



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
Faculdade de Engenharia Mecânica

**CAROLINA SANDOVAL MEJIA**

**Boas práticas e inovações tecnológicas  
visando ganhos de eficiência energética em  
alguns segmentos industriais energo-  
intensivos**

CAMPINAS  
2015

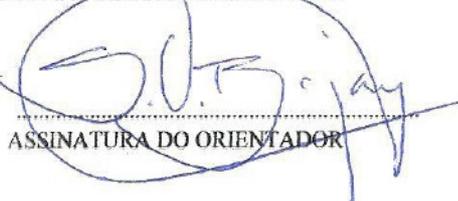
CAROLINA SANDOVAL MEJIA

**Boas práticas e inovações tecnológicas  
visando ganhos de eficiência energética em  
alguns segmentos industriais energo-  
intensivos**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA CAROLINA SANDOVAL MEJIA, E ORIENTADA PELO PROF. DR. SÉRGIO VALDIR BAJAY

  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS  
2015

**Agência(s) de fomento e n°(s) de processo(s):** CAPES, o

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

Sandoval Mejia, Carolina, 1985-  
Sa21b Boas práticas e inovações tecnológicas visando ganhos de eficiência energética em alguns segmentos industriais energo-intensivos / Carolina Sandoval Mejia. – Campinas, SP : [s.n.], 2015.

Orientador: Sergio Valdir Bajay.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Inovações tecnológicas. 2. Energia (Mecânica). 3. Eficiência energética.  
I. Bajay, Sergio Valdir, 1950-. II. Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Good practices and technological innovations aimed at energy efficiency gains in some energy-intensive industrial branches

**Palavras-chave em inglês:**

Technological innovations

Energy (Mechanical)

Energy efficiency

Industry

**Área de concentração:** Planejamento de Sistemas Energéticos

**Titulação:** Mestra em Planejamento de Sistemas Energéticos

**Banca examinadora:**

Sergio Valdir Bajay [Orientador]

Mauro Donizeti Berni

Waldir Luiz Ribeiro Gallo

**Data de defesa:** 14-10-2015

**Programa de Pós-Graduação:** Planejamento de Sistemas Energéticos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA  
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

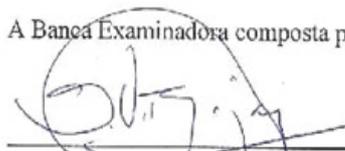
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Boas práticas e inovações tecnológicas  
visando ganhos de eficiência energética em  
alguns segmentos industriais energo-  
intensivos.**

Autora: Carolina Sandoval Mejia

Orientador: Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay  
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo  
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Mauro Donizeti Berni  
Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético

Campinas, 14 de Outubro de 2015.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais que apesar da distância sempre senti seu apoio e confiança.

A Deus, que me permitiu viver esta experiência de aprendizagem e privilegio e me deu força para vivê-la.

## **Agradecimentos**

Agradeço principalmente ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Valdir Bajay, pela ajuda grande que me brindou e confiança depositada em mim, por compartilhar comigo suas experiências e conhecimentos, não somente acadêmicas senão de vida, que tem propiciado muita aprendizagem para mim. Sem duvida, eu não poderia ter terminado com sucesso esta dissertação e este ciclo sem sua participação.

Aos membros da banca, o Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo e o Dr. Mauro Donizeti Berni, por terem aceitado fazer parte dela e pelas suas contribuições para a melhoria desta dissertação.

Agradeço também ao Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), pela participação no projeto Eficind, ao Dr. Orlando Frederico José Godoy Bordoni e aos Mestres Flávio Roberto de Carvalho Mathias e Rafael Rodrigues da Silva pela ajuda com seus conhecimentos e recomendações no enriquecimento da minha dissertação.

À Unicamp e, em especial, à Faculdade de Engenharia Mecânica pelo espaço e ambiente propiciados para o desenvolvimento do meu estudo.

Aos professores do curso de pós-graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos, em especial ao Prof. Dr. Arnaldo Cesar da Silva Walter.

À CAPES, pela bolsa de estudos oferecida.

Aos meus colegas e amigos da “família Mercosul” Vivi, Lore, Jorgi, Jhon, menino, Guisseppe, Laura e Pedro pela presença nos momentos duros e bons e por compartilhar este ciclo de vida comigo. Igualmente a aqueles que estiveram comigo e ajudaram neste processo.

E, sem dúvida, a meus pais por seu amor e apoio, SEMPRE.

*Algún día los puntos se unirán y formarán eso llamado Vida!*

*O futuro tem muitos nomes, para os fracos é o inalcançável, para os temerosos o desconhecido, para os valentes é a oportunidade...*

*(Victor Hugo)*

## Resumo

Este trabalho apresenta os resultados de um amplo levantamento sobre boas práticas e inovações tecnológicas que propiciam ganhos de eficiência energética em alguns segmentos industriais energo-intensivos.

São analisados os processos industriais específicos dos seguintes segmentos: indústria química, indústria de papel e celulose, fabricantes de ferro-gusa e aço e fabricantes de cimento. Complementam o levantamento, dois tipos de equipamentos de uso amplo e geral na indústria: os motores elétricos e os geradores de vapor.

Planilhas foram desenvolvidas na dissertação para estimar potenciais técnicos de conservação de energia, envolvendo boas práticas e/ou inovações tecnológicas, nas diversas etapas dos processos produtivos dos segmentos industriais analisados. Estas planilhas podem ser utilizadas para facilitar a realização de um pré-diagnóstico energético em uma determinada instalação industrial, assim como para estimar tais potenciais no âmbito de uma dada região, ou país.

Para auxiliar na análise do desempenho energético de motores elétricos e geradores de vapor, são indicados e exemplificados, no trabalho, *softwares* de livre acesso na Internet.

*Palavras Chaves:* indústria de papel e celulose; indústria de cimento; indústria de ferro-gusa e aço; indústria química; diagnóstico energético.

## **Abstract**

This thesis presents the results of a broad survey of good practices and technological innovations that bring forth energy efficiency gains in some energy-intensive industrial branches.

The specific industrial processes of the following branches are examined: chemical industry, paper and pulp industry, iron and steel makers, and cement producers. The survey is complemented with two types of equipment of broad and general use in industry: electric motors and steam generators.

Spreadsheets were developed in the thesis to estimate energy conservation technical potentials, concerning good practices and technological innovations, in the several production stages of the industrial branches being evaluated. These spreadsheets can be used to make preliminary energy audits easier in an industrial plant, as well as to estimate such potentials in a region, or country.

Free access softwares in the world web are indicated and exemplified in the thesis to help the energy performance evaluation of electric motors and steam generators.

**Key Words:** pulp and paper industry; cement industry; iron and steel industry; chemical industry; energy audits.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Distribuição setorial do consumo de energia no Brasil em 2013, em %.....	20
Figura 1.2 Consumo final de energia dos segmentos industriais no Brasil em 2013, em 10 <sup>3</sup> tep. .....	21
Figura 2.1 Componentes de um motor elétrico de indução.....	28
Figura 2.2 Curvas características de um motor elétrico de indução trifásico.....	30
Figura 2.3 Evolução dos motores elétricos por kW de capacidade instalada.....	32
Figura 2.4 Caldeiras elétricas.....	39
Figura 2.5 Caldeira aquatubular.....	40
Figura 2.6 Caldeira flamotubular.....	41
Figura 2.7 Caldeira mista.....	42
Figura 2.8 Economizador em uma caldeira flamotubular.....	49
Figura 2.9 Tipos de pré-aquecedores de ar.....	50
Figura 3.1 Cadeia produtiva da indústria de celulose e papel.....	54
Figura 3.2 Processo químico para a produção de celulose de mercado branqueada.....	55
Figura 3.3 O processo produtivo do papel.....	56
Figura 3.4 Processo Kraft de produção de pastas de celulose.....	59
Figura 3.5 Consumo de combustíveis, em PJ, na indústria de papel e celulose no Brasil em 2013 .....	66
Figura 3.6 Revestimento sólido na tampa perfurada das caixas lava-filtro.....	72
Figura 4.1 Etapas dos processos produtivos da indústria de cimento.....	84
Figura 4.2 Moinho vertical de rolos.....	91
Figura 4.3 Moinho de rolos de alta pressão.....	92
Figura 4.4 Ciclones pré-aquecedores, pré-calcinador e forno rotativo de fábrica de cimento..	96
Figura 4.5 Moinho Horomill.....	99
Figura 5.1 Etapas do processo de fabricação de aço.....	103
Figura 6.1 Estrutura simplificada das gerações petroquímicas.....	125
Figura 6.2 Esquema da produção de produtos petroquímicos básicos.....	127
Figura 6.3 A cadeia produtiva dos fertilizantes.....	128
Figura 6.4 Participações relativas dos energéticos no consumo de energia da indústria química brasileira em 2013.....	131
Figura 6.5 Consumo energético dos segmentos da indústria química, de 2003 a 2012.....	133
Figura 6.6 Consumo de energia elétrica dos segmentos da indústria química, de 2003 a 2012 .....	134
Figura 7.1 Estrutura geral de um diagnóstico energético e a etapa onde se inserem as contribuições desta dissertação.....	149
Figura 7.2 Contribuição desta dissertação.....	149
Figura 7.3 Módulos do BDMotor e suas opções.....	151
Figura 7.4 Módulos do MotorMaster+ International.....	152
Figura 7.5 Tela inicial de seleção do método, direto ou indireto, de cálculo do rendimento de uma caldeira pelo <i>software</i> CRC.....	152
Figura 7.6 Módulos do modelo Boiler Tune-up.....	154
Figura 7.7 Indicação do tipo de fábrica, na planilha.....	158

Figura 7.8 Seleção, na planilha, dos processos, ou etapas dos processos a serem analisados	158
Figura 7.9 Potenciais de economia de energia térmica e elétrica, máximos e mínimos, que se pode obter para as boas práticas e inovações tecnológicas selecionadas na planilha	159
Figura 7.10 Análise do dimensionamento do motor modelo 609 da WEG para uma corrente medida de 143 A	160
Figura 7.11 Ganho de rendimento, economia de energia e economia com o custo da energia elétrica com a substituição de um motor WEG modelo 609 por um motor WEG modelo 2641, para um fator de carga de 75%, segundo o BDMotor	161
Figura 7.12 Dados e resultados do cálculo do rendimento de uma caldeira pelo software CRC, usando o método direto.	162
Figura 7.13 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos atuais e consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da fábrica integrada de papel e celulose com a adição das boas práticas e inovações tecnológicas listadas na Tabela 7.6.	165
Figura 7.14 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da fábrica de cimento com a incorporação das boas práticas e inovações tecnológicas analisadas.	166
Figura 7.15 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da siderúrgica integrada com a incorporação das boas práticas e inovações tecnológicas analisadas.	168
Figura 7.16 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da planta petroquímica de primeira geração com a incorporação das boas práticas e inovações tecnológicas analisadas.	170

## Lista de Tabelas

Tabela 1.1 Indicadores de eficiência energética nas indústrias brasileira, americana e francesa, de 1980 a 2008.....	23
Tabela 2.1 Rendimentos mínimos obrigatórios, em %, para os motores elétricos de indução trifásicos no Brasil. ....	33
Tabela 2.2 Rendimentos dos motores elétricos de 60 Hz, em %, das categorias IE3 e IE4 .....	34
Tabela 2.3 Redução media de perdas, em %, utilizando-se motores com eficiência “premium” ao invés de motores elétricos de alto rendimento .....	35
Tabela 2.4 Excesso de ar recomendado, por tipo de combustível. ....	45
Tabela 2.5 Efeitos de mudanças na temperatura do ar de combustão nos níveis de excesso de ar para um determinado combustível e queimador .....	45
Tabela 2.6 Medidas que propiciam ganhos de eficiência energética em sistemas de vapor .....	51
Tabela 3.1 Consumos energéticos específicos e consumos específicos de energia elétrica por tipo de papel das melhores práticas industriais, segundo Worrell <i>et al.</i> (2008) .....	80
Tabela 3.2 Consumos energéticos específicos e consumos específicos de energia elétrica por tipo de papel das melhores práticas industriais, segundo a IEA (2007) .....	80
Tabela 3.3 Consumos energéticos específicos e consumos específicos de energia elétrica por tipo de papel das melhores práticas industriais em fábricas integradas e recicladoras, segundo Worrell <i>et al.</i> (2008) .....	81
Tabela 4.1 Principais equipamentos das cimenteiras e seus usos finais da energia. ....	87
Tabela 4.2 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na etapa de preparação das matérias-primas para a fabricação de clínquer .....	90
Tabela 4.3 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na etapa de produção de clínquer.....	93
Tabela 4.4 Consumos específicos de energia térmica, em GJ/t de clínquer, de equipamentos alternativos no processo de produção de clínquer.....	97
Tabela 4.5 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na etapa de moagem final do cimento .....	99
Tabela 4.6 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na preparação de combustíveis sólidos em fábricas de cimento .....	100
Tabela 4.7 Equipamentos de uso geral na indústria que proporcionam ganhos de eficiência energética em fábricas de cimento.....	101
Tabela 5.1 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor de usinas siderúrgicas integradas com produção própria de coque, no Brasil.....	106
Tabela 5.2 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor de usinas siderúrgicas integradas sem produção própria de coque, no Brasil.....	106
Tabela 5.3 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor de usinas siderúrgicas integradas que utilizam carvão vegetal como agente redutor, no Brasil .....	107

Tabela 5.4 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, de usinas siderúrgicas integradas que utilizam coque de mercado como agente redutor, no Brasil .....	108
Tabela 5.5 Consumos específicos típicos de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor das usinas siderúrgicas semi-integradas, no Brasil.....	109
Tabela 6.1 Consumo final, em 10 <sup>3</sup> tep, dos energéticos utilizados na indústria química brasileira de 1970 a 2013.....	130
Tabela 6.2 Petroquímicos básicos – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t, de 2003 a 2012 .....	132
Tabela 6.3 Resinas termoplásticas – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t, de 2003 a 2012 .....	132
Tabela 6.4 Indústria de cloro e álcalis – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t cloro, de 2003 a 2012 .....	132
Tabela 6.5 Cadeia dos fertilizantes – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t, de 2003 a 2012 .....	133
Tabela 6.6 Consumo de energia elétrica e sua desagregação em energia adquirida e autoproduzida, na indústria química brasileira, em 2013 .....	134
Tabela 6.7 Inovações tecnológicas em centrais de produtos petroquímicos básicos que utilizam o craqueamento a vapor .....	139
Tabela 7.1 Exemplo de base de dados dos processos com suas etapas e respectivos SEC's, nas planilhas .....	155
Tabela 7.2 Exemplo de representação, nas planilhas, de boas práticas e novas tecnologias, com estimativas de suas economias de energia.....	157
Tabela 7.3 Dados da caldeira cujo rendimento é calculado pelo modelo CRC.....	162
Tabela 7.4 Produção horária e consumos energéticos específicos de energia elétrica e de energia térmica de uma fábrica integrada de papel e celulose no Brasil em 2010.....	163
Tabela 7.5 Desagregação dos consumos específicos de energia elétrica e de energia térmica pelas etapas dos processos produtivos de uma fábrica de papel e celulose no Brasil em 2010 .....	164
Tabela 7.6 Boas práticas e inovações tecnológicas selecionadas para a aplicação da planilha em uma fábrica integrada de papel e celulose .....	165
Tabela 7.7 Consumos específicos de energia térmica e energia elétrica, em GJ/t clínquer, por etapa do processo de fabricação de uma fábrica de cimento no Brasil .....	165
Tabela 7.8 Produção de aço bruto e de aço laminado e de seus principais insumos, em t, em uma siderúrgica integrada em 2012 .....	167
Tabela 7.9 Consumos energéticos específicos, de combustíveis e de energia elétrica, em GJ/t aço bruto, em algumas etapas do processo de fabricação de uma siderúrgica integrada no Brasil em 2012.....	167
Tabela 7.10 Boas práticas e as economias de energia que elas podem propiciar em uma central petroquímica de produtos básicos no Brasil.....	169

# Sumario

<b>1. Introdução.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1 Eficiência energética na indústria brasileira .....</b>	<b>18</b>
<b>1.2 Objetivos da dissertação .....</b>	<b>24</b>
<b>1.3 Escopo do trabalho .....</b>	<b>25</b>
<b>2. Equipamentos de uso transversal na indústria .....</b>	<b>26</b>
<b>2.1 Motores elétricos.....</b>	<b>27</b>
2.1.1 Componentes e funcionamento de um motor elétrico de indução trifásica .....	27
2.1.2 Potências de entrada e de saída, perdas, rendimento e curvas características.....	29
2.1.3 Medições do nível de carregamento de um motor elétrico.....	30
2.1.4 Evolução tecnológica dos motores elétricos .....	31
2.1.5 Eficiência mínima obrigatória para motores elétricos.....	32
2.1.6 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética em motores elétricos .....	35
<b>2.2 Geradores de vapor .....</b>	<b>37</b>
2.2.1 Niveles de pressão e combustível utilizados nos geradores de vapor .....	37
2.2.2 Tipos de caldeiras .....	38
2.2.3 Controle de caldeira .....	42
<b>2.3 Eficiência de uma caldeira .....</b>	<b>43</b>
<b>2.4 Perdas na caldeira.....</b>	<b>44</b>
2.4.1 Otimização da relação ar-combustível nos queimadores da caldeira .....	44
2.4.2 Perdas energéticas na combustão incompleta.....	46
2.4.3 Perdas energéticas por excesso de ar na combustão completa.....	47
<b>2.5 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética em caldeiras.....</b>	<b>47</b>
<b>3. Indústria de papel e celulose.....</b>	<b>53</b>
<b>3.1 Introdução.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2 A cadeia produtiva de celulose e papel .....</b>	<b>54</b>
3.2.1 Preparação da madeira .....	56
3.2.2 Produção da pasta de celulose .....	56
3.2.3 Branqueamento da pasta de celulose .....	59
3.2.4 Secagem da celulose.....	60
3.2.5 Preparação do estoque de matérias primas para a máquina de papel.....	60
3.2.6 Formação de papel .....	62
3.2.7 Prensagem do papel .....	62
3.2.8 Secagem do papel.....	63
3.2.9 Acabamento do papel.....	64
3.2.10 Recuperação de reagentes químicos .....	65
<b>3.3 Consumo energético da indústria de papel e celulose no Brasil .....</b>	<b>65</b>
<b>3.4 Tecnologias e boas práticas na indústria de papel e celulose .....</b>	<b>67</b>
3.4.1 Tecnologias e procedimentos eficientes de uso geral na indústria com grande potencial de aplicação no setor de papel e celulose .....	67
3.4.2 Boas práticas e novas tecnologias concebidas para as fábricas de papel e celulose .....	69

3.4.3	Consumos energéticos específicos das melhores práticas industriais .....	79
<b>4.</b>	<b><i>Indústria de cimento</i></b> .....	<b>82</b>
4.1	Introdução.....	82
4.2	Processo produtivo .....	82
4.3	Caracterização energética do processo .....	86
4.4	Principais equipamentos e usos finais da energia, por etapa do processo produtivo. 87	
4.5	Consumos energéticos específicos.....	88
4.6	Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na fabricação de cimento 89	
4.6.1	Produção de cimento com menores teores de clínquer e queima de resíduos no forno do clínquer .....	89
4.6.2	Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na etapa de preparação das matérias-primas para a fabricação de clínquer .....	89
4.6.3	Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na etapa de produção de clínquer.....	92
4.6.4	Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na etapa de moagem final do cimento.....	98
4.6.5	Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na preparação de combustível sólidos em fábricas de cimento .....	100
4.6.6	Medidas de uso geral na indústria que possibilitam ganhos de eficiência energética em fábricas de cimento .....	100
<b>5.</b>	<b><i>Indústria siderúrgica</i></b> .....	<b>102</b>
5.1	Introdução.....	102
5.2	Etapa do processo produtivo.....	102
5.3	Consumo de energia .....	104
5.3.1	Consumos energéticos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos na produção de ferro-gusa e aço.....	105
5.4	Boas práticas e equipamentos eficientes utilizados nas cadeias produtivas tradicionais do ferro-gusa e aço.....	110
5.4.1	Coqueria, ou produção de carvão vegetal.....	110
5.4.2	Sinterização .....	111
5.4.3	Redução em alto-forno.....	111
5.4.4	Aciaria .....	113
5.4.5	Laminação.....	114
5.5	Rotas tecnológicas alternativas para a produção de ferro-gusa e aço.....	115
5.6	Desempenho energético das melhores práticas industriais .....	118
<b>6.</b>	<b><i>Indústria química</i></b> .....	<b>121</b>
6.1	Introdução.....	121
6.2	A indústria petroquímica.....	124

6.3	Produtos petroquímicos básicos.....	126
6.4	A cadeia de produção de produtos intermediários para fertilizantes e a amônia.	128
6.5	Consumo de energia .....	129
6.6	Consumos energéticos e consumos energéticos específicos dos principais segmentos energo-intensivos da indústria química no Brasil .....	130
6.7	Autoprodução de energia elétrica .....	134
6.8	Boas práticas e equipamentos eficientes de uso transversal na indústria química	135
6.9	Inovações que podem reduzir o consumo energético específico de alguns segmentos da indústria química .....	138
6.9.1	Centrais petroquímica de 1ª geração.....	138
6.9.2	Resinas termoplásticas .....	143
6.9.3	Cloro e álcalis.....	143
6.10	Inovações que podem reduzir o consumo energético específico de alguns segmentos da indústria química .....	145
<b>7.</b>	<b>Modelagem e aplicações .....</b>	<b>148</b>
7.1	Utilização dos modelos e planilhas em um diagnóstico energético .....	148
7.2	Modelo de avaliação da eficiência energética de geradores de vapor e sistemas motrizes utilizando motores elétricos.....	150
7.2.1	Sistemas com motores elétricos.....	150
7.3	Planilha para avaliar potenciais ganhos de eficiência energética com boas práticas e novas tecnologias específicas para os processos de fabricação de segmentos industriais	154
7.3.1	Exemplo de utilização da planilha em uma instalação que fabrica papel e/ou celulose....	157
7.4	Exemplificação do uso de modelos de análise de medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética em sistemas de geração de vapor e sistemas motrizes utilizando motores elétricos.....	159
7.4.1	Modelagem de ganho de eficiência energética em motor elétrico .....	159
7.4.2	Cálculo do rendimento de um gerador de vapor .....	161
7.5	Exemplificação do uso das planilhas para simular ganhos de eficiência energética com boas práticas e inovações tecnológicas nos quatro segmentos industriais analisados na dissertação.....	163
7.5.1	Fabrica de papel e celulose.....	163
7.5.1	Fabricação de cimento.....	164
7.5.2	Usina siderúrgica .....	167
7.5.3	Planta química .....	168
<b>8.</b>	<b>Conclusões e recomendações .....</b>	<b>171</b>
8.1	Conclusões .....	171
8.2	Recomendações.....	172
	<b>Referências .....</b>	<b>173</b>



# 1. Introdução

## 1.1 Eficiência energética na indústria brasileira

Em momentos de crise de abastecimento de energia pode ser necessário adotar medidas de economia de energia que afetem a produção do país e o padrão de vida da sociedade. Logo, é importante se ter práticas, sempre, que propiciem ganhos de eficiência na utilização dos recursos energéticos disponíveis.

A preocupação em se buscar maior eficiência no uso da energia entrou na agenda mundial a partir dos choques no preço do petróleo dos anos 1970, quando a sociedade constatou que o uso das reservas de recursos fósseis teria custos crescentes e que um mesmo serviço poderia ser obtido com menor gasto de energia e, conseqüentemente, com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais. Mais recentemente, a busca pela eficiência energética ganhou uma nova motivação: a preocupação com a questão das mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global do planeta, aquecimento este atribuído, em grande medida, à produção e ao consumo de energia.

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2013) afirma que a conservação de energia pode contribuir com quase 50% na mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Segundo a Agência, a estratégia de atendimento à demanda futura de energia deve considerar ações sob o ponto de vista tanto da expansão da oferta quanto da redução da demanda específica de energia para a realização dos serviços energéticos necessários para a produção de bens e serviços, ou para proporcionar mobilidade e/ou conforto aos consumidores.

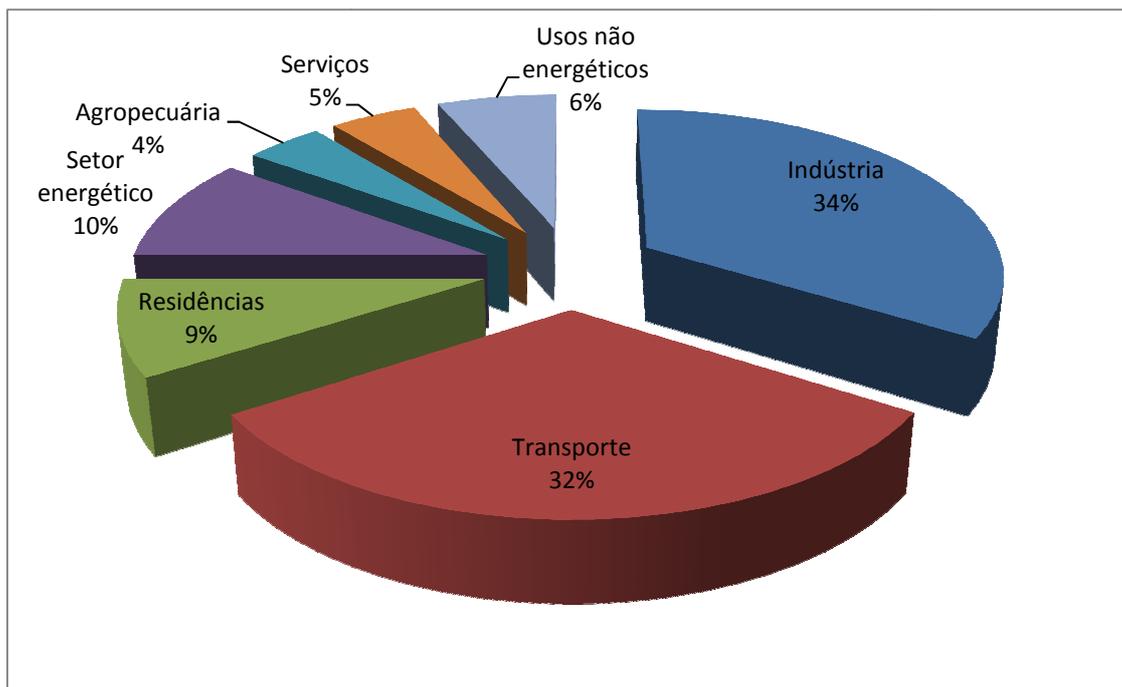
Os potenciais de conservação de energia podem ser classificados como potenciais técnicos, econômicos e de mercado. Os primeiros são definidos em relação a uma tecnologia de referencia, que é, em geral, a melhor tecnologia disponível no mercado (*Best Available Technology – BAT*). Os potenciais econômicos são resultados de avaliações econômicas, além de comparações entre as tecnologias mais utilizadas e as mais eficientes. Finalmente, os potenciais de mercado refletem, além dos fatores já

mencionados, também a influência de barreiras de vários tipos que limitam a utilização de tecnologias eficientes, do ponto de vista de consumo energético, mesmo quando elas são economicamente atrativas. Consequentemente, o potencial de mercado, em um dado setor da economia, é menor do que o potencial econômico e, este, é menor do que o potencial técnico, desde que as metodologias utilizadas em sua determinação sejam compatíveis (BAJAY, 2009).

O consumo energético pode ocorrer de maneira mais eficiente através de um progresso autônomo, ou seja, por iniciativa do mercado e sem interferência de políticas públicas, e/ou através de um progresso induzido, devido a estímulos criados por ações de governo (MME, 2012). De uma maneira geral, o incremento dos níveis de eficiência energética na indústria dá-se por uma série de ações de caráter técnico.

Os três principais setores da economia brasileira são o de serviços, agropecuário e industrial, este último com um aporte ao Produto Interno Bruto (PIB) do País de quase 18% em 2011 (EPE/MME, 2012). O setor industrial envolve uma série de atividades onde a matéria prima é transformada através de vários processos produtivos. Constituem segmentos da indústria: a siderurgia, a indústria mecânica, a indústria química, a indústria têxtil, a indústria de papel e celulose, entre outros.

Conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o setor industrial foi responsável por 34% do consumo energético total no Brasil em 2013, seguindo pelo setor de transporte, com 32% (EPE/MME, 2014).



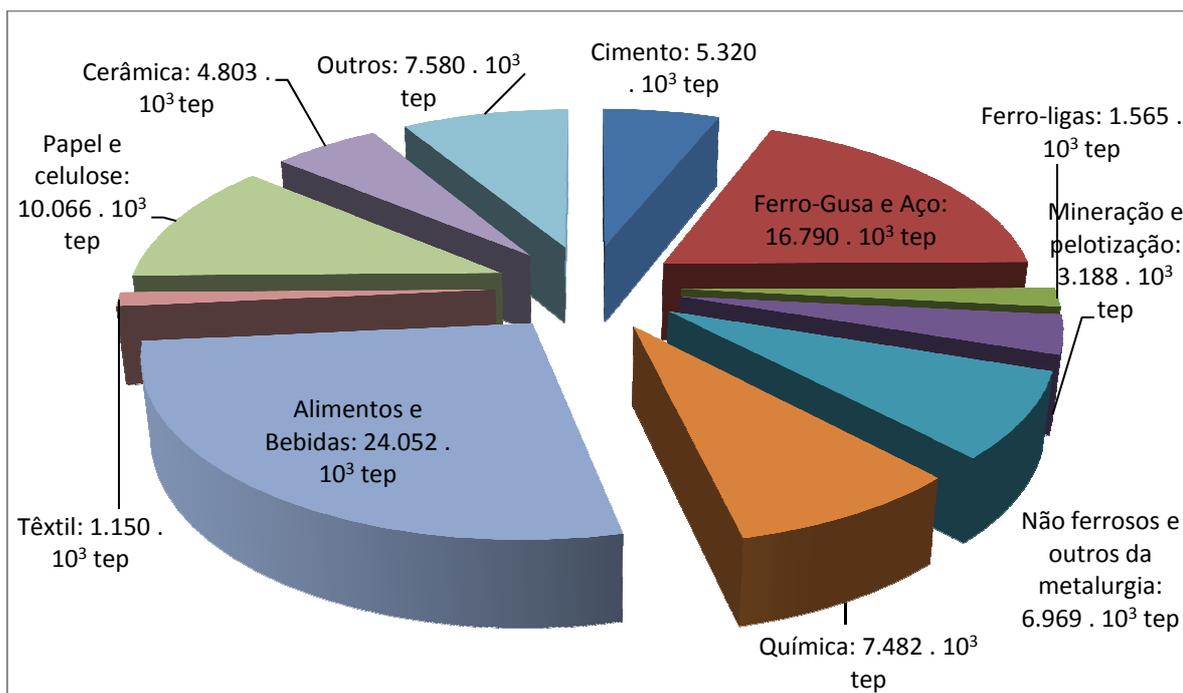
Fonte: elaboração própria, a partir de dados de EPE/MME (2014).

**Figura 1.1 Distribuição setorial do consumo de energia no Brasil em 2013, em %.**

A Figura 1.2 apresenta os consumos finais de energia, em toneladas equivalentes de petróleo (tep), em 2013, dos diversos segmentos que compõem o setor industrial brasileiro. O consumo final de energia do setor industrial como um todo naquele ano foi de  $88.295 \cdot 10^3$  tep. Os segmentos maiores consumidores foram os de alimentos e bebidas, ferro-gusa e aço e indústria química.

A busca por melhorias nos níveis de eficiência energética na indústria pode focar em equipamentos, processos ou fábricas inteiras, e/ou, ainda, envolver a implantação de técnicas de gerenciamento de atividades energéticas (TANAKA, 2011).

O Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030) estabelece uma meta de economia de energia elétrica de 10%, em relação às projeções deste energético para 2030 (EPE/MME, 2007). Metade desta economia adviria de ações induzidas por novas políticas governamentais. O Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), lançado pelo Ministério de Minas e Energia em 2011, apresenta uma série de diretrizes e ações que poderiam viabilizar esta meta, mas poucas delas foram implementadas até hoje, sobretudo no setor industrial.



Fonte: elaboração própria, a partir de dados de EPE/MME (2014).

**Figura 1.2 Consumo final de energia dos segmentos industriais no Brasil em 2013, em 10<sup>3</sup> tep.**

O relatório “Demanda de Energia 2050”, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2014, projeta um consumo final de energia do setor industrial brasileiro de 259,4 milhões de tep em 2050. Esta projeção contabiliza uma redução de 19% neste consumo por conta de ganhos de eficiência energética.

O governo federal possui três programas que fomentam ganhos de eficiência energética na indústria e em outros setores da economia brasileira: o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), através do subprograma Procel Indústria, os Programas de Eficiência Energética (PEEs) das concessionárias distribuidoras de energia elétrica, regulados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e o Programa Proesco, que conta com financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para empresas de serviços de conservação de energia (ESCOs). No passado, o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet), gerenciado pela Petrobras, tinha um subprograma que financiava medidas de eficiência energética nas refinarias de petróleo da empresa; atualmente a Petrobras financia diretamente estas ações, sem passar pelo Conpet.

A força motriz é o principal uso final da energia elétrica no setor industrial com quase 68% da energia elétrica usada (EPE/MME, 2007). Frente a este fato, foi concebido, no programa Procel, o Projeto de Otimização Energética de Sistemas Motrizes, que atua basicamente em duas vertentes: a primeira visa promover ações para aumentar a utilização de motores de alto rendimento pelo mercado; a segunda visa minimizar as perdas nos sistemas motrizes já instalados, promovendo ações junto às fábricas, de forma a capacitar suas equipes técnicas na otimização desses sistemas. Este projeto tornou-se a base para a estruturação do subprograma Procel Indústria, que atua por meio de Associações e Federações da Indústria e prioriza os segmentos mais significativos em termos de oportunidades técnicas de economia de energia.

Através da linha de crédito do Proesco, o BNDES financia, diretamente ou por meio de seus agentes, até 80% do valor de projetos de eficiência energética, incluindo estudos, projetos executivos, obras, instalações, a compra de máquinas e equipamentos novos, nacionais e importados, serviços técnicos especializados e sistemas de informação, monitoramento e controle. O programa pode chegar a financiar até 100% do valor do projeto, se for aplicado em municípios de baixa renda localizados nas regiões Norte e Nordeste.

A Lei de Eficiência Energética e os programas de conservação de energia do governo federal, no entanto, não tem conseguido melhorar os principais indicadores de eficiência energética, tais como intensidades energéticas e consumos energéticos específicos, da indústria brasileira e, sobretudo, de seus segmentos energo-intensivos. Isto pode ser constatado através da análise das séries históricas disponíveis destes indicadores no Balanço Energético Nacional, assim como através de comparações internacionais destes indicadores na base de dados Enerdata, que contempla um grande número de países desenvolvidos e em desenvolvimento. **A Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os valores de alguns dos indicadores da base Enerdata em 1980, 1990, 2000 e 2008 no Brasil, EUA e França; pode-se observar, através deles, o baixo desempenho energético da indústria brasileira ao longo deste período, vis-à-vis as indústrias americana e francesa.

**Tabela 1.1 Indicadores de eficiência energética nas indústrias brasileira, americana e francesa, de 1980 a 2008.**

<b>Brasil</b>					
	<i>Unidades</i>	<i>1980</i>	<i>1990</i>	<i>2000</i>	<i>2008</i>
Intensidade energética da indústria (em relação ao seu valor adicionado (VA)) (em ppc <sup>1</sup> )	kep/\$05p	0,14	0,178	0,182	0,188
Intensidade energética da indústria de transformação (em ppc)	kep/\$05p	0,211	0,269	0,283	0,291
Intensidade energética da indústria química (em ppc)	kep/\$05p	n.d.	n.d.	0,247	0,253
Consumo energético específico na produção de aço	tep/t	0,59	0,63	0,55	0,53
Participação de processos elétricos na produção de aço	%	25,9	23,8	20,6	23,5
Participação da cogeração industrial na geração total de energia elétrica no País	%	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Intensidade de emissões de CO <sub>2</sub> na indústria (em relação ao seu VA) (em ppc)	kCO <sub>2</sub> /\$05p	n.d.	0,223	0,278	0,243
Emissões per capita de CO <sub>2</sub> na indústria	tCO <sub>2</sub> /cap	n.d.	0,36	0,52	0,52
<b>Estados Unidos</b>					
Intensidade energética da indústria (em relação ao seu valor adicionado (VA)) (em ppc)	kep/\$05p	0,271	0,163	0,136	0,122
Intensidade energética da indústria de transformação (em ppc)	kep/\$05p	0,418	0,252	0,197	0,18
Intensidade energética da indústria química (em ppc)	kep/\$05p	0,506	0,421	0,535	0,503
Consumo energético específico na produção de aço	tep/t	0,52	0,43	0,35	0,31
Participação de processos elétricos na produção de aço	%	27,9	37,3	47	58,1
Participação da cogeração industrial na geração total de energia elétrica no País	%	0	5,9	4,3	3,4
Intensidade de emissões de CO <sub>2</sub> na indústria (em relação ao seu VA) (em ppc)	kCO <sub>2</sub> /\$05p	n.d.	0,394	0,294	0,253
Emissões per capita de CO <sub>2</sub> na indústria	tCO <sub>2</sub> /cap	n.d.	2,9	2,58	1,95
<b>França</b>					
Intensidade energética da indústria (em relação ao seu valor adicionado (VA)) (em ppc)	kep/\$05p	0,168	0,113	0,105	0,079
Intensidade energética da indústria de transformação (em ppc)	kep/\$05p	0,226	0,155	0,145	0,114
Intensidade energética da indústria química (em ppc)	kep/\$05p	0,731	0,361	0,238	0,151
Consumo energético específico na produção de aço	tep/t	0,5	0,43	0,32	0,36
Participação de processos elétricos na produção de aço	%	15,9	28,4	40,3	40,3
Participação da cogeração industrial na geração total de energia elétrica no País	%	0	0,3	1,9	2,2
Intensidade de emissões de CO <sub>2</sub> na indústria (em relação ao seu VA) (em ppc)	kCO <sub>2</sub> /\$05p	n.d.	0,296	0,242	0,199
Emissões per capita de CO <sub>2</sub> na indústria	tCO <sub>2</sub> /cap	n.d.	1,63	1,45	1,26

Fonte: Enerdata, 2010.

Esta dissertação faz parte de um esforço de longo prazo do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE) da Unicamp e do Curso de Pós-Graduação em Planejamento de Sistemas Energéticos da FEM/Unicamp, iniciado na década de 1990, na elaboração de contribuições acadêmicas, de caráter prático, nas áreas de formulação

<sup>1</sup> PPC: Paridade do poder de compra.

de políticas públicas, planejamento e regulação de atividades visando ganhos de eficiência energética, sobretudo na indústria.

A participação em reuniões de trabalho e visitas técnicas no projeto “Estudo de prospecção de potencial para a eficiência energética – Eficind”, executado pelo NIPE de 2013 a 2015, propiciaram conhecimentos e informação importantes para a realização desta dissertação, que versa sobre os possíveis impactos, em termos de consumo energético, de boas práticas e inovações tecnológicas em alguns segmentos energo-intensivos da indústria brasileira.

## **1.2 Objetivos da dissertação**

Inovações tecnológicas têm propiciado benefícios econômicos, ambientais e sociais desde os primórdios da humanidade, sobretudo após a primeira revolução industrial.

O objetivo geral desta dissertação é prover informações e ferramentas metodológicas para a realização de pré-diagnósticos energéticos em alguns segmentos industriais energo-intensivos, envolvendo boas práticas e inovações tecnológicas tanto de tecnologias de uso geral na indústria como de processos específicos dos ramos industriais selecionados.

