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

MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE PAPEL E CELULOSE

ONU meio ambiente

gef

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

BRASIL GOVERNO FEDERAL

RÉGIS RATHMANN
(ORGANIZADOR)

MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE PAPEL E CELULOSE

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

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

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

ISBN: 978-85-88063-52-5

1. Mudanças Climáticas. 2. Emissão de gases. 3. Papel. 4. Celulose. 5. Produção de papel – Tecnologia. 6. Políticas públicas – Emissão de gases. I. Rathmann, Régis. II. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. III. ONU Meio Ambiente. IV. Série.

CDU 551.583

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

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Esplanada dos Ministérios, Bloco E
CEP: 70.067-900 – Brasília – DF
Tel.: +55 (61) 2033-7500
www.mcti.gov.br

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

República Federativa do Brasil
Presidente da República
Michel Temer
Ministro de Estado da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
Gilberto Kassab
Secretário Executivo
Elton Santa Fé Zacarias
Secretário de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento
Jailson Bittencourt de Andrade
Diretor do Departamento de Políticas e Programas de Ciências
Sávio Túlio Oselieri Raeder
Coordenador-Geral do Clima
Márcio Rojas da Cruz

Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – ONU Meio Ambiente
Diretor Executivo da ONU Meio Ambiente
Erik Solheim
Diretor Regional da ONU Meio Ambiente para América Latina e Caribe
Leo Heileman
Representante da ONU Meio Ambiente no Brasil
Denise Hamú

EQUIPE TÉCNICA DO MCTIC

Coordenador-Geral do Clima
Márcio Rojas da Cruz
Diretor Nacional do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil
Ricardo Vieira Araujo
Coordenador do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil
Antônio Marcos Mendonça
Coordenador Técnico do Projeto Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil
Régis Rathmann

EQUIPE TÉCNICA

Andréa Nascimento de Araújo
Lidiane Rocha de Oliveira Melo
Marcela Cristina Rosas Aboim Raposo
Moema Vieira Gomes Corrêa (Diretora Nacional do Projeto até outubro de 2016)
Rodrigo Henrique Macedo Braga
Sonia Regina Mudrovitsch de Bittencourt
Susanna Erica Busch

EQUIPE ADMINISTRATIVA

Ana Carolina Pinheiro da Silva
Andréa Roberta dos Santos Campos
Maria do Socorro da Silva Lima
Ricardo Morão Alves da Costa

EQUIPE TÉCNICA DA ONU MEIO AMBIENTE

Francine Costa Vaurof
Patricia Taboada
Guilherme Sattamini
Maria Claudia Cambraia

AUTOR

Fernanda Pires Domingues Cardoso Guedes

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)*

Sumário

Sumário

Introdução 17

1 Caracterização setorial 21

1.1 Desagregação setorial 25

1.2 Consumo energético e fontes emissoras de GEE 29

2 Melhores tecnologias disponíveis aplicáveis aos processos produtivos do setor 37

2.1 Sistemas de cogeração 37

2.2 Sistema de vapor 38

2.2.1 Melhoria do isolamento de caldeiras e linhas de vapor 38

2.2.2 Redução do excesso de ar de combustão em caldeiras 38

2.2.3 Substituição de queimadores 39

2.2.4 Recuperação de calor e vapor 39

2.2.5 Manutenção das caldeiras 41

2.2.6 Modificações nos fornos de cal 41

2.3 Sistema de bombas 41

2.3.1 Instalação de bombas de vácuo mais eficientes 41

2.3.2 Correção do superdimensionamento de bombas 42

2.3.3 Manutenção e monitoramento de bombas 42

2.3.4 Bombas com velocidade variável (ASD) 43

2.3.5 Sistemas de controle de bombas 43

2.4 Sistema de ventilação 43

2.4.1 Correção do superdimensionamento de ventiladores 44

2.4.2 Ventiladores com velocidade variável (ASD) 44

2.5 Sistema de compressão de ar 44
2.5.1 Manutenção e monitoramento do sistema de compressão 44
2.5.2 Redução de vazamentos de ar 45
2.5.3 Minimização da queda de pressão 46
2.5.4 Correção dos diâmetros de tubulações 46
2.5.5 Compressores com velocidade variável (ASD) 46
2.6 Integração de processos 46
2.6.1 Análise *pinch* 46
2.7 Outras medidas de eficiência no processo produtivo 47
2.7.1 Polpação mecânica 47
2.7.2 Polpação química 49
2.7.3 Produção de papel 51
3 Cenários de referência, baixo carbono e baixo carbono com inovação 55
3.1 Cenário REF 56
3.1.1 Premissas 56
3.1.2 Resultados 63
3.2 Cenário BC 64
3.2.1 Premissas 64
3.2.2 Resultados 66
3.2.3 Custos marginais de abatimento 70
3.3 Cenário BC+I 77
3.3.1 Tecnologias inovadoras para o setor 77
3.3.2 Premissas 82
3.3.3 Resultados 84
4 Subsídios à formulação de instrumentos de política pública para adoção dos cenários de baixo carbono 89
4.1 Barreiras e cobenefícios à implementação das atividades de baixo carbono 90
4.2 Síntese de experiências internacionais e nacionais com políticas públicas de baixo carbono 93
4.3 Instrumentos de política pública para adoção dos cenários de baixo carbono 97
Considerações finais 105
Referências 109

Listas de tabelas, figuras, quadros e siglas e acrônimos

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Produção de Papel e Celulose de 2010 a 2016 21

Tabela 2 – Produção e Consumos Específicos de Energia do Setor de Papel e Celulose de 2008 a 2013 30

Tabela 3 – Distribuição Percentual do Consumo dos Energéticos Utilizados na Indústria de Papel e Celulose Brasileira por Usos Finais em 2004 31

Tabela 4 – Rendimentos Médios Percentuais de Conversão Estimados para 2004 na Indústria de Papel e Celulose 32

Tabela 5 – Consumos Específicos de Energia no Método Químico de Produção de Celulose 33

Tabela 6 – Consumos Específicos de Energia no Método Mecânico de Produção de Celulose 34

Tabela 7 – Consumos Específicos de Energia na Produção de Papel 34

Tabela 8 – Consumos Específicos de Todas as Etapas de Produção de Papel e Celulose 35

Tabela 9 – Eficiências das Caldeiras por Fontes de Energia 57

Tabela 10 – Eficiências e Fatores de Capacidade das Unidades de Cogeração 57

Tabela 11 – Penetrações das Tecnologias de Produção de Vapor no Segmento de Celulose 59

Tabela 12 – Penetrações das Tecnologias de Produção de Vapor no Segmento de Papel 59

Tabela 13 – Penetrações das Tecnologias de Produção de Calor no Segmento de Celulose 59

Tabela 14 – Percentuais de Consumo de Combustíveis das Tecnologias Produtoras de Vapor no Processo de Produção de Celulose 60

Tabela 15 – Percentuais de Consumo de Combustíveis das Tecnologias Produtoras de Vapor no Processo de Produção de Papel 60

Tabela 16 – Percentuais de Consumo de Combustível na Produção de Calor do Processo de Produção de Papel 60

Tabela 17 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Demanda Energética do Setor 61

Tabela 18 – Fatores de Emissão de CO_2 62

Tabela 19 – Fatores de Emissão de CO_2 do SIN 62

Tabela 20 – Produção do Setor de Papel e Celulose até 2050 63

Tabela 21 – Participação no Consumo Total por Fontes de Energia (2015-2050) 63

Tabela 22 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050 64

Tabela 23 – Emissões Totais de CO_2 de 2010 a 2050 64

Tabela 24 – Eficiência das Caldeiras no Produção de Celulose por Fontes de Energia 65

Tabela 25 – Eficiências das Caldeiras na Produção de Papel por Fontes de Energia 66

Tabela 26 – Participação no Consumo Total por Fontes de Energia (2015-2050) 67

Tabela 27 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050 67

Tabela 28 – Redução do Consumo de Energia entre os Cenários BC e REF 68

Tabela 29 – Emissões Totais de CO_2 de 2010 a 2050 68

Tabela 30 – Custos e Potenciais de Redução no Consumo de Energia das Tecnologias de Baixo Carbono 72

Tabela 31 – Preços dos Combustíveis 72

Tabela 32 – Preços de Petróleo Considerados para o Cálculo do Custo Marginal de Abatimento das Possibilidades de Mitigação 73

Tabela 33 – Preços dos Combustíveis e da Eletricidade para a Taxa de Desconto de 8% ao ano 73

Tabela 34 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de Desconto de 8% ao ano 74

Tabela 35 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de Desconto de 15% ao ano 74

Tabela 36 – Taxas de Penetração das Tecnologias Inovadoras de 2010 a 2050 84

Tabela 37 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050 85

Tabela 38 – Emissões Totais de CO_2 de 2010 a 2050 86

Lista de Figuras

Figura 1 – Etapas do Processo *Kraft* de Produção de Celulose 23

Figura 2 – Principais Etapas do Processo Mecânico de Produção de Celulose 24

Figura 3 – Processo Produtivo de Papel 25

Figura 4 – Processo de Fabricação de Papel e Celulose 25

Figura 5 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2007 a 2016 29

Figura 6 – Distribuição do Consumo Energético Final, por Uso, na Indústria de Papel e Celulose, em 2016 31

Figura 7 – Distribuição do Consumo Energético Útil, por Uso Final, da Indústria de Papel e Celulose, em 2016 32

Figura 8 – Consumo de Energia nos Cenários REF e BC 68

Figura 9 – Emissões de CO_2 nos Cenários REF e BC 69

Figura 10 – Redução (%) nas Emissões de CO_2 no Cenário BC com Relação ao Cenário REF 69

Figura 11 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 8% ao ano 76

Figura 12 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 15% ao ano 76

Figura 13 – Consumo Energético nos Cenário REF, BC e BC+I 85

Figura 14 – Emissões nos Cenários REF, BC e BC+I 86

Figura 15 – Percentual de Redução de Emissões entre os Cenários BC e BC+I 87

Figura 16 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria 94

Lista de Quadros

Quadro 1 – Tipos de Celulose e Papel Produzidos 26

Quadro 2 – Tipos de Celulose e Pastas Celulósicas, segundo o Prodlist-Indústria 2013... 27

Quadro 3 – Tipos de Papel, segundo o Prodlist-Indústria 2013 27

Quadro 4 – Tipos de Cartolina e Papel-cartão, segundo o Prodlist-Indústria 2013..... 28

Quadro 5 – Potenciais de Economia de Energia e/ou Redução de Emissões por Tecnologia de Ruptura Considerada no Cenário BC+I 83

Quadro 6 – Medidas, Barreiras e Instrumentos de Política para Adoção dos Cenários de Baixo Carbono 101

Lista de siglas e acrônimos

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

ADt – *Air-dried ton*

AFOLU – Agricultura, florestas e outros usos do solo

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ASD – *Adjustable speed drive*

BECCS – *Bioenergy with carbon capture and storage*

BEN – Balanço Energético Nacional

BEU – Balanço de Energia Útil

BID – Banco Interamericano de Desenvolvimento

BIG-GT – *Biomass Integrated Gasifier/Gas turbine*

BIG-GTCC – *Biomass Integrated Gasifier/Gas turbine combined cycle*

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BRACELPA – Associação Brasileira de Papel e Celulose

BSR – *Back surface reflector*

Btu – *British thermal unit*

CAC – *Compressed Air Challenge*

CAL – Custo anual líquido

CCS – 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

CEPI – Confederation of European Paper Industries

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

CH_4 – Metano

CHP – *Combined heat and power*

CMA – Custo marginal de abatimento

CNAE – Classificação Nacional de Atividades Econômicas

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CO_2 – Dióxido de carbono

CO_2e – Dióxido de carbono equivalente

COP21 – 21ª Conferência das Partes (Paris)

CPMA – Controle preditivo multivariável

CT&I – Ciência, tecnologia e inovação

CTCN – Climate Technology Centre Network

CTMP – Polpação químico-termomecânica

DECC – Departamento de Energia e Mudança Climática do Reino Unido

EMBRAPII – Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

EUA – Estados Unidos da América

FGV – Fundação Getulio Vargas

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

GCF – Green Climate Fund

GEE – Gases de efeito estufa

GEF – Global Environment Facility

GLP – Gás liquefeito de petróleo

GWP – Potencial de aquecimento global

IAC – Industrial Assessment Centers

IBAPE – Instituto Brasileiro de Avaliações e Perícias de Engenharia

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – Agência Internacional de Energia

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

INPI – Instituto Nacional de Propriedade Industrial

INT – Instituto Nacional de Tecnologia

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima

MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

MDIC – Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços

MDL – Mecanismo de desenvolvimento limpo

MF – Ministério da Fazenda

MMA – Ministério do Meio Ambiente

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores

MMBtu – Equivalente a 1 milhão de Btu

MME – Ministério de Minas e Energia

MP – Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão

MTD – Melhores tecnologias disponíveis

N_2O – Óxido nitroso

NCASI – National Council for Air and Stream Improvement

NDC – Contribuição Nacionalmente Determinada

NEDO – New Energy and Industrial Technology Development Organization (Japan)

NMVOC – Compostos orgânicos voláteis não mecânicos

O&M – Operação e manutenção

PAR – Pasta de alto rendimento

PD&D – Pesquisa, desenvolvimento e demonstração

PFC – Compostos perfluorados

PIB – Produto interno bruto

PNMC – Plano Nacional sobre Mudança do Clima

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

RMP – Polpação por refinação

RTS – *Retention time, temperature and speed*

SF_6 – Hexafluoreto de enxofre

SGW – *Stone groundwood*

SIN – Sistema Interligado Nacional

SIRENE – Sistema de Registro Nacional de Emissões

STIG – *Steam injected gas turbine*

TCN – Terceira Comunicação Nacional

tep – Tonelada equivalente de petróleo

TI – Tecnologia da informação

TMP – Polpação termomecânica

TRL – *Technology Reodiness Levels*

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

UNIDO – Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial

USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos EUA

Introdução

Introdução

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

Segundo o World Bank (2016), o país desempenhou papel fundamental na formulação do quadro climático para a 21ª Conferência das Partes (COP21), que culminou com o Acordo de Paris. Na ocasião, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, com possível esforço para chegar à redução de 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030.[1] Essa meta é considerada absoluta, pois estabelece um teto de emissões, diferentemente do ocorrido na COP15, em Copenhague, no ano de 2009, quando o Brasil assumiu uma meta voluntária relativa, de redução de suas emissões em relação a uma projeção para o ano de 2020.

As emissões são referentes à totalidade das emissões nacionais, incluindo CO_2, CH_4, N_2O, PFC, HFC e SF_6, 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 CO_2e, usando-se a métrica GWP-100 do AR5.[2] Para a estimativa dos gases, serão utilizadas as metodologias do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) para inventários nacionais. Faz-se menção explícita à possibilidade de utilização das remoções, ou seja, retirada de dióxido de carbono da atmosfera pelas florestas manejadas, na composição das emissões nacionais. Esse método é exatamente o que se utiliza desde a Segunda Comunicação Nacional à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), contendo o Segundo Inventário Nacional de GEE.

Avaliando-se os setores da economia brasileira, no que concerne às emissões de GEE, a maior parcela das emissões líquidas estimadas de CO_2e, segundo o GWP-100 do AR5, é proveniente do setor agropecuário e uso e mudança do uso da terra e florestas (Afolu), correspondendo a aproximadamente 61% das emissões totais no ano de 2010 (MCTIC, 2016). Em segundo lugar, vem o setor de energia, com 27%, e, em seguida, processos industriais, com cerca de 7% das emissões

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

2 Métrica de conversão para dióxido de carbono equivalente do 5º relatório de avaliação do IPCC (MCTIC, 2016).

totais de CO_2 nesse ano. Porém, ao considerar exclusivamente as emissões relacionadas com o consumo de energia, o setor industrial passaria a ser responsável por cerca de 1/3 das emissões totais (HENRIQUES JR., 2010; MCTIC, 2016). Nesse contexto, o setor industrial tem papel relevante para a mitigação de emissões de GEE (HENRIQUES JR., 2010; BORBA et al., 2012; CNI, 2012; RATHMANN, 2012), o que justifica a implementação de política pública nesse sentido, qual seja o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação, comumente chamado de Plano Indústria (FGV, 2015).

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

No âmbito do setor de papel e celulose, 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 e apresentará os consumos energéticos específicos em nível desagregado e principais fontes de emissão no setor. No capítulo 2, serão detalhadas as melhores tecnologias disponíveis (MTD), visando, direta ou indiretamente, mitigar emissões de GEE. No capítulo 3, apresentar-se-ão os cenários de referência (REF), baixo carbono (BC) e baixo carbono com inovação (BC+I), construídos para o setor. No capítulo 4, serão identificados barreiras e cobenefícios à implementação das MTD e instrumentos aplicáveis, visando à adoção dos cenários de baixo carbono. Por fim, serão apresentadas as considerações finais do presente estudo.

Semelhantemente aos estudos de De Gouvello (2010) e La Rovere et al. (2016), este relatório considera uma avaliação setorial, por meio da construção de cenários de emissões de GEE, que tem como limitação a inobservância de possíveis efeitos de não aditividade dos potenciais de mitigação do sistema energético (MCTIC, 2017a; 2017b). Tais cenários abrangem os diferentes segmentos industriais. De fato, a avaliação setorial é relevante, sobretudo, para realizar o

mapeamento das MTD, visando à mitigação setorial de emissões de GEE, para, partindo disso, constituir uma base de dados para a modelagem dos setores industriais em cenários integrados de abatimento de emissões do sistema energético e do setor de agricultura, florestas e outros usos do solo. Deve-se enfatizar que resultarão desses cenários integrados estimativas robustas dos potenciais e custos de abatimento desses setores, as quais serão reportadas no relatório *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono* (MCTIC, 2017b). Portanto, o reporte de projeções de emissões e custos marginais de abatimento neste estudo setorial objetiva, meramente, a comparação com os resultados oriundos da integração dos cenários por meio dos modelos MSB8000, Otimizagro e Efes, de modo a enfatizar a importância dessa metodologia.

Caracterização setorial

Capítulo

1

1 Caracterização setorial

A indústria de papel e celulose no Brasil, segundo a Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA, 2014), em 2013, contava com 222 empresas, com atividade em 540 municípios, de 18 estados, responsáveis pela produção de aproximadamente 15 milhões de toneladas de celulose e 10,4 milhões de toneladas de papel. De acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2013), as regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte da produção de celulose e papel, sendo que somente São Paulo é responsável por 27% da produção nacional de pasta de celulose e 43% da produção de papel.

Em 2016, a produção atingiu 18,8 milhões de toneladas de celulose e 10,3 milhões de toneladas de papel. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor de celulose e o oitavo maior produtor de papel do mundo (IBÁ, 2017). Na Tabela 1, é possível observar as produções de papel e celulose, por tipo, de 2010 a 2016.

Cumpre destacar que a caracterização socioeconômica do setor considera 2010 como ano-base para realizar projeções, relativas ao período de 2011 a 2050, nos cenários REF, BC e BC+I. No entanto, quando disponíveis, foram considerados dados históricos para o período de 2011 a 2016.

Tabela 1 – Produção de Papel e Celulose de 2010 a 2016

Produtos	Produção (mil toneladas)						
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Celulose	14.064	13.922	13.977	15.029	16.465	17.370	18.773
Papel	9.792	10.159	10.260	10.444	10.397	10.357	10.335

Fonte: Elaboração própria com base em BRACELPA, 2009; 2010; 2011; 2012; 2013; IBÁ, 2017

De acordo com a Bracelpa (2014), os altos investimentos da indústria e o desenvolvimento econômico do Brasil tiveram impactos expressivos na produção de celulose e papel na última década, tendo o setor dobrado seu volume de celulose produzido.

A celulose e o papel são produtos de grande importância na pauta das exportações brasileiras. Nos últimos anos, o Brasil intensificou suas operações de comércio exterior, conquistou novos mercados e mais que dobrou sua receita de exportações, mantendo saldo comercial positivo (BRACELPA, 2014). A participação dessa indústria no produto interno bruto (PIB) nacional e industrial no ano de 2016 foi de 1,1% e de 6,2%, respectivamente (IBÁ, 2017).

A madeira usada por essa indústria é extraída exclusivamente de reflorestamentos destinados a ela. Segundo Ibá (2017), a área de florestas plantadas em 2016 correspondeu a 7,8 milhões de hectares, sendo que 34% desse total pertencem às empresas do segmento de celulose e papel.

De acordo com a classificação utilizada pelo Ibá, as empresas podem ser divididas em:

- Produtoras de celulose e de pastas de alto rendimento (PAR);
- Produtoras integradas (papel e celulose);
- Produtoras de papéis, inclusive para fins sanitários;
- Produtoras de papel a partir da reciclagem de fibras secundárias ou papel velho.

Os processos produtivos de papel e celulose podem ser separados exclusivamente em produção de celulose, produção de papel e processos integrados de produção de papel e celulose.

A produção de celulose pode decorrer de processos químicos e mecânicos ou por meio da combinação dos dois métodos. Os principais métodos químicos são os do tipo *kraft* ou sulfato (alcalino), sulfito (ácido) e semiquímico ao sulfito (neutro) (HENRIQUES JR., 2010). Nos processos mecânicos, as fibras de celulose são separadas mecanicamente pela pressão dos pedaços de madeira contra discos metálicos e outros dispositivos.

Segundo Henriques Jr. (2010), no método químico, a madeira e outros materiais fibrosos são cozidos em solução aquosa a alta temperatura e a alta pressão, em equipamentos digestores. O principal método químico utilizado pelo segmento de papel e celulose no Brasil é o processo *kraft* (CGEE, 2013), cujas etapas fundamentais, além do preparo da madeira, são: cozimento, lavagem, depuração, espessamento, branqueamento e recuperação de produtos químicos, os quais são descritos por CNI (2010) da seguinte forma:

- Cozimento: provoca a formação das fibras individuais, do licor negro e dos gases da digestão. Os reagentes químicos são preparados a partir do chamado licor branco, proveniente da unidade de recuperação de produtos químicos. A mistura reagente é encaminhada ao *blow tank*. Na sequência, alguns vapores são condensados e a massa (polpa + licor) segue para lavagem;
- Lavagem: tem por finalidade separar, da melhor maneira possível, a polpa celulósica do licor negro e é feita em filtros rotativos especiais operados em série, com lavagem em contracorrente;
- Depuração: é feita em depuradores centrífugos (peneiras finas) e serve para separar pedaços de cavacos que não foram devidamente desfibrados;
- Espessamento: serve para aumentar a consistência da massa, que é posteriormente enviada ao branqueamento;
- Branqueamento: consiste na remoção das substâncias que conferem cor à massa de celulose e é realizado em três etapas fundamentais: deslignificação, realizada por oxidantes como cloro, oxigênio, entre outros; tratamento cáustico, para remoção das cloroligninas solúveis em álcalis; branqueamento propriamente dito, efetuado por agentes fortemente oxidantes, como cloro, hipocloritos, peróxidos, dióxidos de cloro etc.;
- Recuperação de produtos químicos: realiza-se em etapas: concentração do licor negro em evaporadores de múltiplo efeito; queima do licor negro, na qual os gases de combustão são usados para geração de vapor e o material fundido, constituído basicamente de carbonato de sódio e sulfeto de

sódio, é dissolvido com o licor branco fraco da recaustificação, formando o licor verde; caustificação do licor verde, resultado de sua reação com cal, formando o carbonato de sódio e o hidróxido de sódio; adensamento da cal em filtros a vácuo; calcinação em fornos de cal, que o transformam em óxido de cálcio, que retorna ao processo.

A Figura 1 mostra detalhadamente as etapas de produção de celulose segundo o método *kraft*.

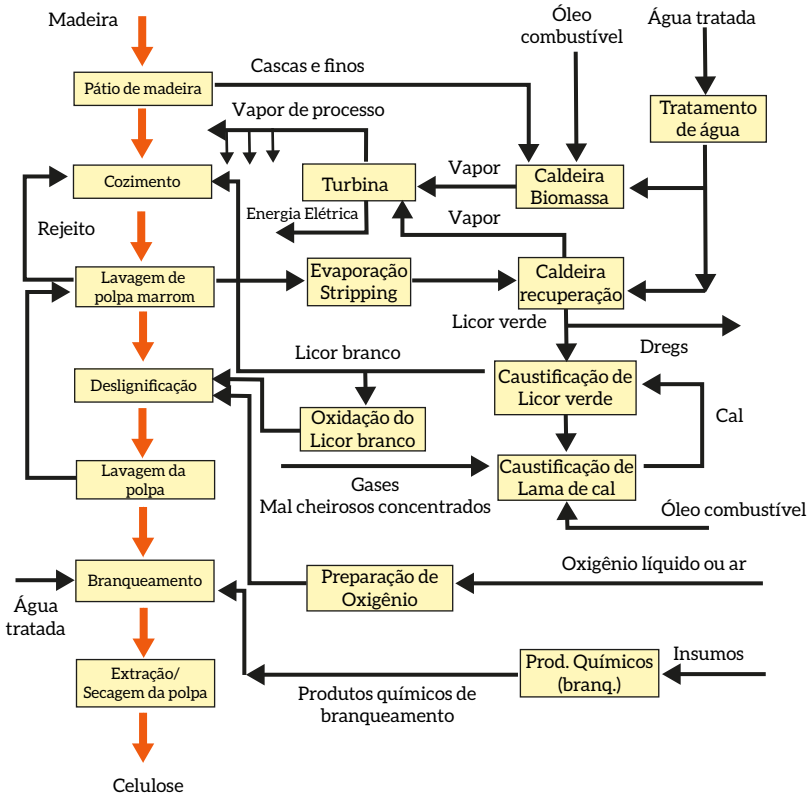

Figura 1 – Etapas do Processo *Kraft* de Produção de Celulose

Fonte: PIOTTO, 2003

No método mecânico, obtém-se vantagem na polpação mecânica, visto que produz rendimentos muito mais elevados do que os processos de polpação química (até 97%) (IPPC, 2010). No entanto, dado que esse processo não dissolve a lignina, e a trituração mecânica produz fibras mais curtas, sua resistência, bem como a resistência da polpa resultante, é baixa. A polpação mecânica também exige maior rigor na análise e seletividade das matérias-primas com vistas a remover contaminantes, tais quais sujeiras, do que os processos de polpação química (KRAMER et al., 2009).

Há quatro tipos principais de produção de pasta mecânica (KRAMER et al., 2009):

- Polpação do tipo *stone groundwood* (SGW): o processo dá rendimento elevado, mas as fibras produzidas podem ser muito curtas e muitas vezes têm de ser combinadas com fibras de polpação química;
- Polpação termomecânica (TMP): nesse processo, as aparas de madeira são inicialmente cozidas para amolecer, antes de serem moídas. O processo TMP gera uma pasta mecânica de grau mais elevado, mas é também um processo com alta intensidade energética devido à utilização de vapor. É o processo mecânico mais comum em uso atualmente;

- Polpação químio-termomecânica (CTMP): esse processo envolve a aplicação de produtos químicos nos cavacos de madeira antes do processo de cozimento e moagem. O pré-tratamento químico das lascas de madeira permite a separação menos destrutiva das fibras, resultando em maiores teores de fibras e fibras mais longas. O processo CTMP produz fibras mais flexíveis (que proporcionam maior densidade da folha, resistência à ruptura e resistência à tração) e brilho da pasta mais elevado do que o processo TMP. Sua principal desvantagem, assim como o processo TMP, é que é um processo de elevada intensidade energética;
- Polpação por refinação (RMP): esse processo mantém as vantagens de alto rendimento do processo SGW e ainda produz fibras mais longas e mais resistentes.

A Figura 2 mostra as principais etapas do processo mecânico de produção de celulose.

