thyssenkrupp-industrial-solutions-mexico.com/fileadmin/documents/brochures/259c5237-1918-41f7-894f-9b34e3bcc10e.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2016.
- TIAN, J. et al. Measures and potentials of energy-saving in a Chinese fine chemical industrial park. *Energy*, n. 46, p. 459-470, 2012.
- TOLMASQUIM, M. T.; SZKLO, A. S.; SOARES, J. B. *Mercado de gás natural na indústria química e no setor hospitalar no Brasil*. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2003.
- UK. Department of Energy and Climate Change/Department for Business, Innovation and Skills – UK DECC. *Industrial decarbonisation and energy efficiency roadmaps to 2050: chemicals*. London: UK DECC/BIS, 2015.
- USA. Department of Energy – US DOE. *Bayer polymers: Plant identifies numerous projects following plant-wide energy-efficiency assessment. Best practice plant-wide assessment case study*. Industrial Technologies Program. Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington DC: US DOE, 2003.
- _____. *Fujifilm hunt chemicals U.S.A. achieves compressed air system energy-reduction goals with a three-phased strategy*. Industrial Technologies Program. Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington DC: US DOE, 2011.
- _____. *Solutia: Massachusetts Chemical Manufacturer uses secure methodology to identify potential reductions in utility and process energy consumption. chemicals best practices plant-wide assessment case study*. Industrial Technologies Program. Energy Efficiency and Renewable Energy. Washington DC: US DOE, 2005.
- USA. US Energy Information Administration – EIA. *Annual Energy Outlook 2015*. 2015. Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/aeo/>>. Acesso em: 12 fev. 2016.

USA. Environmental Protection Agency – USEPA. *EPA Office of Compliance Sector Notebook Project Profile of the Inorganic Chemical Industry*. Washington DC: Usepa, 1995.

WORLD BANK. *Overview Brazil*. 2016. Disponível em: <<http://www.worldbank.org/en/country/brazil/overview>>. Acesso em: 14 out. 2016.

WORLD ENERGY COUNCIL. *World energy perspective energy efficiency policies: what works and what does not*. Energy Effic. Policies. Londres: World Energy Council., 2013.

WORRELL, E. et al. *Energy use and energy intensity of the U.S. chemical industry*. Abril, 2000. Disponível em: <<http://ies.lbl.gov/iespubs/44314.pdf>> Acesso em: 14 set. 2015.

_____. Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency*, n. 2, p. 109-123, 2009.

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