As tecnologias de uso geral na indústria analisadas neste trabalho são os motores elétricos e as caldeiras, enquanto que os segmentos industriais energo-intensivos abordados aqui são a indústria química, a fabricação de cimento, a indústria de papel e celulose e a indústria de ferro-gusa e aço.

Um dos objetivos específicos da dissertação é estimar, sempre que os dados coletados permitirem, os possíveis impactos das boas práticas e inovações tecnológicas no consumo energético setorial. Dispondo-se de dados de consumos energéticos específicos médios para os segmentos analisados e informações sobre os consumos energéticos específicos associados às boas práticas e inovações mapeadas, é possível se calcular o potencial técnico de conservação de energia propiciado pela adoção de uma ou mais destas práticas, ou inovações tecnológicas.

Um segundo objetivo específico, relacionado com o primeiro, é a elaboração de planilhas de cálculo e a indicação de softwares, no caso dos motores elétricos e caldeiras, que permitem a realização de estimativas das economias de energia

supracitadas, seja para o segmento industrial como um todo, no país ou em uma região, seja para uma fábrica deste segmento, em estudos de pré-diagnóstico energético.

### **1.3 Escopo do trabalho**

Além deste capítulo introdutório, a dissertação é composta por mais sete capítulos.

O capítulo 2 aborda as tecnologias de uso geral na indústria analisadas neste trabalho: os motores elétricos e os geradores de vapor, respectivamente.

O mapeamento das boas práticas e inovações tecnológicas nas indústrias de papel e celulose, cimento, ferro-gusa e aço e indústria química é apresentado nos capítulos 3 a 6, respectivamente.

No capítulo 7 se apresenta e se exemplifica o uso das planilhas de cálculo elaboradas na dissertação para estudos de pré-diagnóstico energético nos segmentos industriais analisados nos capítulos de 3 a 6 e se indica e se ilustra a utilização de *softwares* que permitem a avaliação do desempenho energético de motores elétricos e geradores de vapor.

As conclusões e recomendações da dissertação estão no capítulo 8.

## 2. Equipamentos de uso transversal na indústria

Os motores elétricos e os geradores de vapor são os equipamentos que mais consomem energia elétrica e combustíveis na indústria, respectivamente. Eles são encontrados em praticamente todos os ramos industriais. A Agência Internacional de Energia – AIE estima que 60% da eletricidade consumida na indústria é em sistemas envolvendo motores, enquanto que os geradores de vapor são responsáveis por cerca de 30% do consumo industrial final de energia. Estes dois tipos de equipamentos respondem por 41% do consumo energético total da indústria (Napp *et al.*, 2014).

Estes equipamentos propiciam, em geral, grandes oportunidades de economias de energia. Estima-se que os ganhos potenciais de eficiência energética situam-se tipicamente na faixa de 10 a 15% nos geradores de vapor e de 20 a 25% nos motores elétricos. Uma das aplicações importantes dos geradores de vapor na indústria é em sistemas de cogeração, que geram cerca de 10% do total da eletricidade produzida no mundo (IEA, 2009).

A substituição de motores superdimensionados (fatores de carga inferiores a 50%) por motores que operem, em média, com carregamentos próximos à sua potência nominal e a substituição de motores de baixa eficiência por motores de elevada eficiência estão entre as principais medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética em motores elétricos. Desde 2001, a Lei nº 10.295, conhecida como Lei da Eficiência Energética, impõe eficiências energéticas mínimas obrigatórias na venda de motores elétricos no Brasil. Por conta desta lei, a partir de 2009 todos os motores elétricos fabricados, ou comercializados no País são de alto rendimento.

Os geradores de vapor de concepção moderna possuem elevadas eficiências térmicas nominais<sup>2</sup>. Por exemplo, uma empresa líder no mercado brasileiro de caldeiras lançou uma linha de caldeiras flamotubulares compactas, de traseira úmida e reduzido número de tubos, que geram de 2 a 34 t/h de vapor, com pressão de até 21 bar e cuja eficiência nominal é de 91%, segundo a norma DIN. Porém, com a instalação de um economizador, a eficiência pode chegar a 95%.

---

<sup>2</sup> Superiores a 90% no caso de caldeiras industriais e superiores a 95% para caldeiras de usinas termoeletricas.

Neste capítulo são feitas recomendações de boas práticas e se apresentam inovações que propiciam ganhos de eficiência energética em motores elétricos e geradores de vapor.

## 2.1 Motores elétricos

Estima-se que motores elétricos sejam responsáveis por 68% da eletricidade consumida na indústria brasileira. Apesar dos avanços tecnológicos verificados no projeto de motores elétricos, ainda há muitos motores velhos, ineficientes e/ou mal dimensionados operando na indústria nacional (Bajay e Amano, 2013).

### 2.1.1 Componentes e funcionamento de um motor elétrico de indução trifásica

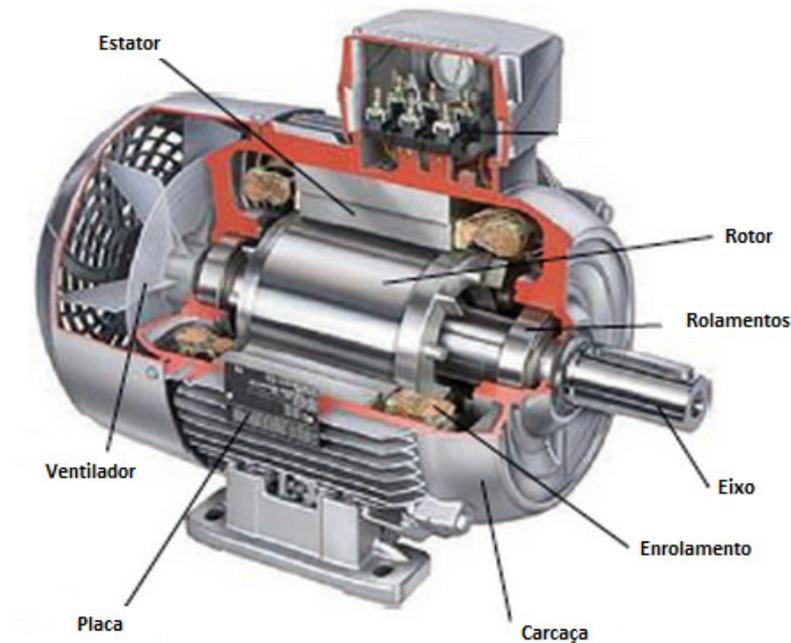
Há vários tipos de motores elétricos. O mais utilizado na indústria é o motor elétrico de indução trifásico.

Este motor é composto por armadura do estator e rotor (vide **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A carcaça do motor, um núcleo laminado e seus enrolamentos constituem a armadura do estator, que recebe a corrente elétrica trifásica a ser transformada em energia mecânica no eixo do rotor. O rotor também possui um núcleo, além de um eixo, rolamentos e ventilador. O núcleo do rotor é formado por um cilindro de aço laminado e seu enrolamento. Este último é composto por condutores de cobre ou alumínio formando hastes inclinadas em relação ao eixo e interligadas por anéis nas extremidades.

O campo nos enrolamentos do estator gira a uma rotação denominada síncrona e produz um fluxo magnético que corta as barras do rotor, induzindo nelas uma corrente secundária. A interação dessas corrente secundárias com o campo girante no enrolamento do estator produz o conjugado do motor.

A rotação síncrona,  $n_s$ , em rpm, depende da frequência da tensão de excitação primária, no estator, ( $f$ ), e do número de polos do motor, ( $NP$ ), conforme indicado na Equação (2.1):

$$n_s = \frac{120f}{NP} \quad (2.1)$$



Fonte: <http://maquinasjrotero.blogspot.com.co/>

**Figura 2.1 Componentes de um motor elétrico de indução**

A diferença entre a rotação do campo girante e a rotação do rotor,  $n$ , como uma porcentagem da rotação síncrona é denominada escorregamento,  $s$ :

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Existem várias classes de isolamento de motores elétricos, designadas pelas letras A, E, B, F e H, que suportam, nesta sequência, temperaturas mais elevadas de operação.

Os motores elétricos também são diferenciados pelo grau de proteção mecânica de seu invólucro. Esta classificação é designada pelas letras IP seguidas de dois dígitos. O primeiro deles indica o nível de proteção contra a penetração de corpos sólidos, enquanto que o segundo dígito mostra o grau de proteção em relação à penetração de líquidos.

### 2.1.2 Potências de entrada e de saída, perdas, rendimento e curvas características.

A potência, elétrica, de entrada do motor,  $P_e$ , é calculada através da Eq. (2.3):

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \quad (2.3)$$

onde:

$V$  = tensão de alimentação do motor;

$I$  = corrente resultante; e

$\cos\phi$  = fator de potência.

A potência, mecânica, de saída do motor,  $P_s$ , é dada pela diferença entre a potência de entrada e a potência dissipada em perdas no motor,  $P_p$ :

$$P_s = P_e - P_p \quad (2.4)$$

No motor há perdas no ferro e nos condutores, além de perdas por atrito mecânico e perdas associadas ao fluxo de ventilação. As causas das perdas no ferro são a histerese e as correntes parasitas. Ocorrem perdas nos condutores do estator, que são proporcionais ao quadrado da corrente de alimentação, e perdas na gaiola do rotor.

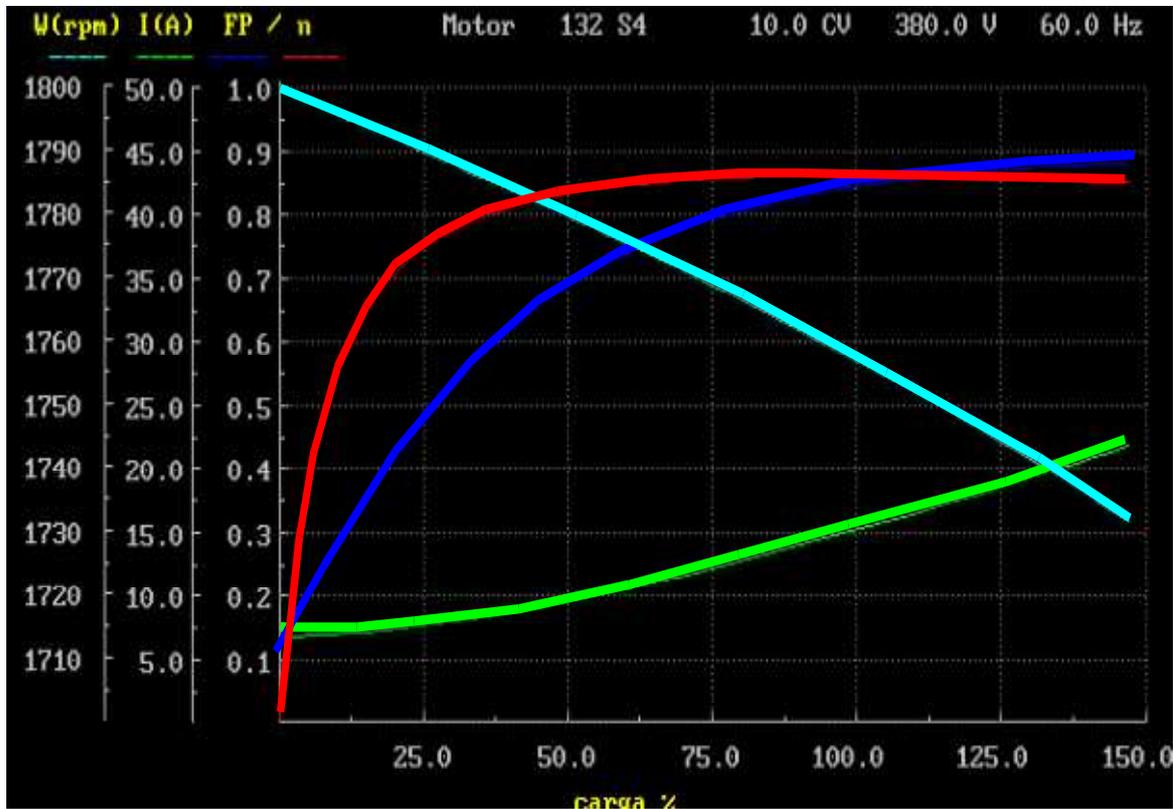
As perdas em um motor elétrico de corrente alternada aumentam rapidamente com a diminuição do seu fator de potência.

O rendimento do motor é definido como o quociente entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada:

$$\eta = \frac{P_s}{P_e} \quad (2.5)$$

**A Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra as curvas características de um motor elétrico de indução trifásico típico. Estas curvas representam as variações da rotação, corrente, fator de potência e rendimento, com o carregamento do motor. Nesta

figura, o rendimento com um carregamento acima de 75% é praticamente constante, enquanto que, com um carregamento abaixo de 50%, o fator de potência e o rendimento caem significativamente.



Fonte: Bajay *et al.*, 2015a

Figura 2.2 Curvas características de um motor elétrico de indução trifásico

### 2.1.3 Medições do nível de carregamento de um motor elétrico

A rotação do motor diminui de uma forma não linear com o seu carregamento. Linearizando esta relação, tem-se que:

$$\frac{P}{P_n} = \frac{n_s - n}{n_s - n_n} = \frac{s}{s_n} \quad (2.6)$$

onde:

$P$  = potência de saída, ou carregamento do motor;

$P_n$  = potência nominal do motor;

$n$  = rotação quando o motor fornece a potência  $P$ ;

$n_s$  = rotação síncrona do motor (aproximadamente igual à rotação do motor sem carga);

$n_n$  = rotação nominal do motor;

$s$  = escorregamento do motor fornecendo a potência P; e

$s_n$  = escorregamento nominal do rotor.

Logo, medindo-se a rotação  $n$ , a Eq. (2.6) fornece a potência de saída P do motor.

A potência produzida por um motor elétrico aumenta com a corrente utilizada em sua alimentação. Esta relação não é linear. A sua linearização, junto com a hipótese de que o motor operando a vazio, ou seja, sem carga, consome 30% da sua corrente nominal propiciam um segundo método aproximado para se calcular o carregamento do motor. A Eq. (2.7) propicia este cálculo:

$$\frac{P}{P_n} = \frac{10}{7} \left( \frac{i}{i_n} - 0,3 \right) \quad (2.7)$$

onde:

$i$  = corrente que alimenta o motor quando este fornece a potência P; e

$i_n$  = corrente nominal de alimentação do motor.

Deve-se usar a maior das correntes das três fases, na Eq. (2.7), para o valor de  $i$ .

Quando a carga do motor for muito variável, ou intermitente, deve-se utilizar um analisador de energia, que permite o registro, para posterior análise, de tensões e correntes de cada fase, potência e fator de potência ao longo de um determinado período de tempo.

#### **2.1.4 Evolução tecnológica dos motores elétricos**

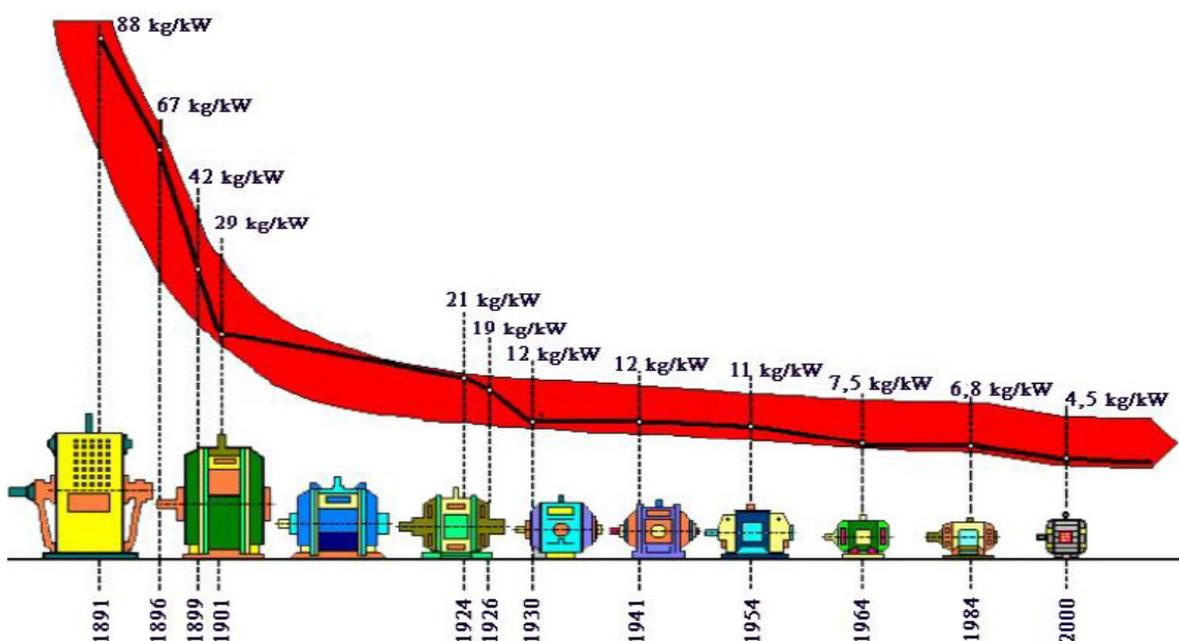
O modo de operar dos motores elétricos de indução do tipo gaiola de esquilo<sup>3</sup> é basicamente o mesmo desde a sua invenção. Seu desenvolvimento tecnológico tem se centralizado em melhorias nos materiais utilizados, tais como os isolantes e as placas magnéticas, no projeto e nos processos de manufatura, que tem propiciado grandes

---

<sup>3</sup> É o tipo de motor elétrico de indução mais empregado no mundo.

impactos em sua eficiência, nível de ruídos, peso e volume específico. Conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, o peso específico dos motores elétricos diminuiu de 88 kg/kW em 1891, para 29 kg/kW em 1901, 12 kg/kW em 1930, 6,8 kg/kW em 1984 e 4,5 kg/kW em 2000 (Bajay e Amano, 2013).

As eficiências mais elevadas de motores elétricos são atualmente conseguidas com o uso de ímãs permanentes de terras raras. Estes motores conseguem ser mais eficientes do que os motores de indução do tipo gaiola de esquilo por reduzirem significativamente as perdas por efeito Joule. Algumas categorias destes motores mais eficientes já vêm associadas com inversores de frequência (Petro, 2013; Bajay e Amano, 2013).



Fonte: Bajay *et al.*, 2015a

Figura 2.3 Evolução dos motores elétricos por kW de capacidade instalada.

### 2.1.5 Eficiência mínima obrigatória para motores elétricos

No Brasil, a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, delega ao governo federal a prerrogativa de estabelecer níveis máximos de consumo energético específico, ou eficiências mínimas de equipamentos manufaturados ou vendidos no Brasil. O Decreto no 4059, de 19 de dezembro de 2001, regulamentou esta lei e criou o Comitê Gestor de

Indicadores de Eficiência Energética (CGIEE). Os níveis máximos de consumo energético específico, ou eficiências energéticas mínimas de máquinas e equipamentos produzidos ou vendidos no País devem ser estabelecidos com base em análises de viabilidade técnica e econômica, levando em conta a vida útil das máquinas e equipamentos.

Em 2001, o primeiro equipamento selecionado pelo CGIEE para ser objeto de uma regulação específica foi o motor elétrico de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, devido à sua elevada participação na demanda de eletricidade no País. De 2001 a 2009, existiam no País duas categorias deste tipo de motor elétrico: os motores padrões, que tinham que ter uma eficiência superior a um valor mínimo estabelecido pelo CGIEE, e os motores de alto rendimento, com eficiências superiores aos dos motores padrões. Em 2005 o CGIEE adotou eficiências mínimas mandatórias iguais aos dos motores de alto rendimento, indicados na Tabela 2.1 (categoria IE2 da norma IEC<sup>4</sup> 60034-30), que passaram a vigorar a partir de 2009. A partir daquele ano não se utiliza mais a classificação supracitada, mas fabricantes de motores, como a WEG, por exemplo, continuam a oferecer, no mercado, motores com rendimentos superiores (categorias IE3 e IE4 das normas IEC 60034-30 e IEC 60034-31 – vide Tabela 2.2) aos dos antes denominados motores de alto rendimento (Bajay e Amano, 2013). No futuro, novos padrões mínimos de eficiência, mais rigorosos do que os atuais, como os dos motores das categorias IE3 e IE4, devem ser estabelecidos pelo CGIEE, seguindo as tendências verificadas na legislação de outros países.

**Tabela 2.1 Rendimentos mínimos obrigatórios, em %, para os motores elétricos de indução trifásicos no Brasil.**

CV	kW	Polos			
		2	4	6	8
1,0	0,75	80,0	80,5	80,0	70,0
1,5	1,1	82,5	81,5	77,0	77,0
2,0	1,5	83,5	84,0	83,0	82,5
3,0	2,2	85,0	85,0	83,0	84,0
4,0	3,0	85,0	86,0	85,0	84,5
5,0	3,7	87,5	87,5	87,5	85,5
6,0	4,5	88,0	88,5	87,5	85,5
7,5	5,5	88,5	89,5	88,0	85,5
10	7,5	89,5	89,5	88,5	88,5
12,5	9,2	89,5	90,0	88,5	88,5
15	11	90,2	91,0	90,2	88,5

<sup>4</sup> *International Electrotechnical Commission.*

20	15	90,2	91,0	90,2	89,5
25	18,5	91,0	92,4	91,7	89,5
30	22	91,0	92,4	91,7	91,0
40	30	91,7	93,0	93,0	91,0
50	37	92,4	93,0	93,0	91,7
60	45	93,0	93,6	93,6	91,7
75	55	93,0	94,1	93,6	93,0
100	75	93,6	94,5	94,1	93,0
125	90	94,5	94,5	94,1	93,6
150	110	94,5	95,0	95,0	93,6
175	132	94,7	95,0	95,0	
200	150	95,0	95,0	95,0	
250	185	95,4	95,0		

**Tabela 2.2 Rendimentos dos motores elétricos de 60 Hz, em %, das categorias IE3 e IE4**

Potência nominal (kW)	IE3 – Premium Efficiency			IE4 – Super – Premium – Efficiency		
	Número de polos			Número de polos		
	2	4	6	2	4	6
0,75	87,0	85,5	82,5	-	85,9	85,4
1,1	84,0	86,5	87,5	86,1	87,6	87,2
1,5	85,5	86,5	88,5	87,0	88,4	88,0
2,2	86,5	89,5	89,5	88,5	89,8	89,5
3,7	88,5	89,5	89,5	89,9	91,1	90,8
5,5	89,5	91,7	91,0	91,1	92,2	92,0
7,5	90,2	91,7	91,0	91,6	92,7	92,5
11	90,0	92,4	91,7	92,6	93,6	93,4
15	91,0	93,0	91,7	93,0	94,1	93,8
18,5	91,7	93,6	93,0	93,4	94,4	94,2
22	91,7	93,6	93,0	93,8	94,8	94,5
30	92,4	94,1	94,1	94,1	95,1	94,8
37	93,0	94,5	94,1	94,4	95,4	95,1
45	93,6	95,0	94,5	94,7	95,6	95,4
55	93,6	94,4	94,5	95,0	95,9	95,6
75	94,1	95,4	95,0	95,2	96,1	95,8
90	95,0	95,4	95,0	95,4	96,3	96,0
110	95,0	95,8	95,8	95,6	96,5	96,1
150	95,4	96,2	95,8	95,7	96,6	96,2
185	95,8	96,2	95,8	95,9	96,7	96,3
220	95,8	96,2	95,8	96,0	96,8	96,4
250	95,8	96,2	95,8	96,0	96,8	96,4
300	95,8	96,2	95,8	96,1	96,9	96,4
335	95,8	96,2	95,8	96,2	97,0	96,4
375	95,8	96,2	95,8	96,2	97,0	96,4

Fontes: (IEC, 2008; IEC, 2009)

A Tabela 2.3 apresenta a redução média de perdas, por faixa de potência nominal, ao se utilizar motores da categoria “*premium*”, ao invés dos motores de alto rendimento.

**Tabela 2.3 Redução média de perdas, em %, utilizando-se motores com eficiência “*premium*” ao invés de motores elétricos de alto rendimento**

<i>Potência nominal (CV)</i>	<i>Redução de perdas (%)</i>
<i>1 – 10</i>	<i>22,31</i>
<i>12,5 – 50</i>	<i>17,75</i>
<i>60 – 100</i>	<i>20,09</i>
<i>125 – 250</i>	<i>20,09</i>

Fonte: Andrade *et al.*,(2009)

### **2.1.6 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética em motores elétricos**

Há uma diminuição do rendimento tanto em motores subdimensionados, como em motores superdimensionados. Todo motor elétrico possui um fator de sobrecarga, que representa o percentual de sobrecarga que o motor pode suportar, em relação à sua potência nominal; este fator geralmente consta nas especificações técnicas do fabricante. O motor só deve operar ocasionalmente dentro da faixa de potência definida pelo seu fator de sobrecarga. Os motores subdimensionados operam com sobrecarga, o que os aquece em demasia, diminuindo a sua vida útil. Por outro lado, os motores superdimensionados operam com rendimentos eventualmente bem abaixo de seu rendimento máximo, elevando o seu consumo de energia.

É comum se encontrar motores elétricos superdimensionados na indústria, por conta da utilização de fatores de segurança muito elevados que foram aplicados na época da seleção dos motores; isto ocorre, em geral, pelo excesso de zelo em se evitar qualquer risco de sobrecarga e, eventual, “queima” do motor, ou, então, pela expectativa de aumentos futuros do carregamento, que acabam não se concretizando.

Baixos rendimentos de motores superdimensionados provavelmente representam a principal fonte de perdas em motores elétricos que se tem encontrado na indústria brasileira.

Martin (2015) recomenda que se substituam motores elétricos que estejam operando com fatores de carga inferiores a 40% por motores de menor capacidade nominal.

Outra fonte importante de perdas na indústria nacional é a utilização de motores velhos e/ou rebobinados, de baixo rendimento. A sua troca por motores novos de alto rendimento pode propiciar economias substanciais de energia e de custo na fatura de eletricidade.

Variações na tensão de alimentação, acima ou abaixo da tensão nominal, diminuem o rendimento de motores elétricos. Logo, elas devem ser evitadas, através do uso de controladores de tensão.

Não deve haver, também, desbalanço entre os valores de tensão nas três fases do motor, nem distorções harmônicas (Martin, 2015).

Como a corrente elétrica demandada por um motor durante a sua partida pode ser até sete vezes superior à sua corrente nominal, é importante, quando possível, evitar partidas com carga, ou, então, utilizar uma chave de partida do tipo soft-starter. Este tipo de dispositivo reduz as perdas magnéticas, mantém o fator de potência em níveis apropriados e opera o motor em temperaturas mais baixas, melhorando, desta forma, o seu rendimento (Martin, 2015).

O fator de potência recomendado para motores elétricos deve ser superior a 0,95, segundo norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Se isto não estiver ocorrendo, deve-se instalar baterias de capacitores para efetuar a compensação da energia reativa em excesso.

Deve-se verificar as condições dos isolamentos, folga e lubrificação dos mancais, e limpeza das superfícies no circuito de ventilação.

Motores elétricos frequentemente acionam equipamentos tais como ventiladores, ou esteiras rolantes através de polias e correias. Desalinhamento das polias e/ou um mau estado de conservação das correias pode causar um aumento de consumo de energia elétrica desnecessário nos motores. Uma manutenção preventiva bem feita é essencial para um bom desempenho energético e uma longa vida de motores elétricos.

Às vezes, as maiores oportunidades de economias de energia residem na otimização da operação dos equipamentos acionados e, quase sempre, esta otimização acaba propiciando ganhos de eficiência também nos motores. Neste contexto, segundo a experiência de diversas empresas de serviços de conservação de energia (ESCOs), uma das principais medidas que tem trazido ganhos substanciais de eficiência energética em

sistemas envolvendo motores elétricos é a utilização de variadores eletrônicos da rotação dos motores, sobretudo para se evitar o controle da vazão de bombas, ventiladores e compressores através de válvulas de estrangulamento.

O período de retorno de um investimento em um variador eletrônico de rotação de motor elétrico depende do tipo de carga, da potência e das horas de funcionamento do motor. Para cargas bastante variáveis durante longos períodos, o período de retorno do investimento pode ser inferior a dois anos, com uma economia anual no consumo de energia do motor de até 25% (Martin, 2015).

## **2.2 Geradores de vapor**

Geradores de vapor, ou caldeiras, são trocadores de calor entre gases quentes, ou uma corrente elétrica e água/vapor, cujo fim é a produção de vapor saturado, ou vapor superaquecido a uma dada pressão. Água pressurizada recebe a energia transferida pelos gases, ou pela corrente elétrica e sofre mudança de fase. Os gases podem ser provenientes de uma reação de combustão interna à caldeira, ou então, serem gases residuais, oriundos de reações de combustão que ocorrem em outros equipamentos, como turbinas a gás, motores de combustão interna, reatores químicos, etc. A pressão do vapor gerado é igual à pressão da água de alimentação da caldeira menos as perdas de carga no circuito da água/vapor interno ao equipamento.

### **2.2.1 Niveles de pressão e combustível utilizados nos geradores de vapor**

Os geradores de vapor podem ser classificados segundo o seu nível de pressão em caldeiras de baixa pressão, quando a pressão é inferior a 10 bar, caldeira de média pressão, quando esta se situa entre 10 e 40 bar, e caldeira de alta pressão, quando as pressões são superiores a 40 bar. As caldeiras de grandes centrais termelétricas em geral operam com pressões superiores a 100 bar.

As caldeiras ou geradores de vapor são equipamentos destinados à produção de vapor sob pressão superior à atmosférica utilizando qualquer fonte de energia. O vapor produzido pelas caldeiras é usado geralmente na indústria para movimentar máquinas

térmicas, ou como fonte de calor para processos. Deste modo, as caldeiras são equipamentos capazes de transferir a energia armazenada nas fontes combustíveis para a água e, então, para a aplicação final.

As fontes energéticas mais utilizadas em caldeiras são o carvão mineral, óleo combustível, gás natural, lenha e resíduos industriais como a lixívia, bagaço da cana de açúcar, entre outros.

## 2.2.2 Tipos de caldeiras

### 2.2.2.1 Caldeiras elétricas

São equipamentos de concepção bastante simples, compostos basicamente de um vaso de pressão, no qual a água é aquecida por eletrodos ou resistências. São fáceis de usar e de automatizar. A eficiência da transformação da energia elétrica em vapor é sempre muita elevada, da ordem 95 a 98%, e, em casos especiais, como caldeiras de alto rendimento, podem atingir até 99,5%.

Apesar da eficiência de conversão elevada, a transformação de energia elétrica em vapor não é recomendável do ponto de vista termodinâmico, pois há uma diminuição da disponibilidade termodinâmica nesta transformação.

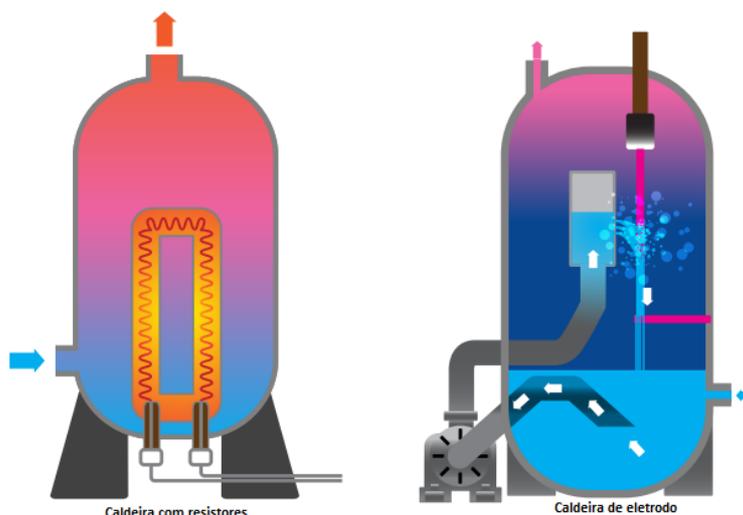
A utilização de caldeiras elétricas só se justifica economicamente quando se dispõe de uma fonte barata de eletricidade.

**Existem dois tipos de caldeiras elétricas, as caldeiras com resistores e as caldeiras de eletrodo. Nas primeiras, a água é aquecida através de resistências elétricas blindadas imersas diretamente nela. As caldeiras de eletrodo, por sua vez, se dividem em: caldeiras de eletrodo submerso e caldeiras de jato de água. Em ambas, a corrente elétrica passa diretamente pela água, aquecendo-a por efeito**

**Joule. A** Fonte:

[http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO\\_DE\\_VAPOR\\_E\\_CALOR.pdf](http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO_DE_VAPOR_E_CALOR.pdf)

Figura 2.4 ilustra, esquematicamente, uma caldeira elétrica com resistores e uma de eletrodo.



Fonte:

[http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO\\_DE\\_VAPOR\\_E\\_CALOR.pdf](http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO_DE_VAPOR_E_CALOR.pdf)

**Figura 2.4 Caldeiras elétricas**

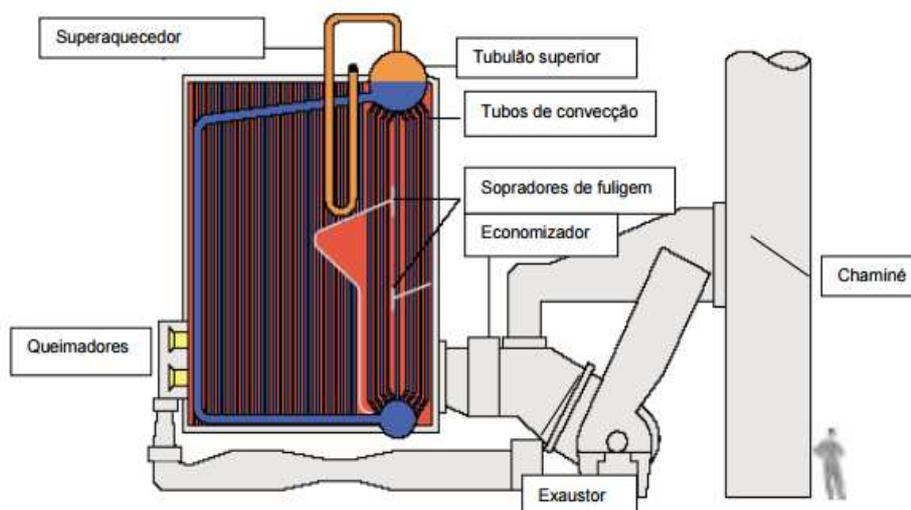
### 2.2.2.2 Caldeiras a combustível

As caldeiras que produzem vapor pela queima de combustíveis podem ser classificadas em dois grandes grupos: caldeiras aquatubulares e caldeiras flamotubulares.

### 2.2.2.3 Caldeiras aquatubulares

Nessas caldeiras, a água a ser aquecida passa pelo interior de tubos que, por sua vez, são envolvidos por gases de combustão. Os tubos podem estar organizados em feixes, como nos trocadores de calor – e as caldeiras que os contêm apresentam a forma de um corpo cilíndrico – ou em paredes de água, como nas caldeiras maiores (Figura 2.5).

As caldeiras aquatubulares tem uma capacidade de vazão a partir de 10 t/h, não havendo limite superior, e operam a altas pressões, normalmente a partir de 20 kgf/cm<sup>2</sup> até 200 kgf/cm<sup>2</sup>. São utilizadas normalmente para vapor superaquecido. Na câmara de combustão estão localizados os queimadores. Os economizadores são trocadores de calor que aquecem a água antes desta entrar nas caldeiras. São instalados na saída dos gases de combustão, aproveitando seu calor sensível. Os pré-aquecedores de ar também utilizam a energia contida nos gases de combustão para aumentar a temperatura do ar utilizado na combustão.



Fonte: <http://www2.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/the-boiler-house/water-tube-boilers.asp>

**Figura 2.5 Caldeira aquatubular**

#### 2.2.2.4 Caldeiras flamotubulares

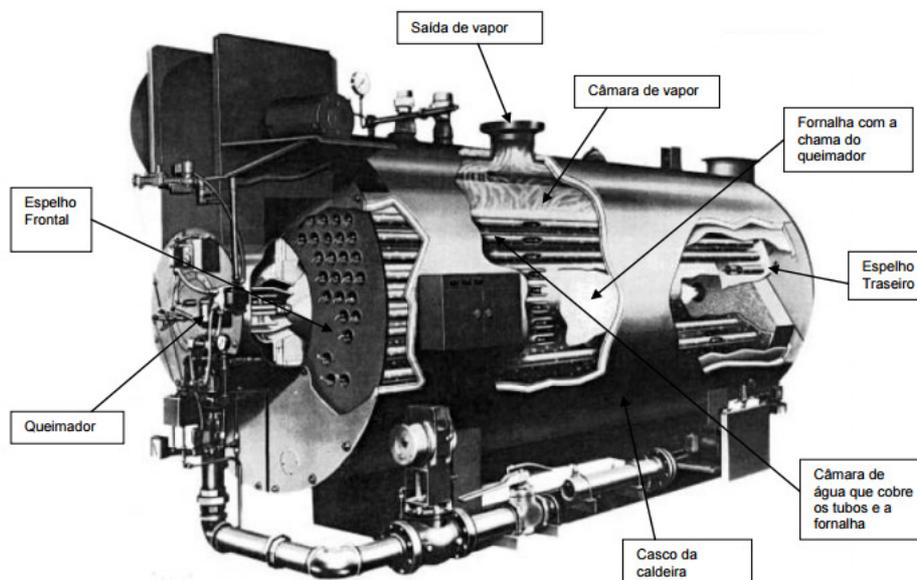
Nas caldeiras flamotubulares, ou pirotubulares os gases da combustão escoam por dentro dos tubos. São construídas para operar com pressões limitadas (normalmente até 25 kgf/cm<sup>2</sup>) e vazões até 30 toneladas/hora.

Estas caldeiras operam usualmente com combustíveis líquidos ou gasosos. O queimador, que se localiza na parte frontal da caldeira, atomiza o combustível, que queima na fornalha. Neste tipo de caldeira, a fornalha é uma câmara cilíndrica lisa ou corrugada. Os gases da combustão escoam no interior de tubos, através de 1, 2, 3 ou 4 passes até saírem pela exaustão. Tanto a fornalha quanto os tubos ficam circundados por água, sendo ancorados em espelhos (discos externos) por mandrilagem e/ou soldagem (Fonte: <https://feedwater.co.uk/industrial-boiler-types/>

Figura 2.6).

Esse tipo de caldeira, geralmente de pequeno porte, usualmente apresenta baixa eficiência, sendo utilizada apenas para pressões reduzidas. Ainda é muito empregada em razão do seu baixo custo de investimento, se comparado com as caldeiras aquatubulares, e da facilidade de manutenção. Utiliza qualquer tipo de combustível, líquido, sólido ou gasoso. É muito comum o seu uso com óleo e gás.

Estas caldeiras tiveram vários aperfeiçoamentos nos últimos anos. Um dos mais importantes foi a câmara de reversão dos gases envolta em água (*wetback*), substituindo a tradicional com “fundo seco” (*dryback*).