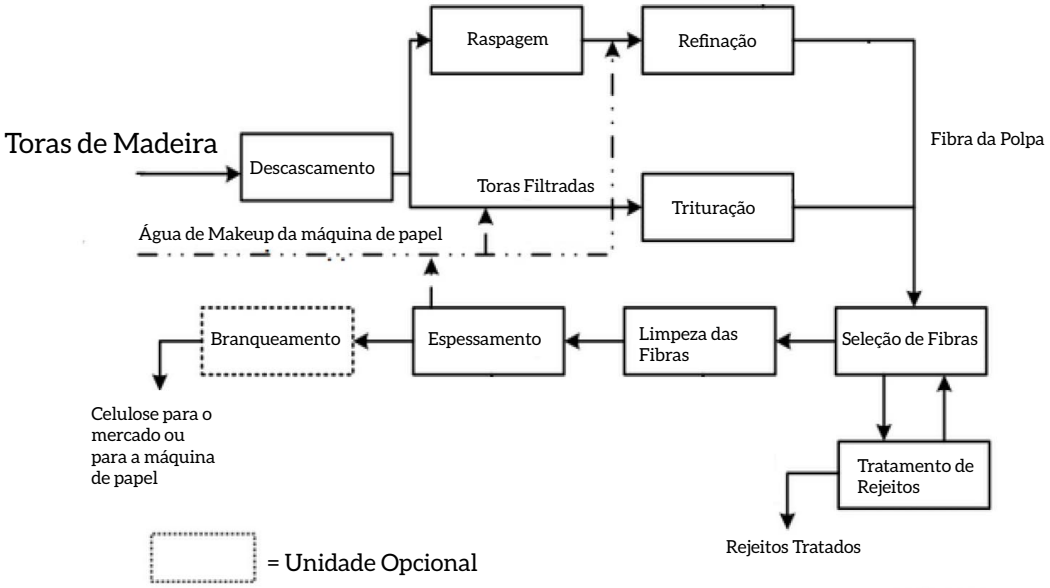

Figura 2 – Principais Etapas do Processo Mecânico de Produção de Celulose

Fonte: Elaboração própria com base em IPPC, 2010

A produção de papel acontece em quatro etapas principais: i) preparo e adequação da pasta celulósica; ii) formação da folha (mesa plana); iii) prensagem mecânica para extração da água; iv) secagem da folha (HENRIQUES JR., 2010).

Após a etapa de preparo e adequação da pasta celulósica, já descrita, a suspensão fibrosa é depositada nas telas da máquina de papel, onde, a partir da redução de sua umidade, por meio de processos mecânicos de drenagem e sucção, inicia-se a formação da folha de papel e posterior prensagem. A folha de papel segue, então, para a seção de secagem da máquina, onde a umidade residual é retirada por cilindros aquecidos. Dependendo do tipo de produto requerido, a folha de papel é encaminhada para tratamento superficial e acabamento final (CNI, 2010). A Figura 3 ilustra o processo produtivo de papel.

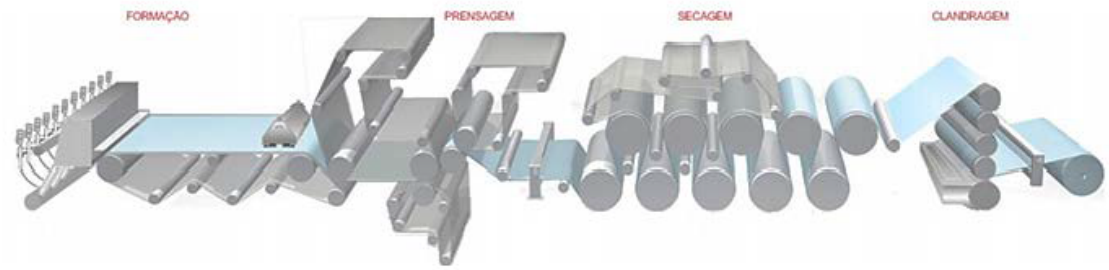

Figura 3 – Processo Produtivo de Papel

Fonte: CNI, 2010

Por fim, na produção integrada de papel e celulose, há, segundo Henriques Jr. (2010), cinco etapas básicas: preparo da madeira; polpação, com vistas à obtenção da celulose; branqueamento (se desejável); recuperação química de produtos; produção de papel propriamente dita.

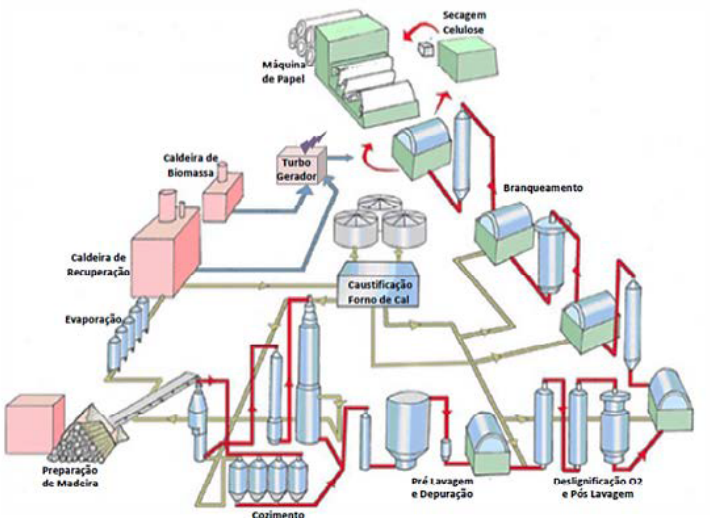

Figura 4 – Processo de Fabricação de Papel e Celulose

Fonte: CNI, 2010

1.1 Desagregação setorial

A desagregação do setor de papel e celulose é importante para que seja possível, a partir da construção *bottom-up* de cenários setoriais de consumo de energia e emissões de GEE, identificar a custo-efetividade da adoção de atividades de menor intensidade de carbono.

Isso pode ser feito segundo unidades produtivas e seus processos de produção, produtos obtidos e empresas existentes, com respectivas localizações geográficas. Segundo Henriques Jr. (2010), no que concerne aos processos produtivos, a desagregação pode ser de três tipos: plantas que produzem somente celulose; plantas que produzem exclusivamente papel; plantas integradas de produção de papel e celulose. É possível, para obtenção da celulose, a utilização de três métodos distintos: o método mecânico, termomecânico ou químio-termomecânico; o método químico, do tipo sulfato

ou *kraft* ou sulfito; e o método semiquímico (BNDES, 2010).

No que diz respeito à produção de papel, como também já citado neste capítulo, esta não sofre variações e se dá em quatro etapas principais: preparo e adequação da pasta celulósica; formação da folha (mesa plana); prensagem mecânica para extração da água; secagem da folha (HENRIQUES JR., 2010).

Quanto aos produtos obtidos, há diversas classificações. A Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2010) classifica os produtos desse setor em:

- Pastas celulósicas de alto rendimento (PAR) produzidas por processos mecânicos;
- Pastas celulósicas químicas e semiquímicas produzidas por processos químicos;
- Papéis produzidos nas etapas básicas de produção de papel.

A Bracelpa (2014) classifica mais detalhadamente os produtos desse segmento, fazendo a distinção das celuloses de acordo com o tipo de fibra e se é branqueada ou não. Ou ainda, se é uma pasta de alto rendimento e a diferenciação dos papéis de acordo com seus usos finais, como descrito no Quadro 1.

Quadro 1 – Tipos de Celulose e Papel Produzidos

Tipos de celulose	Tipos de papel
Fibra longa	Papel de imprensa
Branqueada	Papel de imprimir e escrever
Não branqueada	Papel para embalagem
Fibra curta	Papel para fins sanitários
Branqueada	Papel-cartão
Não branqueada	Cartolinas
Pasta de alto rendimento	Outros

Fonte: Elaboração própria a partir de BRACELPA, 2014

As fibras podem ser do tipo longa, originária de espécies como o pínus e utilizada na fabricação de papéis que demandam mais resistência, como os de embalagens, e nas camadas internas do papel-cartão, além do papel jornal; ou do tipo curta, que deriva principalmente do eucalipto e é ideal para a produção de papéis como os de imprimir e escrever e de fins sanitários (papel higiênico, toalhas de papel, guardanapos) (BRACELPA, 2014).

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014), em sua lista de produtos industriais (PRODLIST-INDÚSTRIA, 2013), que tem como base a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), versão 2.0, elabora uma desagregação ainda mais fragmentada, como mostrado nos quadros 2, 3 e 4.

Quadro 2 – Tipos de Celulose e Pastas Celulósicas, segundo o Prodlist-Indústria 2013

Tipos de celulose e pastas celulósicas
Pastas de matérias fibrosas celulósicas, exceto de madeira.
Pastas mecânicas (químio-termomecânicas, termomecânicas) de madeira.
Pastas químicas de madeira, processo à soda ou sulfato, exceto pastas para dissolução.
Pastas químicas de madeira para dissolução (cruas, semibranqueadas ou branqueadas).
Pastas químicas de madeira, processo sulfito, branqueadas ou não.
Pastas semiquímicas de madeira; pastas mecanoquímicas de madeira.
Serviços de produção de celulose e de pastas para a fabricação de papel ou serviços relacionados.

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2014

Quadro 3 – Tipos de Papel, segundo o Prodlist-Indústria 2013

Tipos de papel
Desperdícios ou aparas de papel ou de papel-cartão.
Papel carbono, papel autocopiativo e outros papéis para cópia ou duplicação, em rolos ou folhas.
Papel para cigarros não cortado, papel-feltro ou papéis de outros tipos, não revestidos.
Papel em rolos contínuos utilizados na fabricação de papéis higiênicos, lenços, toalhas ou semelhantes para uso doméstico ou sanitário.
Papel-filtro.
Papel gomado ou adesivo (autoadesivos).
Papel imprensa ou papel jornal em rolos ou em folhas.
Papel *kraft* para embalagem, não revestido, exceto encrespado ou estampado.
Papel *kraft* para sacos de grande capacidade, não revestido, encrespado, estampado ou perfurado.
Papel *kraft*, revestido de matéria inorgânica, exceto para uso gráfico.
Papel *kraftliner* para cobertura (capa *kraft*), não revestido.
Papel miolo (papel semiquímico para ondular), não revestido (para caixas de papelão ondulado).
Papel obtido por colagem de folhas sobrepostas, não revestido nem impregnado.
Papel ondulado, gofrado, estampado, corrugado, etc., não especificado.

Papel para usos na escrita, impressão e outros fins gráficos (*offset*, bíblia, *bouffant*, *couché*, monolúcido etc.), não revestido.
Papel para uso na escrita, impressão e outros usos gráficos, revestidos de matéria inorgânica.
Papel-pergaminho, papel impermeável a gorduras e outros papéis calandrados transparentes em rolos ou em folhas.
Papel próprio para a fabricação de papel fotossensível, termossensível ou eletrossensível.
Papel próprio para a fabricação de papel de parede.
Papel revestido ou impregnado de substâncias betuminosas, plástico, cera, parafina etc., mesmo coloridos ou decorados.
Papel sulfite para embalagem (papel seda próprio para embalagem de frutas).
Papel *testliner* de peso não superior a 150g/m², não revestido.

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2014

Quadro 4 – Tipos de Cartolina e Papel-cartão, segundo o Prodlist-Indústria 2013

Tipos de cartolina e papel-cartão
Papel-cartão-feltro (cartão-feltro) ou papel-cartão-filtro (cartão-filtro).
Papel-cartão ou cartolina gomado ou adesivo (autoadesivos).
Papel-cartão ou cartolina *kraftliner* para cobertura, não revestido.
Papel-cartão ou cartolina *kraft* para embalagem, não revestido.
Papel-cartão ou cartolina não revestido, para usos na escrita, impressão ou outros fins gráficos.
Papel-cartão ou cartolina obtido por colagem de folhas sobrepostas, não revestido nem impregnado.
Papel-cartão pergaminho (para encadernação, artigos de viagem, etc.).
Papel-cartão ou cartolina revestido com substâncias inorgânicas (papel-cartão kraft, *couché* leve).
Papel-cartão ou cartolina revestido ou impregnado de substâncias betuminosas, plástico, cera, etc., mesmo coloridos ou decorados.
Papel-cartão ou cartolina de outros tipos, com peso superior a 150g/m², não revestido.

Fonte: Elaboração própria a partir de IBGE, 2014

Para fins de análise de consumo energético e emissões de GEE nos cenários REF, BC e BC+I, a desagregação mais adequada para o setor industrial de papel e celulose é por produtos finais e processos produtivos. Ou seja, celulose e pastas de alto rendimento, com seus três métodos distintos de produção (mecânico, químico e semiquímico); e papel, sem maiores separações em subgrupos, dado que os processos produtivos para todos os tipos de papel são semelhantes.

1.2 Consumo energético e fontes emissoras de GEE

O setor de papel e celulose se caracteriza pela utilização intensiva de energia em seus processos produtivos (ABDI, 2012). Segundo Henriques Jr. (2010), praticamente todas as etapas do processo fabril apresentam alta intensidade energética, com os consumos específicos de energia variando em ampla faixa, de acordo com o processo empregado, e em função das características do produto final.

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o setor de papel e celulose foi o terceiro maior consumidor de energia do segmento industrial brasileiro em 2016, tendo sido responsável por aproximadamente 14,7% do consumo total da indústria. Ainda segundo a EPE (2015; 2017), o setor aumentou significativamente seu uso da energia nos últimos dez anos, apresentando, no ano de 2016, consumo de aproximadamente 12,4 milhões de tep, o que representa incremento de 44,7% em face do valor observado em 2007.

Os principais energéticos utilizados pelo setor foram: lixívia, respondendo por 50,4% do total da energia utilizada; em seguida, eletricidade, com 15,8%; lenha, com 15,7%; e gás natural, com 6,3%. Sendo assim, observa-se que, apesar de o setor ser intensivo no uso de energia, grande parte de sua geração advém de fontes renováveis.

De acordo com a CNI (2010), a lixívia é utilizada para gerar vapor de processo e eletricidade em plantas de cogeração, sendo produzida e utilizada somente em plantas integradas e produtoras de celulose. Quanto à lenha, está fortemente inserida na indústria de papel e celulose, tanto como matéria-prima quanto como combustível.

A Figura 5 apresenta a evolução do consumo energético no setor de papel e celulose brasileiro entre os anos de 2007 e 2016.

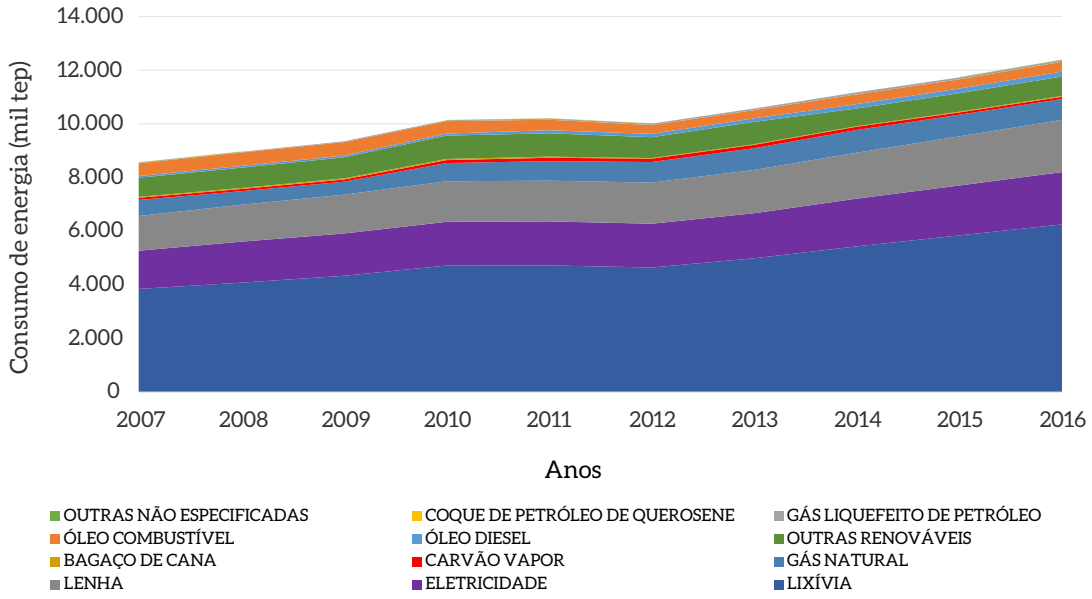

Figura 5 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2007 a 2016

Fonte: Elaboração própria com base em EPE, 2017

Os consumos energéticos específicos da indústria de papel e celulose podem ser obtidos dividindo-se o consumo total de energia e os consumos de energia elétrica e térmica pela produção física total do setor, a qual é representada pela produção total de papel, acrescida das exportações de celulose (CNI, 2010). Na Tabela 2, encontram-se os dados de produção física, consumo específico de energia total e consumos específicos de energia térmica e elétrica no período para o ano de 2008 a 2013.

Optou-se por não atualizar a série de dados até o ano de 2016 em virtude da utilização dos consumos específicos exclusivamente de 2010, que é o ano-base do estudo, para projetar a demanda energética nos cenários REF, BC e BC+I.

Tabela 2 – Produção e Consumos Específicos de Energia do Setor de Papel e Celulose de 2008 a 2013

Parâmetros	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Produção física (10^3 toneladas)	16.449	17.570	18.219	18.357	18.733	19.857
Consumo específico de energia total (GJ/toneladas)	22,8	22,3	23,3	23,3	22,3	22,3
Consumo específico de energia térmica (GJ/t)	18,9	18,5	19,5	19,5	18,7	18,7
Consumo específico de energia elétrica (GJ/t)	3,9	3,8	3,8	3,7	3,6	3,6

Fonte: Elaboração própria com base em BRACELPA, 2014; 2013; 2012; 2011; 2010; EPE, 2017

De acordo com dados obtidos em CNI (2010), o consumo específico de energia total no ano de 2003 era de 24,2 GJ/t, em que 20,2 GJ/t se referiam ao consumo específico de energia térmica e 4,0 GJ/t, ao consumo específico de energia elétrica. Sendo assim, observa-se que, entre 2003 e 2013, houve reduções nos consumos específicos de energia total, térmica e elétrica, o que pode ter sido reflexo de progressos tecnológicos, ganhos de escala e maiores preocupações com a eficiência energética dos equipamentos utilizados (CNI, 2010).

Com base em dados do Balanço de Energia Útil (BEU), ano-base 2004 (MME, 2005), a CNI (2010) apresentou os rendimentos dos consumos energéticos utilizados na indústria de papel e celulose por uso final no ano de 2004, bem como os rendimentos médios de conversão estimados para o mesmo ano, como descrito na Tabela 3 e na Tabela 4.

Os usos finais da energia considerados para o setor de papel e celulose, segundo a CNI (2010), são:

- Força motriz: energia usada em motores estacionários ou em veículos de transporte individual ou coletivo, de carga, tratores etc.;
- Calor de processo: energia usada em caldeiras e aquecedores de água ou circulação de fluidos térmicos;
- Aquecimento direto: energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e micro-ondas;
- Iluminação: energia utilizada na iluminação de interiores e externa;
- Refrigeração: energia usada em geladeiras, *freezers*, equipamentos de refrigeração e ar-condicionado tanto de ciclo de compressão quanto de absorção.

Tabela 3 – Distribuição Percentual do Consumo dos Energéticos Utilizados na Indústria de Papel e Celulose Brasileira por Usos Finais em 2004

Fontes de energia	Força motriz	Calor de processo	Aquecimento direto	Iluminação	Refrigeração
Gás natural	-	100,0	-	-	-
Carvão vapor	-	100,0	-	-	-
Lenha	-	100,0	-	-	-
Bagaço de cana	-	99,9	0,1	-	-
Outras recuperações	-	100,0	-	-	-
Óleo diesel	-	100,0	-	-	-
Óleo combustível	0,7	94,4	4,9	-	-
GLP	8,5	8,2	83,3	-	-
Eletricidade	94,8	3,0	-	1,6	0,6

Fonte: Elaboração própria a partir de CNI, 2010

Aplicando-se tais distribuições aos consumos finais desses energéticos em 2016 (EPE, 2017), nota-se que o calor de processo é o uso final de energia dominante, seguido da força motriz e do aquecimento direto. Os resultados podem ser vistos na Figura 6.

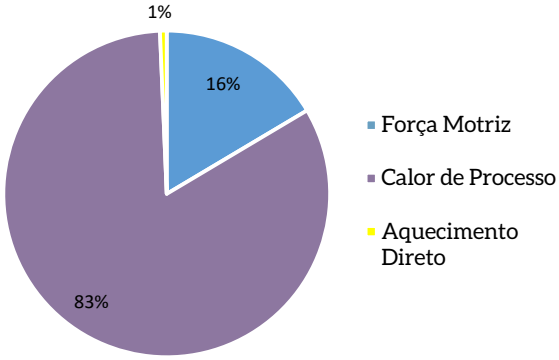

Figura 6 – Distribuição do Consumo Energético Final, por Uso, na Indústria de Papel e Celulose, em 2016

Fonte: Elaboração própria com base em CNI, 2010; EPE; 2017

Os rendimentos médios de conversão para o consumo dos energéticos utilizados na indústria de papel e celulose podem ser vistos na Tabela 4. Esses rendimentos foram aplicados aos consumos finais dos energéticos em 2016 (EPE, 2017), permitindo a estimação da distribuição, por usos finais, do consumo total de energia útil do setor de papel e celulose, conforme representado na Figura 7.

Tabela 4 – Rendimentos Médios Percentuais de Conversão Estimados para 2004 na Indústria de Papel e Celulose

Fontes de energia	Força motriz	Calor de processo	Aquecimento direto	Iluminação	Refrigeração
Gás natural	48,0	88,0	52,0	-	-
Carvão vapor	-	77,0	32,0	-	-
Lenha	-	77,0	32,0	-	-
Bagaço de cana	-	77,0	32,0	-	-
Lixívia (licor negro)	-	77,0	32,0	-	-
Óleo diesel	48,0	88,0	52,0	-	-
Óleo combustível	48,0	88,0	52,0	-	-
GLP	28,0	88,0	52,0	0,2	-
Eletricidade	90,0	97,0	55,0	24,5	60,0

Fonte: Elaboração própria a partir de CNI, 2010

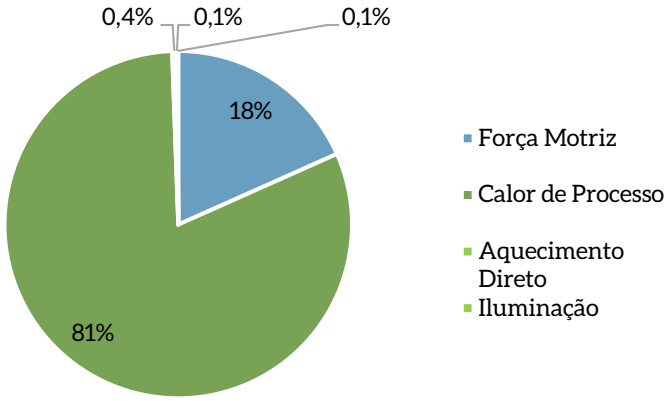

Figura 7 – Distribuição do Consumo Energético Útil, por Uso Final, da Indústria de Papel e Celulose, em 2016

Fonte: Elaboração própria com base em CNI, 2010

Portanto, para o ano de 2016, a energia útil[3] consumida na indústria de papel e celulose brasileira correspondeu a aproximadamente 80% da energia final adquirida. Isso pode ser explicado pelos altos rendimentos de conversão dos combustíveis no uso final dominante desse setor, que é o calor de processo.

Segundo Henriques Jr. (2010), praticamente todas as etapas do processo fabril de papel e celulose apresentam alta intensidade energética. Como verificado, o consumo específico do setor em 2013 foi de 22,3 GJ/t de papel e celulose (Tabela 2). Excluindo-se a energia elétrica, esse consumo específico térmico resultou em 18,7 GJ/t de papel e celulose.

3 Entende-se por energia útil aquela que é utilizada pelo consumidor, após passar por um processo de conversão, sob a forma, por exemplo, de calor, energia motriz, iluminação. Já a energia final designa a energia tal como é disponibilizada, ou, *grosso modo*, comercializada, nas suas várias formas (eletricidade, combustíveis, gás etc.).

Se considerada a adoção das melhores tecnologias disponíveis (MTD) em termos de eficiência energética pelo setor, de acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2009) e Worrel et al. (2009), bem como a cesta atual de produtos (rotas de processamento de celulose e os diversos tipos de papel), poderia ser alcançado um consumo específico entre 13,5 e 14,5 GJ/t de papel e celulose, ou entre 11,5 e 12,3 GJ/t para somente a energia térmica. Esse aspecto revela que o setor tem oportunidades de eficientização energética, as quais serão descritas e exploradas nos próximos desse estudo.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPPC, 2001), na produção de celulose pelo método *kraft*, a maior parte da energia térmica é consumida para o aquecimento de fluidos e para a evaporação de água, também utilizada para acelerar ou controlar reações químicas. A energia elétrica é principalmente consumida para o transporte de materiais (bombeamento) e para o funcionamento das máquinas de papel (apenas em fábricas de celulose integradas).

A fabricação de celulose *kraft* branqueada consome cerca de 10-14 GJ/ADt[4] de energia térmica e 600-800 kWh/ADt de energia elétrica. O consumo de energia para a etapa de secagem da polpa é de cerca de 25% da energia térmica e de 15% a 20% da energia elétrica. A energia usada para bombeamento corresponde a mais de 50% do consumo de energia elétrica (IPPC, 2001).

A Tabela 5 mostra os consumos específicos de energia térmica e elétrica em plantas não integradas de produção de celulose branqueada e não branqueada, pelo método químico de produção de celulose.

Tabela 5 – Consumos Específicos de Energia no Método Químico de Produção de Celulose

Processo	Consumo específico de vapor (GJ/t de celulose)	Consumo específico de eletricidade (GJ/t de celulose)
Método químico sem branqueamento	2,91	0,97
Método químico com branqueamento	4,52	1,19

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

O consumo específico de energia na polpação mecânica é dependente do processo de formação da pasta, que pode ser do tipo *stone groundwood* (SGW), termomecânico (TMP), químio-termomecânico (CTMP) e refinação mecânica (RMP), das propriedades da matéria-prima utilizada e, em grande medida, das exigências de qualidade sobre a celulose produzida (IPPC, 2001). Uma parte substancial (>90%) da entrada de energia para os processos de produção de pasta mecânica é convertida em calor, do qual parte pode ser recuperada (IPPC, 2010).

De acordo com IPPC (2001), apenas uma parte do trabalho mecânico colocado no moinho, ou no refinador, é usado para libertar as fibras da madeira. O resto da energia aplicada é convertido em calor, portanto, passível de ser recuperada como água quente ou vapor, o qual pode ser utilizado na etapa de secagem na produção de papel (para fábricas integradas).

4 ADt = *Air-dried ton*, que significa uma tonelada de celulose seca.

Taxas típicas de consumos específicos de energia do processo mecânico de produção de celulose são descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Consumos Específicos de Energia no Método Mecânico de Produção de Celulose

Processo	Consumo específico de vapor (GJ/t celulose)	Consumo específico de eletricidade (GJ/t celulose)
Método mecânico sem branqueamento	0,03	0,82
Método mecânico com branqueamento	1,64	1,04

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

O processo de produção de papel pode ser considerado energointensivo, e o calor de processo é usado principalmente para as seguintes finalidades (IPPC, 2001):

- Aquecimento de água e vapor;
- Evaporação da água;
- Secagem do papel;
- Ajuste da perda de calor para o meio;
- Conversão em energia elétrica.

Na Tabela 7, são descritos os consumos específicos de vapor e eletricidade no processo de produção de papel. Esses dados foram calculados com base nos consumos apenas da etapa de produção de papel. Para consumos específicos de usinas integradas, devem-se considerar também os consumos específicos das etapas de produção de celulose.

Tabela 7 – Consumos Específicos de Energia na Produção de Papel

Processo	Consumo específico de vapor (GJ/t de papel)	Consumo específico de eletricidade (GJ/t papel)
Produção de papel	10,68	1,92

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

Na Tabela 5, na Tabela 6 e na Tabela 7, foram descritos os consumos específicos relativos aos processos químicos e mecânico de produção de celulose e para a produção de papel, respectivamente. Porém, esses valores não consideram os consumos de vapor, combustíveis e eletricidade de etapas do processo, como preparação da madeira, recuperação química e secagem da celulose (etapa que antecede o processo de produção de papel em fábricas integradas). Sendo assim, os dados de consumos específicos para as etapas citadas encontram-se na Tabela 8 e, nessa mesma tabela, são somados os consumos de todas as etapas de produção, incluindo o processo de produção de celulose e papel, para que assim seja possível estimar o consumo específico total das plantas do setor.

Tabela 8 – Consumos Específicos de Todas as Etapas de Produção de Papel e Celulose

Etapa do processo produtivo	Consumo específico de vapor (GJ/t)	Consumo específico de eletricidade (GJ/ t)
Preparação da madeira	-	0,41
Produção de celulose – método químico	2,91	0,97
Produção de celulose – método mecânico	0,03	0,82
Branqueamento	1,61	0,22
Recuperação química	4,98[1]	0,08
Secagem da celulose	0,42	0,05
Produção de papel	10,68	1,92
Total – com método químico	20,60	3,65
Total – com método mecânico	17,72	3,50

1. O consumo específico, neste caso, não se refere somente ao consumo de vapor por tonelada de produto, mas ao consumo de combustível e vapor por tonelada de produto.

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

A partir dos dados apresentados na Tabela 8, e comparando-os com os dados apresentados na Tabela 2, é possível notar uma pequena diferença ente os consumos específicos totais calculados. Enquanto os valores apresentados na Tabela 2 variam de 22,3 a 23,3 GJ/toneladas, os mesmos valores, mostrados na Tabela 8, variam de 17,7 GJ/toneladas (método mecânico) a 20,6 GJ/toneladas (método químico). Isso pode derivar do método utilizado para o cálculo dos consumos específicos, dado que, no segundo caso, faz-se um detalhamento muito maior, apresentando o consumo para cada etapa do processo, como também do ano de referência dos valores encontrados, correspondendo, os primeiros valores, aos anos pertencentes ao período que vai de 2008 a 2013 e os segundos valores, ao ano 2000. Sendo assim, os valores a serem utilizados para as projeções dos cenários REF, BC e BC+I são os correspondentes aos da Tabela 2, mais especificamente, o valor mostrado para o ano de 2010, que representa o ano-base do estudo.

Como principais fontes emissoras de GEE, é possível citar as reações que compõem os processos, a queima de combustíveis, a produção de vapor e eletricidade pelas próprias fábricas (autogeração), bem como a produção de eletricidade pela rede. De acordo com MCTI (2006; 2010) e MCTIC (2016), as emissões relacionadas ao processo industrial, mais especificamente as emissões de CO, NOx e NMVOC – compostos orgânicos voláteis não mecânicos –, ocorrem durante a preparação da celulose, quando são usados processos químicos para dissolver a lignina da madeira, sendo o principal desses processos, no Brasil, o *kraft*, mais adequado para o processamento do eucalipto. Segundo MCTIC (2016), no ano de 2010, o setor emitiu, na preparação de celulose, 73,4 Gg de CO, 19,6 Gg de NOx e 48,5 Gg de NMVOC, valores maiores que os correspondentes no ano de 1990, que foram de 33,2 Gg para CO, 14,2 Gg para NOx e 35,2 Gg para NMVOC.

No que concerne à queima de combustíveis para geração de energia térmica em forma de vapor e calor, segundo a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2012), esta é a maior fonte de emissão de GEE do setor.

Melhores tecnologias disponíveis aplicáveis aos processos produtivos do setor

Capítulo

2

2 Melhores tecnologias disponíveis aplicáveis aos processos produtivos do setor

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

A descrição será segmentada em sistemas de cogeração, vapor, bombas, ventilação, compressão de ar e integração de processos, assim como outras medidas de eficientização energética nos processos produtivos, entre os quais polpação mecânica, polpação química e produção de papel.

2.1 Sistemas de cogeração

As perdas energéticas provenientes da geração de energia e da produção de calor podem ser reduzidas pela combinação de ambos os processos. A cogeração, que aumenta significativamente a eficiência global de recuperação de energia e ajuda a reduzir o consumo de combustível e emissões atmosféricas, pode ser definida como a produção simultânea e sequenciada de energia térmica e elétrica, a partir de um mesmo combustível (MDIC, 2010).

Segundo o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC, 2010), além do ganho em eficiência energética, dependendo da escala do empreendimento e de outras variáveis (como preço do combustível, tarifa da energia elétrica, possibilidade de venda de excedente de energia, fator de carga, entre outros), a cogeração de energia pode se tornar mais econômica e segura do que a energia elétrica adquirida das empresas distribuidoras, o que pode ser fundamental na escolha dessa tecnologia.

Enquanto em centrais convencionais menos de 40% da energia de entrada é convertida em energia elétrica e o resto da energia é desperdiçado, em instalações de cogeração, entre 80% e 93% da energia de entrada são convertidos em 40%-70% de calor e em 20%-45% de energia elétrica. E ainda, a cogeração pode reduzir a emissão de CO_2 em 50% em comparação com os sistemas convencionais de geração de energia (IPPC, 2010).

O custo de investimento específico é estimado em 1.000 euros/kW, e as poupanças realizáveis e o tempo de retorno dependerão, principalmente, do preço da eletricidade e dos combustíveis no país (IIP, 2013).

2.2 Sistema de vapor

Segundo Kramer et al. (2009), o vapor é usado em inúmeras aplicações importantes em unidades industriais de papel e celulose, todavia seu uso mais significativo ocorre nas etapas de cozimento, branqueamento, evaporação e secagem. Oportunidades de melhorias na eficiência energética dos sistemas de vapor representam, portanto, significativas economias de energia para a indústria de papel e celulose. Ainda, segundo esses autores, em usinas que geram energia elétrica, utilizando turbinas de combustão, o calor residual pode ser recuperado para gerar vapor de processo. Seja qual for o uso, isto é, seja qual for a fonte do vapor, melhorias de eficiência na geração de vapor, distribuição e uso final são possíveis. Sendo assim, este capítulo descreve as MTD para otimizar os sistemas de vapor em relação aos seus consumos energéticos e emissões atmosféricas.

2.2.1 Melhoria do isolamento de caldeiras e linhas de vapor

Essa medida pode ser implementada com a utilização de materiais isolantes. Fatores decisivos na escolha do material incluem baixa condutividade térmica, estabilidade dimensional sob mudança de temperatura, resistência à absorção de água e resistência à combustão. Outras características que também podem ser importantes, dependendo da aplicação são, por exemplo, tolerância a grandes variações de temperatura e vibrações do sistema e resistência à compressão (BAEN; BARTH, 1994).

Segundo Kramer et al. (2009), poupanças entre 6%-26% podem ser conseguidas com a melhoria do isolamento de caldeiras caso seja combinada com melhorias no controle do sistema de vapor.

No que diz respeito às linhas de vapor, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (US DOE, 2006) estima que a instalação de isolamento removível em válvulas, tubos e conexões pode reduzir o consumo de energia do sistema de vapor por 1%-3%.

Como parte de um estudo de caso sobre o uso da energia e oportunidades de eficiência energética em dez fábricas diferentes de papel e celulose em Illinois, foi mostrado que a instalação ou a melhoria do isolamento de tubos e válvulas poderia economizar, em média, mais de 3.600 MMBtu por ano (CHIMACK et al., 2003). Por sua vez, estudos de caso da indústria de celulose e papel dos EUA indicam que o período de retorno para um melhor isolamento é normalmente inferior a um ano (IAC, 2008).

2.2.2 Redução do excesso de ar de combustão em caldeiras

Caldeiras devem ser alimentadas com excesso de ar para garantir a combustão completa, minimizando a presença de monóxido de carbono nos gases de escape. Porém, quando o excesso é acima do adequado, a energia é desperdiçada e o calor acaba sendo transferido para a atmosfera em vez de ser transferido para o vapor. Sendo assim, o ideal é que as caldeiras trabalhem com cerca de apenas 15% de excesso de ar (em torno de 3% de excesso de oxigênio) (US DOE, 2004; GANAPATHY, 1994).

Segundo Zeitz (1997), a maioria das caldeiras industriais já opera com 15% de excesso de ar ou menos, porém ainda existem casos em que o percentual de excesso de ar se encontra acima desse valor.

De acordo com Industrial Assessment Centers (IAC, 2008), numerosos estudos de casos industriais indicam que o período de retorno para essa medida é inferior a um ano.

O US DOE (2002) estima que muitas fábricas de papel e celulose nos EUA poderiam reduzir o consumo de combustível na caldeira em cerca de 2,3% com a aplicação dessa medida.

2.2.3 Substituição de queimadores

A substituição de queimadores antigos por queimadores modernos e mais eficientes pode levar a economias significativas de energia (KRAMER et al., 2009). Um estudo de caso em dez fábricas de papel e celulose em Illinois, nos EUA, mostrou que a melhoria da eficiência de combustão da caldeira poderia economizar em média mais de 9.500 GJ por ano (CHIMACK et al., 2003).

O US DOE (2002) estima que a atualização de queimadores para modelos mais eficientes, ou a substituição de queimadores desgastados, pode reduzir o uso de combustível em caldeiras de fábricas de celulose e papel em cerca de 2,4%, com um período de retorno[5] de cerca de 19 meses.

2.2.4 Recuperação de calor e vapor

Em fábricas de papel e celulose, a recuperação de calor pode ocorrer em diversas etapas e unidades do processo produtivo. Alguns exemplos são: recuperação de calor em unidades digestoras do processo químico de produção de celulose; recuperação de calor na polpação termomecânica; recuperação de calor nas secadoras de papel; recuperação de calor do efluente da etapa de branqueamento; recuperação de calor do gás combustível; recuperação por meio do retorno de condensado.

A recuperação de calor em unidades digestoras, no processo químico de produção de celulose, pode ocorrer tanto em digestores contínuos quanto descontínuos. No primeiro caso, o licor negro extraído segue para um tanque de *flash*, onde é produzido vapor de *flash*; e no segundo caso, o vapor produzido no digestor é tipicamente armazenado como água quente em um tanque acumulador (KRAMET et al., 2009).

Segundo o US DOE (2003), ao avaliar uma planta produtora de mais de 650.000 toneladas de papel, a recuperação de calor em unidades digestoras demonstrou um potencial de recuperação de aproximadamente 990.000 GJ de combustível e 750.000 GJ de vapor por ano. Ainda, estimou que o investimento e o custo anual para um sistema de recuperação de calor desse tipo são estimados em US$ 2.250.000 e US$ 2.235.000, respectivamente, com tempo de retorno inferior a um ano.

No caso da polpação termomecânica, a recuperação de calor se dá pelo vapor produzido como subproduto do processo. Esse vapor é normalmente contaminado, mas seu calor pode ser recuperado para utilização em outros processos, por exemplo: i) na etapa de secagem do papel em fábricas

5 O período de retorno, nesse caso, consiste no tempo necessário para que o ganho acumulado com a implementação de uma medida se iguale ao valor do investimento realizado.

integradas (MARTIN et al., 2000); ii) para aquecer água via trocadores de calor de contato direto (FOCUS ON ENERGY, 2006) e em sistemas térmicos (MARTIN et al., 2000).

Segundo Kramer et al., (2009), estima-se que a recuperação de calor na polpação termomecânica pode gerar 1,1-1,9 toneladas de vapor limpo por tonelada de celulose. O autor também afirma que o custo médio de instalação está estimado em US$ 2.000, com aumentos significativos nos custos de O&M. Para o IPPC (2010), o período de retorno do investimento é, em geral, de aproximadamente um ano.

Nedo (2008) relata que uma planta japonesa com capacidade de 150 toneladas/dia tem capacidade de recuperar 695 GJ de energia na forma de vapor e 1.175 GJ de energia na forma de água quente.

Quanto ao processo de secagem do papel, existem várias possibilidades para recuperar a energia térmica a partir de vapor e resíduos de calor, as quais incluem: i) substituir os secadores por sifões estacionários na máquina de papel, alcançando redução no consumo de energia de 0,89 GJ/t de papel e redução nos custos de operação de US$ 0,045/t de papel (MORRIS, 1998); ii) recompressão mecânica do vapor e reuso de vapor superaquecido no processo de secagem, com redução no consumo de energia da ordem de 5 GJ/t de papel, mas com aumento no consumo de eletricidade de aproximadamente 160 kWh/t de papel (VAN DEVENTER, 1997); iii) uso de bombas de calor para recuperação de calor residual (ABRAHAMSSON et al., 1997).

Martin et al. (2000) estimam economia de energia de vapor de cerca de 0,4 MMBtu/tonelada de papel, alcançável pela recuperação de calor em máquinas de papel, com custos de instalação de cerca de US$ 18 por tonelada de papel. No entanto, o autor afirma que a instalação de sistemas de recuperação de calor pode levar ao aumento nos custos de manutenção, dado que trocadores de calor necessitam de limpeza periódica.

No caso do efluente da unidade de branqueamento, com a instalação de trocadores de calor é possível recuperar grande quantidade de calor, o qual pode ser utilizado, por exemplo, para o aquecimento de água (KRAMER et al., 2009).

Em uma fábrica da Georgia-Pacific, no estado do Arkansas/EUA, uma auditoria revelou uma oportunidade de instalação de trocadores de calor para recuperar calor a partir dos efluentes da unidade de branqueamento, para a geração de água quente utilizada na máquina de papel da fábrica. Com a instalação, a economia de energia estimada seria de 939.000 GJ/ano, com economia anual de cerca de US$ 2,4 milhões (US DOE, 2003). A estimativa de investimento foi de US$ 1,6 milhão, com período de retorno esperado de apenas oito meses (US DOE, 2003).

A recuperação de calor a partir do gás combustível é uma das melhores oportunidades de recuperar calor em sistemas de vapor. Segundo Kramet et al. (2009), o calor recuperado do gás combustível pode ser utilizado para, por exemplo, preaquecer a água de alimentação de caldeiras. O US DOE (2002c) estima que a instalação de preaquecedores de água de alimentação da caldeira reduziria o consumo de combustível da caldeira em cerca de 3,5%. Segundo a IEA (2009), é possível uma economia no consumo de combustíveis de aproximadamente 0,25 GJ/tonelada de produto, com custo de US$ 0,7/tonelada de produto.

Por fim, Staudt (2010) destaca que a redução do consumo de energia com a aplicação de caldeiras com retorno de condensado é de cerca de 13,8%, com custos de investimentos estimados em US$ 5,59/t de produto e custos de O&M de US$ 0,79/t de produto.

2.2.5 Manutenção das caldeiras

Um programa de manutenção, que assegure que todos os componentes de caldeiras estejam operando com desempenho máximo, pode resultar em economias substanciais. Em média, a economia de energia associada com melhor manutenção da caldeira é estimada em 10%. Melhorias na manutenção também podem reduzir a emissão de poluentes (KRAMER et al., 2009).

Segundo Martin et al. (2000), a redução no consumo de combustíveis com a implementação desta medida é de 1,26 GJ/tonelada de produto, e a redução de emissões seria de aproximadamente 2,26 kg de carbono/t de produto.

2.2.6 Modificações nos fornos de cal

Medidas simples podem promover a eficientização energética em fornos de cal no segmento de celulose. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA, 2010), modificações no forno de cal, como a instalação de filtros mais eficientes e refratários de alto desempenho, podem levar a reduções no consumo de energia de até 5%. O custo de investimento estimado para essa medida é de US$ 3,68/tonelada de produto (MARTIN et al., 2000).

2.3 Sistema de bombas

Medidas de eficiência energética aplicadas em bombas podem levar a economias de energia significativas em fábricas de papel e celulose (KRAMER et al., 2009). De acordo com US DOE (2002), melhorias básicas do sistema de bomba em fábricas de papel e celulose podem economizar mais de 6.300 GWh de eletricidade por ano.

Algumas das medidas de eficiência energética aplicáveis ao sistema de bombas e seus componentes são descritas a seguir.

2.3.1 Instalação de bombas de vácuo mais eficientes

As bombas de vácuo são um dos principais equipamentos que consomem energia elétrica em máquinas de papel. Sendo assim, bombas de vácuo com menores consumos energéticos possibilitam a produção de papel com menores custos. Os ganhos energéticos pela substituição de uma bomba estão entre 2% e 10% (WORRELL; GALITSKY, 2005). Benefícios gerados pela troca de bombas ineficientes por bombas eficientes são: redução do consumo de energia, menor necessidade de manutenção e capacidade de vácuo consistente (CII, 2008).

Segundo a Confederação Indiana da Indústria (CII), em 1999, a fábrica de papel Indiana, Andhra Pradesh, fez a troca de cinco bombas de vácuo ineficientes por bombas eficientes, alcançando redução no consumo de eletricidade de 5.000 kWh/dia, associada a uma melhor performance da máquina de papel devido à maior capacidade de vácuo (CII, 2008).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (UNIDO, 2010), a instalação de bombas mais eficientes pode ter um custo de capital que varia de US$ 15.000 a US$ 115.500, para bombas com potência menores que 50 HP e entre 500 e 1.000 HP, respectivamente.

2.3.2 Correção do superdimensionamento de bombas

Bombas superdimensionadas, normalmente, consomem mais energia que o necessário. Assim, a substituição de bombas superdimensionadas por bombas corretamente dimensionadas pode reduzir o uso de eletricidade de um sistema de bombeamento de 15% a 25% (US DOE, 2002). Embora não seja uma prática usual, equipamentos com superdimensionamento podem ser ajustados pelo uso de engrenagens e correias, ou de motores com velocidades reduzidas. O retorno de investimento é de cerca de um ano, dependendo do tamanho da bomba (GALITSKY et al., 2005).

Em uma fábrica de papel de jornal no estado da Geórgia/EUA, um novo sistema de limpador de máquina de papel foi instalado, necessitando de uma pressão de alimentação significativamente mais baixa que a utilizada anteriormente. O sistema anterior era alimentado por uma bomba com motor de 1.250 cavalos de potência, sendo substituído por um motor de 800 cavalos, o que reduziu o consumo de energia elétrica em 2.450 MWh/ano, com custo de investimento de US$ 123.500 e tempo de retorno de 17 meses (US DOE, 2002).

2.3.3 Manutenção e monitoramento de bombas

A manutenção inadequada de bombas pode diminuir a sua eficiência, assim como causar maiores desgastes e aumentar os custos energéticos. A implementação de um programa de manutenção do sistema de bombas pode ajudar a evitar esses problemas. Além disso, a melhoria na manutenção do sistema de bombas pode levar a uma poupança de energia da ordem de 2% a 7% (US DOE, 2002). O monitoramento em conjunto com operações de manutenção pode ser utilizado para detectar problemas e determinar soluções para criar um sistema de bombas mais eficiente (KRAMER et al., 2009). Medidas de monitoramento que podem ser utilizadas consistem em análise de vibrações, controle de pressão e vazão, controle de corrente ou potência, inspeção do sistema, entre outras.

De acordo com a Unido (2010), os custos com a manutenção do sistema de bombas podem variar de acordo com a prática utilizada. Por exemplo, para o conserto de vazamentos, os custos típicos variam de US$ 1.000 a US$ 3.000, dependendo da potência da bomba. Por sua vez, a remoção de sedimentos está na faixa de US$ 3.500 a US$ 14.000 para bombas menores que 50 HP e entre 500 e 1.000 HP, respectivamente.

2.3.4 Bombas com velocidade variável (ASD)

Segundo Kramer et al. (2009), as ASD são recomendadas para ajustar a velocidade conforme a carga requerida na operação, quando o consumo energético em sistemas centrífugos é aproximadamente proporcional ao cubo da vazão. Assim, uma pequena modificação na vazão que seja proporcional à velocidade do motor pode promover uma quantidade razoável de conservação energética. De acordo com Xenergy (1998) e Best Practice Programme (1996), a inclusão de ASD em bombas é capaz de economizar entre 20% e 50% do seu consumo de energia, com *paybacks* relativamente curtos, dependendo da aplicação, do tamanho da bomba, da carga e da variação da carga. Os motores ASD aumentam a produtividade, reduzem o desgaste do equipamento e a necessidade de manutenção.

Como exemplo de aplicação, cita-se a instalação de dois ASD no sistema de bombeamento de efluentes, realizada pela fábrica de papel Daishowa América, em Port Angeles, Washington/EUA. O projeto resultou em economia anual nos custos de energia de US$ 32 mil, totalizando redução de 700.000 kWh no consumo de eletricidade. O projeto também eliminou os problemas que levaram aos excessivos custos de manutenção, resultando em economia adicional anual com manutenção de US$ 10.000 (US DOE, 2002b).

Segundo dados obtidos na Unido (2010), o custo de instalação de ASD em bombas varia de acordo com sua potência. Para bombas com 50 HP, o custo de capital típico é de US$ 4.000; para bombas de 100 a 200 HP, o custo é de US$ 18.000; e para bombas entre 500 e 1000 HP, o custo é de US$ 65.000.

2.3.5 Sistemas de controle de bombas

Os sistemas de controle de bombas podem aumentar a eficiência energética de um sistema de bombeamento, fechando as bombas automaticamente quando a demanda é reduzida, ou colocando-as em *stand-by* com cargas reduzidas até que a demanda aumente (KRAMER et al., 2009).

Em 2000, a Cisco Systems atualizou os sistemas controles em suas bombas para que estas fossem desligadas automaticamente durante períodos de menor demanda do sistema. O projeto possibilitou a economia de US$ 32 mil e 400 mil kWh por ano, o que representou economia de 61,5% no total do consumo de energia das bombas (CEC, 2002). Com custo total de US$ 29.000, o período de retorno do investimento foi de 11 meses. Além da economia de energia, o projeto reduziu os custos de manutenção e aumentou o tempo de vida do sistema de bombas.

2.4 Sistema de ventilação

Assim como no caso do sistema de bombas, existem oportunidades consideráveis para aumentar o desempenho e a eficiência de sistemas de ventilação (KRAMER et al., 2009). De acordo com o US DOE (2002), melhorias básicas no sistema de ventilação de fábricas de papel e celulose podem reduzir o consumo de eletricidade em 1.100 GWh por ano. Nesse contexto, as MTD aplicadas aos sistemas de ventilação são descritas a seguir.

2.4.1 Correção do superdimensionamento de ventiladores

Segundo o US DOE (2003), o superdimensionamento de ventiladores pode acarretar custos de capital elevados, maiores custos de manutenção e custos energéticos maiores que os de ventiladores dimensionados corretamente.

Em uma fábrica de papel-cartão em Tomahawk, Wisconsin/EUA, um projeto de otimização do sistema de ventilação foi elaborado para redimensionar e substituir ventiladores para melhor atender o fluxo de ar e requisitos de pressão. O novo sistema de ventilação levou a uma economia de energia de cerca de 2,5 milhões de kWh por ano, redução anual de custos de cerca de US$ 85.000, custos de investimento de US$ 44.000 e retorno de investimento de aproximadamente de seis meses (US DOE, 1999).

2.4.2 Ventiladores com velocidade variável (ASD)

Economias de energia significativas podem ser alcançadas com a instalação de variadores de velocidade em ventiladores. Segundo o US DOE (2002), a redução no consumo de energia pode variar entre 14% e 49% com a instalação de ASD.

Uma avaliação de eficiência energética em uma fábrica nos EUA verificou que os motores dos ventiladores de uma torre de resfriamento operaram de forma contínua ao longo de um ano, apesar da carga de calor variável. Assim, variadores de velocidade foram instalados nos motores dos ventiladores, o que resultou em economia de 69,7 MWh de eletricidade por ano, com custo de US$ 9.000 e tempo de retorno do investimento de 1,7 anos (US DOE, 2003a).

2.5 Sistema de compressão de ar

Muitas oportunidades para reduzir o consumo de energia em sistemas de ar comprimido apresentam custos acessíveis e períodos de retorno de investimento curtos (KRAMER et al., 2009). A economia de energia alcançada com a otimização dos sistemas de ar comprimido pode variar de 20% a 50% (MCKANE et al., 1999). Um sistema de ar comprimido adequadamente gerido também pode reduzir as exigências de manutenção, diminuir o tempo de inatividade, aumentar o rendimento da produção e melhorar a qualidade do produto (KRAMER et al., 2009).

2.5.1 Manutenção e monitoramento do sistema de compressão

A manutenção inadequada pode diminuir a eficiência da compressão do ar e aumentar vazamentos ou variabilidade de pressão, bem como levar ao aumento da temperatura de funcionamento (KRAMER et al., 2009). Melhorias na manutenção podem reduzir tais problemas e possibilitar economia de energia. De acordo com US DOE (2003), Compressed Air Challenge (CAC, 2002) e Scales e McCulloch (2007), a manutenção adequada inclui:

- Inspeção e manutenção de filtro, posto que filtros bloqueados aumentam a queda de pressão ao longo do filtro. Ao inspecionar e limpar periodicamente os filtros, as quedas de pressão podem ser minimizadas;
- Inspeção de ventiladores e bombas de água para o máximo desempenho;
- Inspeção de armadilhas de drenagem;
- Manutenção dos refrigeradores no compressor;
- Inspeção da correia do compressor;
- Diminuição do vazamento de ar comprimido em todo o sistema.

Além da manutenção adequada, um sistema de monitoramento pode reduzir custos de energia e operacionais nos sistemas de ar comprimido. O acompanhamento eficaz inclui (CADDET, 1997):

- Medidores de pressão;
- Medidores de temperatura em todo o compressor e sistema de arrefecimento para detectar incrustações e bloqueios;
- Medidores de fluxo para medir a quantidade de ar utilizado;
- Medidores de temperatura do ponto de orvalho para monitorar a eficácia dos secadores de ar;
- Verificação de sistemas de distribuição de ar comprimido depois que o equipamento foi reconfigurado para se ter certeza de que o ar não está fluindo para equipamentos não utilizados ou para peças obsoletas do sistema de distribuição de ar comprimido.

De acordo com a Unido (2010), os custos típicos de capital para o monitoramento de sistemas de compressão variam de US$ 500 a US$ 10.000, a depender do tamanho do sistema.

2.5.2 Redução de vazamentos de ar

Os vazamentos de ar podem ser uma fonte importante de desperdício de energia. Segundo US DOE (2003), instalações industriais malconservadas podem ter taxas de fuga variando entre 20% e 30% da capacidade total de produção de ar comprimido.

A magnitude da perda de energia associada a vazamento varia com o tamanho do furo nos tubos ou equipamentos. Um compressor que opera 2.500 horas por ano com pressão de 87 psi e com vazamentos de diâmetros de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm e 4 mm, têm perda estimada, respectivamente, em 250 kWh, 1.100 kWh, 4.500 kWh e 11.250 kWh por ano (CADDET, 1997).

No início de 2001, uma fábrica de jornal em Augusta, Geórgia/EUA, consolidou dois sistemas de ar comprimido em suas instalações. O projeto resultou em um sistema mais simplificado, acrescentou capacidade de armazenamento e corrigiu uma série de vazamentos. A redução implicou uma economia de energia de mais de 1,8 milhão de kWh por ano (US DOE, 2002a). Vários estudos em fábricas de celulose e papel sugerem que o período de retorno para os esforços de redução de vazamentos é geralmente mais curto que sete meses (IAC, 2008). Segundo a Unido (2010), os custos com reparo de vazamentos de sistemas de compressores de ar variam de US$ 1.250 a US$ 5.000, dependendo da magnitude do sistema.

2.5.3 Minimização da queda de pressão

Queda de pressão excessiva pode resultar em fraco desempenho do sistema, associado com consumo excessivo de energia. A minimização da queda de pressão requer modificações, tanto no projeto do sistema de compressão quanto em sua manutenção, selecionando-se componentes do sistema com a menor queda de pressão possível e condições especificadas de máximo funcionamento e melhor desempenho (KRAMER et al., 2009).

Segundo a Unido (2010), os custos com a minimização das quedas de pressão variam de US$ 2.000 a US$ 12.000, de acordo com o tamanho do sistema. Auditorias em fábricas de celulose e papel dos EUA relataram que o período de retorno do investimento é normalmente inferior a um ano (IAC, 2008).