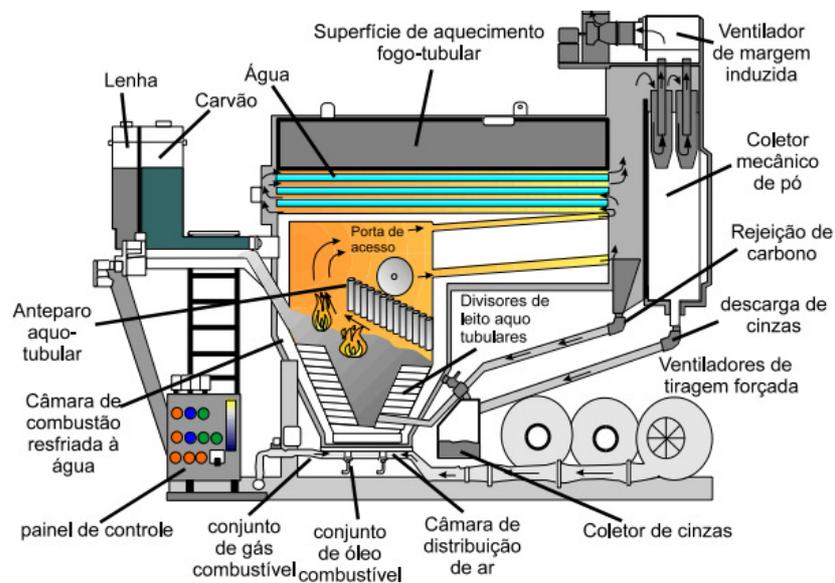


Fonte: <https://feedwater.co.uk/industrial-boiler-types/>

**Figura 2.6 Caldeira flamotubular**

### 2.2.2.5 Caldeiras mistas

Nas caldeiras mistas, que, em geral, queimam combustíveis sólidos, a água é inicialmente aquecida pela fornalha em um arranjo aquotubular. Na sequência, os gases da combustão passam dentro de tubos, na região flamotubular da caldeira, cedendo grande parte de seu calor para a água/vapor circundante (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).



**Figura 2.7 Caldeira mista**

### 2.2.3 Controle de caldeira

Os dispositivos de controle de um gerador de vapor visam uma operação contínua e segura deste equipamento. Várias grandezas são medidas e diversos dispositivos são acionados em uma caldeira em alguns sistemas de controle, que possuem finalidades específicas, que, quando agregadas, visam um atendimento eficiente da demanda de vapor da instalação sendo servida e a uma operação segura do gerador de vapor.

Uma grandeza essencial para se medir a eficiência de uma caldeira pelo método direto é a vazão de vapor. Existem três princípios que podem ser utilizados para se medir esta grandeza: (i) pressões do vapor ao passar por um Venturi; (ii) frequência de um vórtice criado pelo fluxo do vapor; e (iii) força exercida pelo escoamento do vapor sobre tubos.

Basicamente, o controle atua sobre a válvula que monitora o fluxo da água de alimentação. Os sistemas mais simples respondem apenas a sinais do nível d'água. Os

sistemas mais modernos combinam os sinais do nível d'água com os sinais dos fluxos de vapor (na saída) e da água de alimentação.

Um outro dispositivo de segurança importante é a válvula de retenção da caldeira, que impede que o vapor que já saiu do equipamento volte do tubulão de alimentação da instalação (“*steam header*”) para a caldeira. A válvula se abre apenas quando a pressão da caldeira for levemente superior à do “*header*”.

A válvula de segurança é um outro dispositivo essencial para se garantir a integridade da caldeira. Ela permite o corte da alimentação de combustível no caso da pressão de vapor atingir limites extremos (inferiores ou superiores).

Os dispositivos de proteção à chama atuam de modo a que qualquer condição de operação irregular do gerador de vapor resulte no corte da alimentação do combustível. Esses dispositivos permitem a avaliação “on-line” das condições da chama e atuam sobre a sequência de partida do gerador de vapor.

Toda caldeira deve gerar vapor a uma pressão praticamente constante, já que a maior parte dos equipamentos que utilizam este vapor requer uma pressão de alimentação constante. Esta condição é assegurada por um sistema de controle que atua sobre o sistema de combustão da caldeira, fazendo com que a pressão do vapor gerado não se altere significativamente durante a operação do equipamento.

Este mesmo sistema controla a mistura ar/combustível para garantir, também, uma boa eficiência da combustão e minimizar as emissões de poluentes. Os sistemas mais simples utilizam um ajuste fixo entre a válvula reguladora do fluxo de combustível e o “*dampner*” que controla a alimentação de ar; neste caso, variações na pressão do vapor implicam em ajustes proporcionais nos fluxos de ar e combustível. Sistemas mais modernos baseiam-se em uma atuação independente no controle dos fluxos de ar e combustível (Bajay, *et al.*, 2015).

### 2.3 Eficiência de uma caldeira

A eficiência de uma caldeira se define como a relação entre a quantidade de energia absorvida pelo vapor e a quantidade de energia contida no combustível:

$$\eta_{caldeira} = 100 * \left( \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_l)}{\dot{m}_c * PC} \right) \quad (2.8)$$

onde:

$\dot{m}_v$  e  $\dot{m}_c$  = são os fluxos do vapor gerado pela caldeira e do combustível, respectivamente;

$h_v$  e  $h_l$  = a entalpia do vapor produzido pela caldeira e a entalpia da água de alimentação, respectivamente; e

$PC$  = o poder calorífico, superior ou inferior, do combustível.

Como se pode utilizar o poder calorífico inferior (PCI), ou o poder calorífico superior (PCS) na expressão (2.8), é necessário se indicar a qual deles se refere um determinado valor de eficiência da caldeira. No Brasil é mais usual se empregar o PCI.

## 2.4 Perdas na caldeira

As perdas em uma caldeira são provocadas pelos seguintes fatores:

- Temperatura excessiva dos gases efluentes;
- Presença de produtos não queimados nos gases de combustão;
- Porcentagem excessiva de oxigênio nos gases (alto excesso de ar);
- Temperatura elevadas nas paredes da superfície externa;
- Qualidade do vapor;
- Excessivo vazamento na purga;
- Cinzas quentes;
- Fugas de vapor; e
- Falta de controle, ou controle inadequado.

Caldeiras modernas e bem operadas devem atingir eficiências máximas superiores a 90%.

### 2.4.1 Otimização da relação ar-combustível nos queimadores da caldeira

Um nível excessivo de ar significa perdas adicionais de energia, aumento na temperatura dos gases de chaminé e redução da eficiência da caldeira. A quantidade de ar em excesso não participa da reação de combustão, é aquecida e, posteriormente, eliminada, prejudicando a eficiência na combustão. Por outro lado, um baixo nível de excesso de ar causa uma combustão incompleta e produz fuligem, reduzindo, também, a eficiência da combustão. A **Erro! Fonte de referência não encontrada. Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra níveis de excesso de ar recomendados para alguns tipos de combustíveis líquidos e gasosos.

**Tabela 2.4 Excesso de ar recomendado, por tipo de combustível.**

<i>Combustível</i>	<i>Excesso de ar recomendado (%)</i>
<i>Gás natural</i>	<i>5-10</i>
<i>Propano</i>	<i>5-10</i>
<i>Gás de coque</i>	<i>5-10</i>
<i>Óleo combustível</i>	<i>10-15</i>

Fonte: CONAE, 2002.

Aumentando a temperatura do ar de combustão, diminui a quantidade de excesso de ar requerida. A Tabela 2.5 ilustra este efeito para uma determinada combinação de combustível e queimador.

Quando se queima óleo combustível, utiliza-se um atomizador, que é um dispositivo que melhora a mistura do óleo com o ar e o injeta no interior da câmara de combustão.

O controle da quantidade de ar a ser injetado na câmara de combustão é feito geralmente através da medição da percentagem de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e de oxigênio (O<sub>2</sub>) remanescente nos gases coletados na chaminé. Para efeitos práticos e para os tipos de caldeiras mais comuns, o percentual de dióxido de carbono contido na chaminé deve-se situar em uma faixa entre 11 e 13,5%. Esses valores podem variar um pouco de acordo com os tipos de caldeira, de queimador e de combustível. Procura-se manter o teor de dióxido de carbono mais elevado possível sem que isso provoque emissão de fumaça densa na chaminé. O aumento do teor de dióxido de carbono exige redução do excesso de ar de combustão.

**Tabela 2.5 Efeitos de mudanças na temperatura do ar de combustão nos níveis de excesso de ar para um determinado combustível e queimador**

<i>Temperatura do ar de</i>	<i>Excesso de ar (%)</i>
-----------------------------	--------------------------

<i>combustão (°C)</i>	
4,5	25,5
10,0	20,2
26,7	15,0 ( <i>ajusto inicial</i> )
37,8	9,6
48,8	1,1

Fonte: CIBO, Energy Efficiency Handbook

As caldeiras mais eficientes apresentam menor temperatura dos gases na saída da chaminé. Essas caldeiras são construídas com dispositivos internos (por exemplo, economizadores e pré-aquecedores de ar) que permitem o maior aproveitamento da energia residual dos gases. Se o combustível contiver enxofre, a temperatura máxima de exaustão será limitada à temperatura de formação de ácido sulfúrico.

Uma boa combustão depende da operação correta do queimador e de uma manutenção adequada. Na utilização de óleos mais densos, a operação correta da atomização pode se constituir na principal medida para a obtenção de uma combustão eficiente. É fundamental controlar a vazão, a pressão e a temperatura do óleo, de modo que melhor atenda às características do combustível e do queimador empregado.

A tiragem dos gases da chaminé é um outro fator que merece atenção. Obtém-se queima constante quando a tiragem na chaminé permanece constante. Se a tiragem for insuficiente, os gases de combustão demoram a deixar a câmara de combustão e podem surgir pulsações. Se a tiragem for excessiva, a câmara será resfriada e o ar rouba energia sem prover a troca de calor com a água a ser evaporada, e os gases de saída aumentam a sua temperatura.

#### **2.4.2 Perdas energéticas na combustão incompleta**

Uma das perdas mais usuais no sistema de geração de vapor é causada pela combustão incompleta:

$$E_{GC} = m_{GC} * PC_{GC} \quad (2.9)$$

onde:

$E_{GC}$  = energia perdida devido à queima incompleta;

$m_{GC}$ = massa de combustível não queimada;

$PC_{GC}$ = poder calorífico, inferior ou superior, do combustível.

### **2.4.3 Perdas energéticas por excesso de ar na combustão completa**

O ar que não participa da reação de combustão rouba calor desta reação, que é descarregado na chaminé. Esta quantidade de calor desperdiçada pode ser calculada com o auxílio da equação (2.10):

$$E_{ar} = m_{ar} * c_{ar} * (T_f - T_i) \quad (2.10)$$

onde:

$E_{ar}$ = energia desperdiçada pelo aquecimento do excesso de ar;

$m_{ar}$ = massa do excesso de ar na combustão;

$c_{ar}$ = calor específico do ar;

$T_f$ = temperatura de saída do ar aquecido;

$T_i$ = temperatura de entrada do ar no queimador.

## **2.5 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética em caldeiras**

Algumas medidas de economia de energia podem ser executadas com facilidade, sem que sejam necessárias intervenções significativas nas instalações das caldeiras. Uma delas é manter a operação da caldeira próxima do seu ponto de eficiência máxima. Geralmente, as caldeiras apresentam eficiência máxima quando operam entre 80% e 90% da sua capacidade nominal. Operar acima dessas condições pode comprometer a vida útil do equipamento. Por outro lado, ao operar muito abaixo dos 80%, permanecendo fixas as perdas das trocas de calor, a energia necessária para motorizar a tiragem e outros serviços da caldeira reduz sua eficiência global. A condição de operação a cargas reduzidas dos queimadores também pode contribuir para essa redução de eficiência. Sempre que possível, deve-se evitar essa zona de funcionamento, atuando sobre a quantidade de caldeiras em operação para atender às necessidades do momento.

A temperatura elevada na chaminé da caldeira significa maiores perdas de calor através dos gases de exaustão. O acúmulo de fuligem no circuito dos gases forma uma barreira isolante, que prejudica a troca térmica, reduzindo a eficiência, e pode ser detectada pelo aumento da temperatura na chaminé. Além de reduzir a eficiência, a fuligem aumenta o risco de degradação das superfícies de troca, o que reduz a vida útil da caldeira.

Para reduzir a fuligem, deve-se ajustar o ar de combustão e/ou utilizar aditivos especiais. A fuligem pode ser removida por meios manuais e com o uso de produtos químicos. Um crescimento na temperatura de exaustão é um sinal de que a caldeira precisa de limpeza e desincrustação.

As caldeiras, como qualquer outro equipamento térmico, perdem calor para o meio ambiente. Para manter a sua eficiência, é necessário limitar essas perdas. Por isso, recomenda-se verificar periodicamente a estanqueidade do corpo da caldeira e as aberturas em torno dos queimadores e dos visores da câmara de combustão. Na manutenção, devem-se eliminar todas as perdas de calor e vazamentos de água quente e de vapor e refazer os isolamentos térmicos do vaso e de todos os circuitos que contenham fluidos quentes.

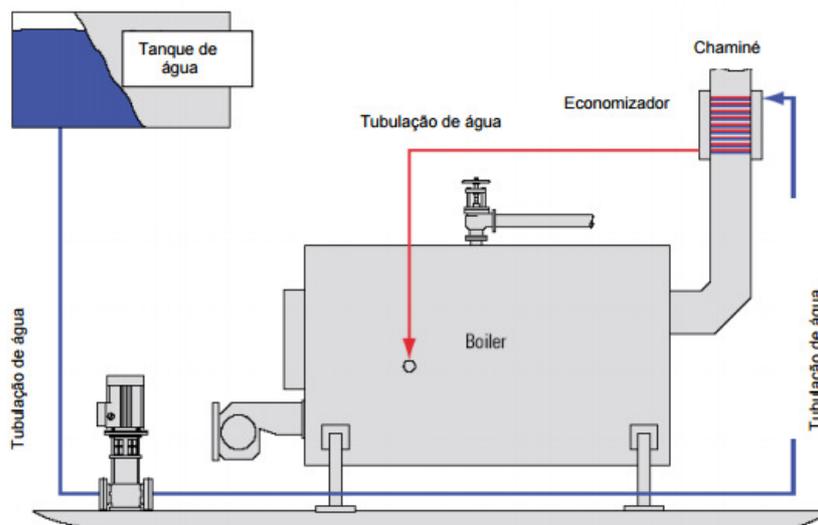
A grandeza das perdas por chaminé sem um dispositivo que ajude à recuperação de calor é de 18% em alguns sistemas de combustão a gás e 12% para carvão. Mediante sistemas de recuperação de calor pode-se aproveitar esta energia.

Os métodos de recuperação de calor comumente usados são pré-aquecimento do ar de combustão e aquecimento de água, através de trocadores de calor localizados após os gases passarem através das secções de geração de vapor da caldeira.

Com a instalação de pré-aquecedores de água, denominados economizadores, pode-se poupar, em média, cerca de 1% de combustível para cada 6 oC de aumento da temperatura da água de alimentação da caldeira.

Os economizadores são basicamente trocadores de calor tubulares usados para pré-aquecer a água de alimentação da caldeira. Os economizadores também reduzem o potencial de choque térmico e fortes flutuações de temperatura quando a água de alimentação entra nos tubulões ou paredes de água de uma caldeira aquotubular, ou no tambor de água de uma caldeira flamotubular.

A Figura 2.8 mostra um economizador instalado em uma caldeira flamotubular.



**Figura 2.8 Economizador em uma caldeira flamotubular**

Com a instalação de preaquecedores de ar de combustão obtém-se, em média, 1% de economia de combustível para cada 22 °C de aumento da temperatura do ar.

O ar pré-aquecido melhora a estabilidade da chama, aumentando a temperatura da fornalha e aumentando, por consequência, a troca de calor por radiação, fazendo com que seja necessário um menor excesso de ar de combustão. Este sistema é utilizado principalmente em caldeiras aquotubulares e mistas, devido ao grande espaço de instalação requerido. O ar passa inicialmente por este aquecimento e é conduzido para a fornalha da caldeira.

Existem dois tipos de pré-aquecedores de ar:

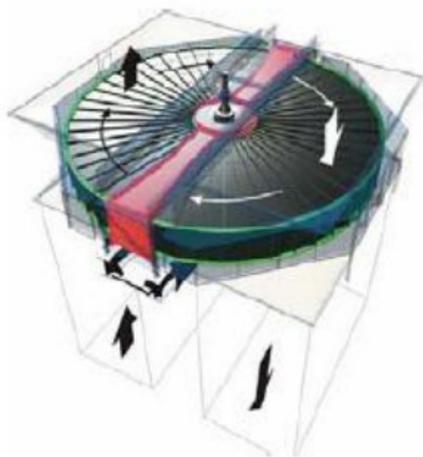
- Os recuperadores, em que os gases da combustão cedem parte de seu calor para o ar de combustão em dutos separados. Não há mistura dos dois gases;
- Os regeneradores, em que a transferência de calor ocorre com o auxílio de uma matriz metálica que absorve, em um primeiro momento, calor dos gases da combustão e libera, em um momento posterior, este calor para o ar de combustão. Há alguma mistura entre os dois gases. Um trocador de calor regenerador pode ser fixo, com válvulas abrindo a passagem, de uma forma alternada, para os gases da combustão e para o ar de combustão, ou, então, rotativo, com cada célula da matriz metálica sendo preenchida pelos

gases da combustão, ou pelo ar de combustão conforme esta matriz gira, à baixa rotação, através dos dutos correspondentes.

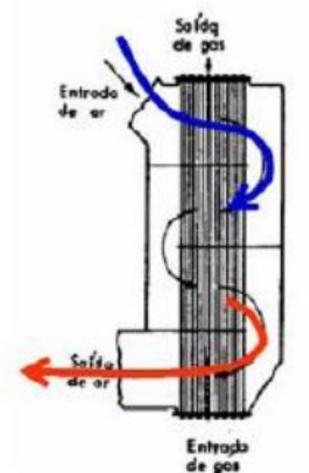
(a) A *Regenerador rotativo*

(b) *Recuperador*

Figura 2.9 ilustra, esquematicamente, um pré-aquecedor de ar do tipo regenerador rotativo e um do tipo recuperador.



(b) *Regenerador rotativo*



(b) *Recuperador*

Figura 2.9 Tipos de pré-aquecedores de ar

A descarga de fundo da caldeira é necessária para eliminar sais presentes na água, que podem formar incrustações nas tubulações, prejudicando a troca de calor. O condensado eliminado pela descarga de fundo, no entanto, carrega consigo uma quantidade significativa de energia que, se for recuperada através de um trocador de calor, para pré-aquecer a água de alimentação, por exemplo, pode aumentar a eficiência da caldeira. Esta recuperação pode ser particularmente atraente quando as descargas forem periódicas e automatizadas, ou quando houver uma dessalinização contínua.

Uma outra maneira de se diminuir as perdas de energia pela descarga de fundo é melhorando o tratamento da água de reposição da caldeira.

A Tabela 2.6 resume as principais medidas que podem propiciar ganhos de eficiência energética em sistemas de vapor, suas potenciais economias de energia e se há necessidade de investimentos, ou não.

Tabela 2.6 Medidas que propiciam ganhos de eficiência energética em sistemas de vapor

<i>Medida</i>	<i>Ação</i>	<i>Economia de energia (%)</i>	
Redução do excesso de ar	Regulagem da combustão	5 a 10%	Sem investimento
Redução da temperatura de saída dos gases na chaminé	Regulagem da combustão. Limpeza da caldeira	1% a cada 5 °C	Sem investimento
Redução da pressão de trabalho	Verificação dos níveis necessários de pressão	1% a cada 5 Bar	Sem investimento
Otimização da temperatura do combustível	Monitoramento da viscosidade do combustível	Até 5%	Sem investimento
Otimização da pressão de atomização do combustível	Implementação das indicações do fabricante do queimador	Até 1%	Sem investimento
Redução das descargas de fundo da caldeira	Conforme análise química dos componentes da água da caldeira	Até 1%	Sem investimento
Otimização da sequência de queima	Ajuste da modulação	5 a 10%	Sem investimento
Otimização da sequência de queima de vários queimadores	Ajuste da modulação.	2 a 7%	Sem investimento
Eliminação de vazamentos de vapor	Inspeção das instalações	Até 10%	Sem investimento
Eliminação de defeitos em purgadores	Inspeção de todos os purgadores	Até 5%	Sem investimento
Redução de depósitos no queimador	Regulagem da queima. Uso de aditivos	1 a 5%	Com investimento
Redução de depósitos na fornalha	Regulagem da queima. Uso de aditivos	1 a 3%	Com investimento
Redução de depósitos no lado de água	Conforme análise química da água da caldeira	1 a 2%	Com investimento
Redução de depósitos de fuligem nos tubos	Regulagem da queima. Uso de aditivos	1 a 4%	Com investimento
Aumento da temperatura do ar de combustão	Instalação de pré-aquecedor de ar	2 a 5%	Com investimento

Aumento da temperatura da água de alimentação	Instalação de economizador	Até 3%	Com investimento
Recuperação de calor através da descarga de fundo	Instalação de “flash tank”	Até 1%	Com investimento
Diminuição da perda de calor na instalação	Otimização do isolamento térmico	Até 8%	Com investimento
Regulagem contínua do nível de água	Instalação de controle de “loop”	Até 1%	Com investimento
Recuperação de condensado	Instalação de tanque de condensado	Depende da instalação	Com investimento

Fonte: Manuais Elektro de Eficiência Energética, Segmento Industrial

## 3. Indústria de papel e celulose

### 3.1 Introdução

A celulose é a principal matéria-prima para a produção de papéis. Os dois tipos de celulose são a de fibra curta e a de fibra longa, oriundas, no Brasil, de árvores de reflorestamentos, em sua grande maioria de eucalipto e pinus, respectivamente. A celulose e o papel podem ser produzidos em uma mesma instalação – uma fábrica integrada, ou podem ser produzidas em instalações separadas; no primeiro caso tem-se a denominada “celulose de mercado”.

O processo de fabricação de cada tipo de papel utiliza um tipo de fibra diferente, pois as fibras curtas e longas têm características mecânicas diversas. De uma forma geral, os papéis de imprimir e escrever, os papéis sanitários e alguns tipos de papel cartão são fabricados a partir de fibras curtas – que proporcionam maior opacidade e maciez. Os papéis para embalagem, papelão ondulado e outros tipos de papel cartão são fabricados a partir de fibras longas, que propiciam maior resistência mecânica.

Uma outra importante fonte de matéria-prima para a indústria de papel são as fibras recicladas, que são utilizadas principalmente para produção de papéis que irão formar o papelão ondulado.

Existem também as chamadas pastas de alto rendimento (PAR), que são utilizadas na produção de papel imprensa e revistas.

A Figura 3.1 ilustra um fluxograma simplificado da cadeia produtiva da indústria de celulose e papel.

O alto grau da integração dos processos produtivos e do setor de utilidades na indústria de papel e celulose implica que as boas práticas e as melhores tecnologias disponíveis no mercado (BATs) devem ser analisadas não só em cada processo e no setor de utilidades individualmente, mas também na fábrica como um todo.



Fonte: Ibá (2015)

**Figura 3.1 Cadeia produtiva da indústria de celulose e papel**

Segundo a Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa), em 2013 o parque industrial deste setor no País era formado por 220 empresas, com atividades em 540 municípios, localizados em 15 Estados. O Brasil é o quarto maior país produtor de celulose; em 2012 produziu 15,1 milhões de toneladas só de celulose de fibra curta branqueada. Naquele ano, o País produziu 10,4 milhões de toneladas de papel (Bracelpa, 2014).

As fábricas integradas de pasta de celulose e papel possuem uma vantagem nos custos de fabricação em relação às fábricas que somente produzem papel, já que nas primeiras se elimina a necessidade de secagem da pasta de celulose. Esta etapa representa um desperdício, em termos de consumo de energia, uma vez que a pasta seca deve ser novamente dispersa em água antes de ser processada na máquina de papel (Bajay, Berni e Lima, 2005).

As fábricas de pastas de celulose podem ser subdivididas em categorias, de acordo com as fibras utilizadas como matéria-prima e de acordo com os processos - químicos, mecânicos, ou uma combinação dos dois - empregados (Ewing, 1985).

A Bracelpa classifica a celulose obtida por processos químicos e semi-químicos em celulose branqueada e não branqueada e denomina as pastas de celulose obtidas por processos mecânicos e suas combinações (processos termomecânicos, quimiomecânicos e quimiotermeomecânicos) como “pastas de alto rendimento” (PAR).

### **3.2 A cadeia produtiva de celulose e papel**

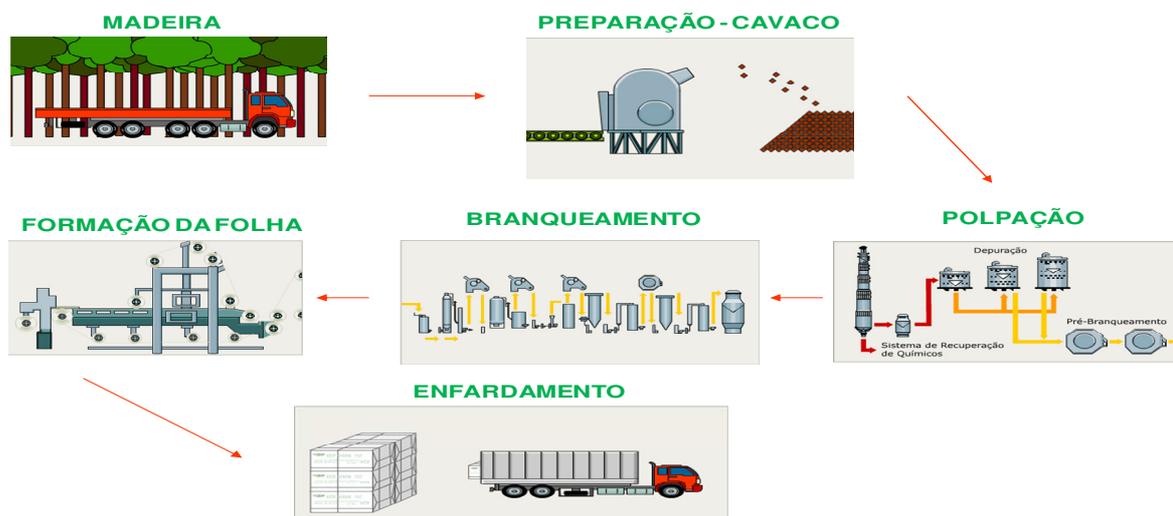
A cadeia produtiva do papel, incluindo a fabricação da pasta de celulose, compreende os seguintes estágios de processamento: preparação da madeira; produção e

lavagem da pasta de celulose; branqueamento; secagem da pasta; preparação do estoque de matérias primas (pastas de celulose, papéis reciclados, aditivos minerais, etc.) para a máquina de fabricação do papel; formação da folha de papel; prensagem do papel; secagem do papel; e acabamento do papel.

Existem, também, atividades auxiliares muito importantes para um bom desempenho técnico, econômico e ambiental das fábricas integradas de papel e celulose: a recuperação de reagentes químicos; a produção, nas instalações das fábricas, de alguns insumos químicos usados no processo de fabricação; e a produção de vapor e eletricidade, usualmente em unidades de cogeração.

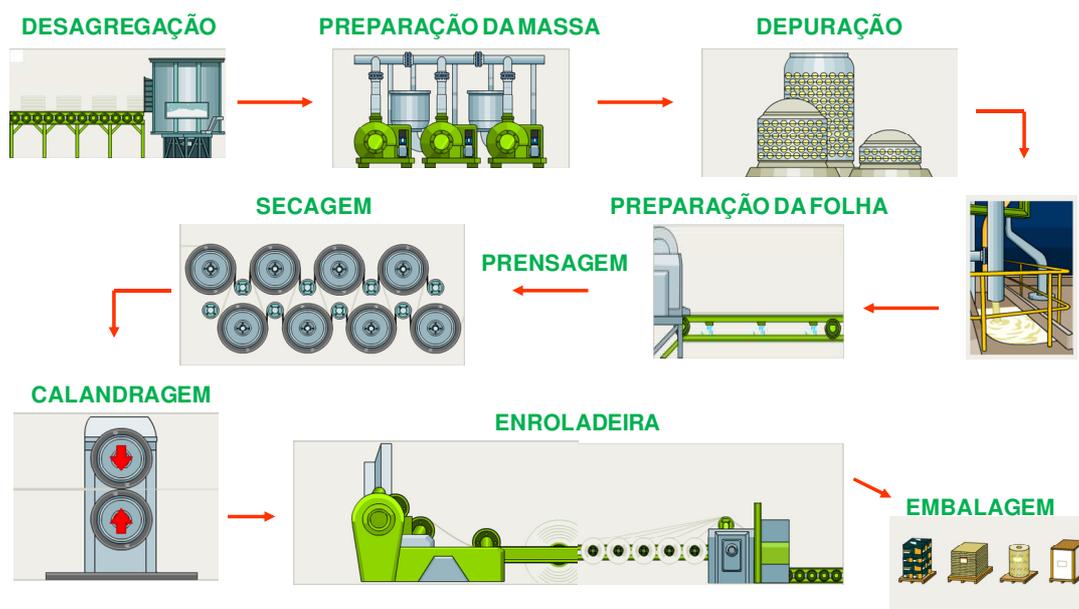
A Figura 3.2 ilustra as etapas do processo químico de fabricação de celulose de mercado branqueada, enquanto que a Fonte: Ibá (2015)

Figura 3.3 mostra o processo de fabricação de papel.



Fonte: Ibá (2015)

**Figura 3.2** Processo químico para a produção de celulose de mercado branqueada



Fonte: Ibá (2015)

**Figura 3.3 O processo produtivo do papel**

### **3.2.1 Preparação da madeira**

A etapa de preparação da madeira compreende a extração das cascas das toras; a produção e a classificação, por peneiramento, de cavacos; e o manuseio de toras e cavacos. Às vezes, as cascas são retiradas das toras manualmente ou mecanicamente nas florestas. A produção e classificação de cavacos não são necessárias nos processos mecânicos de polpação que empregam pedras desfibradoras, uma vez que, neles, a pasta de celulose é produzida diretamente a partir de toras.

Os cavacos menores e as cascas das toras alimentam as chamadas “caldeiras de biomassa”, que produzem parte do vapor e, no caso de unidades de cogeração, parte da eletricidade requerida para o funcionamento da fábrica.

Esta etapa somente demanda eletricidade, para a extração das cascas das toras, a produção e a separação dos cavacos e o manuseio de materiais.

### **3.2.2 Produção da pasta de celulose**

Existem três tipos básicos de processos de produção de pastas de celulose: o mecânico, o químico e uma combinação de ambos. Esta etapa do processamento também é conhecida como polpação.

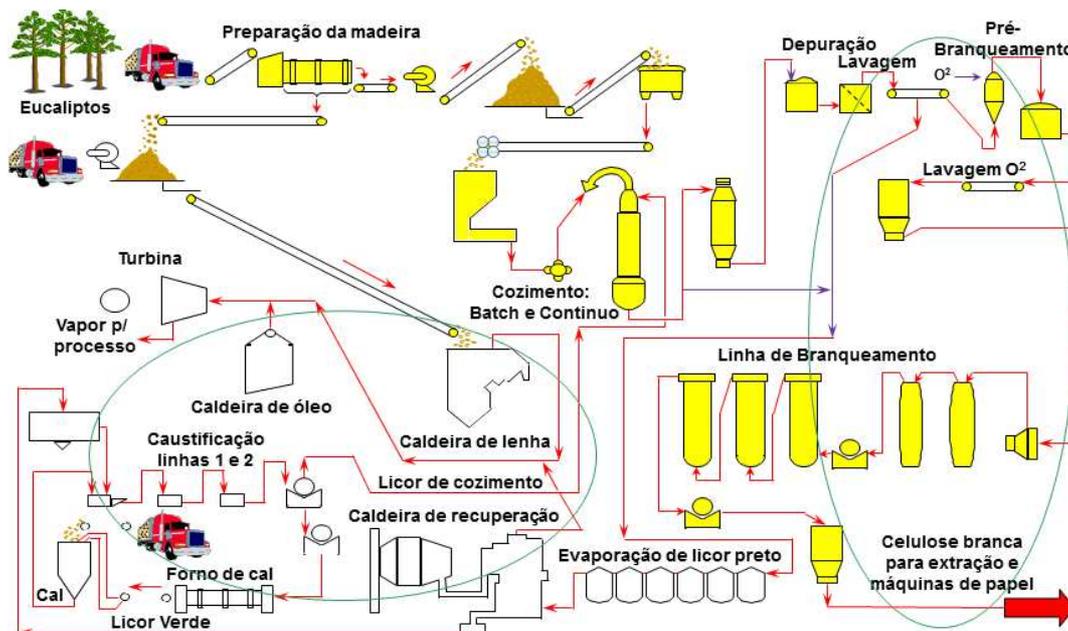
Nos processos puramente mecânicos, a matéria-prima é desagregada por meios físicos em uma suspensão aquosa de partículas fibrosas. Nos processos mais antigos, mas ainda bastante empregados, as toras, cortadas em tamanhos pequenos, são comprimidas contra uma grande pedra desfibradora giratória, sendo trituradas até se transformarem em uma pasta de celulose. As fibras da celulose são, até certo ponto, danificadas por esse processo e a pasta produzida contém a maioria dos componentes não celulósicos da madeira usada como matéria-prima. Por esses motivos, a pasta obtida por estes processos é bem menos resistente do que àquela obtida por processos químicos. Porém, o rendimento em termos de consumo de madeira é muito mais alto; geralmente de 90 a 95% em uma base seca (Ewing, 1985).

Um avanço, mais recente, na produção mecânica de pastas de celulose é o uso de refinadores para desagregar madeira em fibras por meio da inserção dessas partículas entre placas de aço giratórias com superfícies de várias configurações. A pasta mecânica produzida com o uso de pedras desfibradoras tem uma resistência superior à produzida por meio do uso de refinadores, embora o consumo de energia elétrica para produzir uma tonelada de polpa seja significativamente maior no primeiro caso. Esse processo é alimentado por cavacos e serragem. Por meio do aquecimento a vapor dos cavacos, pode-se produzir a chamada pasta “termo-mecânica”, que possui algumas características superiores às pastas mecânicas ordinárias produzidas por refinadores (Ewing, 1985).

O principal equipamento envolvido no processo químico de produção de pastas de celulose é um recipiente aquecido e pressurizado denominado digestor, no qual os cavacos de madeira são introduzidos, juntamente com produtos químicos. A sua finalidade é dissolver os componentes não celulósicos da matéria-prima fibrosa, principalmente a lignina, em uma fase aquosa. Depois que a pasta de celulose deixa o digestor, ela é lavada para remover os produtos químicos dissolvidos. Os digestores podem operar de uma forma contínua ou por bateladas e o seu aquecimento pode ser direto ou indireto. Tecnologias que hoje constituem o estado-da-arte no processo químico de fabricação da celulose incluem os digestores contínuos para grandes unidades e o aquecimento indireto, ou por deslocamento para unidades menores (World Energy Council, 1995). A pasta de celulose obtida por este processo apresenta, no

máximo, 10% de lignina e um nível baixo de impurezas (Ewing, 1985; Bajay *et al.*, 1996).

O processo químico de produção de pastas de celulose mais usado no mundo, inclusive no Brasil, é conhecido como “Processo Kraft” e está ilustrado na Figura 3.4; ele emprega produtos químicos à base de sódio e enxofre, em uma solução aquosa denominada “licor branco”, para desintegrar cavacos de madeira em fibras individuais de celulose. O processo de cocção no digestor pode durar de 2 a 5 horas, a uma temperatura em torno de 170 °C e um nível de pressão entre 7 e 9 atmosferas (Bajay *et al.*, 1996). A celulose é formada depois que o material digerido é evacuado em um tanque de despressurização (*blow tank*) e as fibras são separadas do resíduo resultante do processo, conhecido como lixívia ou “licor negro”, que é uma solução aquosa que contém todos os produtos químicos adicionados ao processo e os componentes não celulósicos dos cavacos de madeira. Depois da lavagem da pasta de celulose, parte do licor negro é retornado ao digestor, para auxiliar na circulação dos insumos do processo sem precisar se adicionar mais água. A 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. Após a lavagem ocorrem as operações de depuração e espessamento (Berni, Bajay e Gorla, 2010). A depuração é feita em depuradores centrífugos (peneiras finas) e serve para separar pedaços de cavacos que não foram devidamente desfibrados. O espessamento serve para aumentar a consistência da massa que é, posteriormente, enviada ao branqueamento e à máquina de papel.



Fonte: Bajay *et al.*, (2015)

**Figura 3.4** Processo Kraft de produção de pastas de celulose

O Processo Kraft é o processo químico de produção de pastas de celulose mais empregado porque permite: (i) a recuperação dos produtos químicos; (ii) um bom nível de recuperação de calor; e (iii) a produção combinada de vapor e eletricidade em unidades de cogeração que queimam a lixívia concentrada. O vapor e a eletricidade produzidos nessas unidades atendem a uma grande parte da demanda de energia das fábricas de celulose que empregam este processo. Esses três fatores tornam o processo bastante econômico.

O processo mecânico de produção de pastas de celulose é uma atividade que consome muita eletricidade, não tendo necessidade de energia térmica. No processo químico, usa-se energia elétrica nos motores dos acionamentos mecânicos e vapor na digestão dos cavacos (Ewing, 1985).

### 3.2.3 Branqueamento da pasta de celulose

O estágio de branqueamento é realizado para dar cor branca à pasta de celulose lavada, que é, por seu turno, usada na fabricação de alguns tipos de papeis. O processo de branqueamento é efetuado em várias etapas, em que são misturados produtos químicos com a pasta de celulose e essa mistura passa por torres de retenção à

temperaturas elevadas. A celulose é lavada entre uma etapa e outra. Utiliza-se vapor para produzir água quente para a lavagem e para se atingir a temperatura desejada em cada etapa do processo. As bombas, agitadores, lavadores e outros equipamentos que requerem motores elétricos compõem a demanda de energia elétrica deste estágio de fabricação da pasta de celulose (Ewing, 1985).

O branqueamento remove os traços de lignina, resinas, íons metálicos e outras impurezas que dão uma aparência amarelada à celulose não branqueada, permitindo a obtenção da cor branca desejada. O dióxido de cloro, o peróxido de hidrogênio, o oxigênio e o ozônio estão sendo usados como substitutos do cloro molecular nesta etapa por questões ambientais.

#### **3.2.4 Secagem da celulose**

As fábricas de celulose de mercado que não são integradas geralmente secam a celulose, para facilitar seu manuseio e reduzir as despesas com o frete, e entregam a celulose na forma de fardos às fábricas de papel. Nas fábricas integradas, uma solução aquosa de celulose é armazenada em tanques, de onde é bombeada diretamente para as máquinas de papel. Às vezes, até a celulose de mercado pode ser bombeada na forma de uma pasta diluída para fábricas de papel próximas, ou, então, ela pode ser transportada parcialmente seca.

A água contida na pasta de celulose pode ser evaporada por despressurização em tanques de descarga, mas, normalmente, prefere-se secar a pasta na forma de uma folha depositada em uma tela contínua de uma máquina semelhante à máquina de papel, cortando-se a folha, em seguida, em tamanho adequado e enfardando estas últimas para entrega. Energia elétrica movimenta esta máquina, incluindo as bombas de vácuo e as prensas que removem a água mecanicamente. A secagem final da folha de celulose é feita com vapor, em cilindros secadores sobre os quais a tela e a folha passam, ou através de aquecimento de ar, que é soprado sobre e sob a folha para secá-la (Ewing, 1985).

#### **3.2.5 Preparação do estoque de matérias primas para a máquina de papel**

Esta etapa do processo varia de acordo com a forma e o tipo da pasta de celulose empregada e o tipo de papel que se deseja produzir. As plantas que só fabricam papel adquirem a celulose de mercado enfardada e seca, enquanto que, em uma planta integrada, a celulose chega em suspensão, facilitando a produção de papel. Se a pasta de celulose é adquirida seca, os fardos devem ser desmontados e a celulose deve ser imersa em uma suspensão de água. Se for usado papel reciclado, ele normalmente terá que passar pelas operações de limpeza e/ou destintamento, antes da imersão em suspensão aquosa.

A preparação do estoque de matérias primas para a máquina de papel compreende três operações distintas: desagregação, refinação e depuração. O objetivo da desagregação é dar consistência aos materiais que entram no processo e se passa em um equipamento conhecido como tanque desagregador. Na refinação, a suspensão obtida é adequada à formação da folha de papel. Esta operação é vital, pois influencia diretamente nas características finais da folha de papel. Os refinadores são equipamentos grandes consumidores de eletricidade. Na depuração, o objetivo é retirar todas as impurezas contidas na suspensão fibrosa e os equipamentos utilizados nesta operação são as peneiras e depuradores centrífugos (Berni, Bajay e Gorla, 2010).