2.5.4 Correção dos diâmetros de tubulações

Aumentar o diâmetro de tubulações para o maior tamanho viável, em um sistema de ar comprimido, pode ajudar a minimizar as perdas de pressão e vazamentos, o que reduz a pressão de operação do sistema e leva a economias de energia (KRAMER et al., 2009). O aumento dos diâmetros da tubulação reduz o consumo de energia do sistema de ar comprimido em 3% (RADGEN; BLAUSTEIN, 2001). De acordo com a Unido (2010), os custos de capital com o redimensionamento do sistema de ar comprimido, para atender a demanda, variam de US$ 12.000 a US$ 120.000, dependendo do tamanho do sistema.

2.5.5 Compressores com velocidade variável (ASD)

A implementação de reguladores de velocidade, em compressores rotativos de ar, pode reduzir em até 15% o consumo de energia (WORRELL; GALITSKY, 2005). A instalação de ASD é recomendável para sistemas com grande variação de carga, locais com frequentes alterações da temperatura ambiente e locais com energia elétrica relativamente cara (maior que 0,04 US$/kWh).

A instalação de motores mais eficientes em sistemas de compressores pode reduzir o consumo energético anual em até 2%, apresentando retorno do investimento de aproximadamente três anos. No entanto, os maiores ganhos ocorrem em sistemas com motores pequenos, usualmente menores que 10 kW (WORRELL; GALITSKY, 2005).

Segundo a Unido (2010), a instalação de ASD em compressores de ar pode ter custo de capital que varia de US$ 12.000 a US$ 100.000, dependendo de sua potência.

2.6 Integração de processos

2.6.1 Análise *pinch*

A análise *pinch* é uma ferramenta prática utilizada para avaliar a possibilidade de ganho de eficiência no uso da energia, água e hidrogênio por meio da integração de processos. Nessa metodologia, investigam-se os fluxos energéticos do processo e a forma mais econômica de se maximizar a recuperação de calor, aproximando o sistema da menor temperatura em que a troca térmica ocorre adequadamente, minimizando-se, assim, o consumo de utilidades, como vapor e água de resfriamento.

Segundo a Natural Resources Canada (2003), a análise *pinch* pode levar a economias de energia de 10% a 35% na indústria de papel e celulose. Vários estudos de caso da análise *pinch* foram feitos por empresas de papel e celulose na América do Norte. Na fábrica de papel e celulose Smurfit-Stone, em La Tuque, Quebec/Canadá, uma análise de integração de sistemas de energia e de água da usina identificou várias opções de recuperação de calor e redução de efluentes. Além de identificar termodinamicamente todas as possíveis sinergias entre sistemas de quentes e frios, a análise mapeou trocas de calor inapropriadas e formas de melhorar a recuperação de calor da fábrica. Foram considerados viáveis, a partir dessa análise, 12 possibilidades de integração energética, as quais resultariam em redução de 15% no uso total de combustível da usina. O período de retorno dessas melhorias foi estimado em apenas dez meses (CETC, 2002).

Em uma fábrica de celulose em Skookumchuck/Canadá, um estudo de integração de processos de água e eficiência energética identificou oportunidades que se concentravam em medidas de preaquecimento da água de alimentação e deslocamento de correntes de água quente em torre de resfriamento. Cinco projetos prioritários foram identificados, os quais reduziriam o consumo de energia – e, ao mesmo tempo, reduziriam o consumo de água – em 10%. As despesas de capital para esses projetos foram estimadas em cerca de US$ 1,8 milhão, e o retorno sobre o investimento se daria em aproximadamente 12 meses (CIPEC, 2008).

Segundo Martin et al. (2000), a redução no consumo de combustível com a aplicação dessa medida é de 1,79 GJ/tonelada de produto, com redução nas emissões de 3,22 Kg de carbono/t de produto.

2.7 Outras medidas de eficiência no processo produtivo

2.7.1 Polpação mecânica

Embora menos comum que a polpação química, as operações de produção de pasta mecânica ainda existem na produção de celulose brasileira. Sendo assim, serão discutidas algumas medidas de eficientização energética para as operações mecânicas de produção de celulose.

Otimização de refinadores

Muitas melhorias em refinadores são possíveis para que se reduza o consumo de eletricidade na polpação mecânica. Como exemplo, Tessier et al. (1997) e Kramer et al. (2009) citam, respectivamente, a implementação de estratégias de controle do refinador em uma fábrica de papel no Canadá, associada à troca de refinadores de disco por refinadores cônicos, as quais possibilitaram economia de 51,3 kWh/t de celulose. Adicionalmente, o IPPC (2010) destaca que o uso de refinadores de disco duplo, em fábricas suecas e norueguesas, consumiu menos energia que refinadores de disco único. Martin et al. (2000) estimam que o potencial de redução no consumo de eletricidade alcançado, a partir de melhorias em refinadores, é de 11%, com custo de capital de aproximadamente US$ 7,7/t de celulose produzida.

Polpação mecânica RTS

A polpação mecânica RTS tem tempo de residência curto, temperatura elevada e alta velocidade de polpação. No processo RTS, o consumo de energia é reduzido devido ao aumento da velocidade rotacional do refinador primário, o qual leva a um menor tempo de residência e maior intensidade de refino (KRAMER et al., 2009). Temperaturas de cerca de 165°C são praticadas, o que resulta em redução do consumo específico de energia sem perda de qualidade da celulose produzida (CANNELL, 1999; FERGUSSON, 1997; PATRICK, 1999).

As estimativas publicadas para as economias de energia obtidas com a polpação RTS variam muito. Martin et al. (2000) estimam que a celulose de RTS pode ser produzida com cerca de 15% menos de energia específica do que a celulose produzida com um sistema tradicional de refino. Os dados de Miotti (2001) sugerem que a energia específica de polpação RTS é cerca de 20% menor do que os processos convencionais. Focus on Energy (2006a) estima que o efeito de aumento da velocidade de rotação em refinadores convencionais pode reduzir o uso de energia a partir de 15% até 30%, dependendo do tipo de placa e refinador.

De acordo com Martin et al. (2000), o potencial de redução de emissões com a polpação RTS é estimado em 128 Kg CO_2/t de celulose, e os custos de implementação são estimados em US$ 50/t de celulose.

Segundo Sabourin (2006), para uma fábrica de papel e celulose com capacidade de 1.000 toneladas por dia, uma redução de 20% no consumo energético resulta em economias de US$ 5 milhões por ano.

Termopolpação

A termopolpação é uma variação do processo TMP, em que a celulose do refinador primário é submetida a um tratamento de alta temperatura, durante um curto período de tempo, numa *termomixer* e em refinador secundário subsequente. As temperaturas na fase primária são abaixo da temperatura de amolecimento de lignina. As pressões de operação mais elevadas no refinador secundário reduzem o fluxo volumétrico de vapor gerado (KRAMER et al., 2009). Estimativas publicadas sugerem que a termopolpação pode reduzir o consumo específico de energia, em comparação com o processo TMP, em até 20% (MIOTTI, 2001). Não foram encontrados dados de custos para essa tecnologia.

Repolpação contínua

O processo de repolpação de pasta de celulose envolve a mistura da carga de alimentação da polpa seca com água, em um tanque, para produzir uma pasta fibrosa. Esse processo normalmente é realizado de forma descontínua. Porém, a conversão para uma repolpação contínua pode conduzir a reduções no consumo de energia devido a uma melhor eficiência do processo (KRAMER et al., 2009). Estima-se que a economia de energia pode alcançar até 40% devido a menores exigências de potência dos motores e que os custos de capital são estimados em US$ 100.000 (FOCUS ON ENERGY, 2006a).

2.7.2 Polpação química

Como já discutido, a maioria das pastas de celulose no Brasil é produzida por processos de polpação química, mais especificamente o processo *kraft* de polpação. Da mesma forma, o capítulo 1 mostrou que a polpação química (ou seja, *kraft*) está associada a um grande consumo de vapor, eletricidade e combustíveis. Sendo assim, a eficientização do processo químico de polpação pode levar a economias significativas de energia na produção de celulose.

Utilização de aditivos na polpação química

A utilização de aditivos na polpação química pode aumentar a penetração do licor e promover maior cozimento. Logo, pode-se alcançar maior rendimento de polpa, menor consumo energético por tonelada de polpa, menores demandas por matérias-primas e melhores taxas de produtividade (KRAMER et al., 2009).

A viabilidade financeira dessa medida é normalmente determinada comparando-se os custos com os aditivos com as economias em fibra projetadas. Alguns estudos estimam que a economia é de aproximadamente US$ 20/t de polpa branqueada (FOCUS ON ENERGY, 2006a).

Normalmente, compostos de antraquinona são utilizados como aditivos de polpação química, porém novas opções estão surgindo. Por exemplo, o US DOE (2008) investigou a aplicação do produto químico ChemStone EOA-11. Foi estimado que a redução do tempo de cozimento pode levar a poupanças de energia de 125.000 Btu por tonelada de lascas de madeira processadas. Outros benefícios relatados incluíram aumento no rendimento de 2%-5% por tonelada de madeira, reduções na polpa residual, menor uso de produtos químicos branqueadores e reduções de emissões à base de enxofre (US DOE, 2008; RONNEBERG; JENNING, 2007).

Outro aditivo emergente na polpação química é o fosfanato. Resultados preliminares de um projeto do US DOE sugeriram que a adição de fosfonato aumenta a remoção de lignina, melhora o rendimento e o brilho da polpa branqueada e conserva a viscosidade da polpa (US DOE, 2006b). Poupanças de energia foram estimadas em 8%-10%, e aumentos de rendimento foram estimados em 4%-6% (US DOE, 2006a).

Otimização do controle do fator de diluição

De acordo com National Council for Air and Stream Improvement (NCASI), a otimização do controle do fator de diluição pode reduzir a quantidade média de água a ser evaporada do licor negro, o que reduz o consumo de vapor dos evaporadores (NCASI, 2001). Em uma avaliação de uma fábrica de celulose e papel em Longview, Washington/EUA, um projeto foi identificado para melhorar a lavagem do digestor e para reduzir o fator de diluição. Estimou-se que tais melhorias poupariam 200 litros de água por minuto e 310.000 MMBtu de gás natural por ano. As economias de custo anuais associadas a essas medidas foram de US$ 580.000 (US DOE, 2004a).

Modificações na digestão descontínua

Várias abordagens podem ser consideradas para reduzir o consumo de energia em digestores descontínuos, tal como o aquecimento indireto e o *cold blow* (KRAMER et al., 2009). Reduções no consumo energético com o aquecimento indireto podem chegar a 3,17 GJ/t de celulose (KRAMER et al., 2009). A economia de energia com o *cold blow* é estimada em 2,3 GJ/t de celulose (NCASI, 2001). Segundo Martin et al. (2000), com a aplicação de tais modificações, alcança-se redução de emissões de GEE de até 105 kg/t de celulose.

De acordo com Kramer et al. (2009), para uma planta com capacidade de 1.000 toneladas por dia, a redução no consumo de energia por meio da aplicação do *cold blow* pode resultar em redução de custos da ordem de US$ 2 milhões por ano. Porém, custos de capital adicionais com equipamentos são considerados altos para a aplicação dessa medida.

Concentração de sólidos do licor negro

Concentradores de licor negro são projetados para aumentar o teor de sólidos do licor negro antes da combustão na caldeira de recuperação. Um aumento dos sólidos significa que menores conteúdos de água devem ser evaporados na caldeira de recuperação, o que pode aumentar a eficiência de geração de vapor substancialmente. Uma análise realizada por NCASI (2001) sugeriu que, para uma planta de celulose com capacidade de 1.000 toneladas por dia, o aumento do teor de sólido de 66% para 80% gerou uma economia na quantidade de combustível consumido referente a 30 MMBtu/hora, o que equivaleu a cerca de US$ 550 mil.

Em uma fábrica de celulose e papel nos Estados Unidos, com capacidade de produção de papel de 900 toneladas por dia, a instalação de um concentrador de sólidos de licor negro para aumentar o teor de sólidos de 73% para 80% resultou em economia de energia de cerca de 110.000 MMBtu/ano e redução de custos de cerca de US$ 900.000/ano, com tempo de retorno do investimento de quatro anos (KRAMER et al., 2009).

Aumento do uso de polpa de celulose reciclada

Segundo Kramer et al. (2009), a produção de polpas recicladas consome, em média, significativamente menos energia do que a necessária para a produção de polpas mecânicas ou químicas. No entanto, em comparação com a produção de pastas químicas, pode haver aumento das emissões de CO_2 quando combustíveis fósseis são utilizados para a recuperação da celulose (IEA, 2009). De acordo com a IEA (2012), considerando que o limite teórico para a recuperação de resíduos de papel é estimado em 80%, acredita-se que, na prática, o limite pode estar perto de 60%.

Segundo a IEA (2012), o uso de celulose reciclada pode reduzir o consumo de energia de 10 a 13 GJ/t de celulose. E, de acordo com Kramer et al. (2009), em comparação com a produção de celulose química, a produção com celulose reciclada pode ter redução no consumo de energia de 6,3 a 11,6 GJ/t de celulose e, na produção de celulose mecânica, de 6,3 a 10,6 GJ/t de celulose.

Estudos estimam que os custos de investimento em capacidade de produção de celulose reciclada são, em média, de US$ 485/t de celulose (MARTIN et al., 2000) e, dependendo do preço dos resíduos de papel necessários para a produção de celulose reciclada, a redução de custos de O&M em relação à produção de celulose de polpa virgem pode ser de até US$ 73,9/t de celulose (O'BRIEN, 1996).

Apesar dos ganhos em energia e custos de O&M, a polpa reciclada produz uma lama que pode apresentar dificuldade de eliminação (KRAMER et al., 2009).

2.7.3 Produção de papel

No processo de produção de papel, a principal etapa consumidora de energia é a secagem. Por isso, a maioria das medidas de eficiência energética é relacionada a melhorar a eficiência do processo de secagem, recuperando seu calor residual para utilizar em outras etapas do processo produtivo. Este item aborda as principais medidas para economizar energia na fabricação de papel.

Controle avançado do processo de secagem por caldeiras

Os sistemas de controle são uma forma bem conhecida de otimização de variáveis de um processo, com consequentes reduções no consumo de energia, aumentos na produtividade e melhorias na qualidade dos sistemas. Um exemplo de um sistema de controle avançado de secadores é o Software SystemTM, o qual oferece controle avançado do secador pelo ajuste de pontos do sistema e de parâmetros do processo, o que reduz o uso do vapor e aumenta a produtividade (FOCUS ON ENERGY, 2006; 2006a; REESE, 2005). Vários estudos de caso dessa tecnologia estão disponíveis na literatura. Focus on Energy (2006b) descreve um piloto do *software* Dryer Management System em uma fábrica de papel em Wisconsin/EUA. Por meio da utilização do *software*, alcançou-se economia de 4.500 kg vapor/h e redução de custos de US$ 360.000 por ano. O período de recuperação do investimento foi estimado em menos de três anos (FOCUS ON ENERGY, 2006b).

Redução da demanda de ar em secadores

Máquinas de papel com cobertura fechada requerem aproximadamente metade da quantidade de ar por tonelada de água evaporada, em comparação com máquinas de papel de cobertura aberta. Ao fechar a cobertura da máquina de papel, há redução da energia térmica demandada, dado que um menor volume de ar é aquecido. Demandas de eletricidade na ventilação do exaustor também são reduzidas (ELAAHI; LOWIRR, 1988).

Estima-se que, com o fechamento da máquina de vapor e com um sistema de ventilação otimizado, a economia de vapor é de cerca de 0,72 MMBtu/t de papel, e a economia de eletricidade é de 6,3 kWh/t de papel. Custos de investimento e O&M foram relatados em US$ 9,5 e US$ 0,07/t de papel, respectivamente (MARTIN et al., 2000).

Utilização de prensas mais eficientes

Segundo Kramer et al. (2009), depois que o papel é formado, ele é pressionado para remover o máximo de água possível. Normalmente, a prensagem ocorre entre dois cilindros rotativos. No caso

dessa tecnologia, em vez da utilização de dois cilindros rotativos, usa-se uma prensa côncava como substituição de um dos cilindros (MARTIN et al., 2000). Assim, a área de prensagem adicional acaba por aumentar o tempo de permanência na prensagem, permitindo maior extração de água (cerca de 5% a 7% a mais de remoção de água) a um nível de 35% a 50% de secura do papel (ELAAHI; LOWITT, 1988; MILLER FREEMAN, 1998; LANGE; RADTKE, 1996). Com maior extração de água na prensagem, há diminuição da demanda de energia no secador, o que reduz a demanda de vapor (MARTIN et al., 2000).

Estimativas para a economia de vapor, por meio da instalação de uma prensa côncava, podem variar entre 2% e 15%, dependendo da configuração da planta (MARTIN et al., 2000; FOCUS ON ENERGY, 2006a). Custos de capital foram estimados em US$ 38,00/t de papel, e os custos de manutenção adicionais em US$ 2,24/t de papel (DE BEER et al., 1994).

Secadores CondeBelt

Os primeiros secadores CondeBelt comerciais foram instalados na Finlândia, em 1996, e na Coreia, em 1999 (MARTIN et al., 2000). No secador CondeBelt, o papel seca no contato com uma peça de aço quente, aquecida por vapor ou gás quente, e a água do papel evapora com o calor da peça de metal (DE BEER et al., 1998). Essa técnica de secagem tem o potencial de substituir completamente a seção de secagem de uma máquina convencional de papel, com velocidade de secagem de 5 a 15 vezes maior que a secagem convencional por vapor (MARTIN et al., 2000).

Os custos de capital são considerados elevados, apesar de o tamanho da área de secagem ser reduzido (KRAMER et al., 2009). Martin et al. (2000) estimam poupança de 15% no consumo de vapor (1,5 MMBtu/t de papel) e ligeira redução no consumo de energia elétrica (20 kWh/t de papel), com custos de investimento de US$ 28/t de papel (DE BEER et al., 1998).

Secagem por impacto do ar

A técnica de secagem por impacto do ar envolve a penetração do ar com alta velocidade na folha de papel molhada através dos queimadores a gás. A secagem por impacto leva a um menor consumo de vapor, porém a maior consumo de eletricidade (MARTIN et al., 2000). De acordo com Martin et al. (2000) e Focus on Energy (2006a), a aplicação da técnica pode levar a reduções de 10% a 14% no consumo de vapor, com aumento no consumo de eletricidade da ordem de 5%. Dado que essa medida envolve um *trade off* entre o consumo de vapor e o consumo de eletricidade, e a extensão dessa troca varia de acordo com a instalação, é importante que se verifique a redução líquida no consumo de energia para cada tipo de instalação (KRAMER et al., 2009).

Cenários de referência, baixo carbono e baixo carbono com inovação

Capítulo

3

3 Cenários de referência, baixo carbono e baixo carbono com inovação

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

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

O cenário REF trata da evolução tendencial do consumo de energia e emissões de GEE, ou seja, com pequenas alterações estruturais em relação aos anos anteriores. Sua construção se deu, primeiramente, por meio de pesquisas dos dados históricos do setor, no que concerne ao consumo de energia por fonte, consumo específico de energia e capacidades de produção, aspectos sintetizados no capítulo 1. Em seguida, foram determinados critérios e premissas que auxiliaram na projeção do cenário em questão, a qual se tratou de uma abordagem *bottom-up*, ou, como o próprio nome diz, de baixo para cima. De acordo com o então Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2010; MCTIC, 2016), esse tipo de abordagem permite detectar onde e como ocorrem as emissões, favorecendo o estabelecimento de medidas de mitigação.

O cenário BC foi construído considerando a penetração de algumas das MTD descritas 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, foram consideradas premissas relativas aos parâmetros técnico-econômicos das tecnologias de conversão de energia dos processos de produção de celulose por meio do processo químico *kraft*, visto que praticamente todas as usinas atuais produtoras de celulose utilizam esse tipo de processo, e de produção de papel. Em seguida, serão descritas as premissas relativas à penetração das tecnologias consideradas no cenário REF.

No processo de produção de celulose, os consumos de combustíveis se dão no forno de cal, nas caldeiras e nas unidades de cogeração.

Com relação ao forno de cal, os principais combustíveis consumidos são óleo combustível, gás natural e metanol. A eficiência do forno de cal foi obtida de Lundqvist (2009). Observou-se que as perdas energéticas do forno derivam de fuga de gás quente, perdas no casco do forno e por meio das cinzas. Porém, a maioria das indústrias de papel e celulose já faz uso da integração energética em seus fornos, por meio da qual o calor perdido através dos gases quentes é recuperado. A eficiência considerada para fornos com integração foi de 85%. Para fornos sem integração, a eficiência seria de 50% a 65% (PERRY et al., 1997), todavia esse dado não foi considerado no presente trabalho, dado que se considerou que todos os fornos utilizados pela indústria de celulose já têm sistema de integração.

Para a projeção da eficiência dessa tecnologia, considerou-se, conservadoramente, que essa eficiência manter-se-á constante até o ano de 2020, aumentando em 0,5% a cada cinco anos, de 2021 até 2050, chegando, então, ao valor de 87,6%. Finalmente, a vida útil para o forno de cal, considerada no presente estudo, é de 25 anos (IBAPE, 2012).

No que concerne às caldeiras existentes no processo *kraft* de produção de celulose, foram consideradas caldeira de biomassa, caldeiras auxiliares e caldeira de recuperação química. A caldeira de biomassa tem a função de complementar a geração de vapor para a produção de celulose e energia elétrica em fábricas de celulose. Seu principal combustível é a biomassa. Por sua vez, a caldeira de recuperação química é, ao mesmo tempo, um reator químico e um gerador de vapor. Ela fornece vapor para a fábrica e para os turbogeradores. Seu combustível principal é o licor negro, proveniente do próprio processo de produção de celulose. Ele é queimado, gerando calor para a produção de vapor. Os dados referentes às capacidades históricas desse equipamento foram obtidos em CNI (2010), no que concerne ao ano de 2008, e em Aneel (2014), em relação ao ano de 2014. Finalmente, as caldeiras auxiliares complementam a produção de vapor utilizado nas unidades de processamento de produção de celulose e para a produção de eletricidade, empregando o gás natural e o óleo combustível como combustíveis principais.

As eficiências consideradas para cada tipo de caldeira, de acordo com os combustíveis consumidos, foram obtidas em Jacobs (2006) e são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Eficiências das Caldeiras por Fontes de Energia

Fontes de energia	Eficiência da caldeira (%)
Carvão	86
Óleo combustível	86
Gás natural	87
Licor negro	64
Lenha	69

Fonte: Elaboração própria a partir de JACOBS, 2006

Para a projeção dessas eficiências, considerou-se, conservadoramente, que se manterão constantes até o ano de 2020, aumentando em 0,1% a cada cinco anos, de 2021 até 2050.

Os custos das caldeiras de biomassa e auxiliares foram obtidos no estudo *Energy sources, production costs and performance of technologies for power generation, heating and transport* (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2008), bem como seus tempos de vida útil. Visto que os dados de custo estavam referenciados em euros e para o ano de 2005, eles foram convertidos para dólares, tendo como base a taxa média de câmbio de 2010, que é o ano-base considerado nas projeções.

Para as caldeiras de biomassa, obteve-se custo de investimento de US$ 616,5/kW e custo de O&M de US$ 25,6/kW ano. Para as caldeiras auxiliares, esses custos foram, respectivamente, US$ 176,14/kW e US$ 14,4/kW ano. Os custos referentes à caldeira de recuperação química foram obtidos em Ferreira (2013), o qual afirma, com base em Brewster (2007), que até 20% dos custos da instalação de uma fábrica de papel e celulose correspondem à caldeira de recuperação química. Nesse contexto, o autor apresenta os custos de investimento de uma caldeira de recuperação química de US$ 300 a 400 milhões. De acordo com Lwarcel Celulose (2015), a caldeira de recuperação tem, em média, capacidade de geração de vapor de 134 toneladas/hora. Logo, calculou-se que o custo de investimento desse equipamento seria de US$ 2.737,5/kW e o custo de O&M de US$ 54,75/kW ano, considerando que o custo de O&M corresponde a aproximadamente 2% do custo de investimento fixo e que o vapor produzido pela caldeira é de alta pressão.

No que concerne às unidades de cogeração de plantas produtoras de celulose, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2014), usam como combustíveis resíduos de madeira e bagaço de cana. As potências instaladas de tais unidades foram obtidas em Aneel (2014), e as eficiências consideradas na planilha foram obtidas em Aneel (2005) e são demonstradas na Tabela 10. Tais eficiências foram, conservadoramente, mantidas constantes até o ano de 2050.

Tabela 10 – Eficiências e Fatores de Capacidade das Unidades de Cogeração

Fontes energéticas	Eficiência térmica (%)	Eficiência elétrica (%)
Derivados de petróleo, gás natural e carvão	80	37,5
Calor recuperado de processo	65	35
Demais combustíveis	75	30

Fonte: Elaboração própria a partir de ANEEL, 2005

Os custos das unidades de cogeração também foram obtidos no estudo *Energy sources, production costs and performance of technologies for power generation, heating and transport* (COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 2008), bem como seus tempos de vida útil. Novamente, visto que os dados de custo estavam referenciados em euros e para o ano de 2005, foram convertidos para dólares, tendo como base o ano de 2010. Para todas as unidades de cogeração, considerou-se custo de investimento de US$ 1.016,5/kW e de O&M de US$ 40,03/kW ano.

Na produção de papel, segundo o IPPC (2001), o consumo de combustível se dá nas unidades de cogeração para a produção de vapor e eletricidade, os quais, por sua vez, são consumidos pelas unidades de processo, e nas caldeiras, as quais também produzem vapor para o processo.

Para as caldeiras, foram consideradas as mesmas eficiências das unidades de produção de celulose, adicionando, porém, como opção, os combustíveis carvão vapor e bagaço de cana. Foram considerados os mesmos custos constantes do segmento de celulose.

Para as unidades de cogeração, utilizaram-se os mesmos dados considerados para o segmento de celulose no que concerne às eficiências consideradas e aos custos de investimento e O&M.

Segundo a Aneel (2014), as unidades de cogeração existentes em plantas produtoras de papel usam como combustíveis gás natural, óleo combustível, resíduos de madeira e bagaço de cana.

A penetração das tecnologias consideradas para o setor de papel e celulose foi feita tendo como base a quantidade de *output* de cada tecnologia, suas respectivas eficiências e projeção da demanda de energia.

Para a definição das penetrações, multiplicou-se o consumo de energia de cada tecnologia, em cada ano, por sua eficiência, e analisou-se a quantidade de vapor e calor que cada uma delas produzia em relação ao total de vapor e calor produzido, tanto no processo de produção de celulose quanto no de papel. A Equação 1 apresenta o procedimento matemático utilizado:

$$\text{Penetração}_{i,j}(\%) = \frac{\text{Consumo de energia}_i * \text{Eficiência}_i}{\text{Produção Total}_j} * 100 \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que, "i" é a tecnologia e "j" é a utilidade (vapor, calor).

As penetrações de tecnologias consideradas no cenário REF constam nas tabelas 11, 12 e 13.

Tabela 11 – Penetrações das Tecnologias de Produção de Vapor no Segmento de Celulose

Tecnologia	Penetração (%)							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Caldeira biomassa	23,81	23,80	23,80	23,71	23,73	23,74	23,73	23,72
Caldeira de recuperação	74,98	74,98	74,98	75,00	75,04	75,02	75,03	75,04
Caldeira auxiliar (gás natural)	0,53	0,54	0,54	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56
Caldeira auxiliar (óleo)	0,19	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,10
Cogeração resíduo de madeira	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
Cogeração bagaço de cana	0,15	0,17	0,18	0,19	0,21	0,22	0,23	0,25

Fonte: Elaboração própria

Tabela 12 – Penetrações das Tecnologias de Produção de Vapor no Segmento de Papel

Tecnologia	Penetração (%)							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cogeração resíduo de madeira	7,27	7,37	7,46	7,56	7,66	7,77	7,87	7,98
Cogeração gás natural	24,94	25,51	26,07	26,64	27,23	27,84	28,46	29,09
Cogeração óleo combustível	26,44	25,08	23,68	22,25	20,79	19,03	17,77	16,21
Cogeração bagaço de cana	0,69	0,76	0,84	0,91	0,99	1,06	1,14	1,22
Caldeira gás natural	24,66	25,22	25,80	26,40	27,01	27,62	28,27	28,92
Caldeira óleo combustível	5,45	5,17	4,88	4,55	4,30	3,99	3,68	3,36
Caldeira carvão vapor	8,87	9,05	9,24	9,43	9,63	9,82	10,02	10,23
Caldeira bagaço de cana	1,68	1,86	2,03	2,22	2,40	2,60	2,79	2,99

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13 – Penetrações das Tecnologias de Produção de Calor no Segmento de Celulose

Tecnologia	Penetração (%)							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Caldeiras óleo combustível	23,12	22,09	21,01	19,89	18,73	17,53	16,28	14,97
Caldeiras a gás natural	24,01	24,77	24,46	26,22	27,01	27,83	28,69	29,58
Caldeiras a metanol	52,86	53,19	53,54	53,89	54,26	54,64	55,04	55,45

Fonte: Elaboração própria

O consumo de energia de cada tecnologia, em cada ano, foi calculado pela definição de um percentual de consumo energético por tecnologia, em relação ao total consumido desse mesmo combustível pelo setor de papel e celulose. Tal cálculo baseou-se em dados históricos do setor. As tabelas 14, 15 e 16 apresentam os percentuais de consumo de cada tecnologia produtora de vapor nos processos de produção de celulose e papel e produtoras de calor no processo de produção de papel.

Tabela 14 – Percentuais de Consumo de Combustíveis das Tecnologias Produtoras de Vapor no Processo de Produção de Celulose

Tecnologia	Fontes de energia	Consumo de combustível (%)
Caldeira biomassa	Lenha	91,8
Caldeira de recuperação	Lixívia	100,0
Caldeira auxiliar a gás natural	Gás natural	3,6
Caldeira auxiliar a óleo combustível	Óleo combustível	0,2
Cogeração resíduo de madeira	Lenha	1,2
Cogeração bagaço de cana	Bagaço de cana	18,4

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15 – Percentuais de Consumo de Combustíveis das Tecnologias Produtoras de Vapor no Processo de Produção de Papel

Tecnologia	Fontes de energia	Consumo de combustível (%)
Cogeração resíduo de madeira	Lenha	7,0
Cogeração gás natural	Gás natural	47,0
Cogeração óleo combustível	Óleo combustível	77,6
Cogeração bagaço de cana	Bagaço de cana	22,4
Caldeira a gás natural	Gás natural	45,4
Caldeira a óleo combustível	Óleo combustível	15,8
Caldeira a carvão vapor	Carvão vapor	100,0
Caldeira a bagaço de cana	Bagaço de cana	59,2

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16 – Percentuais de Consumo de Combustível na Produção de Calor do Processo de Produção de Papel

Combustível	Consumo de Combustível (%)
Óleo combustível	6,0
Gás natural	4,0
Metanol	100,0

Fonte: Elaboração própria

Para a projeção de produção e consumo de energia do setor, conforme Equação 1 e Equação 2, foram consideradas projeções de PIB para o período de 2010 a 2050, convertidas em médias quinquenais (HADDAD, 2015).

$$\text{Produção}_n = \text{Produção}_{n-5} * \left(1 + \frac{\text{Taxa média PIB}_{n-1}}{100}\right)^5 \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que "Produção$_n$" é a produção do setor no ano, "Produção$_{n-5}$" é a produção do setor cinco anos antes, e "Taxa média PIB$_{n-1}$" é a taxa média de crescimento do PIB relativa ao período anterior ao qual se está trabalhando (Tabela 17).

Tabela 17 – Taxas Médias de Crescimento Aplicadas na Projeção de Demanda Energética do Setor

Período	Crescimento Médio Anual
2010-2015	1,45%
2016-2020	1,56%
2021-2025	1,58%
2026-2030	1,50%
2031-2035	1,35%
2036-2040	1,17%
2041-2045	1,00%
2046-2050	0,82%

Fonte: Elaborado a partir de HADDAD, 2015

No âmbito da modelagem integrada dos cenários de emissões de GEE, que terá seus resultados reportados no documento *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, é considerada uma visão alternativa de crescimento do PIB (MCTIC, 2017a; 2017b). Esse cenário incorpora efeitos recentes da crise econômica nos agregados macroeconômicos, que, por certo, afetarão negativamente o crescimento setorial, reduzindo o consumo de energia e as emissões de GEE em relação aos níveis do cenário REF.

A partir da projeção de produção e utilizando um consumo específico de aproximadamente 22,3 GJ/tonelada, o qual se encontra na faixa apresentada por Henriques Jr. (2010), para processos por via química, entre 20 e 25 GJ/tonelada, tornaram-se possíveis o cálculo e a projeção da demanda de energia do setor. Ainda, tendo como base o percentual de participação dos combustíveis no consumo total de energia do setor para o ano de 2010, demonstrado em EPE (2017), e o histórico com relação aos dez anos anteriores, projetou-se o percentual de participação de cada combustível utilizado até o ano de 2050, desconsiderando um *breakthrough*[6] tecnológico. Tal desconsideração é uma limitação da análise setorial na medida em que não permite otimizar oferta e demanda do sistema energético.

Alguns combustíveis apresentados em EPE (2017) foram desconsiderados da presente análise, por exemplo, o GLP, que tem a maior parte de seu consumo voltada para cozinha e empilhadeiras na produção de papel. Desconsiderou-se também o consumo de diesel, visto que é, em sua maioria, voltado para atender veículos internos nas unidades fabris.

Por outro lado, o consumo do combustível metanol, que se dá nos fornos de cal das fábricas produtoras de celulose, não se encontra especificado no BEN. Sendo assim, a partir de Fibria (2013),

6 Nesse caso, significa um avanço tecnológico, ou seja, não se considerou a entrada de tecnologias inovadoras para este cenário.

obteve-se um consumo médio anual de metanol em um forno de cal, e multiplicou-se esse consumo pelo número de fábricas de celulose no país, considerando, conservadoramente, que cada fábrica teria apenas um forno de cal em seu processo produtivo. Logo, chegou-se ao consumo anual total de metanol, considerado como 0,7% do consumo de "Outras Recuperações" apresentadas pelo balanço energético para o ano de 2010. Por fim, foi desconsiderado o consumo de "Outras Renováveis".

A projeção das emissões de CO_2 no cenário REF se baseou na evolução da demanda energética para o mesmo cenário. Foram considerados os fatores de emissão *default* do IPCC constantes da Tabela 18, que também foram utilizados na Terceira Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (MCTIC, 2016). Foram desconsideradas emissões de lenha provenientes de florestas comerciais e florestas nativas. No primeiro caso, o fator de emissão é nulo, e, no caso da origem de florestas nativas, as emissões foram desconsideradas para evitar dupla contagem com o setor de Afolu. Finalmente, foram desconsideradas emissões do bagaço de cana, lixívia e metanol.

Tabela 18 – Fatores de Emissão de CO_2

Fontes	Fatores de emissão (tCO_2/TJ)
Gás natural	56,1
Carvão vapor	94,6
Óleo combustível	77,4

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

Para a eletricidade proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN), foram utilizados os fatores de emissão informados pelo MCTI (2015) (Tabela 19). Para o período de 2017 a 2050, por sua vez, os valores são oriundos da modelagem integrada dos cenários de emissões do projeto. Esses fatores de emissão serão apresentados em valores médios por períodos, entre 2017 e 2050 (MCTIC, 2017b).

Tabela 19 – Fatores de Emissão de CO_2 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, 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, 2017b).

3.1.2 Resultados

A partir das premissas descritas, foi possível projetar a produção de papel e celulose, conforme Tabela 20, até 2050.

Tabela 20 – Produção do Setor de Papel e Celulose até 2050

Ano	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Produção (mil toneladas)	24.946,3	26.950,7	29.147,3	31.406,4	33.585,6	35.602,0	37.410,2	38.963,5

Fonte: Elaboração própria

A partir da projeção de produção apresentada na Tabela 20 e utilizando consumos específicos listados na seção 3.1.1, foram projetadas a demanda e a participação por fontes de energia do setor.

Observa-se crescimento na participação do gás natural, em detrimento do consumo de óleo combustível. Resta verificar, no âmbito da modelagem integrada dos cenários, se haverá gás natural disponível para todos os setores que o demandam como estratégia de baixo carbono para substituição de combustíveis com maior intensidade de carbono (MCTIC, 2017b).

Tabela 21 – Participação no Consumo Total por Fontes de Energia (2015-2050)

Fontes de energia	Participação							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gás natural	7,4%	7,5%	7,6%	7,7%	7,8%	7,8%	7,9%	8,0%
Carvão vapor	1,2%	1,2%	1,2%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%
Lenha	16,5%	16,5%	16,5%	16,6%	16,6%	16,6%	16,7%	16,7%
Lixívia	51,3%	51,4%	51,6%	51,7%	51,9%	52,0%	52,2%	52,3%
Bagaço de cana	0,5%	0,5%	0,6%	0,6%	0,7%	0,7%	0,8%	0,8%
Óleo combustível	4,8%	4,5%	4,2%	3,9%	3,6%	3,3%	3,0%	2,7%
Metanol	0,7%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
Eletricidade	17,7%	17,6%	17,5%	17,5%	17,4%	17,3%	17,3%	17,2%

Fonte: Elaboração própria

A evolução do consumo energético por fontes é apresentada na Tabela 22. Essa projeção foi realizada para o período de 2011 a 2050, havendo calibração para o período de 2010 a 2014 com informações disponíveis no BEN da EPE.

Observa-se um crescimento no consumo de energia de 125% no período de projeção, com a lixívia permanecendo como principal fonte energética do setor. Por se tratar de uma modelagem do tipo *bottom-up* e por terem sido considerados valores diversos para o metanol e excluídos os montantes

consumidos de diesel e GLP, tem-se o diferencial no consumo de energia com relação aos valores de 2010 e 2015 perante EPE (2017).

Tabela 22 – Consumo Energético por Fontes de Energia de 2010 a 2050

Fontes de energia	Consumo de energia (mil tep)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gás natural	676	805	1.077	1.177	1.283	1.386	1.485	1.578	1.660
Carvão vapor	112	86	177	194	210	227	243	257	270
Lenha	1.513	1.833	2.367	2.565	2.770	2.968	3.153	3.321	3.466
Lixívia	4.711	5.837	7.380	8.005	8.650	9.276	9.861	10.392	10.854
Bagaço	41	27	77	90	104	119	135	151	166
Óleo combustível	466	341	641	648	649	641	624	597	560
Metanol	61	87	93	99	105	111	117	121	125
Eletricidade	1.636	1.864	2.543	2.747	2.957	3.159	3.345	3.511	3.653
Total	9.216	10.880	14.355	15.525	16.728	17.889	18.963	19.926	20.753

Fonte: Elaboração própria

A partir da projeção da demanda de energia para o cenário REF, tornou-se possível o cálculo das emissões de CO_2 do setor de papel e celulose. As emissões totais, calculadas para cada quinquênio, são apresentadas na Tabela 23.

Tabela 23 – Emissões Totais de CO_2 de 2010 a 2050

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissões (tCO_2)	5.918.592	8.433.759	9.004.443	9.622.685	10.243.903	10.821.435	11.329.860	11.756.849	12.090.388

Fonte: Elaboração própria

A partir dos resultados obtidos, observa-se que as emissões do setor no ano de 2050 são maiores que as emissões de 2010 em cerca de 104%. Isso se deve ao fato de que, além de a produção do setor no final da projeção ser cerca de 1,6 vez maior que no ano de 2010, como visto na Tabela 20, não se considerou um *breakthrough* tecnológico para esse cenário, como já mencionado. Apesar de o setor ter grande parte de sua geração energética advinda de fontes renováveis, ainda se utilizam tecnologias que consomem fontes fósseis, por exemplo, as caldeiras da produção de papel, que consomem grande quantidade de gás natural, óleo combustível e carvão vapor, os quais, por sua vez, têm relevante contribuição para as emissões totais de CO_2.

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; 2014); 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 a partir de 2015:

- Caldeiras de papel com controle avançado de processo;
- Caldeiras de papel com recuperação de calor e vapor;
- Caldeiras de papel com retorno de condensado;
- Caldeiras auxiliares com controle avançado de processo;
- Caldeiras auxiliares com recuperação de calor e vapor;
- Caldeiras auxiliares com retorno de condensado;
- Manutenção de caldeiras de papel;
- Manutenção de caldeiras auxiliares;
- Uso de secadores CondeBelt na produção de papel;
- Uso de prensas mais eficientes na produção de papel;
- Modificações nos fornos de cal.

Para a construção do cenário BC, utilizou-se a mesma segmentação do cenário REF, a qual separa o setor em: i) produção de celulose por meio do processo químico *kraft*, com os consumos de combustíveis se dando nos fornos de cal, nas caldeiras (caldeira de biomassa, caldeiras auxiliares e caldeira de recuperação) e nas unidades de cogeração; ii) produção de papel, com o consumo de combustível ocorrendo nas unidades de cogeração para a produção de vapor e eletricidade e nas caldeiras, as quais produzem vapor para o processo.

As eficiências consideradas para cada tipo de caldeira, na produção de celulose, de acordo com os combustíveis consumidos, foram as mesmas do cenário REF até o ano de 2020, mas, para a projeção dessas eficiências, aumentou-se 0,2% ao ano, de 2025 até 2050.

Tabela 24 – Eficiência das Caldeiras na Produção de Celulose por Fontes de Energia

Fontes de energia	Eficiência da caldeira (%)						
	2010 a 2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Óleo combustível e carvão	86,00	86,17	86,34	86,52	86,69	86,86	87,04
Gás natural	87,00	87,17	87,35	87,52	87,70	87,87	88,05
Licor negro	64,00	64,13	64,26	64,38	64,51	64,64	64,77
Lenha	69,00	69,14	69,28	69,41	69,55	69,69	69,83

Fonte: Elaboração própria a partir de JACOBS, 2006

Para o forno de cal, considerou-se, nesse cenário, que a eficiência seria a mesma do cenário REF até o ano de 2020, aumentando em 0,7% ao ano, de 2025 até 2050.

No que concerne às unidades de cogeração de plantas produtoras de celulose, estas ainda usam como combustíveis resíduos de madeira e bagaço de cana, e suas eficiências não foram modificadas em relação ao cenário REF.

No que diz respeito à produção de papel, para as caldeiras, foram consideradas as mesmas eficiências utilizadas no preenchimento das caldeiras do processo de produção de celulose, adicionando novamente, como opção, os combustíveis carvão vapor e bagaço de cana, aumentando-se suas eficiências em 0,2% ao ano, de 2025 até 2050. Para as unidades de cogeração, utilizaram-se os mesmos dados do cenário REF. As eficiências relativas às caldeiras da produção de papel encontram-se na Tabela 25.

Tabela 25 – Eficiências das Caldeiras na Produção de Papel por Fontes de Energia

Fontes de energia	Eficiência da caldeira (%)						
	2010 a 2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Óleo combustível e carvão	86,00	86,17	86,34	86,52	86,69	86,86	87,04
Gás natural	87,00	87,17	87,35	87,52	87,70	87,87	88,05
Carvão vapor	86,00	86,17	86,34	86,52	86,69	86,86	87,04
Bagaço de cana	69,00	69,14	69,28	69,41	69,55	69,69	69,83

Fonte: Elaboração própria a partir de JACOBS, 2006

Para a construção do cenário BC, foram utilizadas as mesmas taxas de crescimento do PIB setorial apresentadas na Tabela 17. Consequentemente, a produção do setor de papel e celulose é a mesma do cenário REF (Tabela 20).

Tendo como base os dados de consumo de energia de EPE (2017) relativos ao ano de 2010 e a produção do setor nesse mesmo ano, tornou-se possível o cálculo do consumo específico do setor, de aproximadamente 16,7 GJ/t. Esse valor foi utilizado para a projeção da demanda de energia do setor no cenário BC, juntamente com a projeção de produção apresentada anteriormente.

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

3.2.2 Resultados

Tomando como base o percentual de participação dos combustíveis no consumo total de energia do setor, para o ano de 2010, demonstrado em EPE (2017), bem como para os dez anos anteriores, projetou-se o percentual de participação de cada combustível utilizado até o ano de 2050, considerando, além disso, um *breakthrough* tecnológico, o qual refletiu em aumento no consumo de gás natural e eletricidade, em detrimento do óleo combustível e do metanol , com relação ao cenário REF (Tabela 26).

Tabela 26 – Participação no Consumo Total por Fontes de Energia (2015-2050)

Fontes de energia	Participação							
	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gás natural	7,7%	8,0%	8,3%	8,7%	9,0%	9,3%	9,7%	10,0%
Carvão vapor	1,2%	1,2%	1,2%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%
Lenha	16,5%	16,5%	16,5%	16,6%	16,6%	16,6%	16,7%	16,7%
Lixívia	51,4%	51,6%	51,8%	52,1%	52,3%	52,5%	52,8%	53,0%
Bagaço de cana	0,5%	0,5%	0,6%	0,6%	0,7%	0,7%	0,8%	0,8%
Óleo combustível	4,4%	3,8%	3,2%	2,5%	1,9%	1,3%	0,6%	-
Metanol	0,7%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
Eletricidade	17,7%	17,7%	17,7%	17,7%	17,7%	17,6%	17,6%	17,6%

Fonte: Elaboração própria

A projeção de consumo energético é apresentada na Tabela 27. Constata-se que a implementação das MTD implicaria consumo de energia 25% menor, em 2050, com relação ao cenário REF. Grande parte da queda na demanda de energia decorre da eficientização energética, que diminui a demanda elétrica. Mais que isso, a penetração menor de metanol e óleo combustível incentiva o maior consumo de gás natural, que aumenta sua participação na matriz energética do setor.

De fato, grande parte dos setores industriais encontra no gás natural uma oportunidade de reduzir emissões perante energéticos com maior intensidade de carbono. Todavia, uma análise setorial não observa a disponibilidade de gás natural para todos os setores, competição que, inclusive, afeta os seus preços. Consequentemente, os custos de abatimento da substituição de combustíveis tendem a ser subestimados, e o potencial de mitigação, ao desconsiderar restrições de oferta, é superestimado. Trata-se de uma limitação da análise setorial e da metodologia de custos marginais de abatimento, superada pela integração dos cenários BC nos modelos MSB8000, Otimizagro e Efes (MCTIC, 2017b).

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

Fontes de energia	Consumo de energia (mil tep)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gás natural	676	763	860	969	1.086	1.206	1.325	1.442	1.554
Carvão vapor	112	122	133	145	158	170	182	192	202
Lenha	1.513	1.637	1.772	1.921	2.074	2.223	2.361	2.487	2.595
Lixívia	4.711	5.110	5.546	6.025	6.522	7.006	7.460	7.874	8.237
Bagaço de cana	41	49	57	67	78	89	101	113	124
Óleo combustível	466	440	408	367	317	254	180	94	0
Metanol	61	65	69	74	79	83	87	91	93
Eletricidade	1.636	1.764	1.904	2.057	2.214	2.365	2.505	2.629	2.735
Total	9.216	9.950	10.750	11.626	12.527	13.396	14.201	14.922	15.541

Fonte: Elaboração própria

Perante as projeções da demanda de energia do cenário REF e BC, a Figura 8 apresenta o consumo de energia de ambos os cenários, e a Tabela 28 apresenta a redução do consumo de energia entre os cenários BC e REF. A redução apresentada é crescente durante o período de análise, o que é explicado pela também crescente penetração das tecnologias de baixo carbono.

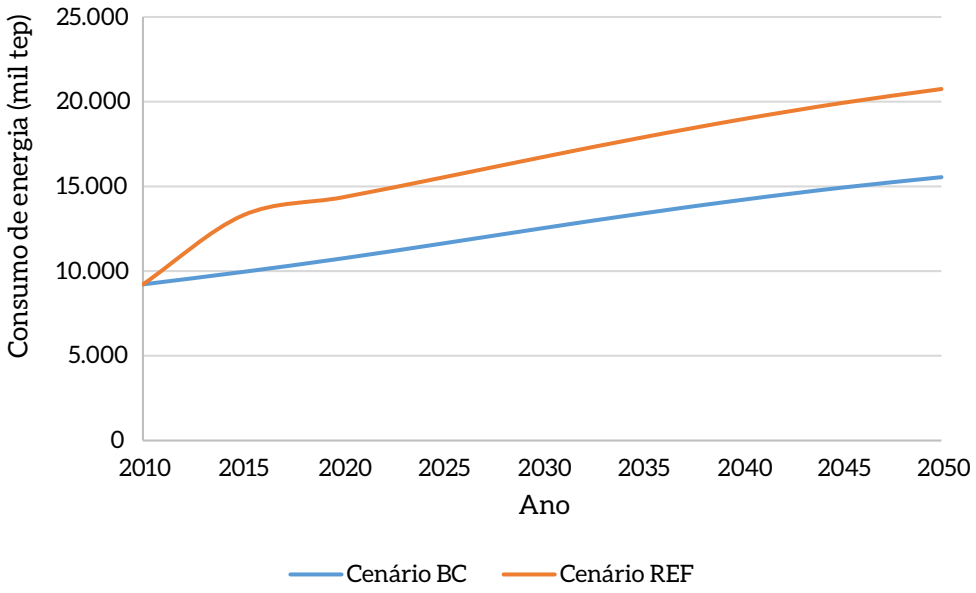

Figura 8 – Consumo de Energia nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

Tabela 28 – Redução do Consumo de Energia entre os Cenários BC e REF

Parâmetro	Redução no consumo de energia (mil tep)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Redução no cenário BC em relação ao cenário REF	-	3.337	3.605	3.899	4.201	4.492	4.762	5.004	5.212

Fonte: Elaboração própria

A partir da projeção da demanda de energia para o cenário BC, tornou-se possível o cálculo das emissões de CO_2 do setor de papel e celulose para esse cenário. Constata-se redução de 30% nas emissões no cenário BC com relação ao cenário REF em 2050 (Tabela 29, Figura 9 e Figura 10).

Tabela 29 – Emissões Totais de CO_2 de 2010 a 2050

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissões (tCO_2)	5.918.592	6.265.466	6.634.342	7.029.569	7.417.643	7.764.682	8.053.136	8.275.401	8.424.498

Fonte: Elaboração própria

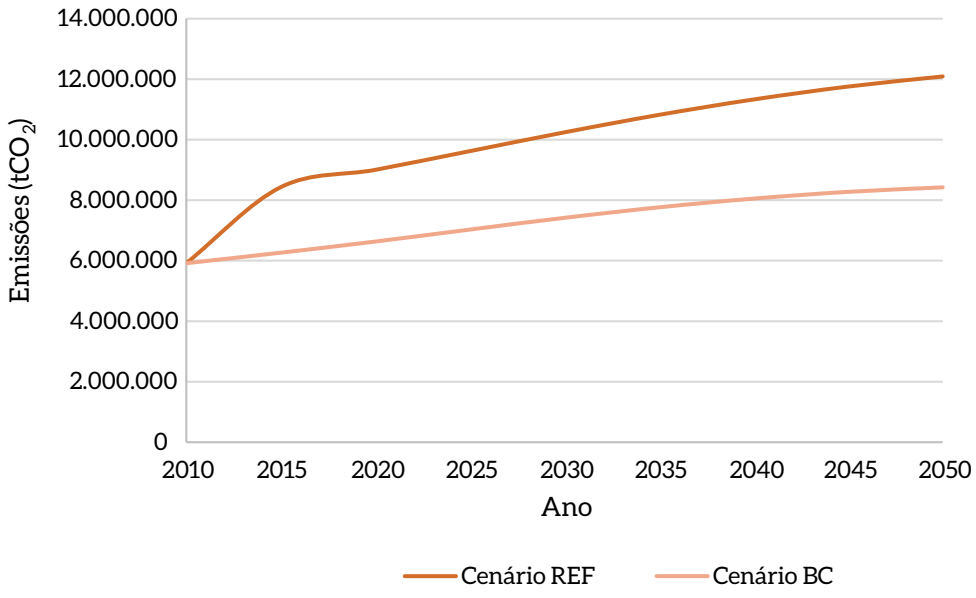

Figura 9 – Emissões de CO_2 nos Cenários REF e BC

Fonte: Elaboração própria

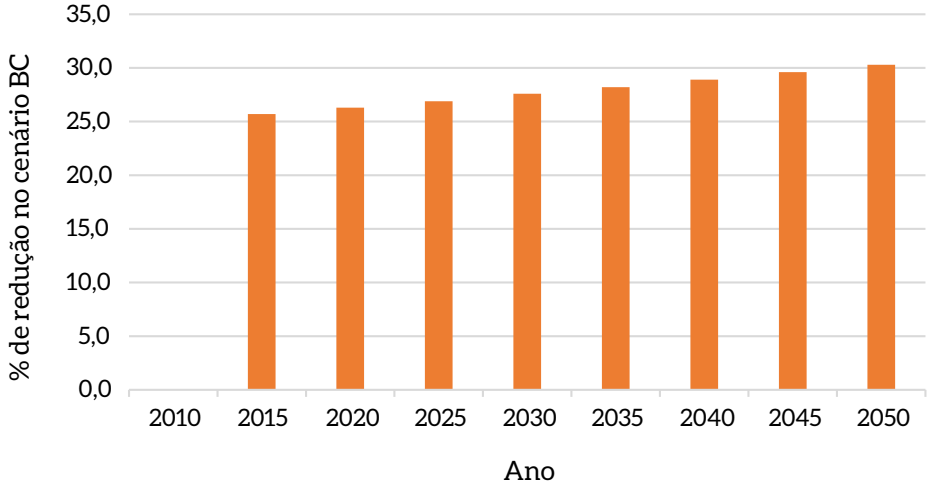

Figura 10 – Redução (%) nas Emissões de CO_2 no Cenário BC com Relação ao Cenário REF

Fonte: Elaboração própria

A partir da análise das figuras 9 e 10, é possível notar que as emissões têm suas reduções iniciadas no ano de 2015. Isso ocorreu pelo fato de ter sido considerado que a entrada das MTD nesse cenário ocorreria a partir desse ano, dado que são medidas já comprovadas e disponíveis comercialmente.

3.2.3 Custos marginais de abatimento

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

O CMA consiste na diferença entre o custo do cenário REF e o custo do cenário de mitigação, ambos expressos por unidade de massa de CO_2 equivalente (US$/tonelada CO_2e) (HENRIQUES JR., 2010). Sendo assim, o custo do CO_2e evitado consiste no gasto necessário para mitigar cada unidade de CO_2e.

Quando o custo é negativo, entende-se que a mitigação incorre em benefícios líquidos, ou seja, além de possibilitar redução da emissão de CO_2e, provê retorno financeiro ao longo da vida útil da tecnologia e/ou horizonte de implementação da atividade de baixo carbono. Por outro lado, se o custo mesmo for positivo, a mitigação de emissões demandará esforço financeiro para o agente, exceto mediante precificação de carbono no mercado. Nesse caso, apenas quando o custo da medida for inferior ao preço de carbono, o delta entre os valores representa ativo financeiro para o agente.

O CMA leva em conta investimentos necessários, custos operacionais em geral (inclusive com os energéticos) e economias em geral (HALSNAES et al., 1998; 2007). Esse custo, para cada opção de mitigação, é determinado a partir do custo incremental com a implementação da medida em comparação com o cenário REF e das emissões anuais evitadas, conforme equação 3:

$$CMA^{opção} = \frac{CAL^{baixo\ carbono} - CAL^{base}}{EA^{base} - EA^{baixo\ carbono}} \quad \text{(Equação 3)}$$

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 4:

$$CAL = \frac{INV*r*\left[(1+r)^t / \left((1+r)^t - 1\right)\right] + OM + COMB - REC}{(1+r)^{(n-2011)}} \quad \text{(Equação 4)}$$

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.