Produtos químicos, corantes e aditivos, como a argila, podem ser adicionados durante este estágio de preparação do estoque, para propiciar características específicas ao papel produzido (Ewing, 1985).

No caso de se utilizar papel reciclado, existe a necessidade de se fazer uma pré-seleção das aparas a serem recicladas. O papel reciclado é separado do lixo e vendido a sucateiros, que o enviam a depósitos. Ali, o papel é enfardado em prensas e, depois, encaminhado aos aparistas, que classificam as partidas e as revendem para as fábricas de papel como matéria-prima. O transporte é feito em caminhões cobertos, de modo a se evitar a absorção de umidade. Ao chegar às plantas, os fardos de papel são pesados e classificados. Essa classificação é feita de acordo com alguns critérios como “grau de brancura”, “nível de contaminantes”, etc.; o resultado desta classificação condiciona o preço de aquisição. Após essa etapa, os fardos usualmente ficam armazenados a céu aberto, aguardando processamento (Berni, Bajay e Gorla, 2010).

Os fardos de papel reciclado são colocados em uma esteira de alimentação, que os leva aos equipamentos denominados “*Hydrapulpers*”, que possuem a forma de tanques cilíndricos, providos de rotores giratórios, onde a massa é desagregada, após a adição de

água, nova e/ou reciclada. Estes equipamentos formam a pasta de celulose, com uma consistência entre 2 e 3 %, que permite o seu bombeamento.

As pastas recicladas usualmente contêm um grande número de impurezas, tais como pedaços de papel não desagregado, metais como arames, cliques, ferragens, bem como plásticos. Uma peneira, abaixo do rotor do *hydrapulper*, constitui a primeira etapa de remoção de materiais grosseiros, que são separados e enviados para o lixo. As impurezas finas e areia são removidas em uma série de equipamentos como peneiras, flutuadores e separadores centrífugos denominados “*cleaners*”, que, progressivamente, vão purificando a massa. Nessas etapas, há o uso de quantidades consideráveis de água de processo, que é empregada na lavagem da massa.

A operação de destintamento não é utilizada quando a pasta reciclada se destina à produção de papel jornal, papel de embrulho/embalagem e papelão.

Esta etapa possui um elevado consumo de energia elétrica, principalmente no acionamento dos refinadores e, no caso de se utilizar pastas recicladas, também nos *hydrapulpers*.

### **3.2.6 Formação de papel**

As fibras do papel devem compor uma folha e o processo de obtenção dessa folha começa com uma suspensão muito diluída, compreendendo, em geral, menos de 0,5% de fibra, que é despejada em uma tela em movimento, na qual a água é removida por gravidade e sucção, ou em uma esteira de feltro, também em movimento, onde a água é removida por meio de sucção. Depois de formada, a consistência da folha tipicamente é de 15 a 20% de fibra (Ewing, 1985).

Somente energia elétrica é consumida nesta etapa, para o funcionamento das bombas, inclusive as de sucção, e para o acionamento da tela.

### **3.2.7 Prensagem do papel**

Mais umidade é removida por meio da prensagem da folha de papel entre prensas. A folha normalmente é conduzida entre as prensas com o auxílio de um feltro que a sustenta e que, também, ajuda na remoção da água que é pressionada para fora da folha.

Pode-se aplicar vácuo para facilitar a remoção da água. Depois da prensagem, o grau de secagem da folha situa-se usualmente na faixa de 35 a 45% (Ewing, 1985).

Novamente, nesta etapa também só se consome energia elétrica, para o acionamento dos cilindros das prensas, das esteiras de feltro e das bombas de vácuo.

### 3.2.8 Secagem do papel

Após a prensagem, seca-se a folha de papel, usualmente através de sua condução, por uma esteira, entre vários cilindros aquecidos a vapor.

As características da folha na direção transversal ao seu movimento na máquina de papel frequentemente são melhoradas com o auxílio de secadores elétricos de raios infravermelhos ou de radiofrequência.

Frequentemente se adiciona amido, cola ou revestimento à folha de papel, a fim de conferir a ela certas propriedades como, por exemplo, papéis couché, maciez, etc. Quando isto ocorre, há uma etapa de pré-secagem da folha, seguida de sua passagem por uma prensa, onde são agregados estes aditivos, devidamente diluídos em água. A folha com os aditivos é submetida, então, a uma secagem que a conduz a um teor de sólidos em torno de 95% (Laurijssen *et al.*, 2010).

Terminada a secagem, em geral a folha é enrolada em bobinas localizadas logo após a máquina de papel.

Nesta etapa, consome-se energia elétrica no acionamento dos cilindros aquecidos, da esteira de feltro e das bombas. Por outro lado, tem-se neste estágio a maior demanda de energia térmica da máquina de papel, na forma do vapor que aquece os cilindros de secagem. O consumo energético específico situa-se na faixa de 2,8 a 4,0 MJ/kgH<sub>2</sub>O, que aumenta para 3,0 – 4,5 MJ/kg H<sub>2</sub>O quando o papel é revestido, enquanto que a taxa de secagem é de 15 a 20 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup> para papéis sem revestimento e de 5 a 10 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup> para papéis revestidos (Laurijssen *et al.*, 2010).

Na secagem de papéis sanitários e, em menor escala, de papelão é comum se encontrar nas fábricas a secagem por impacto (“*impingement drying*”), que emprega ar aquecido por queimadores a gás natural. Estes secadores, conhecidos como cilindros Yankee, possuem elevadas taxas de secagem (cerca de 200 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>), por conta da elevada diferença de temperatura entre o ar e a folha de papel úmida. O consumo energético específico na secagem de papelão (2,8 a 3,5 MJ/kg H<sub>2</sub>O) é comparável ao

observado nos secadores empregando cilindros aquecidos a vapor, mas este consumo é superior ao dos secadores a vapor no caso da secagem de papéis sanitários (4,0 a 5,0 MJ/kg H<sub>2</sub>O) (Laurijssen *et al.*, 2010).

Um outro tipo de secagem com ar quente, conhecido como “*Through-air drying – TAD*”, também é empregado com papéis sanitários e filtros de papel. Neste processo o ar quente escoia através da folha de papel, passando por cada uma de suas fibras. Isto torna a secagem muito eficiente; a taxa de secagem varia de 170 a 550 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>. Como não há secagem mecânica, através de prensas, em uma máquina TAD, este processo requer a remoção, por energia térmica, de cerca de duas vezes mais água do que no processo convencional, com cilindros aquecidos a vapor. Logo, embora o processo de secagem em si seja mais eficiente, o seu consumo energético específico acaba sendo mais elevado: 3,4 – 4,5 MJ/kg H<sub>2</sub>O. As principais vantagens deste processo são a maior maciez, volume e absorção que propiciam ao papel sanitário (Laurijssen *et al.*, 2010).

Secadores elétricos, ou a gás natural emitindo radiação infra-vermelha são utilizados em algumas fábricas na secagem de papel, papelão e, sobretudo, papel revestido, por assegurarem uma boa estabilidade dimensional da folha de papel no sentido transversal. Seu consumo energético específico é elevado, variando de 5 a 8 MJ/kg H<sub>2</sub>O. Sua taxa de secagem é moderada na secagem de papel e papelão (10 – 30 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>), mas bem mais elevada no caso de papel revestido (70 – 120 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>), justificando seu maior uso para esta finalidade ((Laurijssen *et al.*, 2010).

Segundo Laurijssen *et al.*, (2010), de 85 a 90% dos processos de secagem nas fábricas de papel e celulose no mundo utilizam cilindros aquecidos a vapor.

### **3.2.9 Acabamento do papel**

Em geral, o papel oriundo das bobinas das máquinas de papel é cortado e rebobinado em tamanhos menores, determinados pelos seus usos finais.

Outras operações de acabamento incluem o revestimento das folhas. O tratamento com produtos químicos para a obtenção de determinadas propriedades da superfície das folhas e o corte do papel em tamanhos determinados pelos clientes.

Nesta etapa se consome energia elétrica no acionamento das máquinas que realizam estas operações de acabamento do papel. Demanda-se energia térmica nas

operações de revestimento das folhas e tratamento, com produtos químicos, da superfície do papel.

### **3.2.10 Recuperação de reagentes químicos**

O resíduo gerado no processo Kraft de produção de pastas de celulose - a lixívia, ou licor negro - é um efluente que contém os componentes não celulósicos dos cavacos de madeira e todos os reagentes químicos utilizados no processo de digestão dos cavacos.

A lixívia é concentrada até um nível de 50% de sólidos em evaporadores de múltiplos efeitos e até 60% de sólidos em evaporadores de contato direto (Bajay *et al.*, 1996).

A parte orgânica da lixívia concentrada é queimada na caldeira de recuperação de reagentes químicos. Os sais fundidos de sódio que permanecem na caldeira após a combustão da matéria orgânica - carbonato de sódio e sulfeto de sódio - são dissolvidos em água, formando um produto conhecido como “licor verde”.

Em seguida é feita a caustificação do licor verde, resultado de sua reação com cal, formando o carbonato de sódio e o hidróxido de sódio. Um clarificador separa a lama contendo carbonato de cálcio do clarificado (hidróxido de sódio). A partir desta caustificação se recompõe o licor branco, que é enviado ao processo de cozimento.

O carbonato de cálcio é adensado em filtros a vácuo e calcinado em fornos de cal, transformando-se em óxido de cálcio, que retorna ao processo de caustificação do licor verde.

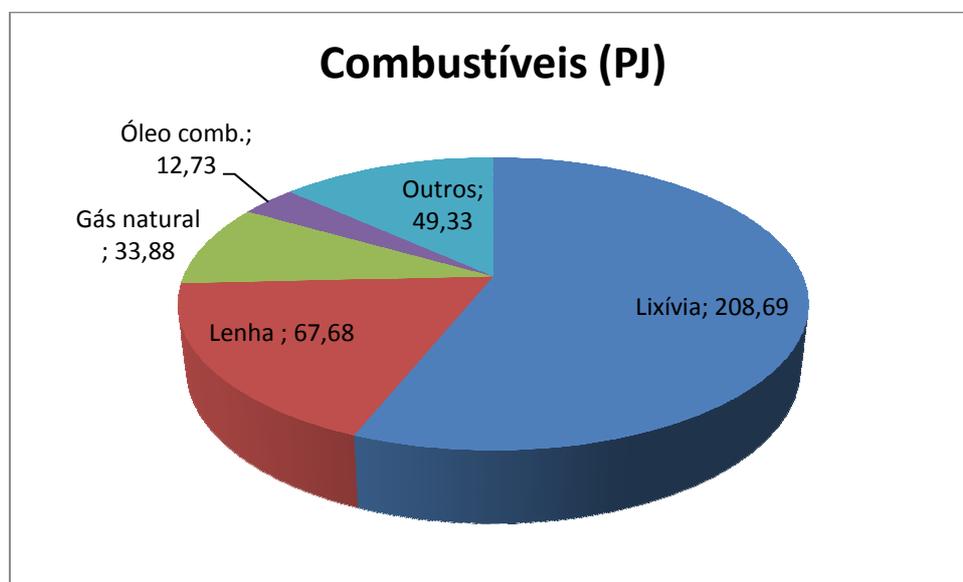
Os fornos de cal, em geral, consomem óleo combustível ou gás natural.

A principal demanda de vapor na recuperação de reagentes químicos é na operação de concentração da lixívia. Energia elétrica é empregada no acionamento de bombas, ventiladores e misturadores.

## **3.3 Consumo energético da indústria de papel e celulose no Brasil**

A indústria brasileira de papel e celulose consome cerca de cinco vezes mais energia térmica do que energia elétrica.

Os principais combustíveis utilizados neste segmento industrial são a lixívia, lenha, gás natural e óleo combustível, nesta ordem (vide Figura 3.5). Em 2013, a lixívia foi responsável por 56% do total de combustíveis consumidos na indústria de papel e celulose brasileira.



Fonte: Elaboração própria a partir de dados de EPE/MME (2014)

**Figura 3.5 Consumo de combustíveis, em PJ, na indústria de papel e celulose no Brasil em 2013**

Em 2013, as empresas produtoras de papel e celulose no País geraram 10.173 GWh, atendendo à 51,9% de sua demanda de eletricidade – 19.594 GWh. De toda a eletricidade autoproduzida por elas naquele ano, 75,4 % foram produzidos em unidades de cogeração com a combustão de lixívia, 10,7% com a queima de cavacos e resíduos provenientes do processamento da madeira, 2,2% em pequenas usinas hidrelétricas, 2,7% em plantas de cogeração que consomem óleo combustível; 3,1% em unidades de cogeração alimentadas com gás natural, 1,2% em centrais cogeneradoras que consomem carvão mineral; e os restantes 4,7% em conjuntos geradores consumindo outras fontes primárias de energia (EPE/MME, 2014).

Entre os anos de 1988 e 2013, ocorreram melhorias na eficiência energética da indústria de papel e celulose no Brasil. O consumo específico de energia elétrica foi reduzido de 4,52 GJ/t em 1988 para 3,55 GJ/t em 2013, uma redução de 21,5%, enquanto que o consumo energético específico total caiu de 26,01 GJ/t para 22,28 GJ/t durante este período (redução de 14,3%) (Bajay, 2015).

### 3.4 Tecnologias e boas práticas na indústria de papel e celulose

#### 3.4.1 Tecnologias e procedimentos eficientes de uso geral na indústria com grande potencial de aplicação no setor de papel e celulose

A otimização dos fluxos de calor e de água é, atualmente, uma grande preocupação não só na indústria de papel e celulose (Foelkel, 2010; Berni e Bajay, 2010; CNI, 2010), como também em diversos outros segmentos industriais, tais como, por exemplo, as indústrias de alimentos e bebidas e a indústria petroquímica.

Mateos-Espejel *et al.*, (2010) otimizaram, de uma forma integrada, os fluxos de calor e de água em uma fábrica canadense de celulose que emprega o processo Kraft, conseguindo reduções de 26% no consumo de vapor e 33% no consumo de água da fábrica e a instalação de 44,4 MW de capacidade de cogeração, utilizando de uma forma interativa, em um modelo de simulação, várias técnicas analíticas e tecnologias que usualmente são empregadas de uma forma isolada na avaliação e projeto de instalações industriais complexas com usos intensos de energia térmica e de água: análise de *Pinch Point* visando a recuperação interna de calor; análise de *Pinch Point* visando a reutilização de água; análise exergética para eliminar operações onde há destruição de exergia por misturas não isotérmicas de fluxos; aproveitamento de calor residual através de bombas de calor operando segundo um ciclo de absorção e posicionadas no processo com o auxílio de uma análise de *Pinch Point* (Bakhtiari *et al.*, 2010); recuperação de condensado; e instalação, ou ampliação de unidades de cogeração para aproveitar o vapor disponibilizado com as medidas de economia de energia adotadas.

O modelo desenvolvido por Mateos-Espejel *et al.* (2010) busca maximizar as sinergias e minimizar os efeitos contrários produzidos por estas tecnologias. O estudo de viabilidade da instalação de bombas de calor foi efetuado após as análises de reutilização da água, recuperação de condensado e recuperação interna de calor (Bakhtiari *et al.*, 2010).

Economias substanciais de energia térmica podem ser alcançadas através da busca de melhorias na eficiência de caldeiras, que são os maiores consumidores de combustíveis nas fábricas de papel e celulose, através de otimização da relação ar/combustível (monitoramento e controle contínuos para grandes caldeiras (CNI,

2010)), limpeza das superfícies de troca de calor, tratamento adequado da água da caldeira, reparos em isolamentos térmicos danificados, recuperação de calor da descarga de fundo e pré-aquecimento da água de alimentação e do ar de combustão, com o calor residual dos gases de combustão (Berni e Bajay, 2004; Foelker, 2010; Kramer *et al.*, 2010).

Resíduos da lenha são queimados nas “caldeiras de biomassa” das fábricas de papel e celulose, assim como em caldeiras de outros ramos industriais que utilizam madeira como matéria prima ou combustível. A queima em suspensão dos resíduos da lenha aumenta a eficiência das caldeiras, diminuindo o porte de novas caldeiras e diminuindo as emissões de poluentes (Clayton, 1995). Esta tecnologia utiliza, como combustível, restos de madeira e cavacos com tamanho máximo de 15 cm e proporciona eficiências de cerca de 80% nas caldeiras com o uso de queimadores ciclônicos em forma de rolo, ou queimadores cilíndricos verticais. Ela é empregada pela Klabin do Paraná em uma planta instalada na cidade de Monte Alegre (Barbeli e Bajay, 2002).

Uma outra possibilidade, bastante difundida nos países escandinavos, é a queima destes resíduos em geradores de vapor de leito fluidizado (Clayton, 1995; Foelkel, 2010; CNI, 2010). Esta categoria de gerador de vapor propicia a queima de vários tipos de combustíveis diferentes, de uma maneira mais eficiente e com menores níveis de emissão de poluentes, em comparação com as caldeiras convencionais.

Fábricas que produzem celulose de mercado e fábricas integradas tradicionalmente possuem unidades de cogeração. Isto já é bem menos comum em fábricas que só produzem papel. Conforme ocorre em vários outros segmentos industriais com elevados consumos de vapor e de energia elétrica, a instalação ou ampliação das melhores configurações de plantas de cogeração pode propiciar economias substanciais nas contas de combustíveis e energia elétrica, assim como, em alguns casos, receita oriunda da venda de eletricidade excedente para a rede pública (CNI, 2010; Kramer *et al.*, 2010).

Diversos segmentos industriais, sobretudo na indústria de alimentos e bebidas e na indústria química, utilizam evaporadores de múltiplo efeito em seus processos de fabricação. Estes evaporadores também são empregados na concentração do licor negro em fábricas de celulose que utilizam o processo Kraft. A recompressão térmica ou mecânica da água evaporada e sua utilização como vapor de processo nos corpos subsequentes dos evaporadores, assim como a adição de novos corpos até se atingir 6 ou

7 podem propiciar ganhos significativos de eficiência energética (IPT, 1990; Bajay *et al.*, 1995).

Uma medida simples que pode economizar energia tanto na indústria de papel e celulose como em inúmeros outros ramos industriais é o uso de água quente, em vez de vapor vivo, no tratamento de efluentes (Bajay *et al.*, 1995).

A geração de biogás a partir da digestão anaeróbica de resíduos provenientes de processos produtivos tem se difundido bastante, impulsionada por normas ambientais cada vez mais rígidas que regem a disposição de resíduos industriais. Nas fábricas de papel a partir de aparas há um potencial econômico para a produção de biogás utilizando a grande quantidade de resíduos que emana do tratamento das aparas, e o seu uso nas caldeiras das fábricas, substituindo óleo combustível, ou gás natural (Berni e Bajay, 2001).

Sistemas avançados de controle de processos e de utilidades tem propiciado ganhos de produtividade e de eficiência energética em praticamente toda a indústria há anos. Berni e Bajay (2010), assim como Kramer *et al.*, (2010) mencionam ganhos energéticos obtidos pela adoção de tais sistemas nas fábricas de papel e celulose, em geral, e no sistema de secagem da máquina de papel, em particular.

O barateamento dos controladores eletrônicos de velocidade de motores elétricos tem aumentado o seu uso na indústria como um todo e, particularmente, na indústria de papel e celulose, no controle de motores, sobretudo os de grande porte, acionando partes da máquina de papel e bombas, ventiladores e compressores que operam com frequência com potências bem abaixo da nominal (Bajay, 1987; Bajay *et al.*, 1995; Berni e Bajay, 2004; Berni e Bajay, 2010; Kramer *et al.*, 2010). A Asea Brown Boveri e a Siemens comercializam estes variadores no Brasil.

### **3.4.2 Boas práticas e novas tecnologias concebidas para as fábricas de papel e celulose**

Kramer *et al.*, (2010) indicam que o uso de descascadores de tambor (*cradle debarkers*) na retirada das cascas das toras, antes destas serem encaminhadas para os picadores, gastam 33% menos energia do que os métodos convencionais de descascagem.

O uso de prensas que reduzem o grau de umidade das cascas das árvores utilizadas como combustíveis nas caldeiras de biomassa, de 55% - 58% para 45% - 48%, aumenta a eficiência destas caldeiras e reduz as emissões de materiais particulados (Clayton, 1995).

A queima de resíduos florestais nas caldeiras de biomassa aumenta a autoprodução de energia elétrica. Esta prática é comum nos países escandinavos, sobretudo na Finlândia, mas não no Brasil (Berni, Bajay e Athayde, 1996).

A pré-secagem dos cavacos de lenha através de um sistema integrado caldeira-secador, antes de sua queima na fornalha das caldeiras de biomassa, melhora a eficiência dessas caldeiras (IPT, 1990).

A utilização de *softwares* de controle baseados em inteligência artificial no processo de cozimento da celulose tem propiciado ganhos de eficiência energética nesta etapa da cadeia produtiva. Furumoto (1995) menciona que a aplicação de um algoritmo de controle baseado em lógica *fuzzy* e redes neurais, desenvolvido pela Siemens, na Alemanha, para otimizar o cozimento da celulose em uma planta na cidade de Caima, em Portugal, propiciou uma economia de 14% no consumo de vapor de processo. As condições de temperatura, pressão e concentração são controladas de modo a se obter a qualidade desejada da celulose minimizando-se o consumo de madeira e de vapor de processo.

Francis *et al.*, (2002), a IEA (2008) e Kramer *et al.*, (2010) recomendam a recuperação de calor do vapor “*flash*” produzido no tanque de despressurização de digestores contínuos e na vaporização da água quente pressurizada nos acumuladores de digestores em bateladas, para pré-aquecer os cavacos, pré-aquecer água de processo, ou evaporar a água do licor negro.

Calor também pode ser recuperado na caustificação do licor verde e no apagamento da cal queimada (Foelker, 2010).

A diminuição do teor de umidade da lama de cal proporciona economias de energia no forno de cal (Bajay *et al.*, 1995). Na etapa de recuperação dos reagentes químicos, tecnologias que constituem o estado-da-arte, como recuperadores de calor residual otimizados para o forno de cal e o sistema compacto da Tampella que, simultaneamente, queima o licor negro e recupera, através de reações químicas, os reagentes em questão (IPT, 1990), podem reduzir o consumo energético desta etapa do processo produtivo em mais de 30 % (World Energy Council, 1995).

Aumentos na produção e na eficiência das caldeiras de recuperação são possíveis de serem atingidas com um aumento da concentração de sólidos no licor negro até um teor em torno de 80%, antes de sua queima nestas caldeiras (IEA, 2008; Foelkel, 2010; Kramer *et al.*, 2010).

A queima do licor negro em caldeiras de leito fluidizado possibilita reduções nas emissões de poluentes, principalmente do dióxido de enxofre, e uma maior estabilidade do processo de combustão (Barbeli e Bajay, 2002). Além disso, a utilização de caldeiras de recuperação de leito fluidizado permite a elevação do relativamente baixo rendimento térmico de muitas caldeiras de recuperação convencionais para valores próximos a 85% (Bajay *et al.*, 1995).

Segundo Clayton (1995), a otimização da distribuição da intensidade do refino e do consumo energético específico entre os diversos estágios do processo termomecânico de fabricação de pastas de alto rendimento (PARs) pode propiciar economias significativas de energia elétrica. Economias de energia térmica na polpação termomecânica podem ser obtidas através de um uso mais intenso de recuperadores de calor (Bajay, 1997; Francis *et al.*, 2002; Kramer *et al.*, 2010).

A polpação com antraquinona, com sulfito alcalino de antraquinona - ASAQ e com sulfito neutro de antraquinona - NSAQ e melhores combinações entre polpação mecânica e polpação química podem reduzir o consumo específico de energia neste estágio do processo produtivo (World Energy Council, 1995).

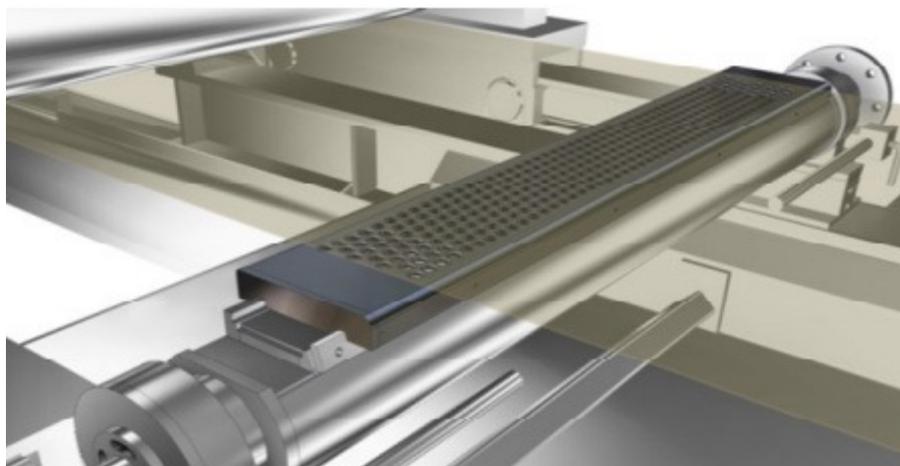
Na etapa de preparação da massa para a máquina de papel, o emprego de refinadores de baixa consistência pode propiciar uma economia de energia elétrica de 40% na operação de refino (Manninen e Poranen, 2011).

O aumento da consistência inicial da mistura fibra/água, de cerca de 1% para 8 a 15%, reduz a necessidade de movimentação de água e o consumo específico de energia elétrica na fabricação de papel (Clayton, 1995; Martin *et al.*, 2000; IEA, 2006; Manninen e Poranen, 2011). Kong, Hasanbeigi e Price (2012) reportam uma economia de energia elétrica de 8% na preparação da massa da máquina de papel e no seu sistema de vácuo.

**A utilização da tecnologia de revestimento sólido na tampa perfurada das caixas lava-feltro (vide** Fonte: [http://www.valmet.com/valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID2/WID-111123-2256E-E7929/\\$File/311\\_resultspp.pdf?openElement](http://www.valmet.com/valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID2/WID-111123-2256E-E7929/$File/311_resultspp.pdf?openElement)

Figura 3.6) aumenta o deságue do feltro com pressões de vácuo menores do que a tampa convencional e diminui o atrito entre a tampa e o feltro, aumentando a vida útil

do feltro e diminuindo a carga do motor acionador da prensa (Manninen e Poranen, 2011).



Fonte: [http://www.valmet.com/valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID2/WID-111123-2256E-E7929/\\$File/311\\_resultspp.pdf?openElement](http://www.valmet.com/valmet/products/Vault2MP.nsf/BYWID2/WID-111123-2256E-E7929/$File/311_resultspp.pdf?openElement)

**Figura 3.6 Revestimento sólido na tampa perfurada das caixas lava-feltro.**

O emprego de prensas de sapatas pode propiciar economias substanciais de vapor nos múltiplos cilindros que compõem a parte de secagem térmica da máquina de papel (Bajay, 1997). Kramer *et al.*, (2010) estimam que elas proporcionam economias de vapor entre 2 e 15% na secagem térmica do papel.

A operação de secagem térmica é a principal consumidora de vapor na fabricação de papel. É importante, portanto, se buscar melhorias na recuperação de calor do ar de exaustão, ou do condensado na seção de secagem da máquina de papel (IEA, 2008; Romano, 2008; Foelker, 2010; Kramer *et al.*, 2010). Uma destas melhorias envolve a instalação de capotas fechadas nas máquinas de papel, a fim de aumentar a eficiência da recuperação de calor do ar de exaustão e diminuir o consumo de eletricidade dos ventiladores de exaustão (Berni e Bajay, 2010; Martin *et al.*, 2000; Foelker, 2010; Kramer *et al.*, 2010).

Melhorias substanciais podem ser alcançadas através da otimização de parâmetros operacionais utilizados na secagem térmica convencional com cilindros aquecidos por vapor, e maximização da recuperação do calor residual deste processo. Laurijssen *et al.*, (2010) relatam um ganho de 32%, obtido com: um aumento da temperatura do ar de exaustão e, conseqüentemente, da temperatura de ponto de orvalho, o que reduz o uso de calor na evaporação da água; um aumento na consistência dos aditivos agregados à

folha de papel entre as seções de pré-secagem e secagem final, permitindo, com isso, uma diminuição na quantidade de água a ser evaporada; e utilização de dois recuperadores de calor, um para pré-aquecer o ar de secagem e o outro para pré-aquecer a água do processo.

Ganhos de eficiência energética também podem ser obtidos através da utilização de uma nova tecnologia de secagem, que emprega uma cinta de condensação, o que dá origem à sua denominação “Condebelt”, abreviação do termo em inglês “*condensing belt*” (Martin *et al.*, 2000; IEA, 2006; Foelker, 2010; Kramer *et al.*, 2010; Kong, Hasanbeigi e Price, 2012). Nesta tecnologia, desenvolvida pela empresa finlandesa Valmet, a folha de papel é seca em uma câmara de secagem através de seu contato com uma cinta metálica contínua aquecida por vapor ou gás. A água evaporada atravessa telas de arame e condensa em uma banda de aço resfriada no outro lado da câmara. O condensado é retirado por pressão e sucção. As principais vantagens deste processo são a elevada taxa de secagem (em torno de 200 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>), que propicia menores consumos energéticos específicos (2,6 – 3,6 MJ/kg H<sub>2</sub>O) e a possibilidade de substituir toda a seção de secagem da máquina de papel. Estimam-se economias de vapor entre 10 e 20%, enquanto que o consumo de eletricidade deve permanecer o mesmo do processo convencional. Laurijssen *et al.*, (2010) relatam que, até 2010, só existiam três instalações comerciais utilizando esta tecnologia: uma na Finlândia, inaugurada em 1996, e duas na Coreia do Sul, inauguradas em 1999 e 2003.

A utilização de materiais de baixo coeficiente de atrito, como fibras de carbono, na lâmina direita, também conhecida como lâmina doutor, na secagem com cilindros Yankee, propicia economias substanciais de energia elétrica no acionamento da máquina de papel (Manninen e Poranen, 2011).

Existem algumas tecnologias ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento que apresentam perspectivas futuras promissoras de aplicação neste segmento industrial. Elas são descritas a seguir.

Segundo o World Energy Council (1995), tecnologias avançadas como a polpação baseada em solventes alcóolicos, a polpação com enzimas oriundas de fungos de madeiras podres, a polpação química com fermentação e a polpação quimiomecânica sem enxofre podem propiciar economias de energia da ordem de 10%.

O World Energy Council (1995) também estima que o branqueamento por deslocamento é capaz de reduzir o consumo de energia elétrica de 30 a 40%, em comparação com o processo de branqueamento convencional.

De acordo com o World Energy Council (1995), economias adicionais, também superiores a 30 %, podem ser conseguidas na etapa de recuperação dos agentes químicos, com tecnologias avançadas, como sistemas de recuperação direta dos produtos alcalinos e gaseificação do licor negro (Martin *et al.*, 2000; DoE, 2010).

Ganhos significativos na geração de energia elétrica e na eficiência em fábricas que produzem celulose segundo o processo Kraft podem ser obtidos através da gaseificação do licor negro e de resíduos da biomassa, antes de sua queima em unidades de cogeração operando segundo o ciclo combinado, eventualmente com injeção de vapor nas turbinas a gás (Berni and Bajay, 1997; Martin *et al.*, 2000; Berni e Bajay, 2010; CNI, 2010). Segundo a AIE, a gaseificação do licor negro e sua utilização na geração de energia elétrica em uma planta de cogeração de ciclo combinado podem produzir economias de energia da ordem de 15% em plantas piloto e unidades de demonstração até 2015 (IEA, 2006). Segundo Kong, Hasanbeigi e Price (2012), a aplicação de gaseificadores à pressão atmosférica e baixas temperaturas está em estágio de demonstração em instalações de pequena escala, enquanto que gaseificadores pressurizados, operando com altas temperaturas ainda estão no estágio de projetos piloto.

O Institute of Paper Science and Technology da Georgia Tech, em parceria com o U.S. DoE, desenvolveu um processo de caustificação direta junto com a gaseificação do licor negro em um reator de leito fluidizado recirculante (DoE, 2010). O processo de caustificação ocorre durante a gaseificação adicionando-se trititanato de sódio ao licor. A caustificação direta completa elimina o ciclo de cal tradicional, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e os custos de produção. O trititanato é recuperado através de uma reação de hidrólise e misturado com o licor a ser processado. O gás de síntese produzido pode ser convertido em energia elétrica em uma planta de ciclo combinado, ou, então, ser convertido em um combustível líquido.

A formação a seco da folha de papel, por processos mecânicos, ou através de correntes de ar, com asperção de resinas e sua polimerização para ajudar na formação da folha (Martin *et al.*, 2000; CNI, 2010; Manninen e Poranen, 2011) pode proporcionar uma economia de 50% na energia gasta na secagem do papel. Como o papel obtido com esta tecnologia é menos uniforme em sua espessura, é menos resistente e menos suave que o papel obtido com a tecnologia tradicional, sua aplicação tem sido restrita a alguns tipos de papel onde estas desvantagens não são importantes. Variantes desta técnica

utilizam etanol, ou dióxido de carbono super crítico, que requerem menos energia para sua remoção do que a água (IEA, 2006).

O emprego de novas técnicas de secagem mecânica, utilizando prensas com secagem térmica por impulsos, pode propiciar economias substanciais de vapor nos múltiplos cilindros que compõem a parte de secagem térmica da máquina de papel (Bajay, 1997). Segundo o World Energy Council (1995), esta economia pode beirar 30%.

A secagem térmica por impulsos melhora a secagem mecânica através da aplicação de temperaturas elevadas nas sapatas da prensa, reduzindo, desta forma, a evaporação da água na seção de secagem térmica da máquina de papel e, por conseguinte, o consumo específico de vapor (Martin *et al.*, 2000; IEA, 2006; Foelker, 2010). Neste equipamento o papel é prensado entre um cilindro giratório muito quente e uma sapata côncava fixa. A pressão é cerca de dez vezes superior à das prensas de sapatas atuais. O teor de sólidos da folha de papel na saída da prensa varia entre 55 e 78%, a taxa de secagem é muito elevada – 500 – 8000 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup> – e o consumo energético específico é baixo: 0,55 – 1,4 MJ/kg H<sub>2</sub>O. Apesar de um histórico de 25 anos de P&D, apoio governamental e envolvimento de um fabricante de máquinas de papel (a Valmet), Laurijssen *et al.*, (2010) afirmam que esta tecnologia ainda não está provada no mercado. A patente do processo pertence à empresa finlandesa Valmet (Martin *et al.*, 2000).

Kong, Hasanbeigi e Price (2012) descrevem várias tecnologias promissoras para a indústria de papel e celulose, em termos de ganhos de eficiência energética e redução de emissões de gases que causam o efeito estufa, que ainda estavam, em 2012, em desenvolvimento. Destacam-se as seguintes tecnologias:

- (i) Tratamento dos cavacos com micro-ondas, antes da polpação química, para reduzir o consumo específico de energia na polpação, no forno de cal e na concentração do licor negro;
- (ii) Tratamento químico (com ácido oxálico), ou biológico, com fungos ou enzimas, dos cavacos antes da polpação mecânica, para se economizar energia no refino. Os tratamentos químico e enzimático ainda estavam no estágio de projeto piloto em 2012, enquanto que o tratamento com enzimas já estava em demonstração piloto;

- (iii) Utilização de 20 a 30% do licor verde em pré-tratamento dos cavacos antes de sua polpação no processo Kraft, para reduzir o consumo energético específico no digestor;
- (iv) Pré-concentração do licor negro através de membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, ou osmose reversa), para se economizar energia nos evaporadores de múltiplo efeito;
- (v) Utilização de caldeira de recuperação química com duas fornalhas e rea aquecimento do vapor, para aumentar a eficiência do ciclo de vapor e aumentar a geração de eletricidade com o mesmo consumo de licor negro. Esta tecnologia se encontrava, em 2012, no estágio de projeto piloto;
- (vi) A utilização de prensas de deslocamento, que combinam a prensagem da folha com o insuflamento de ar sob pressão através da folha de papel, pode economizar cerca de 30% da energia gasta na secagem da folha. Esta tecnologia está sendo desenvolvida pela Voith;
- (vii) A agregação de aditivos na folha de papel economiza energia. Agregar mais do que 15 a 20% dos aditivos minerais usuais prejudica a resistência e a qualidade do papel. Novos aditivos fibrosos, de cálcio e de sílica, podem reduzir o consumo específico de energia na máquina de papel em até 25%. Esta tecnologia ainda estava, em 2012, no estágio de projeto piloto;
- (viii) O uso de secadores a gás da folha de papel, no lugar da secagem com vapor, pode economizar de 10 a 20% da energia consumida na secagem da folha. Em 2012 esta mudança só estava testada em projetos piloto;
- (ix) O uso de uma capota pressurizada em cilindros de secagem da folha de papel melhora a taxa de transferência de calor na superfície de contato da folha com o cilindro e, conseqüentemente, reduz o consumo energético específico na secagem. A primeira instalação comercial desta tecnologia foi realizada pela Voith na Alemanha em 2008;
- (x) A adição de secagem por micro-ondas na seção de prensas da máquina de papel pode aumentar a velocidade da máquina de papel em 30% e reduzir o consumo energético específico na secagem de 12 a 20%;
- (xi) A remoção da hemicelulose dos cavacos antes da polpação química, para utilização como insumo em alguns processos industriais, já é praticada na produção de celulose solúvel. A extensão desta prática para outros tipos de

celulose está sendo testada em escala piloto e tem como principais vantagens o aumento da produção em fábricas onde o gargalo esteja sendo a caldeira de recuperação, e o aumento da eficiência energética do processo Kraft; e

- (xii) Extração de lignina do licor negro para queima no forno de cal do processo Kraft, ou para usar como matéria-prima na fabricação de novos produtos, na própria fábrica de celulose, ou alhures. A Metso é proprietária da tecnologia LignoBoost, cuja primeira instalação comercial deve ter operado em 2012, nos EUA.

O conceito de biorefinaria vem sendo discutido desde a década de setenta, mas somente nos últimos anos é que estudos mais aprofundados passaram a ser desenvolvidos, sobretudo na União Europeia, com financiamentos substanciais.

Basicamente, uma biorefinaria consiste na utilização de plantas em geral, e árvores em particular, assim como produtos reciclados oriundos da biomassa, como, por exemplo, aparas de papel, para produzir, em um mesmo local, calor, energia elétrica, biocombustíveis, como o etanol, e biomateriais, como o papel. As emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção destes múltiplos produtos são compensadas pela absorção deste gás durante a fase de crescimento da fonte de biomassa utilizada.

Há duas rotas tecnológicas, ou plataformas que podem ser empregadas, em conjunto ou sozinhas, em uma biorefinaria: a plataforma do açúcar, mais conhecida como “rota bioquímica”, e a plataforma do gás de síntese, conhecida como “rota termoquímica” (CGEE, 2010). As matérias primas oriundas da rota bioquímica e o gás de síntese produzido na rota termoquímica podem ser utilizados para produzir combustíveis, produtos químicos e materiais, enquanto que os resíduos da primeira rota e o gás limpo da segunda geram calor e eletricidade em unidades de cogeração.

Como diversos tipos de produtos podem ser obtidos de diferentes tipos de matérias primas oriundas da biomassa, o projeto de uma determinada biorefinaria depende das matérias primas mais econômicas que estão disponíveis e dos produtos que uma pesquisa de mercado indicar como sendo as mais lucrativas de serem produzidas por esta biorefinaria.

Biorefinarias podem ser construídas em etapas, a partir, por exemplo, de fábricas de papel e celulose, ou usinas de açúcar e álcool já existentes, ou, então, elas podem ser concebidas, desde o início, como empreendimentos multi-produtos, utilizando, eventualmente, múltiplas matérias primas oriundas da biomassa. No primeiro caso, os

processos das fábricas originais devem ser adaptados às novas atividades, de forma a se otimizar a eficiência do sistema como um todo.

A lignina, que pode ser recuperada do licor negro, é atualmente utilizada em diversas aplicações, tais como, por exemplo, aglutinadores, surfatantes, baterias e aditivos em pavimentações rodoviárias. Possíveis novas aplicações e produtos no futuro incluem as fibras de carbono, particularmente as fibras de carbono ativado, que podem ser usadas na remoção de impurezas de gases e líquidos, e a produção de fenóis, que constituem hoje uma matéria prima para polímeros como resinas de formaldeídos (The Swedish Energy Agency, 2008).

Hemiceluloses são polissacarídeos que podem ser recuperados da madeira, ou do licor negro. As hemiceluloses da madeira têm um grande potencial para se tornar matérias primas renováveis alternativas bastante atraentes para o revestimento de papel de embalagem e na fabricação de filmes de proteção. Tem-se estudado a aplicação de derivados da hemicelulose como aditivos e adesivos na fabricação de papel. Hidrogéis, que são empregados como matrizes para uma liberação controlada de moléculas bioativas, também podem ser produzidas a partir da hemicelulose. O furfural é um outro derivado interessante que pode ser convertido em um grande número de compostos de furano, que, por seu turno, podem produzir diferentes tipos de plásticos. Hemiceluloses degradadas podem ser transformadas, por exemplo, em xilitol e manitol, que são adoçantes não cancerígenos para diabéticos (The Swedish Energy Agency, 2008).

Towers *et al.*, (2007) analisaram a disponibilidade de matérias primas, produtos novos que poderiam ser produzidos em instalações existentes, e tanto tecnologias maduras como emergentes que poderiam viabilizar a criação de biorefinarias associadas à produção de papel no Canadá. Eles também auxiliaram na montagem de uma proposta, pela Pulp and Paper Research Institute of Canada (Paprican) e pela Canadian Pulp and Paper Network for Innovation in Education and Research (Papier), de formação de uma “Rede Canadense de Biorefinarias Florestais”.

As várias operações unitárias que podem ser utilizadas em biorefinarias de base florestal estão em diferentes estágios de desenvolvimento visando esta aplicação. Kong, Hasanbeigi e Price (2012) relatam que a combustão de biomassa e a produção de biogás já estão em escala comercial, enquanto que a gaseificação está em escala de demonstração, semi-comercial e a pirólise ainda está em escala piloto.

Nos EUA, já está sendo comercializado um reator contínuo que utiliza a hidrólise ácida para converter matéria prima composta por celulose em açúcares fermentáveis

(pentose, hexose, ou glucose). O reator possui dois estágios; a função do segundo é recuperar calor residual e ácidos para reutilização no primeiro estágio (DoE, 2010). Estes açúcares, por seu turno, podem ser convertidos em etanol, ou outros produtos químicos orgânicos de interesse comercial.

A BioMetrics, Inc., nos EUA, desenvolveu recentemente um novo processo de hidrólise ácida, com ácido diluído, que converte resíduos de fábricas de papel contendo fibras de celulose em ácido fórmico e ácido levulínico. A partir deste último, podem ser produzidos diversos produtos químicos e combustíveis de alto valor agregado (DoE, 2010).

Nanotecnologias apresentam boas perspectivas, a médio e longo prazo, de aplicações revolucionárias na indústria de papel e celulose, envolvendo, por exemplo, novos usos para o papel, novos produtos de papel e produtos inteligentes produzidos a partir de fibras. Pesquisas nestas direções já estão em curso na Finlândia (Reitzer, 2007; Kong, Hasanbeigi e Price, 2012).

### **3.4.3 Consumos energéticos específicos das melhores práticas industriais**

Worrell *et al.* (2008) apresentam um valor de 11,1 GJ/t como sendo o consumo energético específico das melhores práticas industriais na produção de celulose de mercado através do processo Kraft. O consumo específico de energia elétrica correspondente é de 610 kWh/t. Trata-se de fábricas que geram mais eletricidade do que necessitam consumir, produzindo excedentes entre 15 e 20 kWh/t.

O processo termo-mecânico com recuperação de calor na forma de vapor e água quente é o que corresponde à melhor prática na produção de pastas de alto rendimento (PAR). Os seus consumos específicos de energia (total) e de eletricidade são 6,6 GJ/t e 2.190 kWh/t, respectivamente, e a recuperação de calor pode atingir 1,3 GJ/t (Worrell *et al.*, 2008).

De acordo com Worrell *et al.*, (2008), a melhor prática para produção de celulose a partir de papel reciclado requer um consumo energético específico de 1,5 GJ/t e um consumo específico de eletricidade de 330 kWh/t.

O consumo energético específico da produção de papel a partir de celulose depende do tipo de papel. Worrell *et al.*, (2008) apresentam os valores indicados na

Tabela 3.1 para o consumo energético específico (total) e consumo específico de eletricidade das melhores práticas industriais para a produção de alguns tipos de papéis.

**Tabela 3.1 Consumos energéticos específicos e consumos específicos de energia elétrica por tipo de papel das melhores práticas industriais, segundo Worrell *et al.* (2008)**

	Consumo energético específico (GJ/t)	Consumo específico de eletricidade (kWh/t)
Papel jornal	7,2	570
Papel cartão	9,6	800
Papéis Kraft para embalagens	7,8	535
Papéis para fins sanitários	10,5	1000

A AIE apresenta, na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, valores de consumos energéticos específicos, total e de energia elétrica, diferentes dos da Tabela 3.1, para as melhores práticas industriais envolvidas na produção de diversos tipos de papel.

**Tabela 3.2 Consumos energéticos específicos e consumos específicos de energia elétrica por tipo de papel das melhores práticas industriais, segundo a IEA (2007)**

	Consumo energético específico (GJ/t)	Consumo específico de eletricidade (GJ/t)
Papel de imprimir e escrever não revestido	7,05	1,80
Papel de imprimir e escrever revestido	7,59	2,34
Papel jornal	5,94	2,16
Papel cartão e papel para embalagens	6,12	1,80
Papelão para caixas	8,01	2,88
Papéis para fins sanitários	8,73	3,60
Papéis especiais	7,76	2,88

Os consumos energéticos específicos e consumos específicos de energia elétrica das melhores práticas industriais em fábricas integradas de papel e celulose, segundo uma compilação de Worrell *et al.*,(2008), estão indicados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

**Tabela 3.3 Consumos energéticos específicos e consumos específicos de energia elétrica por tipo de papel das melhores práticas industriais em fábricas integradas e recicladoras, segundo Worrell *et al.* (2008)**

	Consumo energético específico (GJ/t)	Consumo específico de eletricidade (kWh/t)
Papel de imprimir e escrever branco, sem revestimento e manufaturado pelo processo Kraft a partir de celulose virgem	18,3	1200
Papel cartão e papel de embalagem manufaturados pelo processo Kraft, sem a operação de branqueamento, a partir de celulose virgem	17,6	1000
Papel de imprimir e escrever branco, revestido e manufaturado pelo processo sulfito, a partir de celulose virgem	22,4	1500
Papel de imprimir e escrever branco, sem revestimento e manufaturado pelo processo sulfito, a partir de celulose virgem	22,3	1200
Papel jornal manufaturado pelo processo termo-mecânico, a partir de celulose virgem	6,6	2200
Papel para revistas manufaturado pelo processo termo-mecânico, a partir de celulose virgem	7,3	2100
Papel cartão manufaturado 50% pelo processo termo-mecânico, a partir de celulose virgem	11,8	2300
Papel cartão manufaturado a partir de papel reciclado, sem a operação de destintamento	11,2	900
Papel jornal manufaturado a partir de papel reciclado, com a operação de destintamento	7,6	1000
Papéis para fins sanitário manufaturado a partir de papéis reciclados, com a operação de destintamento.	11,3	1200

## 4. Indústria de cimento

### 4.1 Introdução

O cimento é um material diretamente ligado ao desenvolvimento da construção civil. Segundo o Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento (SNIC), ele é o principal componente do concreto, que, por seu turno, é o segundo material de maior consumo no mundo, essencial para o desenvolvimento da infraestrutura de um país (SNIC, 2013).

O cimento pode ser definido como um pó fino, com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que endurece sob a ação de água, constituído basicamente por óxidos de cálcio (CaO), silício (SiO<sub>2</sub>), alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e ferro (FeO/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Na forma de concreto torna-se uma pedra artificial que pode ganhar formas e volumes, de acordo com as necessidades de cada aplicação.

Todos os tipos de cimento são designados como “cimentos Portland”, por conta da homenagem que Joseph Aspdin, descobridor do cimento moderno em 1824, fez à ilha britânica de Portland, que possui rochas com cor e propriedades de durabilidade e solidez semelhantes à do cimento (Silva, 2012).

Podem ser obtidas economias de energia na indústria do cimento através da substituição de equipamentos de baixa eficiência por outros mais eficientes e, também, através de um uso otimizado dos equipamentos disponíveis.

### 4.2 Processo produtivo

O processo de produção do cimento é constituído por três etapas básicas: a preparação do cru, a clínquerização e a moagem. A primeira destas etapas consiste na britagem da argila e do calcário a diâmetros adequados à moagem. A mistura dos ingredientes (cerca de 90% de calcário de 10% de argila) e a sua exposição a um intenso calor desencadeiam reações químicas que convertem os materiais em uma pasta chamada clínquer. Após adição de gipsita (gesso), a mistura é moída, obtendo-se o pó fino denominado cimento Portland.

A produção dos diversos tipos de cimento apresenta procedimentos idênticos durante as primeiras etapas do processo produtivo, diferenciando-se somente na etapa

final de moagem do clínquer, quando ocorrem as adições de materiais distintos para sua obtenção.

A fabricação do clínquer é o processo mais energo-intensivo envolvido na produção de cimento.

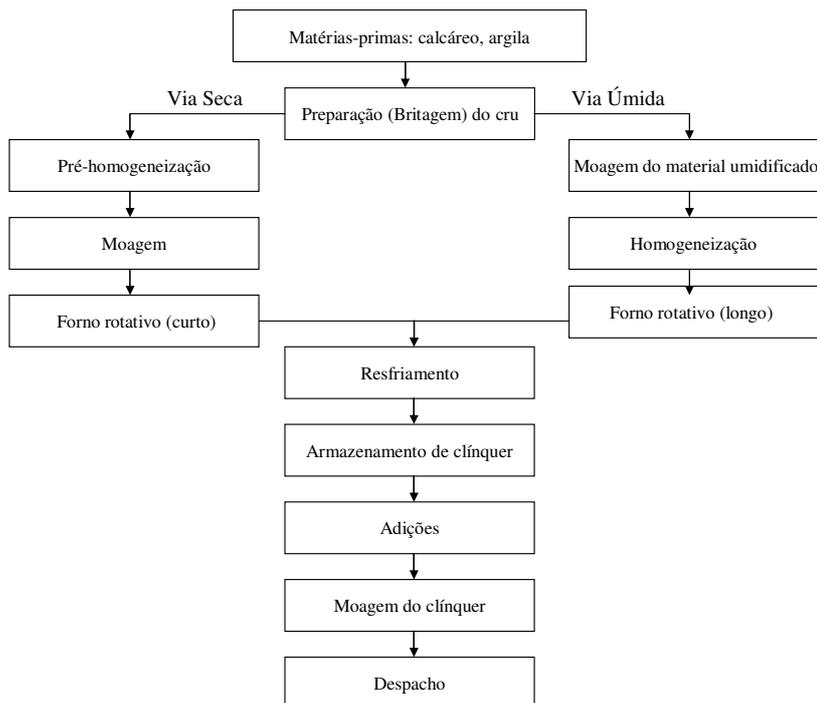
Existem duas tecnologias principais na fabricação do clínquer, por via úmida e por via seca. Segundo o SNIC, no Brasil 99% da fabricação de cimento se dá via seca, que diminui o consumo de combustível em até 50%, em relação ao processo via úmida. No processo via úmida, as matérias primas são moídas com água e enviadas para o forno sob a forma de lama ou pasta, com aproximadamente 40% de água, aumentando significativamente o consumo de combustível para extrair a água presente na mistura.

O processo via úmida foi utilizado inicialmente na fabricação de cimento, pois sua operação é mais simples e não necessita de sistemas avançados de filtragem de material particulado. Já o processo “via seca” tem a grande vantagem de economizar combustível, na medida em que não há água a ser evaporada no forno, o que reduz custos e diminui a emissão de poluentes. O forno de um processo por via seca é mais curto que um forno por via úmida, porém suas instalações de moagem e o forno em si são mais complexos. A homogeneização é mais difícil e as instalações requerem equipamento de filtragem de material particulado muito mais complexo (Santi, 2003).

O fluxograma da Figura 4.1 indica as etapas dos processos produtivos, via seca e via úmida, do cimento.

Depósitos naturais de calcário fornecem o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), extraído de minas a céu aberto, localizadas quase sempre bem próximas às plantas de fabricação. Pequenas quantidades de minério de ferro, bauxita, argila, xisto ou areia podem ser necessários para prover óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), trióxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e sílica ( $\text{SiO}_2$ ) para adaptar a composição química do *mix* de matérias primas aos requisitos do processo e do produto.

As matérias primas são então encaminhadas para a etapa de britagem, em trituradores primários e secundários, de onde saem em pedaços de cerca de 10 cm. Essa granulometria é adequada à sua alimentação nos moinhos de matérias primas da fábrica.



**Figura 4.1** Etapas dos processos produtivos da indústria de cimento.

A qualidade do produto e a estabilidade do processo de produção requerem materiais quimicamente homogêneos. A pré-homogeneização é o processo que mantém a mistura de matérias primas na sua composição química adequada. Os pedaços triturados são então moídos novamente em conjunto para produzir a “farinha crua”.

Quase todos os fornos de cimento hoje em funcionamento contam com torres de pré-aquecimento, que são responsáveis por remover a umidade ainda restante no material (inferior a 1%) e por iniciar a descarbonatação do calcário. Os fornos de maior capacidade e mais modernos contam com torres maiores capazes de completar quase totalmente o processo de descarbonatação. Quanto mais eficaz o pré-aquecimento, mais curtos são os fornos. Os pré-aquecedores mais utilizados são torres de ciclones, que são equipamentos capazes de retirar partículas sólidas de uma corrente de gases. Dispostos em elevadas estruturas, que frequentemente ultrapassam 100 metros de altura, diversos separadores ciclônicos são interligados entre si através de dutos de imersão utilizados para a troca térmica que ocorre entre a farinha alimentada e os gases quentes provenientes do forno. Através da sequência de ciclones fluem os gases quentes provenientes do forno, em contracorrente com a matéria prima. Na medida em que esta

se mistura com o fluxo de gases, ocorre transferência de calor e transferência de massa. Nos primeiros trechos do processo, elimina-se a umidade superficial, enquanto a temperatura permanece próxima à temperatura de ebulição da água. A partir deste ponto, o material sólido contendo apenas umidade intergranular passa a ser aquecido gradativamente. No fim do processo, o material atinge de 700°C a 1000°C, suficiente para que a água seja eliminada e para se iniciarem decomposições químicas da matéria-prima.

Quando o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) atinge a temperatura de 900° C é desencadeada uma reação chamada “calcinação”, por meio da qual é liberado  $\text{CO}_2$  e formado óxido de cálcio, antes da conversão para clínquer ( $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ). Parte da reação acontece no “pré-calcinador”. A decomposição química do calcário emite entre 60% e 65% das emissões de  $\text{CO}_2$  de uma fábrica de cimento; o restante das emissões é gerado pela queima de combustíveis.

O clínquer é o principal componente do cimento Portland, sendo a fonte de Silicato tricálcico  $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$  e Silicato dicálcico  $(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ . Estes compostos tem uma forte característica de ligante hidráulico e estão diretamente relacionados com a resistência mecânica do material após a hidratação. A produção do clínquer é a parte central do processo de fabricação de cimento, sendo a etapa mais complexa e crítica em termos de qualidade e custo. No início do processo de fabricação do clínquer, farinha pré-calcinada é levada ao forno rotativo. Parte das reações de descarbonatação e a formação de silicatos de cálcio e aluminatos de cálcio ocorrem no interior desse forno. Os fornos rotativos consistem em cilindros horizontais de até 160 metros de comprimento. Um pequeno ângulo de inclinação combinado ao lento movimento de rotação (entre 0,5 rpm e 5,0 rpm) permite que o material percorra o cilindro na medida em que desliza pelas paredes. Internamente, há um revestimento de material refratário que protege a carcaça do forno das altas temperaturas e conserva o calor em seu interior. A matéria prima permanece no forno por aproximadamente 4 horas e atinge temperaturas de até 1.230°C (uma temperatura menor produz cal, enquanto uma temperatura maior apenas aumenta o consumo energético). Essa elevada temperatura causa reações químicas e transformações físicas, tornando a mistura incandescente e pastosa, e transformando a farinha em clínquer.

Esse clínquer, resfriado, é então moído junto com gesso e, dependendo do tipo de cimento a ser produzido, com outros materiais, como escória siderúrgica, cinzas volantes, pozolanas e fíler calcário, para formar o cimento portland. Atualmente

empregam-se dois tipos principais de resfriadores. Os fornos mais antigos ainda em operação utilizam resfriadores satélites, que são cilindros menores solidários ao movimento de rotação do forno e acoplados à carcaça do mesmo. Os fornos construídos a partir da década de 1980 frequentemente são dotados de resfriadores de grelha, com ventilação forçada. Esse tipo de resfriador possibilita uma maior taxa de transferência de calor entre o clínquer e o ar que entra. Desta forma, reduz-se a temperatura de saída do material, possibilitando a recuperação de parte da energia associada ao mesmo, o que aumenta a eficiência do sistema. Os resfriadores modernos, além de propiciarem uma boa troca térmica, também direcionam o ar quente oriundo dos resfriadores para o forno, a fim de melhorar a combustão na zona de queima e no calcinador, e, quando ainda há excedentes deste ar, também para auxiliar a troca de calor no moinho de matéria prima.

O despacho do cimento é feito para uma central de empacotamento, no caso de cimento ensacado, ou para um caminhão silo, no caso de venda a granel.

Existem dois tipos de fábricas de cimento, as integradas que produzem tanto clínquer como cimento, e as unidades de moagem, que adquirem o clínquer e só produzem cimento.

### **4.3 Caracterização energética do processo**

A indústria de cimento consome muito mais energia térmica, na forma de combustíveis, do que energia elétrica; o consumo de energia elétrica da indústria de cimento no Brasil em 2013 foi de apenas 13,2% do seu consumo total de energia (EPE/MME, 2014).

A energia térmica é utilizada na secagem, aquecimento e calcinação das matérias-primas. A maior parte da eletricidade é usada no processo de moagem do clínquer (40%), na moagem das matérias-primas (25%) e na operação do forno e do resfriador (20%) (Maríngolo, 2001).

É importante destacar o co-processamento de resíduos na indústria cimenteira no Brasil a partir de meados da década de setenta. A participação destes combustíveis não convencionais no consumo total dos combustíveis utilizados na fabricação de cimento aumentou bastante a partir do início da década de 2000, atingindo 9,9% em 2013 (Bajay *et al.*, 2015).

Segundo o SNIC, 36 fábricas integradas, representando 80% da produção nacional de clínquer, estão licenciadas para coprocessar resíduos. Os principais resíduos aproveitados são: pneumáticos, borrachas, lodo de esgoto, tintas e solventes, papel e papelão, borras ácidas, refratários, resíduos de madeira, borras oleosas e graxas, entulhos da construção civil e terra contaminada (DTTM/SGMTM/MME, 2013).

O coprocessamento apresenta-se como uma solução apropriada para o aproveitamento energético de resíduos, principalmente após a promulgação da lei que estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, segundo a qual os resíduos somente poderão ser dispostos em aterros após terem sido esgotadas todas as possibilidades de reaproveitamento (Bajay, *et al.*, 2015).

#### 4.4 Principais equipamentos e usos finais da energia, por etapa do processo produtivo.

O aquecimento direto, através da queima de combustíveis e recuperação de calor, está presente no forno rotativo, incluindo pré-aquecedor e pré-calcinador se existirem, e na moagem e homogeneização da farinha crua, para efeito de secagem. Já a força motriz é parte integrante de todas as etapas do processo de fabricação.

A Tabela 4.1 mostra os principais equipamentos utilizados no processo de fabricação do cimento em uma fábrica integrada, com seus respectivos usos finais da energia.

**Tabela 4.1 Principais equipamentos das cimenteiras e seus usos finais da energia.**

<i>Etapas do processo</i>	<i>Principais equipamentos</i>	<i>Uso final</i>
Extração de matéria prima	Britadores, perfuratrizes, locomotivas, caminhões e cintas transportadoras.	Força motriz
Britagem, deposito de calcário e argila	Britadores, extratores, cintas transportadoras e filtros de despoejamento.	Força motriz
Moagem e homogeneização da farinha crua	Cintas transportadoras, moinhos e secadores.	Força motriz e aquecimento direto
Alimentação do forno	Roscas, elevadores, bombas e ciclones.	Força motriz
Forno rotativo/pré-aquecedor/pré calcinador	Aquecedores, ventiladores, queimadores, bombas e motores.	Aquecimento direto e força motriz
Britagem do gesso e moagem do cimento	Britadores, cintas transportadoras, moinhos e separadores.	Força motriz
Ensacamento e expedição	Sistema pneumático, ensacadoras, caminhões e filtros.	Força motriz

Fonte: Dorileo, Bajay e Gorla, 2010.

De acordo com um relatório recente da Energy Techonolgy Systems Analysis Program (ETSAP), da Agência Internacional de Energia (ETSAP/IEA, 2010), 38% do consumo total de eletricidade na fabricação de cimento pelo processo de via seca ocorre na moagem de cimento, 24% na moagem de matérias-primas, 22% na produção de clínquer, que inclui a moagem de combustíveis sólidos, 6% na homogeneização das matérias-primas, 5% no processo de extração das matérias-primas e aditivos, e 5% no transporte, embalagem e carregamento do cimento. Estes dados indicam que a maior parte (84%) do consumo de eletricidade neste processo ocorre nas etapas de moagem (moinhos de cimento e de farinha crua) e na clinquerização (forno, pré-aquecedor e resfriador).

Este mesmo relatório (ETSAP/IEA, 2010) destaca que a maioria do consumo de energia térmica ocorre no processo de cliquerização (forno e pré-calcinador).

#### **4.5 Consumos energéticos específicos**

O consumo específico de energia térmica é calculado com base na produção de clínquer, já que praticamente todo o consumo de energia térmica ocorre durante a fabricação do clínquer.

Nas unidades fabris que apenas realizam a moagem do clínquer com aditivos para produzir os vários tipos de cimento só há consumo de eletricidade.

O consumo específico de energia térmica é bem maior no processo “via úmida” do que no processo “via seca”. Não há variações muito grandes no consumo específico de energia elétrica entre os dois processos.

O consumo de energia elétrica ocorre durante a produção do clínquer e, também, na produção dos vários tipos de cimento. Logo, o consumo específico de energia elétrica é calculado com base na produção de cimento.

## **4.6 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na fabricação de cimento**

### **4.6.1 Produção de cimento com menores teores de clínquer e queima de resíduos no forno do clínquer**

A fabricação do clínquer é o processo mais energo-intensivo envolvido na produção de cimento. Logo, produzir tipos de cimento com menores proporções de clínquer constitui uma maneira de se economizar energia. Esta medida, no entanto, só é factível se o mercado a que se destina o cimento aceitar tais tipos e, também, se houver disponibilidade e economicidade para a aquisição de maiores proporções de aditivos ao clínquer.

Uma medida que usualmente reduz o custo de aquisição de combustíveis na produção de cimento, mas não necessariamente o consumo específico de energia térmica envolvido nesta produção, é o aumento na queima de resíduos no forno de clínquer. A viabilidade desta medida depende não só da disponibilidade e custo destes resíduos, como também de suas propriedades (poder calorífico, conteúdo de cloro, enxofre e metais pesados, grau de umidade, etc.). Para poder queimar resíduos em seu forno de clínquer, uma fábrica de cimento no Brasil precisa ser licenciada pelo órgão ambiental local. Em 2013, a queima de resíduos correspondeu a 9,9% do consumo de combustíveis na indústria de cimento brasileira (EPE/MME, 2014). Na Alemanha e na França esta porcentagem era de 38% e 33%, respectivamente, em meados da década passada (IEA, 2007). Worrell e Galitsky (2008) mencionam que economias de energia térmica superiores a 0,6 GJ/t de clínquer podem ser obtidas no forno de clínquer com a queima de resíduos.

### **4.6.2 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na etapa de preparação das matérias-primas para a fabricação de clínquer**

A Tabela 4.2 apresenta medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na etapa de preparação das matérias-primas para a fabricação do clínquer. Para cada medida são apresentadas faixas de valores de economias de energia elétrica verificadas na prática e os trabalhos que indicam estes valores.

Moinhos de bolas constituem os equipamentos mais comuns de moagem em fábricas de cimento – cerca de 60% no mundo, segundo Napp *et al.*, (2014). Vários tamanhos de bolas são usados nestes moinhos, que possuem câmaras separadas para acomodar os diferentes tamanhos de bolas. Suas posições dentro do equipamento podem ser ajustadas. As bolas maiores (60 a 90 mm) moem os produtos através de impactos, enquanto que as bolas menores (15 a 30 mm) obtêm este resultado através do atrito (Silva, 2012).

**Tabela 4.2 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na etapa de preparação das matérias-primas para a fabricação de clínquer**

<i>Medidas</i>	<i>Economia de energia elétrica (kWh/t clínquer)</i>	<i>Referências</i>
Substituição de moinhos de bolas por moinhos verticais de rolos, ou moinhos de rolos de alta pressão	6 – 11,9	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Classificadores de elevada eficiência	2,8 – 6,3	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Sistemas eficientes de mistura das matérias-primas	0,4 – 4,3	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Sistemas eficientes de transporte na preparação das matérias-primas	1,24 – 3,4	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Sistemas avançados de controle de moinhos de rolos	0,8 – 1,7	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Ventilador de alto rendimento, com controle tiristorizado, no moinho das matérias-primas	0,36	(Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)

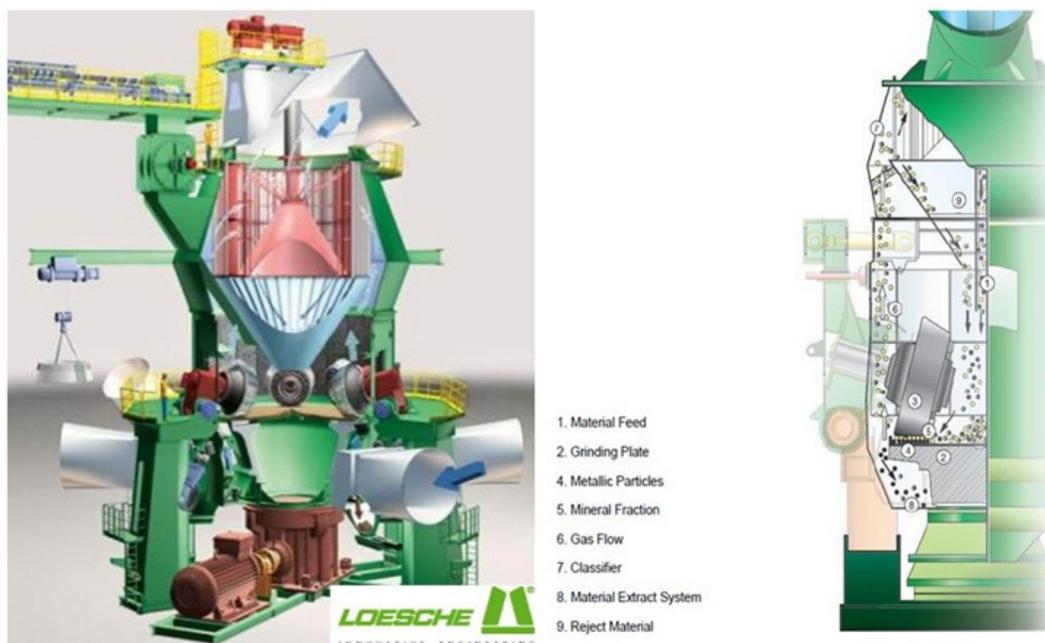
O princípio da compressão é utilizado para moer os produtos nos moinhos verticais de rolos. A Fonte: <http://www.flsmidth.com/en-US/Related+content/Brochures/Grinding/OK+Vertical+Mill>

**Figura 4.2 Moinho vertical de rolos**

ilustra os componentes de um destes moinhos. Madlool *et al.*, (2011) mencionam que este tipo de moinho consome cerca de 20% a menos de eletricidade do que os moinhos de bolas de mesma capacidade. Um fabricante dinamarquês destes moinhos, a FLSmidth, no entanto, afirma que seu modelo OK *Vertical Roller Mill* proporciona economias de energia elétrica na faixa de 30 a 50%, em relação aos moinhos de bolas.

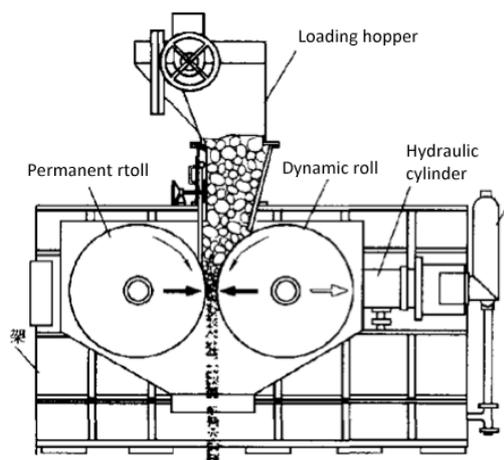
A partir de 1985, os moinhos de rolos de alta pressão (Figura 4.3) passaram a ser utilizados nas fábricas de cimento (Polysius, 2014). Este tipo de moinho possui consumos específicos de eletricidade de 10 a 50% inferiores ao do moinho de bolas (Madloul *et al.*, 2011).

Nos moinhos há classificadores, os quais separam as partículas menores das maiores e encaminham as últimas de volta ao equipamento, para serem moídas novamente. Os classificadores convencionais não são muito eficientes, reenviando, muitas vezes, para reprocessamento, partículas que já estão no tamanho adequado. Classificadores de elevada eficiência, desenvolvidos recentemente, são capazes de propiciar economias de energia elétrica de até 8%, por evitarem reprocessamentos desnecessários (Madloul *et al.*, 2011).



Fonte: <http://www.flsmidth.com/en-US/Related+content/Brochures/Grinding/OK+Vertical+Mill>

**Figura 4.2 Moinho vertical de rolos**



Fonte: NDRC, 2008, apud <http://ietd.iipnetwork.org/content/high-pressure-roller-press>

**Figura 4.3 Moinho de rolos de alta pressão**

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** revela que o uso de moinhos de rolos e o uso de classificadores de elevada eficiência são as medidas que apresentam maiores potenciais de economia de energia elétrica nesta etapa do processo produtivo. Segundo a literatura técnica consultada, os períodos de retorno de investimentos nestes equipamentos, sobretudo nos moinhos de rolos, podem ser elevados; estas medidas são recomendadas para novas fábricas, ou, então, para fábricas antigas onde os custos de operação e manutenção são elevados e justificam economicamente a troca destes equipamentos.

É provável que alguns novos moinhos de rolos já incorporem classificadores de elevada eficiência. Logo, nestes casos estas duas medidas que propiciam ganhos de eficiência energética não são cumulativas.

#### **4.6.3 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na etapa de produção de clínquer**

A Tabela 4.3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra medidas que propiciam ganhos de eficiência energética que já foram implementadas na etapa de produção de clínquer, com os ganhos obtidos de energia térmica e energia elétrica. Os dados negativos representam as reduções no consumo específico de energia térmica obtidas graças a um aumento no consumo específico de energia elétrica.

**Tabela 4.3 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na etapa de produção de clínquer**

<i>Medidas</i>	<i>Economia de energia térmica (GJ/ t clínquer)</i>	<i>Economia de energia elétrica (kWh/t clínquer)</i>	<i>Referências</i>
Substituição de fornos verticais por fornos rotativos com pré-aquecimento e pré-calcinador	2,4	-	(Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Substituição de fornos rotativos longos por fornos curtos com pré-aquecimento e pré-calcinador	0,4 – 1,4	-	(Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Substituição de fornos rotativos longos por fornos curtos com pré-aquecimento	0,43 – 0,87	-	(Worrell and Galitsky, 2008)
Substituição de fornos rotativos longos por fornos curtos com pré-calcinador	0,66 – 1,32	-	(Worrell and Galitsky, 2008)
Adição de um pré-calcinador a um forno rotativo com pré-aquecimento	0,13 - 0,65	-	(Worrell and Galitsky, 2008; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Adição de mais ciclones de pré-aquecimento a fornos com pré-aquecimento e pré-calcinador	0,16 – 0,7	-	(Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Adoção de tijolos refratários melhores no forno de clínquer	0,12 – 0,6	-	(Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et alli</i> , 2013)
Controle tiristorizado dos ventiladores do forno de clínquer	-	5,5	(Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Recuperação de calor de baixa temperatura para geração de eletricidade	0,25 – 0,345	24,73 – 39,2	(Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Recuperação de calor de alta temperatura para geração de eletricidade	0,21 – 0,22	17,84 - 22	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Adoção de ciclones de baixa perda de carga nos pré-aquecedores	0,02 – 0,04	0,5 – 4,4	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Adoção de sistemas	0,005 – 0,006	0,55 – 3,9	(Madlool <i>et al.</i> , 2011)

<i>Medidas</i>	<i>Economia de energia térmica (GJ/ t clínquer)</i>	<i>Economia de energia elétrica (kWh/t clínquer)</i>	<i>Referências</i>
eficientes para o acionamento do forno rotativo			
Melhorias no sistema de combustão do forno rotativo	0,11 – 0,47	-	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Adoção de grelhas móveis no resfriador de clínquer	0,19 – 0,3	-2,4	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Sistemas avançados de controle e gestão da energia	0,11 – 0,32	1,2 – 2,6	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Queima indireta no forno rotativo	0,015 – 0,23	-	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Otimização da recuperação de calor no forno e/ou no resfriador de clínquer	0,05 – 0,37	- 2,0	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Troca do selo de vedação do forno	0,011 – 0,024	-	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011)

Fornos verticais ainda são utilizados em algumas fábricas de cimento. Atualmente, a maioria das fábricas de cimento utiliza fornos rotativos. Estes fornos são tubulares, com diâmetro entre 3 e 6 m. Seu comprimento é de 10 a 20 vezes o seu diâmetro no caso de fornos curtos, e de 32 a 35 vezes seu diâmetro no caso de fornos longos. Os fornos são instalados com uma inclinação de 2° a 4,5° em relação à horizontal e giram com uma baixa rotação (0,5 – 4,5 rpm), de forma a mover o material que irá constituir o clínquer em direção às chamas e à parte inferior do forno (Madlool *et al.*, 2011; Paula, 2009; Silva, 2012).

Na parte inicial e menos quente do forno, a mistura de matérias-primas<sup>5</sup>, finamente moída, é submetida a um processo de aquecimento, onde ocorre a evaporação da água e outros materiais voláteis. Na sequência, na parte do forno onde as temperaturas se situam na faixa de 500 °C a 900 °C, o carbonato de cálcio, que faz parte da mistura das matérias-primas que formam o clínquer, é transformado em óxido de

<sup>5</sup> O calcário é o principal componente do clínquer; ele é formado basicamente por carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>). Outro mineral que também é importante na fabricação de cimento é a argila; é dela que se obtêm os componentes Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, necessários na formulação do clínquer. Outros minerais como a bauxita, o ferro e a areia somente são acrescentados à mistura de matérias-primas quando a argila não apresenta os teores necessários de alumina, óxido de ferro e sílica (Silva, 2012).

cálcio e há liberação de  $\text{CO}_2$ ; trata-se da reação de calcinação. Mais adiante no forno, com temperaturas entre  $850\text{ }^\circ\text{C}$  e  $1450\text{ }^\circ\text{C}$ , o óxido de cálcio reage com substâncias sílica-aluminosas produzindo o quarteto ferrita ( $\text{C}_4\text{AF}$ :  $4\text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ), aluminato ( $\text{C}_3\text{A}$ :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), belita ( $\text{C}_2\text{S}$ :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ) e alita ( $\text{C}_3\text{S}$ :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ), que são as principais fases cristalinas do clínquer e do cimento Portland (Paula, 2009). Minério de ferro também faz parte do conjunto de matérias-primas do clínquer; uma importante função do óxido de ferro, presente no minério, é reduzir a temperatura da clinquerização.

O combustível é fornecido e queimado na extremidade mais baixa do forno. Os gases da combustão se deslocam em contracorrente com a matéria prima até a extremidade oposta. Os fornos são revestidos internamente com material refratário, que protege a sua carcaça de aço, dificulta a perda de calor para o exterior e permite a existência, no seu interior, de elevadas temperaturas, que, na zona perto da saída do clínquer, podem atingir temperatura de chama de aproximadamente  $2000\text{ }^\circ\text{C}$  (Paula, 2009).

O clínquer sai do forno a uma temperatura superior a  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ . Ele é resfriado por uma corrente de ar até a sua temperatura atingir aproximadamente  $170\text{ }^\circ\text{C}$ .

O forno rotativo do processo de produção de cimento via úmida gasta mais energia térmica do que o forno do processo via seca, pois precisa evaporar a água adicionada às matérias-primas utilizadas no forno para facilitar sua mistura e homogeneização. Esta evaporação requer um consumo adicional de  $2,4\text{ GJ/t}$  de clínquer (Madloul *et al.*, 2011).

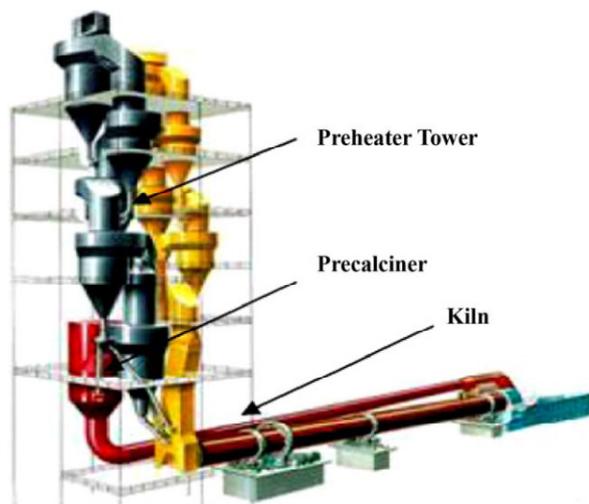
Fornos rotativos longos no processo de produção via seca consomem de  $21\%$  a  $27\%$  menos combustíveis do que os fornos rotativos do processo via úmida (Madloul *et al.*, 2011).

A adição de ciclones pré-aquecedores antes do forno rotativo diminui o consumo específico de energia térmica da etapa de clinquerização. Gases da combustão oriundos do forno circulam nos ciclones em contracorrente transferindo calor para as matérias-primas do clínquer. Até seis estágios destes pré-aquecedores podem ser adicionados e cada um deles aumenta mais o rendimento do processo. Os gases entram na base da torre de ciclones a temperaturas acima dos  $800\text{ }^\circ\text{C}$  e saem no topo da torre a temperaturas da ordem dos  $300\text{ }^\circ\text{C}$ . Antes de passarem por um precipitador eletrostático e saírem para a atmosfera através de uma chaminé, os gases de combustão do forno e/ou ar quente proveniente do resfriador de clínquer cedem parte de sua entalpia para secar o

material cru sendo processado no moinho de cru (a maioria das matérias-primas utilizadas na produção de cimento tem um teor de umidade de 3% a 8%), antes do ingresso destas matérias-primas nos ciclones pré-aquecedores. O filtro eletrostático retém 99,9% do material particulado carregado pelos gases de combustão, que voltam ao processo (Paula, 2009).