Premissas

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

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

Em seguida, fez-se necessário obter parâmetros técnico-econômicos das MTD para mensurar seus custos marginais de abatimento, conforme equações 3 e 4. No caso das caldeiras com controle de processo, Staudt (2010) ressalta que a redução do consumo de energia com a aplicação dessa medida é de cerca de 2,8%, com custos de investimentos estimados em US$ 0,59/t de produto e custos de O&M de US$ 0,12/t de produto (MARTIN et al., 2000). No que se refere à aplicação de caldeiras com recuperação de vapor, a redução do consumo de energia é de cerca de 1,2%, com custos de investimentos estimados em US$ 1,18/t de produto e custos de O&M de US$ 0,16/t de produto (MARTIN et al., 2000). De acordo com Staudt (2010), a redução do consumo de energia com a aplicação de caldeiras com retorno de condensado é de cerca de 13,8%, com custos de investimentos estimados em US$ 5,59/t de produto e custos de O&M de US$ 0,79/t de produto. Segundo a Usepa (2010), a manutenção de caldeiras possibilita redução no consumo de energia de aproximadamente 10%, com custos de investimento desprezíveis e custos de O&M de US$ 0,09/t de produto (MARTIN et al., 2000). De acordo com Kramer et al. (2009), o uso de secadores CondeBelt proporciona poupança de 15% no consumo de vapor (1,5 MMBtu/t de papel) e ligeira redução no consumo de energia elétrica (20 kWh/t de papel), com custos de investimento de US$ 37,5/t de papel para as instalações de *retrofit*. As estimativas publicadas para as economias de vapor alcançadas por intermédio da instalação de prensas mais eficientes variam de 2% a 15%, dependendo do produto e da configuração da planta. Os custos de capital foram estimados em US$ 55,9/t de papel, e custos de manutenção adicionais foram estimados em US$ 3,3/t de papel (KRAMER et al., 2009). De acordo com a Usepa (2010), modificações no forno de cal, como a instalação de filtros mais eficientes e refratários de alto desempenho, podem levar a reduções no consumo de energia de até 5%. O custo de investimento estimado para essa medida é de US$ 3,68/t de produto (MARTIN et al., 2000).

Na Tabela 30, são resumidos os parâmetros técnico-econômicos necessários para a mensuração dos CMA relativos à adoção de um cenário BC pelo setor de papel e celulose.

Tabela 30 – Custos e Potenciais de Redução no Consumo de Energia das Tecnologias de Baixo Carbono

MTD	Custo de investimento (US$ 2010/t produto)	Custo de O&M (US$ 2010/t produto)	Potencial de redução no consumo de combustível (%)
Caldeiras auxiliares com controle avançado de processo	0,59	0,12	2,8
Caldeiras auxiliares com recuperação de calor e vapor	1,18	0,16	1,2
Caldeiras auxiliares com retorno de condensado	5,59	0,79	13,8
Manutenção de caldeiras auxiliares	-	0,09	10
Modificações nos fornos de cal	3,68	-	5
Caldeiras de papel com controle avançado de processo	0,59	0,12	2,8
Caldeiras de papel com recuperação de calor e vapor	1,18	0,16	1,2
Caldeiras de papel com retorno de condensado	5,59	0,79	13,8
Manutenção das caldeiras de papel	-	0,09	10
Uso de secadores CondeBelt	37,5	-	15
Uso de prensas mais eficientes	55,9	3,3	15

Fonte: Elaboração própria com base em STAUDT, 2010; KRAMER et al., 2009; MARTIN et al., 2000

Ainda tendo em vista os dados necessários para aplicação nas equações 3 e 4, fez-se necessário obter os preços de combustíveis constantes na Tabela 31 para serem aplicados no ano-base (2010), visando à obtenção dos CMA.

Tabela 31 – Preços dos Combustíveis

Combustível	Preço	Unidade
Gás natural	0,65	US$/m³
Óleo combustível	0,53	US$/litro
Óleo diesel	1,06	US$/litro
Coque de petróleo	70,00	US$/bbl
Carvão vegetal	47,70	US$/m³
Carvão mineral	180,00	US$/tonelada
Lenha	30,00	US$/m³
Carvão vapor	55,00	US$/tonelada
Bagaço de cana	46,08	US$/tonelada
Eletricidade	147,85	US$/MWh
Metanol	372,00	US$/Mtonelada

Fonte: Elaboração própria com base em ANP, 2017; EPE, 2017

Em seguida, foi necessário projetar preços dos combustíveis para obtenção dos CMA até 2050. Para tanto, foram analisados cenários de preços de petróleo, dos quais derivam preços dos insumos energéticos (Tabela 32). Nos cálculos de CMA realizados pela taxa de desconto de mercado, o preço do petróleo foi considerado constante. No caso, US$ 75 por barril. Trata-se de um preço de robustez do petróleo, que é conservador para não subestimar os custos de abatimento das medidas. No caso da taxa de desconto social, foi considerada a evolução de preços de petróleo do cenário *Low Price Case* do EIA (EIA, 2015).

Tabela 32 – Preços de Petróleo Considerados para o Cálculo do Custo Marginal de Abatimento das Possibilidades de Mitigação

Taxa de Desconto	Preço do Petróleo (US$/barril)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
15% (ótica de mercado)	75	75	75	75	75	75	75	75	75
8% (ótica social)	60	55	75	90	105	120	135	140	145

Fonte: Elaboração própria com base em EIA, 2015

Perante os cenários de preços do petróleo, foram projetados preços dos insumos energéticos para mensuração dos CMA segundo a taxa de desconto social (Tabela 33). Cumpre destacar que esse procedimento não é necessário para aplicação ao cálculo com taxa de desconto de mercado, dado que o preço de petróleo é constante no período. Logo, são considerados os preços dos insumos energéticos apresentados na Tabela 31.

Tabela 33 – 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$/m³	0,65	0,65	0,89	1,06	1,24	1,42	1,60	1,66	1,72
Coque de petróleo	US$/bbl	70,00	70.00	71,40	73,40	77,80	81,20	94,30	101,70	108,90
Lenha	US$/m³	30,00	30,00	35,70	35,60	35,90	36,20	35,30	27,30	24,20
Bagaço de cana	US$/m³	46,08	46,08	56,30	58,20	53,70	55,00	54,40	54,50	56,40
Óleo combustível	US$/litro	0,53	0,53	0,73	0,87	1,02	1,16	1,31	1,35	1,40
Carvão vegetal	US$/m³	47,70	47,70	56,30	58,20	53,70	55,00	54,40	54,50	56,40
Eletricidade	US$/MWh	147,85	147,85	201,61	241,94	282,26	322,58	362,90	376,34	389,78

Fonte: Elaboração própria com base em EIA, 2015; ANP, 2017; EPE, 2017

Resultados

A partir das premissas apresentadas, tornou-se possível o cálculo dos custos de abatimento das MTD, segundo diferentes óticas de taxa de desconto, bem como seus potenciais de abatimento, até o ano de 2050 (Tabela 34 e Tabela 35).

Tabela 34 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de Desconto de 8% ao ano

MTD	Custo de abatimento (US$/$tCO_2$)	Potencial de abatimento acumulado ($MtCO_2e$)
Manutenção das caldeiras de papel	-330,70	2,769
Manutenção das caldeiras auxiliares	-330,55	0,279
Caldeiras de papel com controle avançado de processo	-302,27	0,784
Caldeiras de papel com retorno de condensado	-259,16	2,319
Uso de secadores CondeBelt	-215,60	4,673
Caldeiras de papel com recuperação de calor e vapor	-206,71	0,205
Uso de prensas mais eficientes	-75,89	5,017
Caldeiras auxiliares com controle avançado de processo	71,35	0,079
Modificações nos fornos de cal	123,51	0,272
Caldeiras auxiliares com retorno de condensado	192,25	0,234
Caldeiras auxiliares com recuperação de calor e vapor	929,50	0,021

Fonte: Elaboração própria

Tabela 35 – Custos e Potenciais Acumulados de Abatimento para Taxa de Desconto de 15% ao ano

MTD	Custo de abatimento (US$/$tCO_2$)	Potencial de abatimento acumulado ($MtCO_2e$)
Manutenção das caldeiras de papel	-88,36	2,769
Manutenção das caldeiras auxiliares	-72,22	0,279
Caldeiras de papel com controle avançado de processo	-70,91	0,784
Caldeiras de papel com retorno de condensado	-58,71	2,319
Caldeiras de papel com recuperação de calor e vapor	-17,57	0,205
Uso de secadores CondeBelt	0,37	4,673
Uso de prensas mais eficientes	69,60	5,017
Modificações nos fornos de cal	157,63	0,272
Caldeiras auxiliares com controle avançado de processo	171,98	0,079
Caldeiras auxiliares com retorno de condensado	226,18	0,234
Caldeiras auxiliares com recuperação de calor e vapor	640,70	0,021

Fonte: Elaboração própria

É possível perceber que, para todas as medidas, com exceção da medida caldeira auxiliar com recuperação de vapor, os custos de abatimento calculados com a taxa de 15% ao ano são maiores que os custos calculados com a taxa de 8% ao ano. Isso decorre do fato de 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.

O custo da medida caldeira auxiliar com recuperação de vapor, à taxa de 15% ao ano, pode estar menor que a taxa de 8% ao ano devido à relação entre o valor presente do investimento e o valor presente do custo total da medida, a saber, valor presente do custo de O&M e da receita obtida com economia de combustível. Nesse caso, para ambas as taxas, o valor presente do custo total é maior que o valor presente do investimento, o que não ocorreu para as demais medidas. Mais que isso, o valor presente do custo total para a taxa de 8% ao ano é aproximadamente 1,6 vez maior que o valor presente do investimento, enquanto, para a taxa de 15%, é 1,1 vez maior. Isso pode ser explicado por um potencial de redução de consumo de combustível pequeno, seguido de valores de custos de investimento e O&M próximos.

Ademais, pode-se notar que, para a taxa de desconto de 8% ao ano, 96% do potencial de abatimento são custo-negativos, o que indica a viabilidade econômica das MTD. 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. Até mesmo barreiras econômicas não captadas nos custos de abatimento podem impedir a adoção das atividades, como é o caso da disponibilidade de crédito para realização dos investimentos. Tais aspectos serão brevemente analisados no capítulo 4. Com a taxa de desconto praticada no setor, que é de 15% ao ano, 62% do potencial de mitigação não são custo-efetivos, ou seja, também se exige a adoção de instrumentos econômicos para viabilizar sua adoção. Ainda, é possível verificar que as medidas com menores custos de abatimento, para ambas as taxas de desconto, são a manutenção das caldeiras auxiliares e caldeiras de papel, o que se deve ao fato de tais medidas não apresentarem custos de investimento, mas apenas custos de O&M.

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 nas 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 11 e Figura 12).

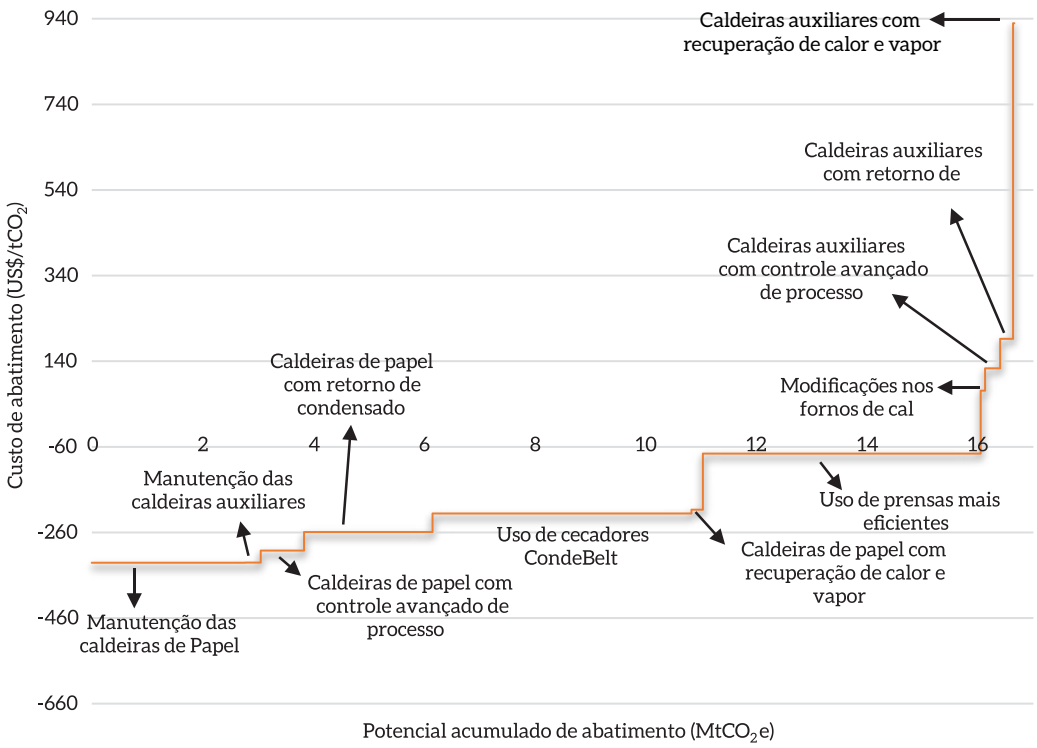

Figura 11 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 8% ao ano

Fonte: Elaboração própria

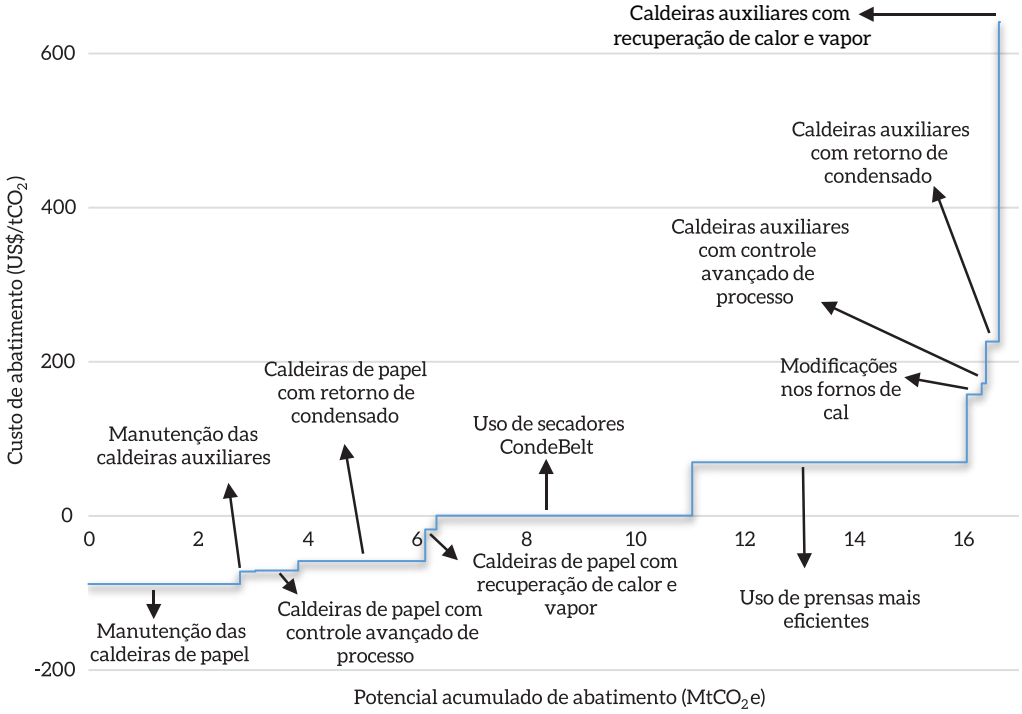

Figura 12 – Curva de Custos de Abatimento para Taxa de Desconto 15% ao ano

Fonte: Elaboração própria

Interessante notar que o potencial demonstrado na Figura 11 e nas Figura 12 representa a redução acumulada das emissões das medidas aplicadas até 2050. O potencial total de mitigação do setor foi estimado em cerca de 16,7 $MtCO_2$.

Entretanto, esse potencial de abatimento não representa o potencial líquido de redução de emissões do setor. É apenas o total da redução de cada medida aplicada em relação ao cenário REF. Dessa forma, pode ocorrer, e está ocorrendo, dupla contagem de redução de emissões, visto que a redução do consumo energético de duas medidas não é necessariamente igual à soma de suas contribuições individuais. Essa característica das curvas de abatimento convencionais e setoriais mostra a necessidade de uma modelagem integrada para a eliminação da dupla contagem e para representar, de forma mais fidedigna, o potencial de mitigação do setor. Tal aspecto justifica a publicação do documento *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*, que deve ser utilizado como referencial para avaliação das oportunidades setoriais de mitigação de emissões de GEE (MCTIC, 2017b).

3.3 Cenário BC+I

Esta seção, primeiramente, descreverá tecnologias de ruptura aplicáveis aos processos produtivos do setor, com potencial de viabilização comercial no longo prazo. Em seguida, serão descritos premissas e parâmetros considerados na construção do cenário BC+I. Por fim, serão apresentadas as projeções de demanda de energia e emissões de CO_2 relativas ao cenário.

Diferentemente do cenário BC, a inexistência de parâmetros econômicos de grande parte das tecnologias inovadoras inviabiliza a mensuração de custos de abatimento de emissões de GEE. Portanto, trata-se de avaliar exclusivamente o potencial técnico de mitigação que está condicionado à criação de políticas públicas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I), visando ao desenvolvimento de tecnologias de ruptura aplicáveis aos processos fabris do setor de papel e celulose.

Algumas tecnologias que serão descritas já vêm sendo testadas, mas ainda não se encontram na fase comercial. Logo, podem ser classificadas em níveis de prontidão tecnológica (TRL) inferiores a 7, que indicam que se encontram em fase de pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) para aplicação em plantas industriais do setor.

3.3.1 Tecnologias inovadoras para o setor

Uso da tecnologia de informação (TI) em controle de processos

A utilização da TI e de suas derivações no controle de processos industriais empregados em plantas integradas de papel e celulose é uma tecnologia inovadora de grande relevância. Áreas como a de utilidades nas plantas integradas, por exemplo, caldeiras e digestores, têm operações complexas que exigem alto grau de confiabilidade em termos de segurança, demandando, então, o uso de sistemas inteligentes em suas operações (CNI, 2009).

A seguir, serão apresentadas duas aplicações do uso de TI no controle de processos em plantas integradas de papel e celulose.

- TI em caldeiras de recuperação

Nas plantas integradas, a produção de eletricidade baseada na biomassa é feita a partir das caldeiras auxiliares de recuperação. Nesse contexto, a TI faz o gerenciamento local e remoto da produção de vapor, em regime de paridade térmica, utilizando, em geral, turbinas de contrapressão e, com menos frequência, turbinas de extração-condensação. O contínuo aumento de escala das caldeiras de recuperação é possível com a incorporação da TI embarcada em tecnologias inovadoras. Quanto a esse alto grau de tecnologia, se, por um lado, ele permite o aumento da complexidade das caldeiras e instalações periféricas, por outro, acaba por proporcionar ganhos de produtividade e sustentabilidade dotados de um grau de segurança que influenciará as apólices de seguro. Além disso, nessas novas configurações, aumenta-se a recuperação de produtos químicos que seriam perdidos e diminui-se o impacto ambiental das instalações, tornando as plantas mais harmoniosas com as comunidades do seu entorno. São inúmeras as tecnologias baseadas na TI incorporadas na área de utilidades visando à melhoria do desempenho nas caldeiras de recuperação. Lavagem e incineração dos gases do tanque de dissolução na caldeira e o sistema *multilevel* de ar de combustão que proporcionam o abatimento de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos reduzidos de enxofre (TRS) são exemplos. A adoção de tecnologia que utiliza mais de quatro níveis de ar na fornalha tem proporcionado bons resultados em termos de eficiência energética e ambiental, resultando na conciliação de emissões de CO e NOx, com níveis abaixo de 120 ppm. Controles evaporativos possibilitam aumento do teor de sólidos do licor negro, incremento da troca térmica e eficiência das caldeiras a partir da incorporação de reaquecedores e de preaquecedores, de novos materiais e da modulação do ponto de fusão das cinzas (CNI, 2009).

- Controle preditivo multivariável avançado (CPMA)

O CPMA é uma TI passível de implementação no processo de polpação que permite prever o comportamento da planta baseado em modelos heurísticos, a fim de que sejam adotadas ações preventivas e corretivas imediatas, assegurando a maximização da planta em termos de produção de celulose, racionalização na utilização de produtos químicos e minimização dos custos energéticos e do uso de água por tonelada de celulose produzida (KRAMER et al., 2009).

Gaseificação do licor negro acoplado à turbina a gás

A gaseificação é a tecnologia tida como mais promissora no caso dos sistemas de recuperação e geração de energia por eliminar riscos de explosão, diminuir efeitos ambientais, reduzir custos e aumentar o aproveitamento energético do licor negro. As turbinas com injeção de vapor (*steam injected gas turbine* – STIG) têm alto rendimento e já se encontram em fase de comercialização, representando uma alternativa para a utilização de turbinas a gás em que parte do vapor produzido na caldeira de recuperação, a partir dos gases de exaustão, é injetada na câmara de combustão da turbina a gás.

Outras tecnologias também utilizam turbina a gás, porém em outras configurações, levando em conta o fato de que não só a gaseificação do licor negro produz gás a elevada temperatura (superior a 1.000°C), em comparação com a temperatura do vapor gerado em caldeiras (500°C a 550°C), como a eficiência das turbinas a gás em ciclo combinado é maior que a eficiência das turbinas a vapor. O sistema de gaseificação do licor negro acoplado a uma turbina a gás é chamado de tecnologia *biomass integrated gasifier/gas turbine* (BIG-GT). Para que a produção de eletricidade seja eficiente, os gases de exaustão da turbina a gás devem ser aproveitados em sistemas de cogeração, na produção de vapor para alimentar a turbina de vapor e constituir o ciclo combinado, denominado *biomass integrated gasifier/gas turbine combined cycle* (BIG-GTCC) (CNI, 2009).

A tecnologia BIG-GT é a que tem maior probabilidade de se tornar comercial. Todavia, ainda existem problemas a serem equacionados no tocante à limpeza do gás, a modificações na câmara de combustão da turbina a gás e à alimentação nos gaseificadores pressurizados (CNI, 2009).

Biorrefinaria

Biorrefinaria consiste em um processamento sustentável em uma planta industrial que integra os processos de conversão de biomassa para produzir combustíveis, produtos químicos de valor agregado e energia (REE; ANNEVELINK, 2007). Esse conceito é análogo ao de refinaria de petróleo, que produz múltiplos combustíveis e produtos a partir do petróleo (CNI, 2009).

A biorrefinaria tem sido apontada como o caminho tecnológico mais promissor para a criação de uma nova indústria baseada na biomassa. A partir de matérias-primas fibrosas, podem-se obter produtos químicos, plásticos, bioetanol, biogás, calor, eletricidade, carvão e outros combustíveis. As biorrefinarias permitem a produção de produtos com maior valor agregado, a partir de tecnologias inovadoras sustentadas e de produtos flexíveis que utilizem os diferentes subprodutos e produtos intermediários do processo (CNI, 2009).

No caso do setor de papel e celulose, a proposta de uma biorrefinaria contempla:

- Processos de separação e conversão, intercambiáveis, ou seja, a possibilidade de que uma biorrefinaria seja utilizada com vários materiais derivados da biomassa;
- Biotecnologia desenvolvida no setor de papel e celulose que serve de alavanca na ampliação dos mercados e na criação de novas fontes de receita;
- Valorização de fibras celulósicas recuperadas e geração de lodos nas plantas das estações de tratamento de água (ETA);
- Sinergia com outros setores, como o agropecuário e o químico; e
- Minimização de impactos ambientais com geração de emprego e renda.

Secagem por impulso

A secagem por impulso envolve o pressionamento do papel entre um rolo girando a uma temperatura muito alta (150-500°C) e uma prensa estática côncava, com tempo de contato muito curto. A

pressão, nesse caso, é cerca de dez vezes maior que em prensas convencionais e na secagem CondeBelt (DE BEER, 1998; BOERNER; ORLOFF, 1994). A secagem por impulso aumenta significativamente a taxa de secagem do papel, com potencial de economia no consumo de vapor de 50% a 75% em relação à secagem convencional. A tecnologia promete trazer custos reduzidos de capital, aumento na produtividade da máquina, utilização reduzida de fibra, redução do uso de energia e melhores propriedades físicas no papel. A despeito de tantas vantagens, ainda é uma tecnologia a ser provada em escala comercial devido a dificuldades no controle de aspectos físicos sob as condições intensas em que a tecnologia trabalha (KRAMER et al., 2009).

Back surface reflector na secagem de papel por infravermelho

Back surface reflector (BSR) é uma tecnologia inovadora no segmento de papel e celulose que proporciona melhoria drástica de eficiência, qualidade e rendimento no processo de fabricação de papel. De acordo com o US DOE (2009), a tecnologia aumenta a porcentagem de potência de entrada que é absorvida pela folha de papel na etapa de secagem, diminuindo os custos de energia e aumentando a qualidade do produto, bem como a taxa de transferência de calor.

Tecnologia de pré-tratamento por micro-ondas na polpação química

Essa tecnologia está sendo desenvolvida para melhorar tanto o desempenho econômico quanto o desempenho ambiental dos processos de polpação química. Segundo o US DOE (2009), a tecnologia melhora a capacidade de polpação química das aparas de madeira. Mais que isso, reduz a quantidade requerida de energia para a etapa de polpação, a quantidade de gás natural requerida no forno de cal e a quantidade necessária de produtos químicos para a produção de papel.

Biotratamento

O tratamento de aparas de madeira com fungos ou enzimas pode amolecer as aparas, resultando em menor uso de energia nos processos de produção de pasta celulósica. Os resultados de um projeto-piloto em que o processo de biotratamento foi utilizado para o tratamento de aparas de madeira antes do processo mecânico de produção de pasta celulósica possibilitaram sua ampliação em 50 toneladas, transformando-o em um projeto em escala semicomercial. As vantagens do biotratamento consistem na melhoria significativa das propriedades de resistência da polpa celulósica, bem como na redução das necessidades energéticas do refinador (cerca de 33%). Suas desvantagens residem no fato de que as aparas tratadas devem ser armazenadas por até quatro semanas para somente depois serem encaminhadas para o processo de produção, o que pode ser um problema para áreas de produção com restrições de espaço. Essa tecnologia está declaradamente pronta para a implantação, porém não há dados que comprovem que tem sido adotada pela indústria de papel e celulose (KRAMER et al., 2009).

Gaseificação de resíduos na produção de papel

Sistemas de gaseificação de resíduos da produção de papel para geração de energia estão em desenvolvimento. É possível produzir combustível (gás de síntese) a partir da gaseificação de resíduos de madeira. Esse gás de síntese pode, então, ser utilizado para substituir os combustíveis fósseis atualmente utilizados em fornos de cal, caldeiras e outros dispositivos de combustão (KRAMER et al., 2009).

De acordo com Carbon Trust (2011), o potencial do Reino Unido para a redução de CO_2 com essa tecnologia é de 50.000 toneladas ao longo de dez anos, ao custo de £ 10/tonelada de CO_2.

Otimização de secadores

Segundo Ricardo-AEA (2013), o potencial para redução no consumo de energia de secadores é de até 50% via redução do teor de água, otimização do processo de secagem e recuperação de calor. De acordo com Carbon Trust (2011), em uma típica fábrica de papel, a otimização de secadores poderia levar a uma redução de emissões de 22.000 toneladas de CO_2 após cinco anos e de 55.000 toneladas de CO_2 após dez anos, com tempo de retorno de investimento entre 1,5 e 4,5 anos, e economia de custos de aproximadamente £ 350.000/ano.

Prensagem a quente

Sistemas de prensagem a quente vêm sendo experimentados nos Países Baixos e têm potencial de redução de emissão de 68.000 toneladas de CO_2 em dez anos, ao custo médio de £ 7,50/tonelada de CO_2 (CARBON TRUST, 2011).

Apesar de seu considerável potencial, há incerteza sobre o impacto das altas temperaturas de operação nas superfícies das fibras, bem como nas propriedades mecânicas e no acabamento dos produtos finais. De acordo com Ricardo-AEA (2013), o tempo de retorno do investimento dessa tecnologia é de três anos.

Solventes eutéticos profundos

Os solventes eutéticos profundos são solventes biorrenováveis produzidos por plantas que permitem obter a celulose sob pressão atmosférica e condições de temperatura ambiente. Com essa tecnologia, qualquer biomassa poderá dissolver a lignina, a celulose e a hemicelulose, minimizando o uso de energia, reduzindo emissões e gerando menor volume de resíduos. Ainda, sendo esta uma tecnologia muito menos agressiva e exigente do ponto de vista técnico, sua implementação em futuras plantas poderá dispensar a aquisição de equipamentos atualmente necessários para cobrir o processo em vigor. De acordo com a Confederation of European Paper Industries (CEPI, 2013), o uso de solventes eutéticos profundos na produção de celulose é capaz de reduzir as emissões de CO_2 em 20% a partir de níveis atuais, até 2050, e esse processo transformaria a fabricação de papel em um negócio bioquímico, cortando o uso primário de energia em 40%.

Uso de CO_2 supercrítico

O CO_2 supercrítico pode ser empregado para secar a pasta de papel sem calor ou vapor, servindo também para colorir o papel ou remover os contaminantes (CEPI, 2013). Sendo assim, a tecnologia oferece redução de consumo de energia exatamente onde há a maior ocorrência de emissões de CO_2 no processo de produção do setor, ou seja, na etapa de secagem de celulose e papel. De acordo com Cepi (2013), se aplicada em todo o setor, essa tecnologia possibilita redução de emissões de CO_2 em cerca de 45% no ano de 2050, se comparada à linha de base tecnológica, bem como resulta em aproximadamente 20% de redução no consumo de energia.

Vapor *flash* para secagem de fibras

Nessa tecnologia, o vapor *flash* é produzido pela passagem do condensado quente do sistema de alta pressão para o sistema de baixa pressão, que produz o fenômeno de reevaporação. As fibras poderão ser secadas por uma turbulência de vapor *flash*, usando um milésimo da água consumida hoje (CEPI, 2013).

Segundo Cepi (2013), se aplicada em todo o setor, em 2050, seria possível reduzir as emissões de CO_2 em cerca de 50%, e o consumo de energia primária em 20%.

Bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS)

Uma opção para o setor de papel e celulose no tocante a tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS) refere-se ao sistema de bioenergia com captura e armazenamento de carbono, também conhecido como BECCS. Esse sistema consiste na conversão de biomassa de madeira e outras vegetações em eletricidade, produtos químicos e combustíveis, e as emissões resultantes são capturadas e armazenadas (CIPE, 2010).

Diversos estudos destacam as emissões negativas associadas à aplicação de BECCS, como indispensáveis para atingir redução acentuada de emissões e manter a temperatura média da superfície terrestre até 2ºC em relação aos níveis pré-industriais (IEA, 2014; GCCSI, 2014).

As emissões de CO_2 provenientes da combustão sustentável de biomassa são reconhecidas como neutras, pois novas biomassas crescem e absorvem a mesma quantidade de CO_2. Se o CO_2 emitido pela combustão de biomassa for capturado e armazenado, retira-se mais CO_2 da atmosfera do que é emitido (GCCSI, 2014), criando-se um balanço negativo.

Atualmente, há 16 projetos de BECCS em diversos estágios de desenvolvimento pelo mundo. Segundo estimativa da IEA (2014), a tecnologia BECCS poderá sequestrar até dez bilhões de toneladas métricas de emissões industriais até 2050, mas terá que superar obstáculos como a relativa ineficiência dos biocombustíveis, os altos custos da CCS e a atual falta de investimento tanto do setor público quanto do privado. Essa tecnologia deverá se tornar viável por volta de 2020-2025 e implementada até 2030.

3.3.2 Premissas

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

O Quadro 5 apresenta os potenciais de redução no consumo de energia das tecnologias de ruptura consideradas no cenário BC+I.

Quadro 5 – Potenciais de Economia de Energia e/ou Redução de Emissões por Tecnologia de Ruptura Considerada no Cenário BC+I

Tecnologias	Potencial de Economia de Energia e/ou Redução de Emissões
Secagem por impulso	Economia no consumo de vapor de 50% a 75% em relação à secagem convencional.
Biotratamento	Redução de 33% das necessidades energéticas do refinador.
Gaseificação de resíduos da produção de papel	Redução das emissões de CO_2 com essa tecnologia é de 50.000 toneladas ao longo de dez anos.
Otimização de secadores	Redução no consumo de energia de secadores é de até 50% e poderia levar a redução de emissões de 22.000 toneladas de CO_2 após cinco anos e 55.000 toneladas de CO_2 após dez anos.
Prensagem a quente	Potencial de redução de emissão de 68.000 toneladas de CO_2 em dez anos.
Solventes eutéticos profundos	Capaz de reduzir as emissões de CO_2 em 20% a partir de níveis atuais até 2050. Corta o uso primário de energia em 40%.
Uso de CO_2 supercrítico	Possibilita redução de emissões de CO_2 em cerca de 45% no ano de 2050, se comparada à linha de base, bem como resulta em aproximadamente 20% de redução de economia de energia.
Vapor *flash* para secagem das fibras	Se aplicada em todo o setor, em 2050, seria possível reduzir as emissões de CO_2 em cerca de 50% e o consumo de energia primária em 20%.

Fonte: Elaboração própria com base em KRAMER et al., 2009; CARBON TRUST, 2011; RICARDO-AEA, 2013; CEPI; 2013

Não foram encontrados dados referentes a custos de investimento e O&M para a maioria dessas tecnologias, o que já era de se esperar, dado que são tecnologias inovadoras, ou seja, ainda estão em fase de bancada, e não há estudos de casos de implementações no setor industrial. Tal aspecto inviabiliza a obtenção de custos marginais de abatimento.

Com as informações apresentadas no Quadro 5, foram calculados, para as tecnologias que têm dados referentes ao potencial de redução de emissões de CO_2, seus respectivos potenciais de economia de energia. Para converter o potencial de abatimento das emissões em percentuais de redução no consumo energético, foram consideradas as projeções das emissões de CO_2, do consumo de energia do setor de ferroligas, além da penetração de cada tecnologia inovadora a partir da fórmula a seguir para cada ano (i), conforme equação 5:

$$\text{Redução de energia (Mtep)} = \frac{\text{Consumo de energia}}{\text{Emissões (Mt}CO_2\text{)}} \times \text{Redução das emissões (Mt}CO_2\text{)} \quad \text{(Equação 5)}$$

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

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

Tecnologias/Anos	Taxa de penetração								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Biotratamento	-	-	-	-	-	50%	55%	60%	65%
Gaseificação de resíduos da produção de papel (caldeira produção de papel a gás natural)	-	-	-	-	-	40%	45%	50%	55%
Gaseificação de resíduos da produção de papel (caldeira produção de papel a óleo combustível)	-	-	-	-	-	40%	45%	50%	55%
Gaseificação de resíduos da produção de papel (caldeira produção de papel a carvão vapor)	-	-	-	-	-	40%	45%	50%	55%
Prensagem a quente	-	-	-	-	-	20%	25%	30%	35%
Solventes eutéticos profundos	-	-	-	-	-	10%	20%	30%	40%
Uso de CO_2 supercrítico	-	-	-	-	-	5%	10%	15%	20%
Vapor *flash* para secagem das fibras	-	-	-	-	-	5%	10%	15%	20%
Otimização de secadores	-	-	-	-	-	10%	10%	15%	15%
Secagem por impulso	-	-	-	-	-	5%	5%	10%	10%

Fonte: Elaboração própria

Por fim, adotaram-se os mesmos procedimentos dos cenários REF e BC para projetar a demanda de energia e emissões de GEE

3.3.3 Resultados

A partir das premissas citadas, foi possível projetar o consumo de energia e emissões no cenário BC+I (Tabela 37). Constata-se que a implementação das tecnologias inovadoras implicaria consumo de energia 51% menor, em 2050, com relação ao cenário REF.

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

Fontes de energia	Consumo de energia (mil tep)								
	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Gás natural	676	763	860	969	1.086	1.055	1.026	944	859
Carvão vapor	112	122	133	145	158	151	143	131	117
Lenha	1.513	1.637	1.772	1.921	2.074	2.000	1.889	1.739	1.556
Lixívia	4.711	5.110	5.546	6.025	6.522	6.305	5.968	5.511	4.942
Bagaço	41	49	57	67	78	82	84	85	83
Óleo combustível	466	440	408	367	317	227	143	66	-
Metanol	61	65	69	74	79	75	70	63	56
Eletricidade	1.636	1.764	1.904	2.057	2.214	2.268	2.391	2.499	2.589
Total	9.216	9.950	10.750	11.626	12.527	12.163	11.714	11.039	10.202

Fonte: Elaboração própria

Dadas as projeções da demanda de energia dos cenários REF e BC e a projeção do cenário BC+I, a Figura 13 mostra o consumo de energia dos três cenários.

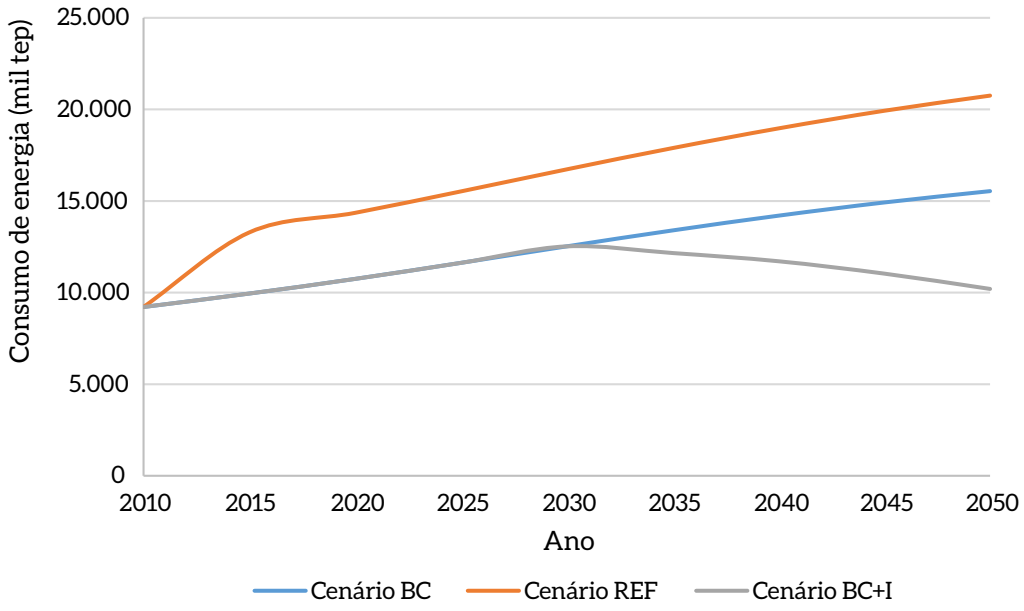

Figura 13 – Consumo Energético nos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 38 apresenta as emissões de GEE nos cenários BC+I, e, a partir da projeção da demanda de energia para o cenário BC+I, tornou-se possível o cálculo das emissões de CO_2 do setor de papel e celulose. Foram considerados os mesmos fatores de emissão dos cenários REF e BC (MCTI, 2015), bem como a média do fator de emissão do *grid* nacional para o ano de 2010 (MCTI, 2010).

Assim como nos outros cenários, foram desconsiderados os combustíveis lenha, lixívia, bagaço de cana e metanol. As emissões totais, calculadas para cada ano, são apresentadas na Tabela 38.

Tabela 38 – Emissões Totais de CO_2 de 2010 a 2050

Ano	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Emissões (tCO_2)	5.918.592	6.265.466	6.634.342	7.029.569	7.417.643	7.107.934	6.914.045	6.580.031	6.242.152

Fonte: Elaboração própria

A Figura 14 consolida as emissões nos cenários REF, BC e BC+I. A adoção do cenário BC+I, caso as tecnologias de ruptura se tornem disponíveis comercialmente, levaria a uma redução de 48% nas emissões com relação ao cenário REF, em 2050.

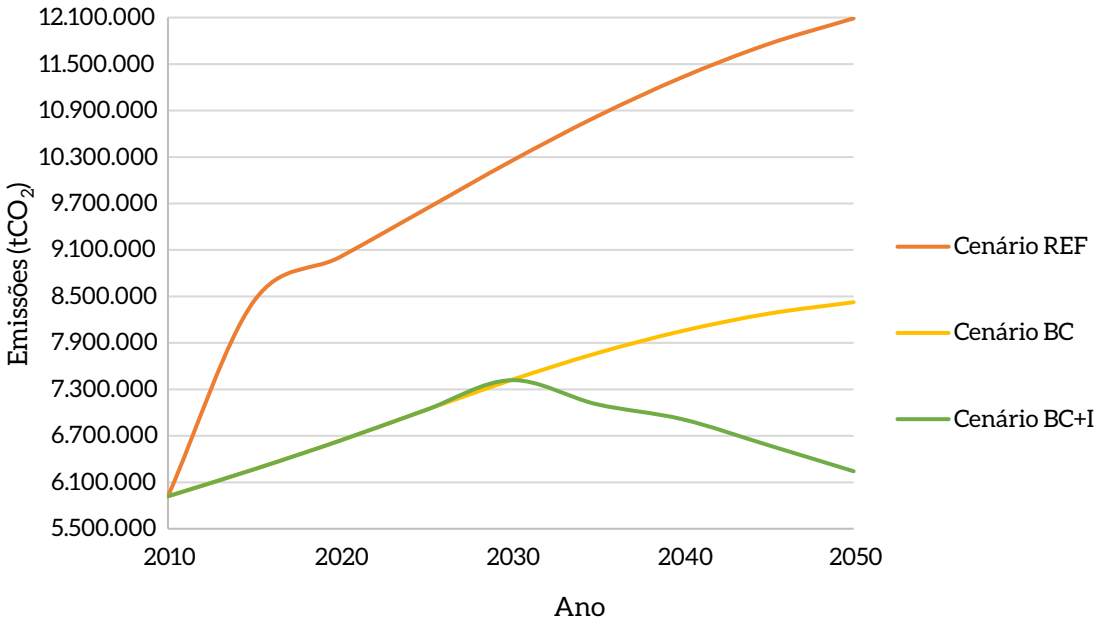

Figura 14 – Emissões nos Cenários REF, BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

Comparativamente ao cenário BC, a disponibilidade comercial e a implementação das tecnologias de ruptura proporcionariam um potencial adicional de mitigação de emissões, em 2050, de 26% (Figura 15).

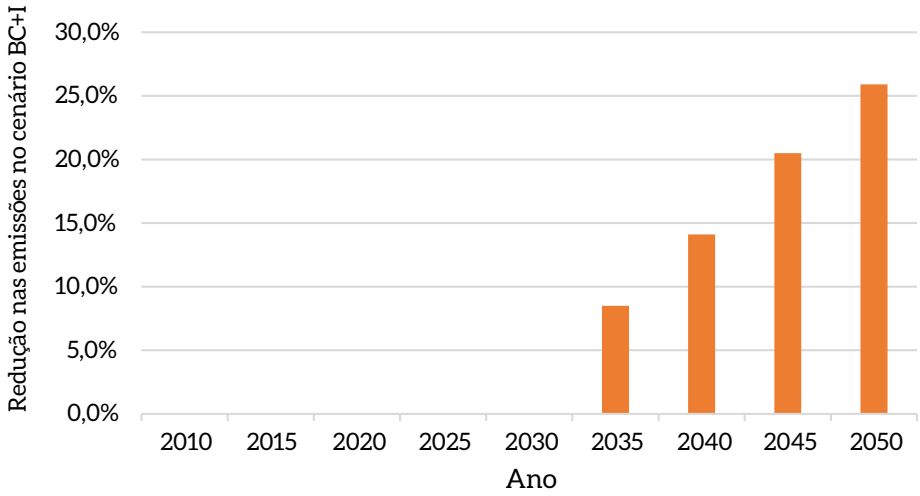

Figura 15 – Percentual de Redução de Emissões entre os Cenários BC e BC+I

Fonte: Elaboração própria

Dentre as tecnologias consideradas para a construção do cenário de BC+I, o uso de solventes eutéticos profundos pode ser considerado o mais relevante para o alcance de redução tão expressiva de emissões de CO_2 em relação ao cenário BC. Isso ocorre porque a tecnologia possibilita diminuição no uso de energia primária de até 40%. Outras medidas, como o biotratamento, reduzem apenas consumo de eletricidade (fonte que tem o menor fator de emissão dentre as fontes utilizadas no setor de papel e celulose), ou reduzem apenas 20% do consumo de energia até 2050. É o caso das tecnologias de uso de CO_2 supercrítico ou vapor *flash* para secagem das fibras.

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

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

Capítulo

4

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

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

Pôde-se constatar um potencial acumulado de abatimento de 16,7 $MtCO_2$ no cenário BC, com 96% e 38% desse montante apresentando custos de abatimento negativos com taxas de desconto de 8% e 15% ao ano, respectivamente. Ainda que grande parte das atividades de baixo carbono seja atrativa sob o ponto de vista financeiro, aspectos que não foram avaliados no estudo poderiam levar a resultados distintos. Tipicamente, análises setoriais de oportunidades de mitigação de emissões de GEE tendem a desconsiderar aspectos que afetam significativamente a mensuração de potenciais e custos de abatimento: i) competição por tecnologias de baixo carbono com outros setores; ii) adequação dos custos de capital e O&M, obtidos na literatura científica, à realidade econômico-tributária do país; iii) impactos de deficiências regulatórias, refletidos em custos de transação que não capturados pela metodologia de CMA; iv) não aditividade e aplicabilidade de medidas em face de restrições técnico-operacionais; entre outras.

No caso das tecnologias de ruptura, avaliadas no cenário BC+I, o potencial de mitigação seria substancialmente maior, qual seja, de 48% de redução de emissões em 2050 com relação ao cenário REF. Todavia, são medidas mitigadoras de emissão distantes da disponibilidade comercial, sendo o objetivo da análise demonstrar os efeitos que trariam mediante a remoção de substanciais barreiras por meio de instrumentos de política pública variados, mas em particular voltados a PD&D.

As lacunas associadas a não aditividade e 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 e vapor e a manutenção de caldeiras de papel e caldeiras auxiliares, perante o conjunto de medidas com custo de abatimento negativo (Tabela 34 e Tabela 35), são verdadeiramente custo-efetivas no horizonte de implementação até 2025. E, mesmo que tenham custo-efetividade, exigem a remoção de barreiras para sua adoção, pois não fazem parte, em sentido amplo, do *baseline* do setor.

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

i) Identificação de barreiras e cobenefícios da adoção das medidas de baixo carbono;

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

iii) Instrumentos de política pública aplicáveis ao setor para promover o abatimento de emissões de GEE;

iv) Síntese da proposta de instrumentos de política pública para a implementação dos cenários de baixo carbono.

Cumpre enfatizar que os subsídios constantes nesse capítulo abrangem exclusivamente a adoção de cenários de baixo carbono por plantas industriais de papel e celulose. A base florestal do setor é analisada no relatório *Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de agricultura, florestas e outros usos do solo* (MCTIC, 2017c).

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 entraves transversais a setores industriais que são aplicáveis ao setor de papel e celulose. 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 no setor tem custos marginais de abatimento positivos. Além dessa barreira econômica, a atual situação econômica do país leva a que o governo precise realizar 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 adoção das tecnologias de baixo carbono. Finalmente, a recessão afeta a renda das famílias e, consequentemente, a demanda por bens derivados da cadeia de celulose e papel, o que dificulta a realização de investimentos em eficientização dos processos produtivos.

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

No caso das medidas viáveis sob o ponto de vista econômico e menos complexas, como é o caso de manutenção, controle avançado, retorno de condensado e recuperação de calor e vapor em caldeiras, também é necessária a disponibilização de capital para instalação das tecnologias. Ademais, e em linha com DECC (2015), essas medidas demandam menores prazos de retorno de capital, aspecto que frequentemente impede a sua adoção.

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

Uma barreira transversal à adoção de atividades de baixo carbono no setor é a elaboração de instrumentos de política pública que desconsideram a integração das unidades fabris com o setor de base florestal. Mais que isso, o setor carece de sinalização de patamares mínimos de precificação de carbono, fundamentais para a adoção das tecnologias com custos de abatimento positivos.

Em termos institucionais e regulatórios, a obtenção de crédito para o financiamento em atividades de baixo carbono está condicionada a uma série de exigências burocráticas, dentre as quais se destaca a elaboração de projetos para o acesso a linhas de crédito de programas governamentais. Além do custo de transação relacionado às inúmeras exigências processuais e documentais para o acesso ao crédito, em particular por bancos de fomento, destaca-se que pequenas empresas do setor têm dificuldade na elaboração de projetos, com restrição de mão de obra qualificada para esse propósito (SORRELL et al., 2004). Ainda no âmbito regulatório, a inexistência de padrões de eficientização energética e/ou emissões de carbono constitui barreira adicional (DECC, 2015).

A questão do suprimento de gás natural, dado pelo aumento da participação da fonte na matriz energética nos cenários de baixo carbono, se constitui em entrave relevante. É necessário garantir a oferta da fonte, sob pena de afetar a capacidade produtiva do setor.

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

Em termos comportamentais e informacionais, muitos atores do setor desconhecem a relação custo-benefício das medidas que resultam em eficientização energética, como é o caso das tecnologias mapeadas no cenário BC. Mesmo diante do conhecimento dos benefícios, é comum inexistir pessoal técnico capacitado para identificar, implementar e monitorar as referidas medidas (UNIDO, 2011a; BERGH, 2012), em particular em unidades industriais de médio e pequeno porte. Esse aspecto pode resultar em sobre ou subdimensionamento das novas tecnologias, como é o caso das prensas mais eficientes e secadores Condebelt. 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 de papel e celulose, visto que o *layout* das plantas pode não permitir a adaptação e/ou instalação das novas tecnologias à configuração das plantas industriais existentes (ZILAHY, 2004). Finalmente, a falta de conteúdo local das tecnologias de baixo carbono pode constituir barreira a sua adoção. Tecnologias importadas têm restrições de manutenção e comumente não estão adaptadas para atender as especificidades dos processos produtivos locais, o que pode retardar ou impedir sua introdução, inviabilizando ganhos em termos de produtividade e economia de energia (CURRÁS, 2010).

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

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

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

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

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 eficientização 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 16, 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 pelo setor de

papel e celulose, é necessário avançar na proposição de instrumentos econômico-financeiros e regulatórios para viabilizar a transição dessas atividades para uma economia de baixo carbono.

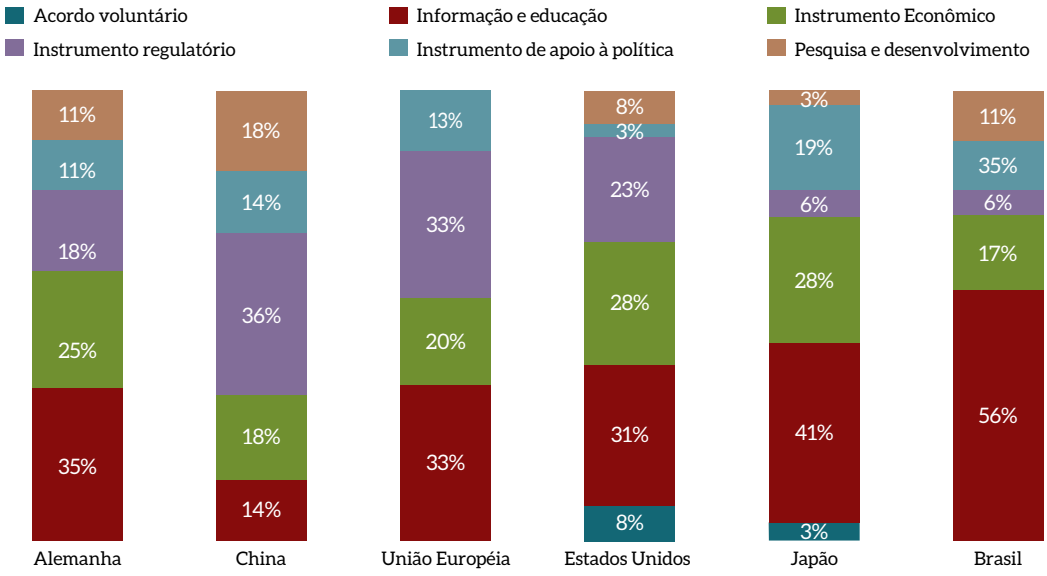

Figura 16 – Instrumentos Utilizados por Países para Promover a Eficiência Energética na Indústria

Fonte: Elaborado a partir de WORLD ENERGY COUNCIL, 2013

A partir de pesquisa bibliográfica em documentos internacionais como World Energy Council (2013) e International Energy Agency (2015), tornou-se possível a identificação de políticas públicas criadas para remover as barreiras apresentadas. Entre os mecanismos utilizados, encontram-se incentivos fiscais, disponibilização de financiamentos e fundos para investimento em tecnologias de eficiência energética, exigência do monitoramento relativo às emissões de CO_2, 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, taxação de carbono e créditos de carbono.

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

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

- Fomentar aumentos de eficiência no desempenho dos setores da economia na busca constante do alcance das melhores práticas;
- Manter elevada a participação de energia renovável na matriz elétrica, preservando a posição de destaque que o Brasil sempre ocupou no cenário internacional;

- Fomentar o aumento sustentável da participação de biocombustíveis na matriz de transportes nacional e atuar com vistas à estruturação de um mercado internacional de biocombustíveis sustentáveis;
- Buscar a redução sustentada das taxas de desmatamento, em sua média quadrienal, em todos os biomas brasileiros, até que se atinja o desmatamento ilegal zero;
- Eliminar a perda líquida da área de cobertura florestal no Brasil, até 2015;
- Fortalecer ações intersetoriais voltadas para redução das vulnerabilidades das populações;
- Identificar os impactos ambientais decorrentes da mudança do clima e fomentar o desenvolvimento de pesquisas científicas para que se possa traçar uma estratégia que minimize os custos socioeconômicos de adaptação do país.

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

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

Para remover barreiras econômicas e de mercado, tendo em vista que a disponibilização de crédito e subvenções 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, com estabelecimento de patamar mínimo de preço, poderia servir de incentivo à viabilização das atividades com custo marginal de abatimento positivo e, sobretudo, tecnologias de ruptura. Nesse caso, optando-se pela taxação de carbono enquanto instrumento de internalização do preço de carbono na economia, seria desejável a reciclagem de parte dos recursos para incentivo de P&D.

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

Para remover a barreira relacionada a tecnologias importadas, e por isso estão sujeitas à volatilidade cambial e taxas alfandegárias, poderia ser implementado um instrumento econômico com vistas a desonerar impostos das importações de tecnologias-chave para a mitigação de emissões de GEE. Para tornar o instrumento eficiente, o MF poderia prever, com atribuições para o MDIC, que a desoneração

fosse acompanhada de contrapartidas tecnológicas e sociais, quais sejam: i) estabelecimento de metas de eficientização energética; ii) manutenção dos níveis de emprego por um período mínimo de dois anos após o recebimento do benefício fiscal. O MDIC seria o agente responsável pelo monitoramento do cumprimento das metas, com auxílio da CNI e da Ibá. Considerando que as MTD propostas seriam implementadas a partir de 2020, os instrumentos precisam ser adotados no médio prazo.

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

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

Com vistas a promover uma cultura organizacional voltada para ações de eficientização 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 Ibá. Adicionalmente, é importante a criação de instrumento voltado à substituição de equipamento no final da vida útil. Nesse sentido, poderia ser elaborado um programa de depreciação obrigatória de caldeiras, com contrapartida relacionada a condições facilitadas de taxa de juros e análise simplificada de crédito no âmbito da linha de crédito "Finem – Eficiência Energética na Indústria". Para tanto, é relevante o envolvimento do MDIC, de associações representativas dos setores industriais e do BNDES. Os dois instrumentos poderiam ser implementados a partir de 2020.