A adição de um pré-calcinador aos pré-aquecedores diminui ainda mais o consumo específico de energia térmica da clínquerização (8 a 11%). O pré-calcinador possui uma câmara de combustão, que é responsável por cerca de 60% do consumo total de combustível da fábrica. De 80% a 90% da calcinação ocorre no pré-calcinador; o forno rotativo responde pelo restante (Madloul *et al.*, 2011). Para que não haja perda térmica, o ar de combustão fornecido ao pré-calcinador tem que ter uma temperatura elevada, o que é conseguido por recuperação de calor no processo de resfriamento do clínquer, imediatamente após a saída do forno rotativo. Este ar é transportado por uma tubulação isolada termicamente, colocada paralelamente ao forno rotativo (Paula, 2009).

Os pré-aquecedores e o pré-calcinador formam uma torre montada na entrada do forno rotativo, (vide Figura 4.4). Esta torre pode atingir uma altura de aproximadamente 120 m (Paula, 2009). Quanto mais pré-aquecedores houver, menor pode ser o comprimento do forno rotativo.



Fonte: Madloul *et al.*, 2011

**Figura 4.4** Ciclones pré-aquecedores, pré-calcinador e forno rotativo de fábrica de cimento

O clínquer necessita ser resfriado bruscamente para fixar as suas características químicas e cristalinas. O resfriamento pode ser efetuado em vários tipos de

equipamentos (resfriador rotativo, de satélite, ou planetário e de grelha), denominados resfriadores de clínquer, que são responsáveis pelo resfriamento e recuperação de parte da entalpia contida no clínquer. Os resfriadores de grelha são o tipo mais indicado para sistemas dotados de pré-calcinador. Neste sistema de resfriamento, o clínquer quente cai, na saída do forno, sobre uma grade fixa e é deslocado através de um movimento recíproco de pratos que deslizam sobre as grades. O clínquer é resfriado por ar insuflado através das grades, provindo de compartimentos separados existentes por baixo. Estes compartimentos permitem a existência de duas zonas: uma zona de recuperação, em que o ar de resfriamento aquecido vai servir de ar secundário para combustão no queimador principal do forno rotativo, e uma zona de pós-resfriamento, onde ar excedente esfria o clínquer a temperaturas mais baixas e, posteriormente, serve de ar terciário para a combustão no pré-calcinador e para a secagem das matérias-primas (Paula, 2009).

Os consumos específicos mais baixos de energia térmica são obtidos com o uso de seis ciclones pré-aquecedores, pré-calcinador e um resfriador de clínquer de alta eficiência, conforme indicado na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 Consumos específicos de energia térmica, em GJ/t de clínquer, de equipamentos alternativos no processo de produção de clínquer**

<i>Tipo de equipamento</i>	<i>Consumo específico de energia térmica (GJ/ t clínquer)</i>
Forno rotativo, no processo via úmida	5,9 – 6,7
Forno rotativo longo, no processo via seca	4,6
Processo via seca com 1 ciclone de pré-aquecimento	4,2
Processo via seca com 2 ciclones de pré-aquecimento	3,8
Processo via seca com 4 ciclones de pré-aquecimento	3,3
Processo via seca com 4 ciclones de pré-aquecimento e pré-calcinador	3,1
Processo via seca com 5 ciclones de pré-aquecimento, pré-calcinador e resfriador de clínquer de alta eficiência	3,0 – 3,1
Processo via seca com 6 ciclones de pré-aquecimento, pré-calcinador e resfriador de clínquer de alta eficiência	2,9

Fonte: (IEA, 2007; Madloul *et al.*, 2011)

Uma linha de produção de clínquer não pode ser completamente estanque devido à existência de partes móveis, como o forno rotativo. Assim, para evitar fugas de materiais e produtos de combustão ao longo do sistema, toda a linha funciona em

subpressão, sendo o movimento dos fluidos gasosos efetuado pelo vácuo gerado por ventiladores colocados na parte inicial da linha, imediatamente antes da chaminé (Paula, 2009). Os ventiladores de exaustão dos gases são importantes consumidores de energia elétrica em uma fábrica de cimento, justificando a utilização de ventiladores e motores de alto rendimento com controle tiristorizado de rotação.

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** indica que as melhores oportunidades para economias de energia térmica são propiciadas pela substituição de fornos rotativos longos por fornos curtos com pré-aquecimento e pré-calcinação, adição de um pré-calcinador a um forno rotativo com pré-aquecimento, adição de mais ciclones de pré-aquecimento a fornos com pré-aquecimento e pré-calcinador, adoção de tijolos refratários mais adequados no forno de clínquer e melhorias no sistema de combustão do forno rotativo (utilização de queimadores e sistemas de controle da combustão mais eficientes). A recuperação de calor, tanto de baixa como de alta temperatura, para geração de eletricidade, o controle tiristorizado dos ventiladores do forno de clínquer e a adoção de ciclones de baixa perda de carga nos pré-aquecedores são as medidas que tem o maior potencial de redução do consumo específico de energia elétrica nesta etapa do processo de fabricação de cimento.

#### **4.6.4 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na etapa de moagem final do cimento**

As medidas que têm sido aplicadas para se obter economias de energia elétrica na moagem final do cimento estão indicadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, junto com as faixas de redução de consumo específico deste energético que têm sido obtidas.

A otimização da distribuição das bolas, o uso de materiais de maior dureza e resistência ao desgaste nas bolas e nos revestimentos dos moinhos de bolas podem reduzir de 5 a 10% o consumo específico de eletricidade nestes equipamentos (de 3 a 5 kWh/t de cimento, no caso da moagem de cimento) (Madloul *et al.*, 2011).

A empresa Horomill fabrica o moinho ilustrado na Figura 4.5, que, segundo o fabricante, tem propiciado economias de energia na faixa de 30 a 65%, em relação aos moinhos de bolas, e de 10 a 20% em relação aos moinhos verticais de rolos.

As maiores economias de energia elétrica que têm sido obtidas na etapa de moagem final do cimento têm sido proporcionadas por moinhos de rolos de alta pressão, moinhos Horomill, moinhos verticais de rolo e classificadores de elevada eficiência (Erro! Fonte de referência não encontrada.).

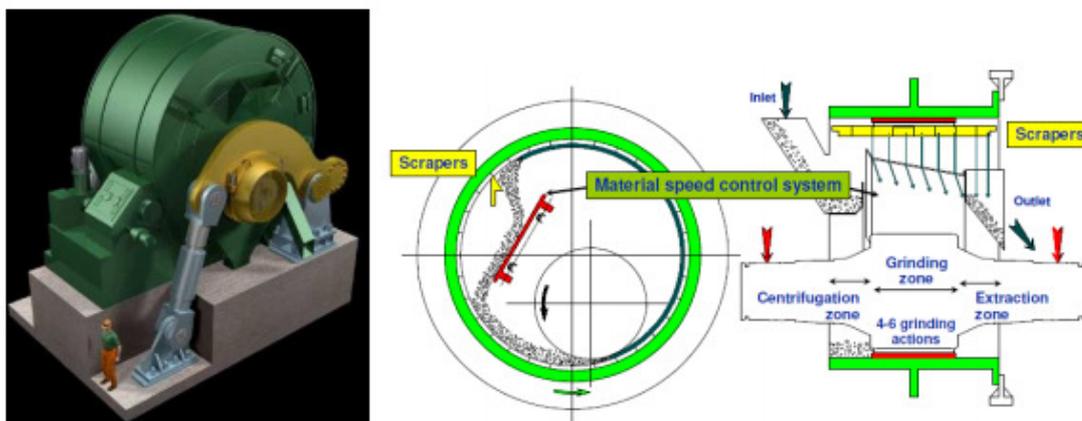


Figura 4.5 Moinho Horomill

Tabela 4.5 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na etapa de moagem final do cimento

<i>Medidas</i>	<i>Economia de energia elétrica (kWh/t cimento)</i>	<i>Referências</i>
Moinhos de rolos de alta pressão, no lugar de moinhos de bolas	7 – 28	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Moinhos horizontais de rolos (Horomill), no lugar de moinhos de bolas	27,77	(Madlool <i>et al.</i> , 2011)
Moinhos verticais de rolo, no lugar de moinhos de bolas	10 – 25,93	(Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Classificadores de elevada eficiência	1,62 - 7	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Melhorias nas superfícies de moagem em moinhos de bolas	1,8 – 6,1	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Sistemas avançados de controle e gestão da energia	1,6 – 4,2	(Worrell and Galitsky, 2008; Madlool <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Ventilador de alto rendimento no moinho das matérias-primas	0,13	(Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)

É provável que alguns destes novos moinhos de rolos já incorporem classificadores de elevada eficiência. Logo, nestes casos estas duas medidas que propiciam ganhos de eficiência energética não são cumulativas.

#### **4.6.5 Medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética na preparação de combustíveis sólidos em fábricas de cimento**

A preparação de combustíveis sólidos nas fábricas de cimento que utilizam tais combustíveis também contempla medidas que propiciam ganhos de eficiência energética. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta tais medidas e as economias de energia que elas podem oferecer.

**Tabela 4.6 Medidas que proporcionam ganhos de eficiência energética na preparação de combustíveis sólidos em fábricas de cimento**

<i>Medidas</i>	<i>Economia de energia elétrica (kWh/t cimento)</i>	<i>Referências</i>
Substituição de moinho de bolas por moinho vertical de rolo na moagem de carvão	0,7 – 1,47	(Worrell and Galitsky, 2008; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Ventiladores de alto rendimento, com controle tiristorizado, nos filtros de manga do moinho de carvão	0,16	(Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)

#### **4.6.6 Medidas de uso geral na indústria que possibilitam ganhos de eficiência energética em fábricas de cimento**

Alguns equipamentos de uso geral na indústria têm propiciado economias de energia elétrica em fábricas de cimento. Destes equipamentos, se destacam os motores elétricos e sistemas de acionamento de alto rendimento, devido às economias de energia substanciais que eles podem trazer nestas fábricas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

A geração de eletricidade através de ciclos *bottoming* compete com a recuperação de calor para finalidades puramente de aquecimento, utilizando trocadores de calor, que é, em geral, mais atrativa do ponto de vista econômico. Na indústria de cimento, uma

grande parte do calor residual dos fornos de clínquer é empregada usualmente para secar as matérias-primas que formam o clínquer.

**Tabela 4.7 Equipamentos de uso geral na indústria que proporcionam ganhos de eficiência energética em fábricas de cimento**

<i>Medidas</i>	<i>Economia de energia elétrica (kWh/t cimento)</i>	<i>Referências</i>
Motores elétricos e acionamentos de alto rendimento	3 - 25	(Worrell and Galitsky, 2008; Madloul <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Controles tiristorizados da rotação de motores elétricos	5,5 - 9,15	(Worrell and Galitsky, 2008; Madloul <i>et al.</i> , 2011; Hasanbeigi <i>et al.</i> , 2013)
Ventiladores de alto rendimento	0,11 - 0,7	(Madloul <i>et al.</i> , 2011)
Otimização de sistemas de ar comprimido	0 - 2	(Worrell and Galitsky, 2008)
Iluminação eficiente	0 - 0,5	(Worrell and Galitsky, 2008)

Em princípio, é possível haver a geração de eletricidade através de um ciclo *bottoming* ao mesmo tempo em que se faz a recuperação de calor tradicional, supracitada. Madloul *et al.*, (2011) e Campos (2007) relatam estudos desta situação envolvendo comparações do desempenho energético de plantas de cogeração operando segundo o ciclo Rankine a vapor, ciclo Rankine orgânico e ciclo Kalina<sup>6</sup>. Quanto maior for o aproveitamento do calor residual do forno de clínquer para a finalidade de aquecimento, menor será a quantidade de eletricidade gerada pelo ciclo *bottoming*, assim como menor será a eventual atratividade econômica desta alternativa.

A Agência Internacional de Energia só registrou, até 2007, o uso destes ciclos de cogeração na indústria de cimento japonesa, por conta, provavelmente, dos altos preços da energia elétrica naquele país (IEA, 2007). Por outro lado, Worrell e Galitsky (2008) mencionam que, em 1999, havia quatro fábricas de cimento cogorando nos EUA.

<sup>6</sup> O ciclo Kalina é um [ciclo termodinâmico](#) para a conversão de [energia térmica](#) em [força mecânica](#), otimizado para uso com [fontes térmicas](#) que estejam em uma temperatura relativamente baixa, em comparação com a temperatura do dissipador de calor (ou o ambiente). O ciclo utiliza um fluido de trabalho com pelo menos dois componentes (geralmente água e [amônia](#)) e uma relação entre esses componentes é variável em diferentes partes do sistema para aumentar a [reversibilidade termodinâmica](#) e, portanto, o aumento global da [eficiência termodinâmica](#).

## **5. Indústria siderúrgica**

### **5.1 Introdução**

As principais matérias primas utilizadas na indústria siderúrgica brasileira são minério de ferro, sucatas de ferro e aço, materiais fundentes – calcário e dolomita, carvão mineral, carvão vegetal e coque de carvão mineral.

A indústria siderúrgica brasileira é composta por um conjunto de usinas integradas e não-integradas, que produzem aços semi-acabados, ou laminados, e produtores independentes, que produzem exclusivamente ferro-gusa.

O ferro-gusa é uma liga de ferro e carbono com um teor elevado de carbono.

Em relação à sua composição química, os aços são classificados como aços carbono e aços ligados, ou especiais.

Segundo a EPE (2009), entre os diversos segmentos industriais, a indústria siderúrgica é o segundo maior consumidor de energia e o principal setor emissor de CO<sub>2</sub> no mundo.

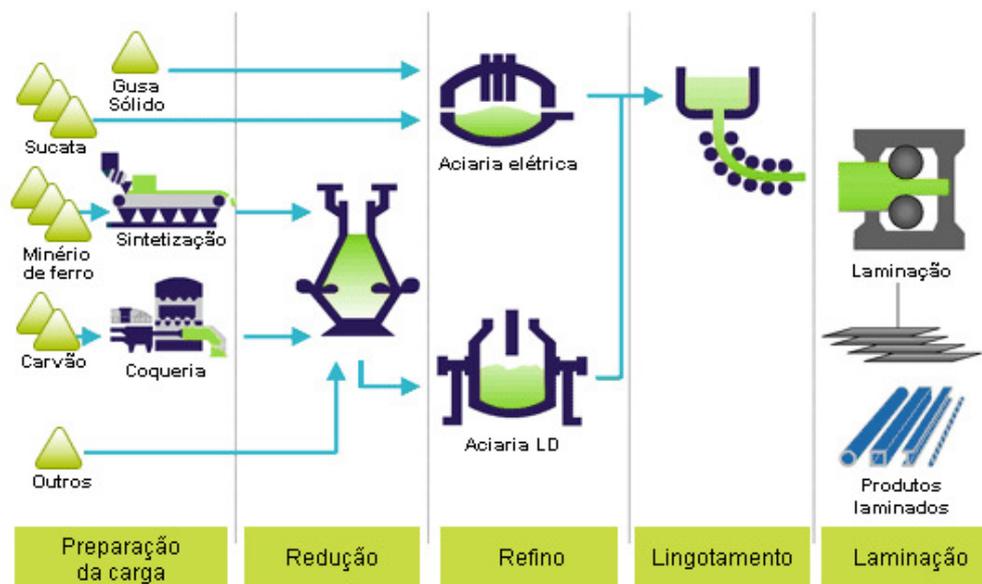
A cadeia produtiva do ferro-gusa e aço produz diversos resíduos, como os gases de coqueria, alto forno e aciaria, cujo bom aproveitamento energético é fundamental para se atingir desempenhos energéticos elevados nas usinas siderúrgicas. Um destes resíduos já é bem aproveitado na fabricação de alguns tipos de cimento: a escória de alto-forno. Por outro lado, plásticos reciclados podem ser queimados em altos-fornos, economizando no consumo de carvão mineral, ou vegetal e coque.

A indústria siderúrgica é uma grande consumidora de energia e de materiais e, também, é responsável por um grande volume de efluentes gasosos e líquidos, assim como de resíduos sólidos, especialmente nas etapas de coqueria, sinterização e alto-forno. Por isso, este segmento industrial tem sido induzido a buscar processos mais eficientes e a reciclar subprodutos desses processos (EPE/MME, 2009).

### **5.2 Etapa do processo produtivo**

O processo de produção do aço pode ser dividido em cinco etapas principais, conforme ilustrado na Figura 5.1: preparação da carga, redução do minério de ferro, refino

do aço, lingotamento e laminação. É comum se considerar o lingotamento como parte da etapa de refino do aço.



Fonte: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/processo--etapas.asp>, acessado em junho de 2015.

**Figura 5.1** Etapas do processo de fabricação de aço

Na etapa de preparação da carga, grande parte do minério de ferro (finos) é aglomerada utilizando-se cal e finos de coque. O produto resultante é denominado sinter. Nesta etapa, a maior parte do carvão é processada na coqueria, transformando-se em coque.

As matérias-primas, devidamente processadas, são carregadas no alto forno na etapa de redução. O oxigênio, aquecido a uma temperatura de 1000 °C, é soprado pela parte de baixo do alto forno. O coque, em contato com o oxigênio, produz calor que funde a carga metálica e dá início ao processo de redução do minério de ferro em um metal líquido: o ferro-gusa.

No refino, aciarias a oxigênio (LD), ou aciarias elétricas são utilizadas para transformar o ferro-gusa líquido ou sólido e a sucata de ferro e aço em aço líquido. Nesta operação, parte do carbono contido no ferro-gusa é removida, juntamente com impurezas. O aço líquido é solidificado em equipamentos de lingotamento para produzir semi-acabados, lingotes e blocos.

Os semi-acabados, lingotes e blocos são processados por equipamentos chamados laminadores e transformados em uma grande variedade de produtos siderúrgicos.

Os produtos semi-acabados são placas, blocos ou tarugos oriundos de processo de lingotamento contínuo, ou de laminação de desbaste, destinados a posterior

processamento de laminação, ou forjamento a quente. Os produtos planos resultam do processo de laminação com larguras muito superiores à sua espessura; eles são comercializados na forma de chapas e bobinas de aço carbono e especiais. Os produtos longos saem do processo de laminação com seções transversais de formato poligonal e comprimento muito superior à maior dimensão da seção; eles são ofertados tanto na forma de aço carbono, como aço especiais.

Os produtores de aço podem ser classificados em dois segmentos homogêneos: as usinas integradas, que executam todas as etapas do processo de fabricação do aço, e as usinas que só realizam as etapas de refino, lingotamento e laminação, que são denominadas usinas semi-integradas. Estas últimas partem de ferro-gusa, ferro esponja ou sucata metálica, adquiridas de terceiros, para transformá-los em aço em aciarias elétricas e sua posterior laminação.

No Brasil há, ainda, os produtores independentes de ferro-gusa, que só realizam a redução do minério de ferro e exportam a maior parte de sua produção.

### **5.3 Consumo de energia**

Os energéticos mais consumidos na indústria siderúrgica brasileira em 2013 foram o coque de carvão mineral, carvão vegetal, carvão mineral, eletricidade, gás de coqueria e gás natural (Bajay, 2015). Coque de carvão mineral e carvão vegetal foram responsáveis por 63% do total da energia consumida em 2013. A maior parte do carvão vegetal foi consumida pelos produtores independentes.

Segundo a EPE/MME (2009), as principais características do carvão vegetal, em comparação com o coque, traduzem-se em menor estabilidade mecânica, conteúdo de cinzas muito inferior e conteúdo de material volátil muito superior. O uso de carvão vegetal em grandes alto-fornos é limitado por sua baixa resistência mecânica. Embora o uso de carvão vegetal não resulte em ganho de eficiência energética, ele pode reduzir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub>, desde que sua produção seja feita de maneira sustentável.

Um fato que merece destaque é a elevação da produtividade florestal para a produção de carvão vegetal observada nos últimos anos. A expectativa para 2015 é de se atingir um valor em torno de 27 t/ha/ano (EPE/MME, 2009).

### **5.3.1 Consumos energéticos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos na produção de ferro-gusa e aço**

O ferro-gusa produzido nas usinas integradas é matéria-prima para a produção de aço, que é o produto final nestas usinas. A maior parte das usinas integradas no Brasil possui produção própria de coque; o restante destas usinas adquire coque de mercado, ou, então, consome carvão vegetal. As usinas semi-integradas, por seu turno, consomem tanto sucatas como ferro-gusa fabricado por produtores independentes; aço é o produto final destas usinas.

A EPE/MME contratou em 2008 uma empresa de consultoria para levantar consumos energéticos específicos típicos e gerações específicas típicas dos energéticos consumidos nas três rotas tecnológicas adotadas na siderurgia brasileira.

A Tabela 5.1 mostra valores típicos de consumos energéticos específicos e gerações específicas de energéticos, por etapa do processo produtivo e tipo de energético, das usinas integradas com produção própria de coque no País.

A Tabela 5.1 revela que os maiores consumos energéticos específicos líquidos (consumo específico menos geração específica) deste tipo de usina estão nos altos-fornos, na coqueria e na laminação, nesta sequência, e que os maiores consumos absolutos são de carvão mineral, coque, gás de alto-forno e finos de carvão, com o coque e o gás de alto-forno gerados localmente. Parte do consumo total de eletricidade também é gerado localmente (autoprodução).

A Tabela 5.2 apresenta consumos específicos típicos e gerações específicas típicas dos energéticos de usinas integradas sem coque próprio no Brasil. Ela contempla tanto usinas com alto-forno a coque adquirido de terceiros, quanto usinas com alto-forno a carvão vegetal, que têm no Brasil especial importância pela difusão deste tipo de alto-forno.

Comparando os valores das Tabela 5.1 e Tabela 5.2, pode-se observar o menor consumo total de energéticos das usinas siderúrgicas integradas sem produção própria de coque, devido à ausência do consumo da coqueria, mas um menor consumo específico líquido das usinas integradas com produção própria de coque, por conta da produção de coque e das gerações de gás de coqueria, gás de aciaria e eletricidade, além de uma maior geração específica de gás de alto-forno, nestas.

**Tabela 5.1 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor de usinas siderúrgicas integradas com produção própria de coque, no Brasil**

	<i>Coqueria</i>	<i>Sinterização</i>	<i>Alto-forno</i>	<i>Aciaria</i>	<i>Laminação</i>	<i>Utilidades /outros</i>	<i>Total</i>
Carvão mineral	15,35						15,35
Finos de carvão			4,10				4,10
Coque			10,60				10,60
Moinha/antracito		1,75					1,75
Gás de coqueria	0,67	0,07	0,63	0,18	0,75	0,51	2,82
Gás de alto-forno	0,67		1,41		0,37	1,78	4,24
Gás de aciaria					0,03	0,40	0,43
Energia elétrica	0,06	0,13	0,17	0,17	0,42	0,44	1,39
Oxigênio				0,39		0,21	0,60
Nitrogênio				0,22			0,22
Gás natural				0,08	0,58		0,66
Outras fontes	0,12		1,09	0,22	0,19		1,63
<i>Consumo total (A)</i>	<i>16,87</i>	<i>1,95</i>	<i>18,01</i>	<i>1,26</i>	<i>2,36</i>	<i>3,34</i>	<i>43,79</i>
Gás gerado na coqueria	3,28						3,28
Gás gerado no alto-forno			5,14				5,14
Gás gerado na aciaria				0,49			0,49
Coque para alto-forno	10,91						10,91
Eletricidade gerada						1,01	1,01
<i>Geração total (B)</i>	<i>14,19</i>		<i>5,14</i>	<i>0,49</i>		<i>1,01</i>	<i>20,83</i>
<i>(A) – (B)</i>	<i>2,68</i>	<i>1,95</i>	<i>12,87</i>	<i>0,77</i>	<i>2,36</i>	<i>2,33</i>	<i>22,99</i>

Fonte: EPE/MME (2009)

Uma vez que, na Tabela 5.2, foram incluídas tanto usinas que utilizam o coque como redutor no alto-forno como usinas que fazem uso do carvão vegetal, os consumos unitários e produções unitárias dos energéticos dessa tabela representam valores típicos relativos à configuração em 2008, quando foi realizado o estudo pela EPE/MME, do parque siderúrgico brasileiro para o mix de usinas que se enquadram nesta rota. Nesse sentido, os resultados apresentados não contemplam explicitamente os consumos energéticos das usinas que utilizam apenas o coque, bem como daquelas que utilizam somente o carvão vegetal no alto-forno.

**Tabela 5.2 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor de usinas siderúrgicas integradas sem produção própria de coque, no Brasil**

	<i>Sinterização</i>	<i>Alto-forno a coque</i>	<i>Alto-forno a carvão vegetal</i>	<i>Aciaria a oxigênio</i>	<i>Laminação</i>	<i>Utilidades/ outros</i>	<i>Total</i>
Carvão			10,68				10,68

vegetal							
Finos de carvão		1,22	2,86				4,09
Coque		3,88					3,88
Moinha/ant racito	0,79						0,79
Gás de alto-forno	0,09	0,75	1,49	0,12	1,32	0,6	4,40
Energia elétrica	0,06	0,16	0,09	0,30	0,93	0,30	1,83
Oxigênio		0,14		0,36			0,50
Nitrogênio		0,10		0,14			0,24
Gás natural		0,14		0,15	0,06		0,35
Outras fontes	0,18	0,10	1,12	0,18	0,57		2,14
<i>Consumo total (A)</i>	<i>1,12</i>	<i>6,49</i>	<i>16,23</i>	<i>1,25</i>	<i>2,89</i>	<i>0,93</i>	<i>28,90</i>
Gás gerado no alto-forno		2,48	1,63				4,11
<i>Geração total (B)</i>		<i>2,48</i>	<i>1,63</i>				<i>4,11</i>
<i>(A) – (B)</i>	<i>1,12</i>	<i>4,01</i>	<i>14,60</i>	<i>1,25</i>	<i>2,89</i>	<i>0,93</i>	<i>24,74</i>

Fonte: EPE/MME (2009)

As Tabela 5.3 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresentam consumos unitários típicos e gerações unitárias típicas dos energéticos nas usinas integradas que consomem carvão vegetal e coque de mercado, respectivamente, no Brasil. Os valores da Tabela 5.4 foram calculados através das diferença entre os valores totais de consumo/geração dos energéticos da Tabela 5.2 e Tabela 5.3**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, divididas pela produção de aço nas usinas integradas que consomem coque de mercado

É possível visualizar, nas Tabela 5.1**Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Tabela 5.4, o consumo específico líquido significativamente maior dos energéticos consumidos nas usinas que utilizam carvão vegetal como agente redutor, vis-à-vis tanto as usinas que consomem coque de mercado, como as que possuem coqueiras próprias.

**Tabela 5.3 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor de usinas siderúrgicas integradas que utilizam carvão vegetal como agente redutor, no Brasil**

	<i>Carvoejamento</i>	<i>Alto-forno a carvão vegetal</i>	<i>Aciaria elétrica</i>	<i>Laminação</i>	<i>Utilidades / outros</i>	<i>Total</i>

Lenha	15,24					4,56
Carvão vegetal		10,68				10,68
Finos de carvão		2,85				2,85
Gás de alto-forno		1,51				1,51
Energia elétrica		0,08	1,67	0,84	0,59	3,18
Oxigênio			0,38			0,38
Gás natural			0,75	1,17	0,96	2,88
Outras fontes		1,13	0,59	0,25	1,51	3,48
<i>Consumo total (A)</i>	<i>15,24</i>	<i>16,25</i>	<i>3,39</i>	<i>2,26</i>	<i>3,06</i>	<i>29,52</i>
Gás gerado no alto-forno		1,63				1,63
Carvão vegetal para alto-forno	10,68					10,68
<i>Geração total (B)</i>	<i>10,68</i>	<i>1,63</i>				<i>1,63</i>
<i>(A) – (B)</i>	<i>4,56</i>	<i>14,62</i>	<i>3,39</i>	<i>2,26</i>	<i>3,06</i>	<i>27,89</i>

Fonte: Bajay, 2015.

**Tabela 5.4 Consumos específicos típicos e gerações específicas típicas de energéticos, em GJ/t de aço bruto, de usinas siderúrgicas integradas que utilizam coque de mercado como agente redutor, no Brasil**

<i>Fontes</i>	<i>Consumos específicos e gerações específicas</i>
Finos de carvão	4,35
Coque	4,89
Moinha/antracito	1,00
Gás de alto-forno	4,86
Energia elétrica	1,38
Oxigênio	0,54
Nitrogênio	0,29
Outras fontes	1,72
<i>Consumo total (A)</i>	<i>19,03</i>
Gás gerado no alto-forno	4,86
<i>Geração total (B)</i>	<i>4,86</i>
<i>(A) – (B)</i>	<i>14,17</i>

Fonte: Bajay, 2015.

A Tabela 5.3 mostra que as etapas mais energo-intensivas nas usinas que produzem e consomem o carvão vegetal são o alto-forno, o carvoejamento e a aciaria elétrica, nesta sequência, e que os maiores consumos absolutos nestas usinas são de carvão vegetal, lenha, outras fontes de energia e eletricidade, nesta ordem.

Já nas usinas integradas que utilizam coque de mercado, a Tabela 5.4 revela que os maiores consumos energéticos absolutos são de coque, gás de alto-forno e finos de carvão, nesta sequência.

Os altos-fornos são responsáveis por 60% e 52,4%, respectivamente, dos consumos energéticos específicos médios das usinas integradas que utilizam coque de produção própria e carvão vegetal como agentes redutores no Brasil. Logo, por não

contemplarem a etapa de redução do minério de ferro, nem outras, como a sinterização, coqueificação e carvoejamento, as usinas siderúrgicas semi-integradas possuem consumos energéticos específicos bem menores do que os das usinas integradas. Não há produção interna de energéticos neste tipo de usina. A Tabela 5.5 mostra consumos específicos típicos dos energéticos utilizados nas usinas siderúrgicas semi-integradas no País.

**Tabela 5.5 Consumos específicos típicos de energéticos, em GJ/t de aço bruto, por setor das usinas siderúrgicas semi-integradas, no Brasil**

	<i>Aciaria elétrica</i>	<i>Laminação</i>	<i>Utilidades/ outros</i>	<i>Total</i>
Energia elétrica	1,69	0,85	0,60	3,14
Oxigênio	0,38			0,38
Gás natural	0,74	1,19	0,97	2,90
Outras fontes	0,58	0,27	1,50	2,35
<i>Consumo total (A)</i>	<i>3,39</i>	<i>2,30</i>	<i>3,07</i>	<i>8,76</i>

Fonte: EPE/MME (2009)

Observa-se, nesta tabela, que a etapa mais energo-intensiva nestas usinas é a aciaria elétrica, seguida pelo setor de utilidades/outros. Os energéticos de maior consumo são a energia elétrica e o gás natural, nesta ordem.

A cogeração de eletricidade a partir de gases de coqueria, de alto-forno e de aciaria é uma prática tradicional da indústria siderúrgica.

Uma usina siderúrgica integrada típica com coqueria própria instalada no Brasil possui uma necessidade de aquisição de energia elétrica de 0,38 GJ/t aço bruto, ou 106 kWh/t aço bruto, pois gera 73% de sua demanda deste energético (Tabela 5.1).

As usinas siderúrgicas integradas sem produção própria de coque, operem elas com alto-forno a coque ou com alto-forno a carvão vegetal, tradicionalmente não fazem a recuperação dos gases de alto-forno para a cogeração de eletricidade. Neste caso, segundo a EPE/MME (2009), o balanço “consumo x geração” de eletricidade mostra uma necessidade típica de aquisição externa de eletricidade de 510 kWh/t de aço.

No caso das usinas semi-integradas, com aciaria elétrica, o balanço de energia elétrica registra a necessidade de aquisição externa de energia da ordem de 871 kWh/t de aço (EPE/MME, 2009).

## **5.4 Boas práticas e equipamentos eficientes utilizados nas cadeias produtivas tradicionais do ferro-gusa e aço**

### **5.4.1 Coqueria, ou produção de carvão vegetal**

A captura e posterior queima para geração de energia elétrica dos gases proveniente do processo de coqueificação é uma importante medida que se pode aplicar em coquerias de usinas integradas, visando ganhos de eficiência energética nesta usinas. Estima-se uma disponibilização de energia elétrica da ordem de 1 MWh/t coque (Silva *et al.*, 2010).

Uma alternativa é encaminhar os gases contendo os produtos voláteis do carvão para uma planta carboquímica, para recuperação dos condensáveis (alcatrão, naftaleno e amônia) e condicionamento do gás residual para utilização em fornos e caldeiras da usina siderúrgica. Os subprodutos recuperados são vendidos. Uma estimativa da energia disponibilizada por esta prática é de 3,28 GJ/ t coque (EPE, 2009).

O apagamento a seco do coque substitui o apagamento do coque utilizando água, após a retirada do forno de coqueificação, pela técnica de abafamento por gás inerte (N<sub>2</sub>), com posterior recuperação da energia térmica disponível em uma caldeira de recuperação, para produção de vapor e sua eventual utilização para a geração de eletricidade (125 kWh/t coque). De acordo com Silva *et al.*, (2010), *apud Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate* (2007), esta tecnologia permite recuperar uma quantidade significativa de energia (entre 800 e 1.200 MJ/t coque), além de reduzir o consumo de água e as emissões de particulados.

A maior parte da produção de carvão vegetal para altos-fornos no Brasil utiliza processos de baixa eficiência, como os fornos rabo quente (rendimento gravimétrico, mensurado pela proporção tonelada de carvão vegetal/tonelada de madeira seca, de apenas 20% a 25% e com muita baixa recuperação de resíduos), ou os fornos circulares (rendimento gravimétrico de 25% a 39% e pouca recuperação de resíduos); de Paula (2014) estima que só 16% da produção de carvão vegetal dos produtores independentes de ferro-gusa e 38% da produção de carvão vegetal para a siderurgia utiliza fornos mais eficientes, como os fornos retangulares (rendimento gravimétrico de 30% a 37%, boa recuperação de biocarboquímicos e eficientes controles de emissões de gases, que necessitam ser condensados para a fabricação dos carboquímicos). Logo, a substituição

de fornos rabo quente e fornos circulares por fornos retangulares propicia ganhos de eficiência energética, assim como reduções das emissões de gases que causam o efeito estufa, desde que a madeira utilizada nos fornos seja de reflorestamentos (Bajay *et al.*, 2015).

#### **5.4.2 Sinterização**

O calor recuperado dos gases de exaustão da sinterização pode ser utilizado para pré-aquecimento do ar de combustão, ou da carga na própria sinterização, ou, então, empregado para gerar vapor/eletricidade na usina siderúrgica. Pode-se recuperar 0,55 GJ/t sinter (EPA, 2012; Silva *et al.*, 2010, *apud Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate*, 2007).

A sinterização é pouco difundida entre os produtores independentes de ferro-gusa no Brasil; só 20% da produção de ferro-gusa de mercado a emprega. Esta operação, além de aumentar a produtividade destas usinas, reduz o seu consumo de carvão vegetal em 10% (de Paula, 2014).

#### **5.4.3 Redução em alto-forno**

Os gases de topo do alto-forno contêm de 20% a 28% de CO e de 1% a 5% de H<sub>2</sub>. Após passarem por um processo de limpeza, eles podem ser utilizados como combustível para produzirem calor de processo e/ou gerarem eletricidade. Estima-se uma energia disponibilizada em 5,14 GJ/t gusa (EPE, 2009).

Uma turbina de topo, de recuperação de pressão, substituindo a válvula *septum* pode converter a energia cinética e de pressão do gás de topo do alto-forno em eletricidade, gerando entre 40 e 60 MWh/t gusa (Silva *et al.*, 2010, *apud Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate*, 2007).

Só uma parte dos produtores independentes de ferro-gusa no Brasil (52% da produção de ferro-gusa de mercado) recupera o gás de topo dos altos-fornos a carvão vegetal para aquecer o ar injetado nas ventaneiras dos altos-fornos e gerar vapor e eletricidade, tornando a usina de ferro-gusa autosuficiente em energia elétrica (de Paula, 2014).

Dois indicadores tradicionais da eficiência energética dos altos fornos são o consumo específico de coque, em kg/ t de ferro gusa, conhecido pela designação inglesa “*coke rate*”, e o consumo específico de finos de carvão, também em kg/t gusa, conhecido pelo nome inglês “*Pulverized Coal Injection*”, ou simplesmente “PCI”. Pode-se diminuir o “*coke rate*” aumentando-se o “PCI”, com um ganho líquido na energia que se economiza com o carvão que é injetado diretamente nos altos fornos, sem a necessidade de ser transformado em coque (Bajay, 2009). Segundo a EPA (2012), a injeção, em um alto-forno, de 130 kg de carvão pulverizado por tonelada de ferro-gusa produz uma economia de combustíveis de 0,77 GJ/t gusa.

O somatório dos consumos específico de coque (*coke rate*) e finos de carvão (PCI rate) é denominado *fuel rate*. No caso da siderurgia brasileira, este índice diminuiu de 518 para 500 kg por tonelada de ferro produzida no período 2000-2013. Toda a produção de ferro-gusa a partir de coque, no Brasil, destina-se ao consumo interno das usinas (de Paula, 2014).

No que tange à produção de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal, no Brasil, no período 2000-2012, o consumo específico variou em torno de 730 kg de carvão vegetal por tonelada de ferro-gusa, segundo o CGEE (2014). Esse valor considera tanto usinas integradas a carvão vegetal, quanto produtores independentes de ferro-gusa.

Segundo de Paula (2014), o carvão vegetal, desde a sua fabricação nas carvoarias até o alto-forno, gera finos que podem alcançar 25% em peso. Este resíduo (moinha) é de comercialização incerta e seu preço é muito baixo comparado com o do carvão vegetal. A alternativa encontra-se na injeção desses finos pelas ventaneiras do alto-forno em substituição parcial ao carvão vegetal granulado carregado pelo topo do forno. Essa substituição não pode chegar a 100%, porque o processo necessita de permeabilidade do leito de carvão na parte superior. Em geral, é possível substituir até 20% do carvão carregado pelo topo do alto-forno. Estima-se que o PCI permita a redução de 15% no consumo de carvão vegetal. Só 44% da produção de ferro-gusa de mercado no Brasil tem aproveitado esta oportunidade de ganho de eficiência energética.

De uma forma geral, a injeção de agentes redutores no interior do alto-forno tais como carvão pulverizado, gás natural, óleo combustível ou plástico reciclado permite reduzir o consumo de coque metalúrgico, diminuindo o consumo de energia na fase de beneficiamento do carvão metalúrgico na coqueria, assim como as emissões atmosféricas deste processo. A injeção, em um alto-forno, de 140 kg de gás natural por

tonelada de ferro-gusa, por exemplo, propicia uma economia de combustíveis de 0,90 GJ/t gusa (EPA, 2012).

Sistemas avançados de controle do alto-forno propiciam, segundo a EPA (2012), uma economia de combustíveis de 0,4 GJ/t gusa.

#### 5.4.4 Aciaria

Os gases provenientes dos conversores LD, na aciaria, contêm de 64% a 71% de CO e de 1% a 2,5% de H<sub>2</sub>. Logo, tal qual ocorre com os gases do alto-forno, os gases dos conversores LD, após passarem por um processo de limpeza, podem ser utilizados como gás combustível na usina siderúrgica, tanto para a produção de calor de processo, quanto para a geração de eletricidade. A EPE (2009) estima a energia disponibilizada por este processo como sendo de 0,49 GJ/t aço.

Os gases provenientes do conversor LD deixam o mesmo a 1.200°C, possibilitando o emprego de um sistema de recuperação de calor para gerar energia elétrica, melhorando, desta forma, a eficiência energética do processo. Silva *et al.*, (2010) relatam que a energia térmica recuperada se situa entre 0,1 e 0,3 GJ/t aço. A estimativa da EPA (2012) é mais otimista: 0,92 GJ/t aço.