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

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

Para fomentar o gás natural como alternativa a combustíveis de maior intensidade de carbono, deve ser fomentada a expansão dos gasodutos para cobrir todas as cidades com mais de 500 mil habitantes. A partir disso, devem ser elaborados contratos e seguros entre plantas industriais e ofertantes de gás natural. Trata-se de um instrumento que deve ser implementado a partir de 2020, em parceria entre o MME, o MDIC, empresas do setor energético e de papel e celulose e seguradoras.

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

Para a superação das barreiras comportamentais e informacionais, os instrumentos de política pública devem buscar a minimização da resistência existente à entrada de novas tecnologias. Em particular, a barreira associada à falta de informação dos benefícios das ações de eficientização energética poderia ser superada por meio da realização de ações de sensibilização, informação e capacitação. O monitoramento de emissões de GEE também seria necessário, o que permitiria verificar, por exemplo, se os pré-requisitos exigíveis para obtenção de financiamento estão sendo cumpridos. O presente projeto, no qual este estudo está inserido, vem desenvolvendo uma série de atividades com esse propósito, as quais poderiam ser ampliadas ao setor por meio do estabelecimento de acordo de cooperação técnica entre MDIC, MCTIC, Ibá, CNI e 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 sensibilidade e capacitação, a inserção nas micro e pequenas empresas facilitaria a execução de ações nesse sentido. Todas as atividades mencionadas poderiam ser implementadas a partir de 2018.

A aplicação de instrumentos de políticas públicas voltados para a remoção de barreiras tecnológicas, em particular, deve estar voltada para acelerar a penetração de tecnologias de baixo carbono ainda não maduras no mercado. Nesse sentido, destacam-se as medidas mapeadas para o cenário BC+I, e é reforçado o papel do MDIC e do MCTIC como agentes indutores da inovação. Nesse caso, deve ser fomentada a P&D voltada para tecnologias de ruptura, sendo o lançamento de editais para o financiamento de projetos específicos de baixo carbono, junto à Financiadora de Estudo e Projetos (Finep), um instrumento relevante para o setor. Ademais, a oferta de estudos conjunturais, estratégicos e tecnológicos para diferentes setores da indústria, voltada para o desenvolvimento sustentável do setor, pela ABDI, deve ser incentivada.

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

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

Finalmente, instrumentos de política pública visando à mitigação de emissões de GEE devem ser elaborados considerando a integração dos setores a montante e a jusante. No caso do setor papel e celulose, devem explorar oportunidades de abatimento em unidades fabris abrangendo a contribuição dada pela base florestal. Especificamente, as políticas de mitigação de emissões devem ser elaboradas em conjunto com mecanismos de mercado que estimulem a demanda por produtos baseados no uso de biomassa proveniente de florestas comerciais.

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

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

<table>
<tr><th>Medidas</th><th>Barreiras</th><th>Instrumentos</th></tr>
<tr><td>Manutenção das caldeiras de papel e caldeiras auxiliares</td><td rowspan="5">• Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões;
• Ausência de patamares mínimos de precificação de carbono;
• Ausência de viabilidade econômica das medidas com custos de abatimento positivos;
• Baixo prazo de retorno do capital;
• Competição com outros investimentos;
• Desconsideração da integração das unidades fabris com a base florestal na elaboração de instrumentos setoriais de política pública;
• Conjuntura econômica e setorial recessiva;
• Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento;
• Dificuldade na elaboração de projetos por médias e pequenas empresas;
• Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficientização energética;
• Falta de garantia de suprimento de gás natural;
• Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas;
• Resistência à substituição de equipamentos;
• Restrições à instalação pelo layout das plantas.</td><td rowspan="5">• Captação de recursos para investimento em ações de mitigação no GCF, GEF e BID e CTCN para pequenas empresas;
• Criação da linha de crédito “Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria”;
• Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial;
• Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor;
• Criação de Selo de Eficiência Energética Industrial;
• Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito;
• Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono;
• Diversificação das linhas de crédito existentes para atender pequenas, médias e grandes empresas;
• Elaboração coordenada de instrumentos de política pública de mitigação de emissões com mecanismos de mercado, visando incentivar a demanda por produtos baseados no uso de biomassa proveniente de florestas comerciais;
• Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis;
• Expansão dos gasodutos para todas as cidades com mais de 500 mil habitantes e elaboração de contratos e seguros de fornecimento de gás natural;
• Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono;
• 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, com patamar mínimo de preço;
• Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos e monitoramento de ações de eficiência energética;
• Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono;
• Revisão das metas do setor no Plano Indústria, ou naquele que vier a sucedê-lo no âmbito da NDC brasileira, visando à incorporação dos instrumentos propostos nesse estudo.</td></tr>
<tr><td>Caldeiras de papel e caldeiras auxiliares com controle avançado de processo</td></tr>
<tr><td>Caldeiras de papel e caldeiras auxiliares com retorno de condensado</td></tr>
<tr><td>Caldeiras de papel e caldeiras auxiliares com recuperação de calor e vapor</td></tr>
<tr><td>Modificações nos fornos de cal</td></tr>
</table>

Uso de secadores Condebelt	• Altos custos de importação em função das taxas de câmbio e tributação; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Ausência de patamares mínimos de precificação de carbono; • Ausência de viabilidade econômica das medidas com custos de abatimento positivos; • Competição com outros investimentos; Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Desconsideração da integração das unidades fabris com a base florestal na elaboração de instrumentos setoriais de política pública; • Dificuldade de acesso (assimetria), falta e alto custo de transação nas operações de financiamento; • Dificuldade na elaboração de projetos por médias e pequenas empresas; • Falta de conhecimento acerca das vantagens da eficientização energética; • Falta de garantia de suprimento de gás natural; • Falta de pessoal capacitado para identificar, implementar e monitorar as medidas; • Resistência à substituição de equipamentos; • Restrições à instalação pelo *layout* 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 mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; • Criação de um programa de depreciação obrigatória de equipamentos de geração de calor e vapor; • Criação, por meio de parcerias público-privadas, de atividades de capacitação para médias e pequenas empresas na elaboração de projetos de viabilidade técnico-econômica para acesso a crédito; • Desburocratização da análise de financiamento por bancos públicos de fomento relacionada a ações que mitiguem emissões de GEE, tendo como contrapartida o cumprimento do arcabouço regulatório de baixo carbono; • Desoneração de impostos de importação de tecnologias de baixo carbono; • Diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; • Elaboração coordenada de instrumentos de política pública de mitigação de emissões com mecanismos de mercado, visando incentivar a demanda por produtos baseados no uso de biomassa proveniente de florestas comerciais; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Expansão dos gasodutos para todas as cidades com mais de 500 mil habitantes e elaboração de contratos e seguros de fornecimento de gás natural; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono; • 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, com patamar mínimo de preço; • Promoção de atividades de capacitação de técnicos, em parceria público-privada, para a coleta de dados de emissão das plantas industriais e preparação de projetos e monitoramento de ações de eficiência energética; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento de tecnologias industriais de baixo carbono; • Revisão das metas do setor no Plano Indústria, ou naquele que vier a sucedê-lo no âmbito da NDC brasileira, visando à incorporação dos instrumentos propostos nesse estudo.
Uso de prensas mais eficientes		

Tecnologias de ruptura do cenário BC+I	• Altos custos de importação devido às taxas de câmbio e tributos; • Ausência de padrões de eficiência energética e/ou limite de emissões; • Ausência de patamares mínimos de precificação de carbono; • Competição com outros investimentos; Conjuntura econômica e setorial recessiva; • Desconsideração da integração das unidades fabris com a base florestal na elaboração de instrumentos setoriais de política pública; • Dificuldade de acesso a crédito para realização de investimentos em P&D; • Dificuldade na elaboração de projetos por médias e pequenas empresas; • Elevado tempo de análise para concessão de patentes; • Falta de adequação aos padrões, normas e regulamentações; • Falta de capacidade financeira para custear P&D; Indisponibilidade comercial das tecnologias; • 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 da linha de crédito "Financiamento a empreendimentos – Finem Eficiência Energética na Indústria"; • Criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo 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; • 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; • Elaboração coordenada de instrumentos de política pública de mitigação de emissões com mecanismos de mercado, visando incentivar a demanda por produtos baseados no uso de biomassa proveniente de florestas comerciais; • Estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; • Expansão dos gasodutos para todas as cidades com mais de 500 mil habitantes e elaboração de contratos e seguros de fornecimento de gás natural; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração das tecnologias inovadoras de baixo carbono; • Financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidade das tecnologias de ruptura; • 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, com patamar mínimo de preço e retorno dos recursos captados mediante possibilidade de taxação para investimento em P&D de tecnologias de ruptura; • Retomada do Plano Brasil Maior, visando ao direcionamento para o fomento em P&D de tecnologias de ruptura; • Revisão das metas do setor no Plano Indústria, ou naquele que vier a sucedê-lo no âmbito da NDC brasileira, visando à incorporação dos instrumentos propostos nesse estudo.

Fonte: Elaboração própria

Considerações finais

Considerações finais

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

Considerando os resultados obtidos, nota-se que o setor de papel e celulose apresenta considerável potencial para abatimento de emissões de GEE, apesar de já ter grande parte de sua geração de energia advinda de fontes renováveis, como lixívia e lenha. O potencial nos cenários BC e BC+I, com relação ao cenário REF, em 2050, é de 30% e 48%, sendo as medidas mais representativas a aplicação de secadores CondeBelt e a utilização de prensas mais eficientes.

As principais barreiras a sua adoção são: i) ausência de viabilidade econômica; ii) altos custos de capital; iii) assimetria e elevados custos de transação para acesso a crédito; iv) atual conjuntura econômica e setorial recessiva; v) restrição à instalação pelo *layout* da planta; vi) custos de importação; vii) risco do sobre ou subdimensionamento das tecnologias. A superação dessas barreiras, visando à adoção das tecnologias, é extremamente desafiadora, assim exigindo a adoção de uma série de instrumentos de política pública: i) diversificação das linhas de crédito para atender pequenas, médias e grandes empresas; ii) 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; iii) precificação de carbono a partir de 2025; iv) desoneração de importações dos secadores CondeBelt e prensas mais eficientes; v) criação da linha de crédito "Finem – Eficiência Energética na Indústria"; vi) criação de Selo de Eficiência Energética Industrial; vii) criação de mecanismos de diferenciação nos processos de compras públicas para empresas que possuam o Selo Eficiência Energética Industrial; viii) estabelecimento de limites de emissão por unidades industriais e/ou combustíveis; ix) 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; x) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de estudos detalhados de aplicabilidade e potencialidades de tecnologias de baixo carbono.

No caso do mecanismo de precificação, este deve ser capaz de estimular a demanda por produtos baseados no uso da biomassa florestal. Ou seja, deve ter patamar mínimo de preço que estimule o desenvolvimento da cadeia de biomassa energética, por exemplo, tornando competitiva nos leilões a bioeletricidade.

No caso das tecnologias de rupturas avaliadas no cenário BC+I, o desafio seria ainda maior, sendo adicionados às barreiras anteriormente citadas: incerteza acerca da viabilidade comercial; dificuldade de acesso a crédito para investimentos em P&D; e elevado tempo de análise para concessão de patentes. Para maturação dessas tecnologias em âmbito nacional, é fundamental a formulação dos seguintes instrumentos: i) desoneração de importações de componentes de tecnologias inovadoras de baixo carbono; ii) financiamento, por meio de agências do fomento à pesquisa, para a elaboração de projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração das tecnologias inovadoras de baixo carbono; iii) precificação do carbono a partir de 2025; iv) ampliação do quadro de funcionários e aprimoramento do sistema e-Patentes do Inpi.

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

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

Outra limitação resulta das projeções econômicas consideradas na construção dos cenários. Para tratar essa questão, tendo em vista a transversalidade e a relevância das variáveis macroeconômicas para os cenários setoriais de emissões, será considerada uma segunda visão de crescimento setorial do PIB no âmbito da modelagem integrada, a qual considerará os efeitos de curto e médio prazo do recente contexto econômico nacional. Esta tem resultados reportados no documento *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono* (MCTIC, 2017b).

Referências

Referências

ABRAHAMSON, K. et al. Application of heat pump systems for energy conservation in paper drying. *International Journal of Energy Research*, v. 21, n. 7, p. 631-642, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PAPEL E CELULOSE – BRACELPA (Brasil). *Conjuntura Bracelpa* – Publicação mensal da Associação Brasileira de Celulose e Papel, São Paulo, 2013.

_____. *Conjuntura Bracelpa* – Publicação mensal da Associação Brasileira de Celulose e Papel, São Paulo, 2012.

_____. *Conjuntura Bracelpa* – Publicação mensal da Associação Brasileira de Celulose e Papel, São Paulo, 2011.

_____. *Conjuntura Bracelpa* – Publicação mensal da Associação Brasileira de Celulose e Papel, São Paulo, 2010.

_____. Conjuntura Bracelpa – Publicação mensal da Associação Brasileira de Celulose e Papel, São Paulo, 2009.

_____. *Site Bracelpa*. 2014. Disponível em: <http://bracelpa.org.br/bra2/?q=node/34>. Acesso em: 30 jul. 2014.

BAEN, P. R.; BARTH, R. E. Insulate heat tracing systems correctly. *Chemical Engineering Progress*, v. 90, n. 9, p. 41, 1994.

BERGH, C. *Energy efficiency in the South African crude oil refining industry*: Drivers, barriers and opportunities. MSc Sustainable Energy Engineering. Cidade do Cabo, África do Sul: Universidade de Cape Town, 2012.

BEST PRACTICE PROGRAMME. *Good practice case study 300*: Energy savings by reducing the size of a pump impeller. Melbourne: Sustainability Victoria, 1996.

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

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

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Nota Técnica nº. 058/2005* –SRG/SCG/ANEEL. Estabelece os requisitos necessários à qualificação de centrais termelétricas cogeradoras de energia, revoga a Resolução nº 21, de 20 de janeiro de 2000, e dá outras providências. Brasília: Aneel, 2005.

_____. *BIG – Banco de Informações de Geração 2014*. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 15 ago. 2015.

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

BRASIL. Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES. Panorama de mercado: celulose. *BNDES Setorial*, Brasília, DF, n. 32, p. 311-370, 2010.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. *Balanço Energético Nacional 2015*: Ano-base 2014. Brasília: EPE, 2015.

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

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Prodlist – Indústria 2013*. Disponível em: <http://concla.ibge.gov.br/estrutura/produtos-estrutura/prodlist-industria>. Acesso em: 18 ago. 2014.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. *Inventário brasileiro de emissões antrópicas por fontes e remoções por sumidouros de gases de efeito estufa não controlados pelo Protocolo de Montreal*. Brasília: MCTI, 2010.

_____. *Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa*. Relatório de Referência: Emissões de gases de efeito estufa nos processos industriais e por uso de solventes. Brasília: MCTI, 2006.

_____. *Fatores de emissão de CO_2 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. *Trajetórias de mitigação e instrumentos de políticas públicas para alcance das metas brasileiras no acordo de Paris*. 2017a. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/2098519/Trajetorias-Ebook-b_final.pdf/29c11698-b71d-4009-850c-a162090e1108>. Acesso em: 18 dez. 2017.

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

_____. *Modelagem setorial de opções de baixo carbono para o setor de agricultura, florestas e outros usos do solo*. Brasília: MCTIC, 2017c.

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

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior – MDIC. *Nota Técnica Plano Indústria Papel e Celulose*. Brasília: MDIC, 2010.

BREWSTER, J. Economic impact of modern kraft recovery boilers. In: TAPPI INTERNATIONAL CHEMICAL RECOVERY CONFERENCE, p. 9-14, 2007.

CANADA. Canadian Industry Program for Energy Conservation – CIPEC. Industrial processes. Pulp and paper, process integration. *CIPEC Newsletter*, Vancouver, v. XII, n. 8, 15 de abril de 2008.

CANADA. Canmet Energy Technology Centre – CETC. *Pulp & Paper case study*. Process integration. Heat Recovery Opportunities at the Smurfit-Stone Mill in La Tuque. Varennes, Canada: CETC, 2002.

CANNELL, E. Mechanical pulping technologies focus on reducing refining energy. *Pulp & Paper*. Miller Freeman Publications, São Francisco, 1999.

CARBON TRUST. The Industrial Energy Efficiency Accelerator – Guide to the paper sector. 2011. Disponível em: <https://www.carbontrust.com/media/206496/ctg059-paper-industrial-energy-efficiency.pdf>. Acesso em: 24 out. 2017.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE (Brasil). *Eficiência energética*: Recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados – celulose e papel. Série Documentos Técnicos, 20. Brasília: CGEE, 2013.

CHIMACK, M. J.; WALKER, C.E.; MILLER, R. *Energy conservation opportunities in the pulp and paper industry*. Paper presented at the ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry 2003 Sustainability and Industry: Increasing Energy Efficiency and Reducing Emissions. 2003.

COMPRESSED AIR CHALLENGE – CAC. *Guidelines for selecting a compressed air system service provider and levels of analysis of compressed air systems*. Washington: Compressed Air Challenge, 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI (Brasil). *Novas tecnologias para processos industriais*: Eficiência energética na indústria. Brasília: CNI, 2009.

_____. *Oportunidades de eficiência energética para a indústria*: Setor papel e celulose. Brasília: CNI, 2010.

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

CONFEDERATION OF EUROPEAN PAPER INDUSTRIES – CEPI (Bégica). *The two team project*. Bruxelas: CEPI, 2013.

CONFEDERATION OF INDIAN INDUSTRY – CII (India). *National best practices manual pulp and paper industry*. India: CII, 2008.

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

DE BEER, J. G. et al. *Icarus-3*: The potential of energy efficiency improvements in the Netherlands up to 2000 and 2015. Utrecht, The Netherlands: Utrecht University, Department of Science, Technology and Society, 1994.

DE BEER, J. G. *Potential for industrial energy efficiency improvement in the long term*. 1998. Department of Science, Technology and Society. Utrecht University. Utrecht, The Netherlands, 1998.

ELAAHI, A; LOWITT, H. E. *The U.S. pulp and paper industry*: An energy perspective. Washington, DC: US DoE, 1988.

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

_____. *BAT conclusions for the production of pulp, paper and board*. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0687&from=EN>. Acesso em: 18 set. 2016.

FERGUSSON, K. TMP technologies focus on reducing energy use. *Pulp & Paper Magazine*, Miller Freeman Publication, San Francisco, 1997.

FERREIRA, D. J. O. *Modelagem de caldeira de recuperação química kraft*. 2013. 238 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

FIBRIA. *Inventário de gases de efeito estufa* – Inventário de Carbono 2013 – Ano-base 2012. Disponível em: <http://www.fibria.com.br/shared/midia/publicacoes/inventario_de_carbono_2013.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2014.

FOCUS ON ENERGY. *New dryer management system dries up energy costs*. Pulp and Paper Industry Case Studies. Madison, Wisconsin, 2006b.

_____. *Pulp & paper industry case studies*. Dryer Management System. Madison, Wisconsin, 2006a.

_____. *Pulp and paper energy best practice guidebook*. Madison, Wisconsin, 2006.

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

GALITSKY, C. et al. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the pharmaceutical industry: An Energy Star guide for energy and plant managers. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

GANAPATHY, V. *Understand steam generator performance*. Chemical Engineering Progress. Texas, Fairmont Press: 1994.

GLOBAL CCS INSTITUTE – GCCSI. *Moving below zero*: Understanding bioenergy with carbon capture and storage. The Climate Institute. Melbourne, Australia: GCCSI, 2014.

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

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

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

HENRIQUES JR., M. F. *Potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa pelo uso de energia no setor industrial brasileiro*. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ (Brasil). *Relatório 2017*. Disponível em: <http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2017.

INSTITUTE FOR INDUSTRIAL PRODUCTIVITY – IIP. *Industrial efficiency technology database*. Disponível em: <http://ietd.iipnetwork.org/content/pulp-and-paper>. Acesso em: 20 out. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA – IBAPE (Brasil). *Estudo de vidas úteis para máquinas e equipamentos*. São Paulo: Ibape, 2012.

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

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. *Energy technology perspectives 2014:* Harnessing electricity's potential. Paris: IEA, 2014.

_____. *Energy technology transitions for industry* – Strategies for the next industrial revolution. Paris: IEA, 2009.

_____. *Tracking clean energy progress*. Paris: IEA, 2012.

JACOBS ENGINEERING GROUP – Jacobs. *Pulp and paper industry* – Energy Bandwidth Study. Pasadena, California: Jacobs, 2006.

JAPAN. New Energy and Industrial Technology Development – NEDO. *Global warming countmeasures*: Japanese technologies for energy savings/GHG Emissions. Japão: NEDO, 2008.

KRAMER, J. K. et al. *Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the pulp and paper industry*. Berkeley, California: Environmental Energy Technologies Division – Lawrence Berkeley National Laboratory, 2009.

LANGE, D.; RADTKE, M. *Extended nip pressing of paper grades*: A technical summary. Beloit, Wisconsin: Beloit Corporation, 1996.

LUNDQVIST, P. *Mass and energy balances over the lime kiln in a kraft pulp mill*. 2009. Master Thesis – Uppsala Universitet, Suécia, 2009.

LWARCEL CELULOSE. *Caldeira de recuperação química*. 2015. Disponível em: <http://www.lwart.com.br/site/content/lwarcel/celulose_processo_industrial_recuperacao_quimica_etapa.asp?id=19>. Acesso em: 14 ago. 2016.

MARTIN, N. et al. *Opportunities to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions in the U.S*. Pulp and paper industry. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2000.

MCKANE, A.; GHISLAIN, J. P.; MEADOWS, K. *Compressed air challenge*: Market change from the inside out. ACEEE summer study on energy efficiency in industry. Saratoga Springs, Nova York, 1999.

MILLER, F. *Lockwood-post directory database of the pulp, paper and allied trades*. Miller Freeman, Inc. San Francisco, California, 1998.

MIOTTI, R. *Energy savings in mechanical pulping*. Mechanical Pulping Course. Clayton, Victoria, Australia: Australian Pulp and Paper Institute, Monash University, 2001.

MORRIS, K. L. Dryer section rebuild at bowater calhoun lowers steam use, ups machine speed. *Pulp and Paper Magazine*, San Francisco, California. Miller Freeman Publications, October 1998.

NATIONAL COUNCIL FOR AIR AND STREAM IMPROVEMENT – NCASI. *Technologies for reducing carbon dioxide emissions*: A resource manual for pulp, paper and wood products manufacturers. Research Triangle Park, Carolina do Norte: NCASI, 2001.

O'BRIEN. *Augusta newsprint* – A world class recycling mill, pamphlet reprinted from Paper Age. 1996.

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.

PATRICK, K. L. Bowater to start up new TMP line at Calhoun. *Pulp and Paper Magazine*. Miller Freeman Publications, São Francisco, 1999.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H.; GREEN, C. W. (Ed.). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7. ed. Seções 12.56-12.60, 23.60. New York: McGraw-Hill, 1997.

PIOTTO, Z. C. *Ecoeficiência na indústria de celulose e papel* – Estudo de caso. 2003. 379 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

RADGEN, P.; BLAUSTEIN, E. (Eds.). *Compressed air systems in the European Union, energy, emissions, savings potential and policy actions*. LOG_X Verlag, GmbH, Stuttgart, Alemanha, 2001.

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.

REE, R.; ANNEVELINK, B. *Status report biorefinery 2007*. Agrotechnology and Food Science Group. Wageningen, Holanda, 2007.

REESE, D. *Pulp & Paper*. Low-Cost Dryer Upgrade Opportunities Offer Efficiency Gains, Energy Saving. 2005.

RICARDO-AEA. *Decarbonisation of heat in industry*: a review of the research evidence. Londres: Imperial College, 2013.

RONNEBERG, D.; JENNINGS, W. L. DOE's R&D effort offer means to boost pulp mill performance, Yield. *Paper & Pulp*, v. 81, p. 40-42, 2007.

SABOURIN, M. *Energy savings in TMP using high efficiency refining*. Forum on Energy: Immediate Solutions and Emmerging Technologies. Appleton, 2006.

SCALES, W.; MCCULLOCH, D. M. *Best practices for compressed air systems*. 2. ed. Washington, DC: Compressed Air Challenge®, 2007.

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

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

STAUDT, J. Memorando de Jim Staudt, Andover Technology Partners, para Will Yelverton, Matt Witosky e Elineth Torres, U.S. EPA, e Katie Hanks, RTI International. *ISIS Emissions Control for Pulp and Paper Plants*, 2010.

TESSIER, P. et al. Industrial implementation of motor load and freeness control of chemimechanical pulp refiners. *TAPPI Journal*, v. 80, n. 12, p. 135-141, 1997.

UE. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies – CADDET. *Saving energy with efficient compressed air systems*. London: CADDET, Maxi Brochure, 06, 1997.

UE. Comission of the European Communities. *Energy sources, production costs and performance of technologies for power generation, heating and transport*. Bruxelas: CE, 2008.

UE. Integrated Pollution Prevention and Control – IPPC. *Draft reference document on best available techniques in the pulp and paper industry*. União Europeia: IPPC, 2010.

_____. *Reference document on best available techniques in the pulp and paper industry*. União Europeia: IPPC, 2001.

_____. *Motor systems efficiency supply curves*. Viena: Unido, 2010.

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

USA. Industrial Assessment Centers – IAC. *Industrial assessment centers database*. New Brunswick, New Jersey: Rutgers University, 2008.

USA. United States Department of Energy – US DOE. *Energy tips* – Compressed air: Alternative strategies for low-pressure end uses. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2004a.

_____. *Final public release report for the Boise cascade energy savings assessment* (ESA-006). Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2006.

_____. *Forest products, project fact sheet*. Improving several fan-driven systems in an oriented-strand board manufacturing facility. A motor challenge technical case study. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 1999.

_____. *Forest products*. Best practices assessment case study. Georgia-Pacific Palatka plant uses thermal pinch analysis and evaluates water reduction in plant-wide energy assessment. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2002a.

_____. *Forest products technologies*: Public private partnerships produce R&D results. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2008.

_____. *Improving fan system performance*. A sourcebook for industry. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2003.

_____. *Improving steam system performance*. A sourcebook for industry. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2004.

_____. *Industrial Technologies Programs*. Yield improvement and energy savings using phosphonates as additives in kraft pulping. Promises substantial energy savings, increased yield, and bleaching. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2006b.

_____. *Industrial Technologies Program:* Summary of program results for CY 2009. Washington, DC: US Department of Energy – Energy Efficiency and Renewable Energy. 2009.

_____. *Neville Chemical Company:* Management pursues five projects following plant-wide energy-efficiency assessment. July 2003. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2003a.

_____. *Performance spotlight*. Proven tools and practices to increase industrial system energy efficiency. Boise paper: Process pumping system optimization saves energy and improves production. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2006a.

_____. *Pump system optimization saves energy and improves productivity at Daishowa America Paper Mill*. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2002b.

_____. *Steam system opportunity assessment for the pulp and paper, chemical manufacturing, and petroleum refining industries*. Main Report. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, 2002c.

_____. *United States industrial electric motor systems market opportunities assessment*. Washington, DC: Office of Industrial Technologies, 2002.

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

USA. United States Environmental Protection Agency – USEPA. *Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the pulp and paper manufacturing industry*. Carolina do Norte: EPA, 2010.

VAN DEVENTER, H. C. Feasibility of Energy Efficient Steam Drying of Paper and Textile Including Process Integration. *Applied Thermal Engineering*, v. 17, n. 8, p. 1035-1041, 1997.

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

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

WORRELL, E. et al. Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency*, n. 2, p. 109-123, 2009.

WORRELL, E.; GALITSKY, C. Worrell, E. Energy efficiency improvement opportunities - *An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2005.

WORRELL, E.; PRICE, L. K. *Barriers and Opportunities*: a review of selected successful energy-efficiency programs. Berkeley, California: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.

XENERGY, Inc. *United Stated industrial electric motor system market opportunities assessment*. Prepared for the United States Department of Energy's Office of Industrial Technology and Oak Ridge National Laboratory. Burlington Massachusetts, 1998.

ZEITZ, Ronald A. *CIBO energy efficiency handbook*. Council of Industrial Boiler Owners, Burke, Virginia, 1997.

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

ONU meio ambiente

gef

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

BRASIL
GOVERNO FEDERAL