Em um forno elétrico a arco, pré-aquecer a sucata com os gases de exaustão, que estão a altas temperaturas, reduz a energia necessária para fundir a carga, energia esta que seria fornecida pelo próprio forno a arco. A redução é estimada em 60 kWh/t de aço (EPA, 2012; Silva *et al.*, 2010, *apud Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate*, 2007).

Instalar queimadores de combustível em fornos a arco diminui o consumo de eletricidade dos fornos, reduz o tempo de aquecimento da carga e aumenta a taxa de transferência de calor durante o processo. Segundo a EPA (2012), a instalação de queimadores oxi-combustível nos fornos a arco pode propiciar uma economia de energia elétrica de 0,14 GJ/t aço.

Os fornos elétricos a arco executam as etapas de fusão da carga sólida e subsequente refino primário (descarburização e desfosforação) via uma injeção significativa de oxigênio (40 Nm<sup>3</sup>/t de aço). Segundo de Paula (2012), estes equipamentos têm apresentado índice de consumo de energia elétrica em torno dos 400 kWh / t de aço, com tendência a diminuí-lo (360-300 kWh/t de aço), em face da

incorporação de mais energia química complementar no processo (injeções de combustíveis e oxigênio: 25 kg C/tonelada de aço e até 70 Nm<sup>3</sup> de oxigênio/tonelada de aço).

Segundo a EPA (2012) e Silva *et al.*, (2010), *apud* Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate (2007), a utilização de sistemas de controle baseados em redes neurais nos fornos elétricos a arco permite economias de energia da ordem de 30 kWh/t de aço produzido.

#### 5.4.5 Laminação

O forno de reaquecimento é o ponto central do consumo energético de uma laminação a quente, sendo o foco das ações de redução de consumo energético específico. Os demais consumidores de energia são os acionadores dos laminadores. Para estes, uma boa prática é o emprego de motores elétricos de alto rendimento.

O lingotamento contínuo integra o lingotamento e a laminação a quente do aço em uma única fase, eliminando a necessidade de reaquecimento do aço antes da laminação. Esta tecnologia contribui para a conservação de energia e reduz o investimento. A conservação de energia obtida com esta tecnologia pode chegar a algo em torno de 1 GJ a 3 GJ por tonelada de aço. Ainda que na indústria siderúrgica brasileira o percentual de participação do uso do lingotamento contínuo seja elevado, cabe destacar que, em 2009, cerca de 7% da produção nacional de aço bruto era realizada através de lingotamento convencional, onde pode haver espaço para ganhos de eficiência energética (EPE, 2009).

O enforamento a quente é considerado uma das melhores formas de se economizar energia térmica na laminação. Trata-se do enforamento do produto semi-acabado (tarugo ou placa), vindo diretamente da saída do lingotamento, para se aproveitar ao máximo a elevada temperatura (em torno de 700 °C) residual do material. Este procedimento evita o dispêndio de boa parte da energia necessária para elevar a temperatura do material até a temperatura requerida pela laminação a quente. A EPA (2012) e Silva *et al.*, (2010) estimam economias de combustíveis de até 0,61 GJ/t aço.

De acordo com Silva *et al.*, (2010), a recuperação da energia residual dos gases de exaustão do forno de reaquecimento para pré-aquecimento da carga do forno ou do ar de

combustão, ou ainda, para geração de vapor pode propiciar uma economia de 0,3 GJ/t aço.

A EPA (2012) estima que o uso de queimadores recuperativos e regenerativos no forno de reaquecimento pode propiciar uma economia de combustíveis de 0,7 GJ/t aço.

O controle automático da operação de um forno de reaquecimento pode propiciar ganhos de eficiência energética no forno da ordem de 10 a 15%, em comparação com o controle manual. Este sistema otimiza a distribuição de calor ao longo do forno, acompanha as flutuações do processo e minimiza as perdas de calor por infiltrações, por manter pressão manométrica positiva no forno. Em termos de consumo energético específico, o controle automático pode propiciar reduções de 0,15 a 0,30 GJ/t aço laminado (EPA, 2012; Silva *et al.*, 2010).

Uma economia de 0,21 GJ/t aço no consumo de energia elétrica pode ser alcançado com o emprego de controle automático dos equipamentos de laminação a frio e de acabamento (EPA, 2012).

## **5.5 Rotas tecnológicas alternativas para a produção de ferro-gusa e aço**

Em alguns países tem havido um esforço para se substituir o alto-forno por novos processos de fusão redutora, ou por processos de redução direta. Os principais novos processos de fusão-redução são o COREX, o HIs melt e o ITmk3. Existem duas rotas distintas para os processos de redução direta: a redução em forno de cuba, onde se pode mencionar os processos Midrex e Hyl, e a redução em reatores de leito fluidizado, onde há quatro processos em desenvolvimento – Finmet, Circored/Circofer e FINEX (Silva *et al.*, 2010).

Os processos de fusão redutora produzem ferro-gusa prescindindo da necessidade de produção de coque, através da combinação da gaseificação do carvão com a redução do minério, utilizado normalmente na forma de pelotas.

O processo COREX, inicialmente desenvolvido na África do Sul e operado em escala comercial neste país, na Coreia do Sul, na Índia e na China, opera com dois reatores. Carvão e oxigênio são introduzidos no reator inferior, onde um gás de alta temperatura é gerado para a redução dos óxidos; 95% deste gás são compostos por CO e H<sub>2</sub>. O gás é resfriado e alimentado no reator superior, onde a redução ocorre no estado sólido produzindo ferro diretamente reduzido (DRI), cuja fusão e redução residual

ocorrem no reator inferior. O gás efluente tem um alto conteúdo energético, podendo ser usado na geração de energia elétrica, em fornos de cimento, na pelotização, ou, ainda, na redução direta de minério de ferro. Silva *et al.*, (2010) mencionam três vantagens desta tecnologia: (i) redução da escala ótima de produção de metal líquido; (ii) diminuição substancial de emissões no meio ambiente, por conta da eliminação da coqueria; e (iii) custo de produção de metal líquido cerca de 20% inferior ao do método convencional.

O processo HIs melt, desenvolvido pela Rio Tinto, tem uma unidade de demonstração na Austrália. A redução dos óxidos e a gaseificação do carvão ocorrem em banho metálico. O processo utiliza ar pré-aquecido a 1200 °C enriquecido com oxigênio. A carga é constituída por finos de minério e carvão. Os materiais são injetados por lanças submersas e não pelo topo do reator.

A tecnologia e os equipamentos do processo ITmk3 são conceitualmente similares ao do processo Fasmel<sup>7</sup>, que produz pelotas de cura a frio, só que a temperatura de trabalho é mais elevada (1350 °C), resultando na fusão do metal e na necessidade de uma posterior separação da escória.

Uma das principais vantagens dos processos de redução direta é viabilizar a instalação de mini-usinas, menores do que as usinas convencionais com altos-fornos. É necessário, entretanto, dispor-se de redutor/combustível em quantidade suficiente e baixo custo no local (Bajay, 2009). O ferro-esponja resultante dos processos de redução direta é uma alternativa, ou complemento de alta qualidade para a sucata na carga de fornos elétricos (Worrell *et al.*, 2008).

Os processos Midrex e HyL, de redução em forno de cuba vertical, usam pelotas e gás natural, eliminando o consumo de carvão, com todas as emissões a ele relacionadas. O Midrex opera à pressão ambiente, utilizando um gás redutor mais rico em CO que o HyL, e diferentes tipos de reformadores. Segundo Silva *et al.*, (2010), existem várias instalações comerciais de pequeno porte utilizando estes processos.

---

<sup>7</sup> O processo Fastmet, de propriedade das empresas Midrex e Kobe Steel, é baseado no uso de um forno RHF que reduz pelotas de cura a frio, produzidas a partir de finos de minério de ferro, resíduos siderúrgicos ricos em ferro e finos de carvão. As pelotas são carregadas no forno por meio de um sistema de alimentação vibratória. Após carregadas, as pelotas são aquecidas em 3 zonas por queimadores montados junto às paredes do forno. Todos os queimadores são projetados para a combustão de gás natural. Um painel refrigerado à água é posicionado após a terceira zona para promover o resfriamento do DRI à 1000 – 1200°C, antes da sua descarga. O material produzido pode ser coletado para posterior briquetagem à quente, ou diretamente carregado em fornos elétricos. O processo opera em pressão moderadamente negativa, e é vedado através de um selo d'água.

O processo Finmet utiliza finos de minérios e gás natural, dispensando, por conseguinte, coque, carvão e pelotas. Os finos de minérios são reduzidos em uma série de 4 reatores de leito fluidizado, a uma pressão de 10-12 bar, e os finos de DRI do último reator são briquetados a quente. Existem duas instalações comerciais, com capacidade de 2 milhões de toneladas por ano cada uma, uma na Venezuela e outra na Austrália. No entanto, segundo Silva *et al.*, (2010), o processo ainda apresenta problemas, que não foram resolvidos.

Circored e Circofer são processos que empregam leito fluidizado em dois estágios, baixas temperaturas e pressão moderada (4 bar). Os finos de minério são aquecidos e reduzidos em um reator de leito fluidizado circulante até atingirem índices de metalização em torno de 70%, quando são transferidos para o segundo reator, onde a redução continua até um índice de metalização de 93%. O processo Circored é à base de gás natural e o Circofer à carvão.

O reator de redução utilizado no processo COREX é substituído por uma série de reatores de leito fluidizado no processo FINEX. A vantagem é a utilização direta de finos de minérios ao invés de pelotas. A empresa POSCO, da Coreia do Sul, construiu uma usina com esta tecnologia com uma capacidade de 1,5 milhões de toneladas por ano (EPE, 2009).

O Brasil vem se mantendo na vanguarda da tecnologia de auto-redução, por meio do desenvolvimento do processo Tecnored, que encontra-se no início do estágio de consolidação técnica/comercial, estando ligeiramente atrás de suas concorrentes internacionais mais expressivas (processos HIs melt, RHF e Finex), que já estão neste estágio há pelo menos três anos. A planta-piloto do Tecnored, localizada em Pindamonhagaba-SP, com capacidade de 75 mil toneladas, iniciou a operação em setembro de 2011 (de Paula, 2012).

No forno Tecnored são utilizados, como fonte de ferro e carbono redutor, aglomerados auto-redutores de cura a frio, produzidos a partir de misturas compostas de unidades de ferro (finos de minério de ferro, resíduos de mineração, resíduos siderúrgicos) e unidades de carbono (finos de carvão mineral, carvão vegetal, coque verde de petróleo ou resíduos industriais contendo carbono). Estes materiais são misturados com fundentes e ligantes e aglomerados em briquetadoras ou em discos tradicionais de pelletização, na forma de briquetes e pelotas respectivamente. Os aglomerados produzidos são então curados e secados ao tempo ou em equipamentos especiais operando em temperaturas de cerca de 250°C. Em seguida os aglomerados são

reduzidos e fundidos em um forno de cuba de geometria especial, o forno TecnoRed™, produzindo metal líquido, escória e gás de topo.

Silva *et al.*, (2010) afirmam que, a menos dos processos Midrex, Hyl e COREX, viáveis em muitas situações, nenhum dos demais compete com o alto-forno e muitos ainda não têm soluções de engenharia satisfatórias. A economicidade dos processos Midrex e Hyl depende da disponibilidade de gás natural de baixo custo, o que não tem ocorrido no Brasil.

Duas tecnologias, denominadas “*near-net-shape casting*”, para perfis, e “*thin-slab casting*”, para produtos planos, foram desenvolvidas com a finalidade de fundir, em uma única operação, as etapas de lingotamento e laminação a quente. Com isto, são eliminados os fornos de reaquecimento, o que propicia economias de capital na instalação das plantas e economias de energia na sua operação (Bajay, 2009).

O processo “*thin slab casting*” permite a produção direta de placas planas com espessura de 1-10 mm, ao invés de produzi-lo com espessura entre 120-300 mm, com conformação posterior entre 1-10 mm. Neste caso, o potencial de economia de energia é estimado entre 1 e 3 GJ/t aço. Outro benefício é a economia indireta de energia, proporcionada pela redução de perdas de material. O consumo energético específico desta tecnologia é de somente 0,20 GJ/t aço laminado (EPE, 2009, *apud* Worrell e Neelis, 2007). A EPA (2012) estima a economia de combustíveis propiciada por este processo em 3,5 GJ/t aço no caso de conversores LD e em 3,2 GJ/t aço no caso de fornos elétricos a arco, e a economia de energia elétrica em 0,64 GJ/t aço.

## 5.6 Desempenho energético das melhores práticas industriais

Segundo Worrell *et al.*, (2008) e EPE (2009), *apud* Worrell e Neelis (2007), uma usina siderúrgica integrada convencional, com coqueria, sinterização, alto-forno, conversor LD, lingotamento contínuo e laminação a quente, que segue as melhores práticas industriais possui um consumo energético específico de 16,6 GJ/t aço. Este consumo específico pode ser decomposto pelas várias etapas da cadeia produtiva da usina da seguinte forma: 0,80 GJ/t aço na coqueria, 1,90 GJ/t aço na sinterização, 12,20 GJ/t aço no alto-forno a coque, -0,30 GJ/t aço na aciaria com conversor LD, 0,1 GJ/t aço no lingotamento contínuo e 1,8 GJ/t aço na laminação a quente. O valor negativo na

aciaria significa que, naquela etapa do processo produtivo, se produz mais energia do que se consome. Se a usina ainda possuir laminação a frio e operações de acabamento, some-se mais 0,4 GJ/t aço e 1,1 GJ/t aço, respectivamente, totalizando 18 GJ/t aço. O consumo de combustíveis para aquecimento direto responde por 87% deste total, a eletricidade por 7% e o vapor e o oxigênio, cada um, por 3%.

O processo de substituição das etapas de lingotamento e laminação pelo processo denominado “*thin slab casting*” reduz consideravelmente o consumo total energético da cadeia siderúrgica que, em lugar de 18,0 GJ/t, passaria a apresentar um consumo energético específico de 14,8 GJ/t, isto é, 18% inferior. Neste caso, as proporções de energéticos no consumo total são as seguintes: combustíveis para aquecimento direto, 90%; eletricidade, 5%; oxigênio, 4%; e vapor, 1% (Worrell *et al.*, 2008, EPE, 2009, *apud* Worrell e Neelis, 2007).

Ainda de acordo com Worrell *et al.*, (2008) e EPE (2009), *apud* Worrell e Neelis (2007), o consumo energético específico de uma usina siderúrgica semi-integrada que segue as melhores práticas industriais, considerando as etapas de refino do aço em fornos elétricos consumindo sucata (2,5 GJ/t aço), lingotamento contínuo (0,1 GJ/t aço) e laminação a quente (1,8 GJ/t aço), é de 4,3 GJ/t aço. Se, nesta usina, se utilizar o processo “*thin slab casting*” ao invés do lingotamento contínuo e laminação a quente, o seu consumo energético específico diminui para 2,6 GJ/t aço.

As melhores práticas industriais aplicadas em uma usina siderúrgica integrada empregando o processo COREX de fusão redutora para produção de ferro-gusa e um forno a oxigênio na aciaria conduzem a um consumo energético específico total de 21 GJ/t aço, desagregado da seguinte forma entre as etapas do processo produtivo: 0,6 GJ/t aço na pelletização, 17,3 GJ/t aço na fusão redutora, -0,4 GJ/t aço no forno a oxigênio, 0,1 GJ/t aço no refino, 0,1 GJ/t aço no lingotamento contínuo, 1,8 GJ/t aço na laminação a quente, 0,4 GJ/t aço na laminação a frio e 1,1 GJ/t aço no acabamento. O emprego do processo “*thin slab casting*” reduz o consumo energético específico total desta usina para 17,8 GJ/t aço (Worrell *et al.*, 2008; EPE, 2009, *apud* Worrell e Neelis, 2007).

Uma usina siderúrgica integrada que utilize as melhores práticas industriais de redução direta para produzir ferro-esponja e de fornos elétricos para produzir aço tem os seguintes consumos energéticos específicos mínimos nas várias etapas de sua cadeia produtiva: 1,9 GJ/t aço na sinterização, 0,6 GJ/t aço na pelletização, 11,7 GJ/t aço na redução direta, 2,5 GJ/t aço nos fornos elétricos, 0,1 GJ/t aço no lingotamento contínuo e 1,8 GJ/t aço na laminação a quente; resulta um consumo energético específico total de

18,6 GJ/t aço. O emprego do “*thin slab casting*” permite uma redução deste valor para 16,9 GJ/t aço (Worrell *et al.*, 2008; EPE, 2009, *apud* Worrell e Neelis, 2007).

Em um seminário realizado em outubro de 2013, o grupo da Agência Internacional de Energia que monitora os avanços tecnológicos da indústria siderúrgica no mundo apresentou alguns valores de consumos energéticos específicos das melhores tecnologias disponíveis no mercado para este ramo industrial em 2013 que são diferentes, em geral menores, do que os valores correspondentes publicados por Worrell *et al.*, em 2008: 10,4 GJ/t no alto-forno, 3,7 GJ/t na coqueria, 10,4 GJ/t na redução direta com gás natural, 20,0 GJ/t na redução direta com carvão, 1,1 GJ/t nos fornos elétricos, 2,0 GJ/t na laminação a quente e operações de acabamento e 1,0 GJ/t na laminação a frio e operações de acabamento (IEA’s Iron and Steel break out group, 2013).

## 6. Indústria química

### 6.1 Introdução

Tradicionalmente, a indústria química tem sido dividida em dois grandes grupos: o grupo dos produtos inorgânicos, formado por mais de 100 produtos, que incluem ácidos, óxidos, silicatos e sais inorgânicos, entre outros; e o grupo de produtos orgânicos, no qual se destaca a indústria petroquímica, grande fornecedora de insumos para a indústria de transformação (Tolmasquim e Szklo, 2000).

No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, com o apoio da Associação Brasileira da Indústria Química (Abiquim), definiu, com base nos critérios aprovados pela ONU, uma nova Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) e promoveu o enquadramento de todos os produtos químicos nessa classificação.

Durante o ano de 2006, o IBGE redefiniu toda a estrutura da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) e promoveu o enquadramento de todos os produtos químicos nessa classificação, adaptando-a a revisão nº 4 da International Standard Industry Classification (ISIC). Os segmentos que compõem as atividades da indústria química passaram a ser contemplados, a partir de janeiro de 2007, nas Divisões 20 e 21 da CNAE 2.0 (Abiquim, 2013a).

A Divisão 20 – Fabricação de Produtos Químicos - da CNAE 2.0 compreende:

- ❖ 20.1 Fabricação de produtos químicos inorgânicos
  - 20.11-8 Fabricação de cloro e álcalis
  - 20.12-6 Fabricação de intermediários para fertilizantes
  - 20.13-4 Fabricação de adubos e fertilizantes
  - 20.14-2 Fabricação de gases industriais
  - 20.19-3 Fabricação de produtos químicos inorgânicos não especificados anteriormente
- ❖ 20.2 Fabricação de produtos químicos orgânicos
  - 20.21-5 Fabricação de produtos petroquímicos básicos
  - 20.22-3 Fabricação de intermediários para plastificantes, resinas e fibras
  - 20.29-1 Fabricação de produtos químicos orgânicos não especificados anteriormente

- ❖ 20.3 Fabricação de resinas e elastômeros
  - 20.31-2 Fabricação de resinas termoplásticas
  - 20.32-1 Fabricação de resinas termofixas
  - 20.33-9 Fabricação de elastômeros
- ❖ 20.4 Fabricação de fibras artificiais e sintéticas
  - 20.40-1 Fabricação de fibras artificiais e sintéticas
- ❖ 20.5 Fabricação de defensivos agrícolas e desinfetantes domissanitários
  - 20.51-7 Fabricação de defensivos agrícolas
  - 20.52-5 Fabricação de desinfetantes domissanitários
- ❖ 20.6 Fabricação de sabões, detergentes, produtos de limpeza, cosméticos, produtos de perfumaria e de higiene pessoal
  - 20.61-4 Fabricação de sabões e detergentes sintéticos
  - 20.62-2 Fabricação de produtos de limpeza e polimento
  - 20.63-1 Fabricação de cosméticos, produtos de perfumaria e de higiene pessoal
- ❖ 20.7 Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes, lacas e produtos afins
  - 20.71-1 Fabricação de tintas, vernizes, esmaltes e lacas
  - 20.72-0 Fabricação de tintas de impressão
  - 20.73-8 Fabricação de impermeabilizantes, solventes e produtos afins
- ❖ 20.9 Fabricação de produtos e preparados químicos diversos
  - 20.91-6 Fabricação de adesivos e selantes
  - 20.92-4 Fabricação de explosivos
  - 20.93-2 Fabricação de aditivos de uso industrial
  - 20.94-1 Fabricação de catalizadores
  - 20.99-1 Fabricação de produtos químicos não especificados anteriormente

A Divisão 21 – Fabricação de Produtos Farmoquímicos e Farmaceuticos - da

CNAE 2.0 compreende:

- ❖ 21.1 Fabricação de produtos farmoquímicos
  - 21.10-6 Fabricação de produtos farmoquímicos
- ❖ 21.2 Fabricação de produtos farmacêuticos
  - 21.21-1 Fabricação de medicamentos para uso humano
  - 21.22-0 Fabricação de medicamentos para uso veterinário
  - 21.23-8 Fabricação de preparações farmacêuticas

Um número relativamente reduzido dos produtos da indústria química são energo-intensivos, ou seja, requerem dispêndios elevados de energia para a sua fabricação. Para estes produtos, o custo da energia pode representar até 60% do custo da produção de produtos químicos básicos. No caso da amônia, esta porcentagem atinge 80% (IEA, 2007).

Inúmeros processos da indústria química envolvem a utilização de fornos onde ocorrem reações químicas a temperaturas elevadas. A utilização de novos materiais cerâmicos tem se difundido nestas aplicações. Novos materiais, nanomanufaturados, também têm se mostrado promissores em certos equipamentos utilizados na indústria química, tais como membranas (Bajay *et al.*, 2015a).

Uma reciclagem pós-consumo importante na indústria química é a de plásticos. No Brasil, o 9º censo da reciclagem de PET revelou que, em 2012, o índice de reciclagem deste material, na forma de garrafas plásticas, foi de 58,9%, correspondendo a 331.000 toneladas (Abipet, 2013). Evidentemente, esta reciclagem propicia uma economia de energia na produção de novo plástico. Na produção de fibras de poliéster reciclado para a indústria têxtil, por exemplo, utiliza-se só 30% da energia utilizada na produção da fibra virgem (Bajay *et al.*, 2015a).

O aproveitamento de resíduos industriais é comum na indústria química, sobretudo em seu ramo petroquímico, que produz muitos efluentes gasosos, que são, em geral, utilizados para gerar vapor, em caldeiras de recuperação, ou para aquecer, em trocadores de calor, correntes gasosas, ou líquidas de produtos químicos a temperaturas mais baixas.

A matéria prima utilizada na indústria química afeta tanto o rendimento dos produtos obtidos quanto o desempenho energético dos processos empregados. Por exemplo, a utilização da nafta como matéria prima nas centrais petroquímicas de primeira geração permite a produção de mais compostos químicos comercializáveis, com destaque para os produtos aromáticos como o benzeno, tolueno e xilenos, e um menor consumo energético específico médio por central, do que a utilização de gás natural para a mesma finalidade (Mathias, 2014).

A substituição do petróleo por matérias primas de origem renovável, como a biomassa e seus derivados, já começou a ser praticada. A transição para uma economia menos dependente do petróleo e mais “verde”, está promovendo o desenvolvimento de olefinas leves, principalmente eteno e propeno, a partir da biomassa. Há, também, pesquisas em desenvolvimento, pela Gevo Inc. e pela LyondellBasell, envolvendo a

criação de novas rotas tecnológicas para a produção de olefinas C4 a partir de fontes renováveis. Com o isobuteno é possível produzir éter etil-terbutílico (ETBE), metil metacrilato, poli-isobuteno, iso-octeno, biodiesel e outros produtos químicos (Leite, 2013).

A Braskem está desenvolvendo, no Brasil, tecnologias para produzir biopolímeros, ou polímeros “verdes”, como o polietileno a partir do etanol da cana de açúcar. A empresa também anunciou investimentos para desenvolver tecnologias para a produção de polipropileno e butadieno a partir de rotas alternativas e de matéria-prima renovável (Mathias, Mejia e Bajay, 2014).

## 6.2 A indústria petroquímica

O gás de refinaria – subproduto dos processos de reforma e craqueamento - e as frações líquidas são os insumos básicos da indústria petroquímica, dentre as frações de petróleo. Entre as frações líquidas deve ser destacada a nafta<sup>8</sup>.

O gás natural, por sua vez, na condição de matéria-prima direta, é de grande importância para a indústria petroquímica, por permitir a dissociação física desse segmento industrial da atividade de refino de petróleo. O gás natural é usado para produzir amônia, metanol e outros produtos. A amônia é usada principalmente na produção de fertilizantes. Etano, propano e butano são componentes do gás natural empregados na produção de olefinas.

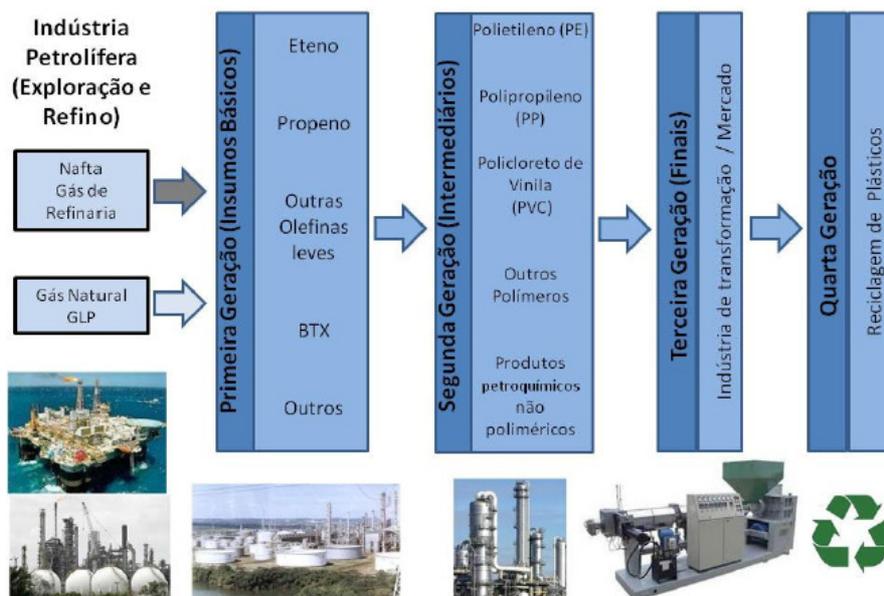
Atualmente, no Brasil, os insumos básicos da indústria petroquímica têm sido a nafta e o gás natural.

**São três as principais gerações de produção da indústria petroquímica: a de produtos básicos, a de produtos intermediários e a de produtos finais; a reciclagem de plásticos é, às vezes, referida como uma quarta geração.** A Fonte: Mathias, 2014.

Figura 6.1 apresenta, de uma forma simplificada, os produtos das gerações petroquímicas e o fluxo da cadeia produtiva petroquímica.

---

<sup>8</sup> A nafta é uma fração leve oriunda da destilação do óleo cru, sendo retirada entre 50 e 200 °C. Esta fração compreende compostos entre seis e dez átomos de carbono.



Fonte: Mathias, 2014.

**Figura 6.1** Estrutura simplificada das gerações petroquímicas.

As plantas petroquímicas de insumos básicos (1ª geração) operam de forma integrada em um complexo ou polo petroquímico, com as plantas de 2ª geração e, para ganhos de escala, uma central de utilidades atende a maior parte dessas plantas.

As empresas de primeira geração brasileiras, denominadas “craqueadoras”, decompõem a nafta, sua principal matéria prima, em petroquímicos básicos. Os petroquímicos básicos produzidos pelas unidades craqueadoras incluem as olefinas, principalmente o eteno, propeno e butadieno, e os aromáticos, como benzeno, tolueno e xilenos, entre outros.

O processo de produção de petroquímicos básicos envolve basicamente o aquecimento, compressão, resfriamento e a separação das correntes de hidrocarbonetos que são geradas sob condições controladas de temperatura e pressão, a partir das matérias-primas utilizadas na planta.

A maioria dos produtos petroquímicos básicos é transferida nos pólos petroquímicos, na forma de gases ou líquidos, através de dutovias, para processamento em produtos petroquímicos intermediários nas unidades e empresas de segunda geração. Os produtos petroquímicos intermediários incluem o polietileno (PE), produzido a partir do eteno, o polipropileno (PP), produzido a partir do propeno, e o policloreto de vinila (PVC), entre outros produtos.

As empresas de terceira geração, conhecidas como transformadoras compram os produtos petroquímicos intermediários das empresas de segunda geração e os transformam em produtos de uso final para os consumidores, compostos, por exemplo, por resinas plásticas (polietileno, polipropileno e PVC), fibras acrílicas, náilon e elastômeros.

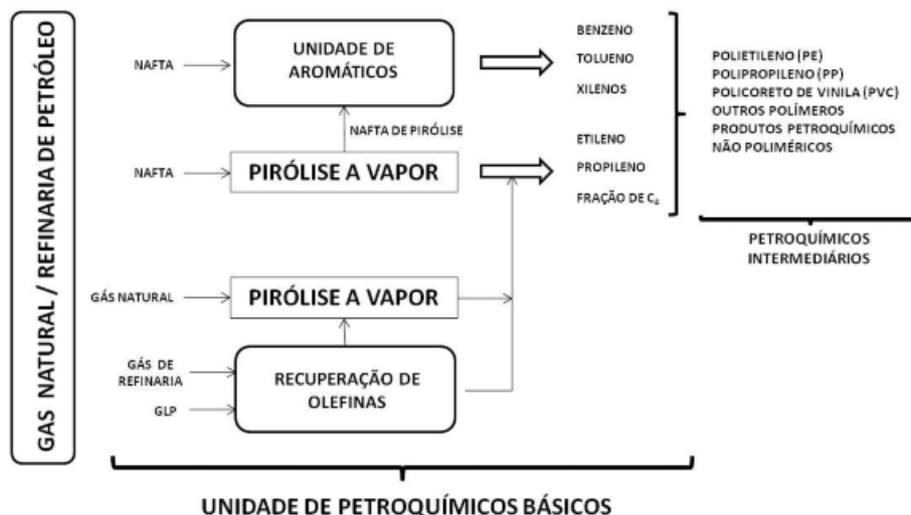
As empresas de quarta geração, conhecidas como recicladoras, após o uso e o descarte feito pelos consumidores, coletam e reprocessam produtos derivados de plástico, transformando-os novamente em alguns produtos de uso final para o mercado consumidor.

### **6.3 Produtos petroquímicos básicos**

A produção dos petroquímicos básicos é energo-intensiva, sendo, por conseguinte, detalhada a seguir.

As principais matérias-primas petroquímicas utilizadas no processo de craqueamento nas plantas petroquímicas de insumos básicos são a nafta, o gás natural e o gás liquefeito de petróleo (GLP). O etileno é o mais importante produto produzido nessas unidades.

A produção começa com a pirólise a vapor (*steam cracking*), onde ocorre o craqueamento térmico de cargas líquidas ou gasosas. As cargas de nafta, ou gás natural são aquecidas em fornos de pirólise, na presença de vapor d'água para reduzir a pressão parcial dos hidrocarbonetos e a formação de coque, a altas temperaturas (maiores que 700°C), com tempos de residência de 0,1 a 0,5 segundos e em baixas pressões (menores que 200 kPa), gerando principalmente o eteno (vide Figura 6.2) (Brasil *et al.*, 2011; Leite, 2013).



Fonte: Mathias, 2014.

**Figura 6.2** Esquema da produção de produtos petroquímicos básicos

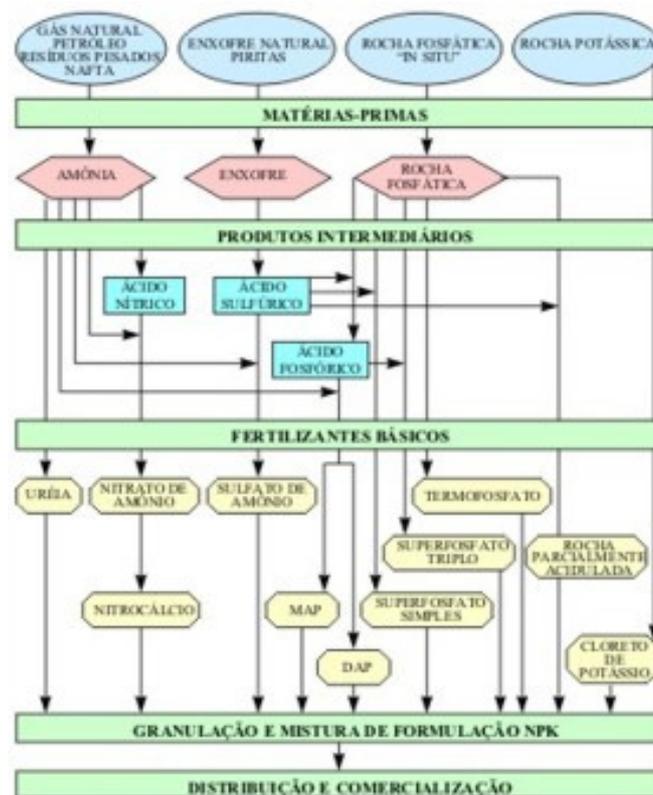
Após os fornos, a corrente de efluentes segue para uma caldeira de recuperação de calor -TLE (transfer line exchanger), onde a temperatura da corrente de produtos é reduzida para a faixa de 280°C a 300°C, interrompendo as reações de craqueamento para reduzir a perda de rendimento de eteno e propeno, devido à polimerização, evitar a formação de depósitos (coque) nos tubos e recuperar parte da energia fornecida à carga nos fornos. A caldeira de recuperação de calor é utilizada na geração de energia elétrica, através de uma unidade de cogeração.

Na “área quente” da central, o efluente do TLE é resfriado rapidamente (quenching). Nas plantas que operam com nafta, o resfriamento é feito inicialmente com óleo combustível. O efluente segue para uma torre fracionadora gerando duas correntes: a corrente de topo (fase vapor) é resfriada com água e encaminhada para uma unidade de compressão; e a corrente de fundo, óleo combustível, é parcialmente utilizada no próprio resfriamento rápido (quenching). A corrente na fase vapor é comprimida e tratada para a remoção de gás ácido e água na área de compressão. Em seguida, os vapores contendo as olefinas desejadas são enviados para uma “área fria”, onde são separados os hidrocarbonetos mais leves em uma série de torres de fracionamento.

#### 6.4 A cadeia de produção de produtos intermediários para fertilizantes e a amônia

Diversos produtos intermediários para fertilizantes são energo-intensivos, com destaque para a amônia. A sua cadeia produtiva é brevemente descrita a seguir.

O gás natural, resíduos pesados do petróleo, nafta, enxofre natural, pirritas, rochas fosfáticas “*in situ*” e rochas potássicas são as matérias-primas primárias desta cadeia, a partir das quais se obtém as matérias-primas secundárias, que são a amônia, o enxofre processado e rochas fosfáticas processadas. Estas, por seu turno, possibilitam a produção dos seguintes produtos intermediários: ácido nítrico, ácido sulfúrico e ácido fosfórico. Finalmente, se tem os fertilizantes básicos, que incluem, entre outros, a ureia, o nitrato de amônio, o sulfato de amônio, o fosfato de amônio e os superfosfatos. Estes fertilizantes são, então, granulados e misturados para se obter a composição NPK desejada, antes de serem distribuídos e comercializados. A Figura 6.3 ilustra a cadeia produtiva dos fertilizantes.



Fonte: Bajay, *et al.*, 2015.

Figura 6.3 A cadeia produtiva dos fertilizantes

A amônia é a fonte de quase toda a produção de fertilizantes nitrogenados sintéticos no mundo (IEA, 2007).

No processo de obtenção de amônia a partir de gás de síntese, uma corrente de gás natural, ou de algum resíduo dessulfurizado de hidrocarboneto, é enviada a um reformador primário de vapor, que opera entre 700 e 815 °C e contém um catalisador à base de níquel. Esta operação permite converter a maior parte da matéria-prima em hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono. A corrente de saída do reformador primário é misturada com ar e conduzida a um reformador secundário, operando entre 900 e 925 °C. O conteúdo térmico do efluente deste segundo reformador é recuperado através de uma caldeira de recuperação, que permite gerar vapor superaquecido.

O dióxido de carbono<sup>9</sup> é removido através de torres de absorção (empregando carbonato de potássio, ou dietanolamina de metila) e o gás efluente, depois de purificado, é comprimido e enviado para um reator de conversão de amônia, na presença de um catalisador à base de óxido de ferro. O efluente do reator é, então, refrigerado para a condensação da amônia, obtida na forma anidra (Tolmasquim, Szklo e Soares, 2003).

De 50 a 60% do consumo de gás natural neste processo é na forma de matéria-prima; o restante é consumido como combustível no reformador primário e no pré-aquecimento do metano. Vapor é gerado a 315,6 °C na caldeira de recuperação e a 204,4 °C no conversor de amônia. Eletricidade é consumida na coluna de absorção de CO<sub>2</sub>, nos compressores de ar e de metano, no conversor de amônia e no resfriador da amônia. O consumo energético específico é maior quando se utiliza resíduos de hidrocarbonetos, ao invés de gás natural (Brown, Hamel and Hedman, 1985; Tolmasquim, Szklo e Soares, 2003; IEA, 2007).

O uso de membranas de paládio na separação do hidrogênio pode reduzir o consumo específico de energia em 2 GJ/t de NH<sub>3</sub>. O CO<sub>2</sub> é, em geral, separado do H<sub>2</sub> usando algum processo de absorção por solventes; a utilização de novos solventes pode ocasionar economias de até 1,4 GJ/t de NH<sub>3</sub> (IEA, 2007).

O gás natural responde por 70 a 90% do custo da amônia (IEA, 2007).

## 6.5 Consumo de energia

---

<sup>9</sup> O dióxido de carbono assim produzido pode ser destinado à produção de uréia, ou para a indústria de bebidas. Uma tonelada de uréia requer 0,88 toneladas de CO<sub>2</sub> (IEA, 2007).

A Tabela 6.1 mostra a evolução, desde 1970, do consumo final dos energéticos usados na indústria química brasileira. Pode-se observar, nesta tabela, que o óleo combustível era a fonte de energia térmica mais consumida nas décadas de setenta e oitenta e que perdeu esta posição nas décadas seguintes para o gás natural e outros derivados de petróleo. Nesta última categoria destacam-se os gases produzidos nos próprios processos industriais das instalações químicas, assim como o gás de refinaria.

**Tabela 6.1 Consumo final, em 10<sup>3</sup> tep, dos energéticos utilizados na indústria química brasileira de 1970 a 2013**

<i>Energéticos</i>	1970	1980	1990	2000	2010	2011	2012	2013
Gás natural	3	157	324	1.252	2.289	2.437	2.218	2.037
Carvão mineral	0	2	95	79	125	105	164	152
Lenha	123	87	218	74	49	48	47	50
Bagaço de cana e outras recup.	0	17	40	154	93	92	90	91
Óleo diesel	57	39	23	83	27	12	13	23
Óleo combustível	754	2.330	1.588	1.136	233	377	328	424
Gás liquefeito de petróleo	1	6	9	14	64	176	190	192
Nafta	0	33	0	0	0	0	0	0
Querosene	0	2	0	2	0	0	0	0
Gás canalizado	0	0	1	1	0	0	0	0
Eletricidade	227	686	1.145	1.483	2.055	2.014	2.023	1.962
Carvão vegetal	0	32	32	0	20	20	19	19
Outros derivados de petróleo	0	350	758	2.143	2.259	2.158	2.145	2.035
<i>Total</i>	1.166	3.741	4.234	6.421	7.214	7.440	7.237	6.986

Fonte: Elaboração própria com base em dados do Balanço Energético Nacional (EPE/MME, 2014)

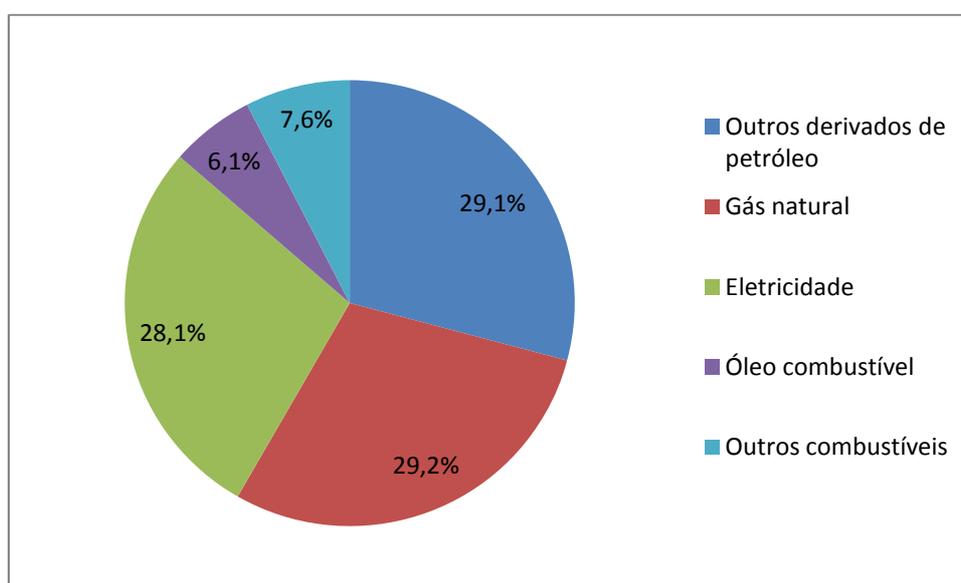
A Figura 6.4 mostra que os maiores consumos da indústria química brasileira em 2013 foram de gás natural (29,2%), outros derivados de petróleo (29,1%) e eletricidade (28,1%), vindo, a seguir, com consumos bem mais baixos, outros combustíveis (7,6%) e o óleo combustível (6,1%). O segmento químico é o maior consumidor de gás natural na indústria brasileira (EPE/MME, 2014).

## **6.6 Consumos energéticos e consumos energéticos específicos dos principais segmentos energo-intensivos da indústria química no Brasil**

Em 2013 a equipe do projeto Eficind no NIPE/Unicamp teve acesso a dados de produção e de consumo de energia em 4 centrais de produtos petroquímicos básicos, 9

unidades produtoras de polietileno/poliolefinas, 5 unidades produtoras de polipropileno, 2 fábricas de soda/cloro e derivados e 2 fábricas de PVC da Braskem, que é a maior empresa petroquímica do Brasil.

As tabelas e figuras a seguir apresentam os consumos energéticos e consumos energéticos específicos estimados dos principais segmentos energo-intensivos da indústria química nacional: petroquímicos básicos, resinas termoplásticas, soda-cloro e a cadeia dos fertilizantes. Esta divisão da indústria química permite obter boas estimativas de consumo através da utilização dos dados disponibilizados pela Braskem em 2013 e informações obtidas durante visitas técnicas realizadas por pesquisadores do NIPE em 2008, complementadas por dados publicados na literatura técnica consultada.



Fonte: Elaboração própria com base em dados do Balanço Energético Nacional (EPE/MME, 2014)

**Figura 6.4 Participações relativas dos energéticos no consumo de energia da indústria química brasileira em 2013**

A Tabela 6.2 apresenta a evolução, de 2003 a 2012, dos valores médios obtidos para os consumos energéticos específicos dos produtos petroquímicos básicos. Salta aos olhos, na Tabela 6.2, o quanto o consumo específico de energia elétrica é menor do que o consumo energético específico total, ou seja, neste segmento industrial a energia térmica é amplamente predominante.

**Tabela 6.2 Petroquímicos básicos – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t, de 2003 a 2012**

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Consumo específico de energia	15,91	15,57	16,05	15,97	16,35	16,38	16,08	15,33	15,59	16,54
Consumo específico de energia elétrica	0,67	0,67	0,68	0,67	0,70	0,74	0,65	0,66	0,66	0,64

Fonte: Bajay *et al.*, 2015a.

A Tabela 6.3 apresenta a evolução, de 2003 a 2012, dos valores médios obtidos para os consumos energéticos específicos das resinas termoplásticas. Pode-se observar claramente, na Tabela 6.3, uma tendência decrescente de ambos os consumos específicos.

**Tabela 6.3 Resinas termoplásticas – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t, de 2003 a 2012**

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Consumo específico de energia	5,13	5,12	4,83	4,56	4,68	4,68	4,53	4,38	4,37	4,25
Consumo específico de energia elétrica	1,71	1,64	1,61	1,60	1,59	1,58	1,64	1,55	1,56	1,52

Fonte: Bajay *et al.*, 2015a.

A Tabela 6.4 mostra o consumo energético específico médio das duas unidades de cloro e álcalis da Braskem durante o período 2003 – 2012. Estes valores foram empregados, no projeto Eficind, para se estimar o consumo energético e consumo energético específico médio de todo o conjunto dos produtores de cloro e álcalis no Brasil.

**Tabela 6.4 Indústria de cloro e álcalis – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t cloro, de 2003 a 2012**

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Consumo específico de energia	18,37	18,08	19,89	17,31	19,01	18,68	15,22	17,27	18,06	18,11
Consumo específico de energia elétrica	11,99	12,35	11,74	11,59	11,66	11,56	11,48	11,63	11,48	11,52

Fonte: Elaboração própria com dados da Abiclor e da Braskem

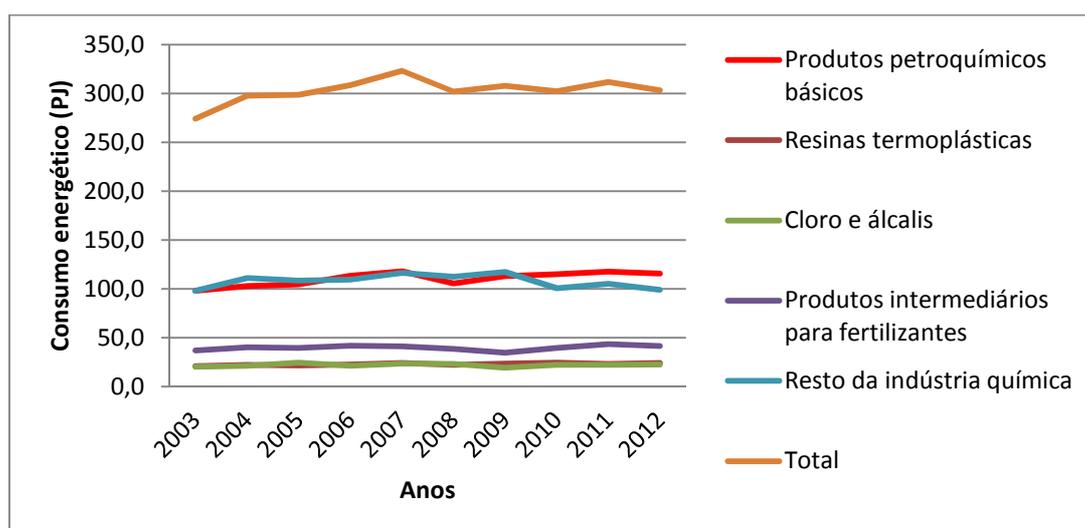
Os produtos mais energo-intensivos, ou seja, de maior consumo energético específico, são a amônia (15,6 GJ/t), o sulfato de amônio (9,31 GJ/t), o ácido fosfórico (4,86 GJ/t) e a ureia (4,2 GJ/t). Os outros produtos da cadeia dos fertilizantes listados acima, no entanto, possuem consumos energéticos específicos menores, resultando em médias ponderadas para o conjunto não muito elevadas. Estas médias estão indicadas na Tabela 6.5. Observe-se, nesta tabela, os valores baixos do consumo específico de energia elétrica.

**Tabela 6.5 Cadeia dos fertilizantes – valores médios de consumo específico de energia e consumo específico de energia elétrica, em GJ/t, de 2003 a 2012**

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Consumo específico de energia	3,18	3,31	3,38	3,34	3,13	3,06	3,05	3,14	3,27	3,04
Consumo específico de energia elétrica	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,21	0,22	0,23	0,23	0,23

Fonte: Bajay *et al.*, 2015a.

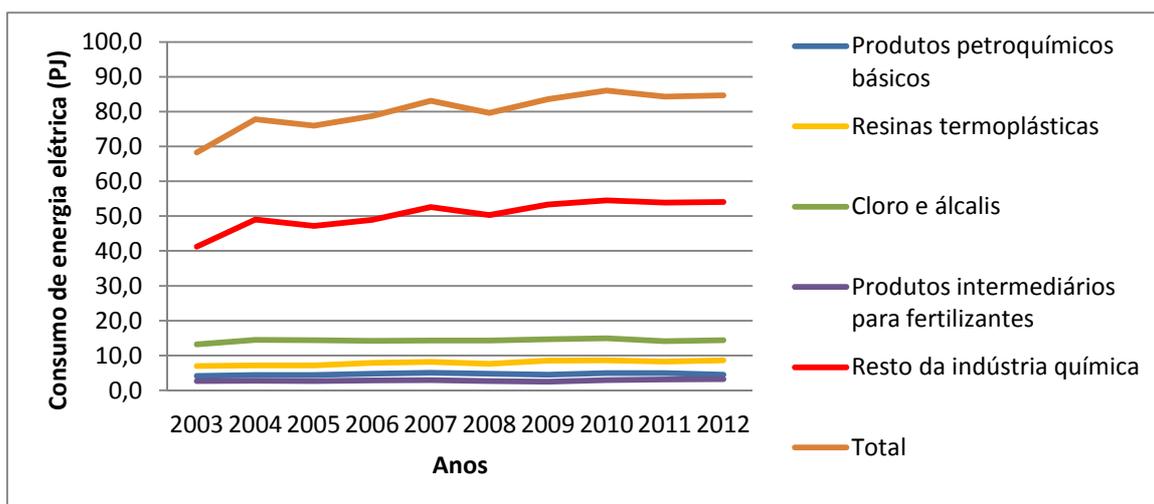
A Figura 6.5 mostra a evolução, de 2003 a 2012, do consumo energético estimado dos segmentos da indústria química brasileira analisados no projeto Eficind. Os quatro segmentos energo-intensivos analisados foram responsáveis por 67,3% do consumo energético total da indústria química em 2012. Os segmentos maiores consumidores naquele ano foram os produtos petroquímicos básicos, o resto da indústria química e os produtos intermediários da cadeia de fertilizantes, nesta sequência.



Fonte: Bajay *et al.*, 2015a.

**Figura 6.5 Consumo energético dos segmentos da indústria química, de 2003 a 2012**

Os consumos estimados de energia elétrica destes segmentos durante o mesmo período estão indicados na Figura 6.6. Os maiores consumidores de energia elétrica têm sido, nesta ordem, o resto da indústria química, a indústria de cloro e álcalis, e as resinas termoplásticas.



Fonte: Bajay *et al.*, 2015a.

**Figura 6.6 Consumo de energia elétrica dos segmentos da indústria química, de 2003 a 2012**

## 6.7 Autoprodução de energia elétrica

A Tabela 6.6 mostra o consumo de energia elétrica da indústria química brasileira em 2013, assim como a desagregação deste consumo em energia adquirida da rede pública e energia autoproduzida. A tabela também desagrega a energia autoproduzida por tipo de combustível utilizado. Pode-se constatar, nesta tabela, que os combustíveis mais utilizados na autoprodução de eletricidade naquele ano foram os gases de refinaria e de processos químicos, o gás natural e derivados de petróleo, nesta sequência. A autoprodução atendeu 9,3% do consumo de energia elétrica deste segmento industrial naquele ano.

**Tabela 6.6 Consumo de energia elétrica e sua desagregação em energia adquirida e autoproduzida, na indústria química brasileira, em 2013**

Consumo total de energia elétrica (GWh)	22.817
Energia elétrica adquirida (GWh)	20.704
Autoprodução (GWh)	2.113
Centrais hidrelétricas	7
Centrais termelétricas	2.105
Gás natural	560
Carvão mineral	47
Gases de refinaria e de processos químicos	1.135
Outras fontes de energia	363
Autoprodução sobre o consumo setorial (%)	9,3

Fonte: EPE/MME (2014)

## 6.8 Boas práticas e equipamentos eficientes de uso transversal na indústria química

Bajay, Beissmann e Gorla (2009) estimaram os seguintes usos finais da energia como tendo sido os maiores, em ordem decrescente, na indústria química brasileira em 2006: fornos/reatores – 35,4%; vapor de processo – 32,5%; força motriz elétrica – 16,7%; processos eletrolíticos – 4,4% e secadores – 3,9%.

Uma grande parte das reações químicas de interesse industrial requer aquecimento direto em fornos/reatores. As seguintes boas práticas (CIRAS, 2005) são recomendadas para fornos, em geral, e para as suas aplicações na indústria química; após algumas destas boas práticas estão indicadas faixas típicas de economias de energia verificadas na indústria química (Neelis, Worrell e Masanet, 2008): (i) otimização da relação ar-combustível dos queimadores do forno – 5 a 25%; (ii) limpeza regular dos queimadores e áreas de troca de calor – 5 a 10%; (iii) redução das perdas de calor do forno, através de um isolamento térmico adequado e em bom estado – 2 a 5%; (iii) redução da infiltração de ar no forno – 5 a 10%; (iv) otimização do controle e do regime operacional do forno – 2 a 10%; e (v) recuperação de calor dos gases de exaustão do forno para pré-aquecimento da carga, aquecimento do ar de combustão do forno (8 a 18%), geração de vapor ou água quente em uma caldeira de recuperação ou trocador de calor, ou utilização em algum processo industrial próximo. Muitos dos fornos/reatores utilizados na indústria química empregam catalizadores e a sua escolha e grau de conservação são elementos-chave para o desempenho energético do equipamento.

A indústria química apresenta muitas oportunidades para a recuperação de calor residual entre processos de fabricação adjacentes (CIRAS, 2005; IEA, 2009). A identificação destas oportunidades de integração de processos pode ser maximizada com o uso da metodologia denominada “*Pinch Point*”. Em sua origem, no final da década de setenta, ela foi desenvolvida para processos contínuos e envolvendo só trocadores de calor. Posteriormente, ela foi expandida para processos em batelada, incorporação de unidades de cogeração e busca de economias simultâneas de energia térmica e água. Neelis, Worrell e Masanet (2008) mencionam economias de energia entre 20 e 30% oriundas da aplicação desta técnica em instalações da indústria química.

Conforme evidenciado pela estimativa de Bajay, Beissmann e Gorla (2009) para 2006, a indústria química é um grande consumidor de vapor de processo. Todas as boas práticas discutidas na seção 2.5 desta dissertação conseqüentemente são particularmente importantes para este ramo industrial.

Seguem alguns exemplos de economias de energia, em percentuais do consumo de vapor, conseguidas na indústria química com medidas visando ganhos de eficiência energética em sistemas de geração e distribuição de vapor (Neelis, Worrell e Masanet, 2008): (i) redução da pressão do vapor gerado – 5,8 a 8%; (ii) melhorias no isolamento das caldeiras – 6 a 26%; (iii) recuperação de calor dos gases residuais – 5 a 10%; (iv) recuperação de calor das descargas de fundo das caldeiras – 0,8 a 1,3%; (v) utilização de sistemas de controle mais avançados nas caldeiras – 3%; (vi) melhorias no isolamento das redes de distribuição de vapor – 3 a 13%; (vii) vistoria regular, ou automatizada e manutenção adequada dos purgadores das redes de distribuição de vapor – 10 a 15%; (viii) vistoria regular e manutenção adequada de vazamentos de vapor nas redes – 3 a 5%; e (ix) aumentos na taxa de retorno do condensado – até 10%.

Na indústria química, sobretudo em seu ramo petroquímico, é comum se utilizar caldeiras aquatubulares que operam a pressões e temperaturas elevadas, consumindo gases residuais, ou gás natural e gerando vapor superaquecido que alimenta turbinas a vapor que, por seu turno, acionam compressores, bombas, ou geradores elétricos. Outros tipos de equipamentos que costumam utilizar vapor de processo na indústria química são torres de destilação, evaporadores, reformadores, torres de decapagem e trocadores de calor, em geral. Da mesma forma, o vapor é bastante utilizado nesta indústria para controlar a temperatura e regular a pressão de reações químicas, transportar produtos químicos e diluir gases de processo para minimizar a formação de coque nas superfícies de troca de calor (CIRAS, 2005).

Em inúmeros processos da indústria química, a montante e/ou a jusante dos reatores são utilizados equipamentos tais como colunas de destilação e evaporadores cuja finalidade é separar componentes de misturas de produtos químicos. É uma boa prática se trabalhar com as menores pressões e temperaturas possíveis nestes equipamentos, para se economizar energia (CIRAS, 2005).

Chillers e torres de resfriamento também são muito comuns na indústria química. Um controle adequado de suas condições operacionais (temperaturas, vazões, incrustações, sequenciamento de um conjunto de chillers, filtragem e perdas por

evaporação em torres de resfriamento, etc.), particularmente quando operam com cargas parciais, é essencial para se obter um bom desempenho energético.

Segundo a estimativa feita por Bajay, Beissmann e Gorla (2009), a força motriz elétrica foi o terceiro maior uso final da indústria química brasileira em 2006. Toda a gama de boas práticas para motores elétricos e o emprego de motores de alto rendimento e motores tipo *premium*, discutidos na seção 2.1 desta dissertação, se aplicam com bastante propriedade a este ramo industrial

Bombas são os equipamentos mais acionados por motores elétricos. É importante se dimensionar o sistema de bombeamento e se escolher a bomba de forma que esta última opere, a maior parte do tempo, próximo a seu ponto de rendimento máximo. Se o regime de operação da bomba for muito variável, o que é comum na indústria química, pode-se utilizar um controlador de frequência acoplado ao motor que aciona a bomba, ou seja, varia-se a rotação do conjunto motor/bomba para se conseguir as vazões e pressões desejadas, evitando-se as perdas associadas ao controle de vazão por estrangulamento, em válvulas (Bajay *et al.*, 2015a).

Operar uma bomba de forma eficiente e proporcionar-lhe uma boa manutenção podem economizar de 2 a 7% de seu consumo de energia. A troca de uma bomba por um modelo que opera com maior eficiência pode economizar de 2 a 10% de seu consumo de energia; se a bomba a ser trocada estiver superdimensionada, a economia de energia pode ser maior ainda – 15 a 25%. A simples troca do motor elétrico que aciona a bomba por um modelo mais eficiente pode propiciar economias de energia de 2 a 5%. Quando a vazão bombeada for muito variável, a instalação de bombas em paralelo pode economizar de 10 a 50% do consumo energético de um sistema com uma única bomba. Uma outra solução para estes casos é o uso de motores com controladores de frequência, que permitem obter economias de energia de 20 a 50% (Neelis, Worrell e Masanet, 2008).

Motores com controladores de frequência também podem propiciar grandes economias de energia no acionamento de ventiladores e sopradores – 14 a 49%. Se o acionamento dos ventiladores ou sopradores for através de correias em V, a sua substituição por correias dentadas pode economizar cerca de 2% do seu consumo energético (Neelis, Worrell e Masanet, 2008).

Segundo Neelis, Worrell e Masanet (2008), a otimização de sistemas de ar comprimido na indústria química, através de medidas tais como a redução da pressão de descarga dos compressores, redução de vazamentos, instalação de motores elétricos de

alto rendimento, utilização de motores com controladores de frequência e emprego de sistemas de controle eficientes permite se alcançar economias de 2 a 18% no seu consumo de energia.

## **6.9 Inovações que podem reduzir o consumo energético específico de alguns segmentos da indústria química**

### **6.9.1 Centrais petroquímica de 1ª geração**

As principais rotas tecnológicas que têm possibilitado ganhos de eficiência energética na indústria petroquímica envolvem processos de integração das unidades produtivas, cogeração, reciclagem, recuperação de calor e novos catalisadores, com uma maior seletividade em relação aos produtos desejados.

Uma maior seletividade de um novo catalizador propicia economias de energia nas operações unitárias de separação e purificação e no tratamento de resíduos (Dechema/IEA/ICCA, 2013).

Os dois processos tradicionais de fabricação de produtos petroquímicos básicos são o craqueamento a vapor (*steam cracking*) e o craqueamento catalítico fluido (FCC - *Fluid Catalytic Cracking*).

O processo de craqueamento a vapor é composto por três etapas: (i) o craqueamento propriamente dito, em fornos de pirólise; (ii) o resfriamento rápido do gás efluente dos fornos de pirólise, sua compressão e um fracionamento primário; e (iii) o fracionamento da corrente, a frio, para extração dos diversos petroquímicos básicos produzidos (Bajay *et al.*, 2015a).

A Tabela 6.7 indica as principais inovações que têm sido introduzidas nas três etapas da tecnologia de craqueamento a vapor e no setor de utilidades associado a esta tecnologia.

A tecnologia de craqueamento a vapor para produção de petroquímicos básicos é dominada e licenciada por um número reduzido de fabricantes, que operam em nível global. Segundo Leite (2013), os principais licenciadores desta tecnologia são a Kellogg Brown & Root (KBR), Linde AG, ABB - Lummus, Stone & Webster (SSW) e a Technip.

É comum o uso de mais de uma destas tecnologias em uma central petroquímica. Por exemplo, a central da Braskem em Camaçari, Estado da Bahia, utilizava, em 2005, em suas unidades de olefinas, as tecnologias da ABB – Lummus, da Linde AG e da Technip (Braskem, 2006).

**Tabela 6.7 Inovações tecnológicas em centrais de produtos petroquímicos básicos que utilizam o craqueamento a vapor**

<i>Etapa do processo</i>	<i>Inovações tecnológicas</i>
<i>Craqueamento</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhorias no projeto das serpentinas do forno de pirólise para facilitar a transferência de calor</li> <li>• Utilização de inibidores para minimizar a formação de coque e maximizar o rendimento na produção das olefinas desejadas</li> <li>• Uso de serpentinas com revestimento de cerâmica, com resistência mecânica para operar em temperaturas de até 1.400 °C</li> <li>• Aumento da eficiência de combustão nos fornos de pirólise</li> <li>• Integração do sistema de alimentação de ar para combustão, nos fornos, com uma turbina a gás: o ar de combustão é substituído pelos gases de exaustão da turbina a gás, que ainda contêm de 15 a 17% de oxigênio, à uma temperatura de 580°C</li> <li>• Melhorias no projeto das caldeiras de recuperação de calor</li> </ul>
<i>Resfriamento do gás, fracionamento primário e compressão</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Melhor utilização do calor disponível na água de resfriamento</li> <li>• Pressão mais baixa no sistema inter-estágio de compressão</li> <li>• Temperatura da gasolina mais alta na coluna de fracionamento primário</li> </ul>
<i>Separação a frio</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Expansão do gás para otimizar a alimentação do sistema da coluna desmetanizadora</li> <li>• Uso de trocadores com superfície estendida para melhorar a eficiência na transferência de calor</li> </ul>
<i>Utilidades</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalação de turbina a gás na unidade de cogeração</li> <li>• Otimização do uso do vapor</li> <li>• Maior eficiência dos sistemas de acionamento / compressão</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria a partir de Ren, Patel e Blok (2004) e Neelis, Worrell e Masanet (2008)

Utilizando diferentes combinações das inovações tecnológicas mencionadas na Tabela 6.7, diversos fabricantes de equipamentos de craqueamento a vapor tem conseguido reduzir os consumos energéticos específicos dos seus produtos. Os melhores consumos energéticos específicos dos equipamentos produzidos pela Technip-Coflexip para craqueamento da nafta situam-se na faixa de 10,3 GJ/ t produtos comercializáveis a 10,9 GJ/t produtos comercializáveis e seu rendimento em etileno é de 35%. Um valor típico de consumo energético específico dos equipamentos fabricados pela ABB –

Lummus é de 11,5 GJ/t produtos comercializáveis, com um rendimento em etileno de 34,4%; a incorporação de uma turbina a gás pode diminuir este consumo específico para 9,8 GJ/t produtos comercializáveis. Os equipamentos produzidos pela Linde AG atingem um rendimento em etileno de 35% e seu melhor consumo energético específico é de 11,5 GJ/t produtos comercializáveis. Os consumos energéticos específicos dos equipamentos de craqueamento a vapor da nafta fabricados pela Stone & Webster estão entre 10,9 GJ/t produtos comercializáveis e 13,7 GJ/t produtos comercializáveis (Ren, Patel e Blok, 2006; Worrell *et al.*, 2008).

As unidades de craqueamento catalítico em leito fluidizado - FCC, existentes na maioria das refinarias de petróleo, são a segunda maior fonte de propeno no mundo e o mesmo é um subproduto da produção de gasolina, dos destilados médios e do GLP.

A demanda de propeno vem crescendo rapidamente nos últimos anos. Projeções para os próximos anos indicam que o crescimento da produção de propeno via pirólise de nafta tende a ser menor do que o crescimento da demanda de eteno, criando um déficit na oferta deste produto. As unidades de FCC encontram-se em posição única para suprir este aumento na demanda por propeno devido à sua flexibilidade operacional. Embora sua principal aplicação nas últimas décadas tenha sido a produção de gasolina, a unidade de FCC é frequentemente explorada para maximizar outros produtos, tais como destilados médios ou GLP. Na seção de conversão do FCC, a elevação do rendimento de propeno inclui algum aumento da severidade reacional, que pode ser obtido através de uma maior temperatura de reação além do uso de aditivo catalítico à base de zeólita ZSM-5. Porém, além da maximização da produção de propeno no reator, um segundo objetivo deve ser perseguido: o aumento da recuperação do propeno na seção de recuperação de gases. Nesta seção, o rendimento final é afetado pelo desempenho do compressor de gases, o projeto dos equipamentos e o esquema do processo. Eventualmente, novos equipamentos podem ser instalados, tais como chillers, visando à melhoria do sistema de absorção. Prevendo um real aumento na demanda por propeno no mercado nacional, Penna (2012) avaliou as mudanças necessárias na seção de recuperação de gases de uma unidade de FCC da Petrobras para se dobrar a produção de propeno em relação à operação convencional.

Ren, Patel e Blok (2006) mencionam uma planta piloto utilizando FCC que atinge rendimentos em propeno entre 17% e 20%, com um consumo energético específico de apenas 10 GJ/t produtos comercializáveis. O baixo consumo específico de energia que se consegue com unidades de FCC é, em grande parte, devido à menor temperatura com

que estes equipamentos operam (600 – 650 °C), em comparação com o craqueamento a vapor.

A Petrobrás pretende instalar uma unidade de FCC que maximize a produção de olefinas em sua nova refinaria, no Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro - Comperj, no Estado do Rio de Janeiro, ora em construção.

Os principais licenciadores do FCC petroquímico são a UOP, KBR e Stone & Webster, além da Sinopec e do Cenpes/Petrobrás (Bastos, 2009).

A empresa chinesa Sinopec desenvolveu os processos denominados DCC – *Deep Catalytic Cracking* e CPP – *Catalytic Pyrolysis Process*, ambos comercializados através da Stone & Webster. O DCC processa resíduos atmosféricos e apresenta elevado rendimento de propileno e produz uma nafta rica em aromáticos. Já o CPP foi desenvolvido com o objetivo de maximizar a produção de eteno a partir de gasóleos pesados (Perrone, 2012).

Segundo informações da Sinopec, ao final de 2010 haviam 13 unidades DCC e uma de CPP em operação comercial no mundo. Estavam em fase de projeto 3 unidades DCC, uma para a Rússia ( Nizhnekamosk ), outra para a China (Yanchang) e outra para a Índia. Em 2012, a Shaw Stone Webster anunciou o licenciamento de uma nova planta de DCC, de 30.000 BPD, para a Petro Rabigh, na Arábia Saudita.

As unidades de FCC das refinarias RPBC (desde 1992) e Replan (desde 1995), da Petrobrás, operam com um “Conversor de Duplo Riser Externo, uma tecnologia desenvolvida pelo Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes) com o objetivo de maximizar a produção de propeno.

A Petrobras possui uma longa experiência com o processo FCC e é proprietária de uma tecnologia de craqueamento de resíduos pesados, o chamado RFCC, já usado em suas refinarias. Além disso, a empresa desenvolveu tecnologia própria de FCC Petroquímico, tanto na linha do *riser* duplo, quanto na de “*down-flow*”. Ainda mais, é coproprietária de uma fábrica de catalisadores de FCC, no Rio de Janeiro, capaz de produzir os sistemas catalíticos especialmente projetados para o FCC Petroquímico. As frações pesadas são, assim, uma fonte alternativa de matéria-prima para o desenvolvimento da indústria petroquímica no Brasil (Perrone, 2012).

Rendimentos elevados em etileno (36-40%) e baixos consumos energéticos específicos (10-13 GJ/t produtos comercializáveis) podem ser atingidos através da hidropirólise da nafta, uma tecnologia já disponível comercialmente (Ren, Patel e Blok, 2006).

Propeno pode ser produzido utilizando propano e oxigênio como matérias primas. Ren, Patel e Blok (2006) descrevem uma tecnologia disponível comercialmente, utilizando esta rota, que atinge um rendimento em propeno de 84%, com um consumo energético específico de 8-10 GJ/t produtos comercializáveis.

Segundo Ren, Patel e Blok (2006), outras rotas tecnológicas com baixos consumos energéticos específicos para se produzir eteno ou propeno ainda estavam sendo testadas em laboratório: (i) produção de eteno, com um rendimento de 90%, a partir de etano, ou outras matérias primas gasosas em um reator que gera ondas de choque (8-10 GJ/t produtos comercializáveis); (ii) produção de eteno, com um rendimento de 80%, a partir de etano e oxigênio em um reator com alimentação de hidrogênio e catalizador de zeolita mordenita (12 GJ/t produtos comercializáveis); e (iii) produção de eteno (rendimento de 21%) e propeno (rendimento de 18%) a partir de óleos pesados em um reator utilizando zeolita ácida como catalizador (12 GJ/t produtos comercializáveis).

O metanol produzido a partir do gás natural pode ser utilizado como produto intermediário para a produção de olefinas, em geral (o processo MTO – *methanol to olefines*), ou propeno (o processo MTP – *methanol to propylene*). O MTO é licenciado pela UOP e o MTP pela Lurgi, UOP, DICP e Exxon Mobil. No final da década passada ainda não haviam unidades instaladas utilizando estas tecnologias; haviam planos para instalações na China e na Nigéria. Estas tecnologias exigem elevados investimentos e disponibilidade de gás natural a preços muito baixos (entre US\$ 0,50 e US\$ 0,80/milhão de BTUs) (Bastos, 2009). Além disto, como o processo de produção do metanol é energo-intensivo, o consumo energético específico destas rotas tecnológicas, considerando a produção do metanol, é muito mais elevado do que o do craqueamento térmico e o do FCC petroquímico (Dechema/IEA/ICCA, 2013).

Pode-se obter ganhos de eficiência energética na produção de compostos aromáticos, como o benzeno, tolueno e xilenos, nas centrais de produtos petroquímicos básicos, através do uso de melhores sistemas de recuperação de produtos (Neelis, Worrell and Masanet, 2008).

Processos de produção, nas centrais petroquímicas de produtos básicos, complementares à produção de eteno, propeno, BTX<sup>10</sup> e alguns outros produtos menos importantes por craqueamento a vapor podem envolver tecnologias licenciadas por

---

<sup>10</sup> BTX: benzeno, tolueno e xilenos.

outros fornecedores que não os mencionados anteriormente. Por exemplo, em 2005, se utilizava, na central petroquímica da Braskem em Camaçari, uma tecnologia desenvolvida pela Nippon Zeon, uma empresa japonesa, na planta de butadieno, uma tecnologia desenvolvida pela Universal Oil Products nas plantas de fracionamento de BTX, uma tecnologia licenciada pela Mobil na conversão de tolueno para benzeno e xilenos, e uma tecnologia Petroflex na planta de MTBE (Braskem, 2006).

### **6.9.2 Resinas termoplásticas**

De acordo com Neelis, Worrell and Masanet (2008), as seguintes medidas propiciam ganhos de eficiência energética na produção em larga escala de resinas termoplásticas tais como polietileno, polipropileno, poliestireno e PVC: (i) geração de vapor de baixa pressão com o calor de reações exotérmicas; (ii) re-uso de restos de solventes e óleos e de resíduos de catalizadores; (iii) reciclagem, ou queima como combustível de monômeros que não reagiram, solventes e polímeros residuais; e (iv) utilização de bomba de engrenagem ao invés de, ou em complemento a um extrusor.

### **6.9.3 Cloro e álcalis**

Entre os três tipos de células eletrolíticas utilizadas na produção de cloro e soda cáustica, o que apresenta o menor consumo energético específico é a célula de membrana<sup>11</sup>. Por conta desta característica, muito importante em um segmento industrial eletro-intensivo como o de cloro e álcalis, a participação deste tipo de célula em novas unidades produtoras e na expansão de unidades existentes tem sido crescente, no Brasil e em outros países.

Essa tecnologia é similar à empregada na célula de diafragma. O diafragma é substituído por uma membrana sintética seletiva que deixa passar íons de sódio, porém não permite a passagem de íons hidroxila e cloreto.

---

<sup>11</sup> A célula de membrana é similar à célula de diafragma, exceto que o amianto é substituído por um flúor – polímero que é impermeável aos íons cloreto. Similarmente à soda cáustica produzida na célula de mercúrio, a soda da célula de membrana tem um teor muito baixo de sal. A concentração da soda cáustica produzida é de 28 – 35% em NaOH.

O hidróxido de sódio obtido é mais puro e mais concentrado do que o obtido pelo método da célula de diafragma<sup>12</sup> e, como este, consome menos energia que o método da amálgama de mercúrio, mesmo que a concentração de hidróxido de sódio obtida seja menor, sendo necessário concentrá-lo.

O seu consumo específico de energia elétrica é igual ou menor comparado ao das células de diafragma, enquanto o seu consumo específico de energia térmica é menor, devido à maior concentração de hidróxido de sódio que ele proporciona, em relação ao conseguido com as células de diafragma.

Por outro lado, as matérias primas do processo empregando células de membrana precisam ser de alta pureza e o custo de reposição das membranas é alto. Estes fatores têm limitado o crescimento desta tecnologia na indústria de cloro e álcalis.

Há uma tendência mundial para a extinção do processo de mercúrio na produção de soda-cloro, em face dos impactos ambientais produzidos pela utilização dessa substância na cadeia produtiva, como a inalação dos vapores de mercúrio metálico, que acarreta problemas de saúde. Há, também, pressões para a limitação do uso de diafragmas de asbestos, por se tratar de material comprovadamente cancerígeno.

O cloro pode ser obtido de outras formas, tais como: eletrólise da salmoura de cloreto de potássio em células de membrana ou mercúrio, com a coprodução de hidróxido de potássio; eletrólise de cloreto de sódio ou de magnésio fundido para produzir sódio ou magnésio metálico; eletrólise de ácido clorídrico; e outros processos não-eletrolíticos.

Os eletrodos de difusão gasosa estão sendo estudados para dois objetivos diferentes: eletrólise de solução de ácido clorídrico e eletrólise de solução de cloreto de sódio. Segundo Fernandes, Glória e Guimarães (2009), ambas as aplicações usam o catodo despolarizado de oxigênio. Com a utilização deste catodo, as reações anódicas permanecem idênticas às dos processos tradicionais de eletrólise (diafragma para eletrólises de ácido clorídrico e membrana para eletrólises de cloreto de sódio), enquanto as reações catódicas são modificadas para posicioná-los em níveis termodinâmicos favoráveis. Os resultados são a baixa voltagem da célula e a redução no consumo de energia da ordem de 700 kWh por tonelada de cloro.

---

<sup>12</sup> As células de diafragma caracterizam-se, como o nome indica, pela presença de um diafragma que separa o compartimento anódico do catódico. O diafragma, que consiste basicamente de asbestos, permite a passagem dos íons por migração elétrica, mas reduz a difusão dos produtos. O diafragma permite o escoamento da salmoura do compartimento anódico para o catódico e, desta forma, diminui muito, ou impede, as reações secundárias (por exemplo, a formação de hipoclorito de sódio)

Para economizar energia e reduzir emissões, Neelis, Worrell and Masanet (2008) recomendam a cloração direta do etileno em fase gasosa, permitindo a recuperação de calor em temperaturas mais elevadas, e o craqueamento catalítico, em vez do térmico, do dicloroetano (EDC) para produzir o cloreto de vinila (VCM).

#### **6.10 Inovações que podem reduzir o consumo energético específico de alguns segmentos da indústria química**

Segundo Worrell *et al.*, (2008), os consumos energéticos específicos do craqueamento a vapor da nafta e do gás natural (etano) utilizando as melhores práticas industriais no mundo são 11 GJ/t produtos comercializáveis e 12,5 GJ/t produtos comercializáveis, respectivamente. Nestes consumos energéticos específicos totais está embutido um consumo específico de energia elétrica de 1 GJ/t produtos comercializáveis (278 kWh/t produtos comercializáveis), igual para o processamento das duas matérias primas.

Os consumos energéticos específicos das melhores práticas industriais para se produzir polietileno dependem do tipo de produto. O melhor consumo energético específico total verificado na produção comercial de polietileno de baixa densidade é de 1,4 GJ/t, com um gasto de 3,5 GJ/t de eletricidade e um excedente de produção de vapor de -2,1 GJ/t. O polietileno de alta densidade demanda um consumo energético específico total mínimo maior – 1,9 GJ/t e um consumo específico de eletricidade menor – 0,9 GJ/t. Os melhores consumos específicos total e de energia elétrica envolvidos na produção de polietileno linear de baixa densidade são 2,0 GJ/t e 0,4 GJ/t, respectivamente (IEA, 2009).

A melhor prática industrial para se produzir polipropileno requer um consumo energético específico total de energia de 1,0 GJ/t, constituído, em sua maioria, por energia elétrica – 0,9 GJ/t (IEA, 2009).

As duas plantas analisadas no projeto Eficind que produzem PVC também produzem o seu monômero, o cloreto de vinila (MVC). Somando os consumos específicos das melhores tecnologias para se produzir PVC e MVC tem-se 5,4 GJ/t para o consumo energético total e 1,0 GJ/t para o consumo de eletricidade (IEA, 2009).

De acordo com a IEA (2009), o consumo energético específico total da melhor prática industrial para se produzir PET é relativamente elevado – 4,8 GJ/t, enquanto que o consumo específico de energia elétrica correspondente é relativamente modesto – 0,7 GJ/t.

A produção comercial mais eficiente de poliestireno não requer muita energia: 0,2 GJ/t de consumo específico de eletricidade (Bajay, Beissman e Gorla, 2009) e 0,9 GJ/t de consumo energético específico total (IEA, 2009).

Por outro lado, a melhor produção comercial de policarbonato é a mais energointensiva entre os processos de fabricação das resinas termoplásticas analisadas no projeto Eficind: consumo energético específico total de 12,5 GJ/t e consumo específico de energia elétrica de 2,2 GJ/t (IEA, 2009).

Uma fábrica de cloro e álcalis produz múltiplos produtos, tais como cloro, soda cáustica, hidrogênio, ácido clorídrico, hipoclorito de sódio, etc. As comparações de consumos energéticos específicos, no entanto, são feitas com base na produção de cloro. Conforme apresentado anteriormente, a célula eletrolítica mais eficiente, do ponto de vista de consumo energético, disponível no mercado é a célula de membrana. Segundo a Agência Internacional de Energia, os menores consumos específicos de energia (total) e de energia elétrica para esta tecnologia são 11,9 GJ/t de cloro e 10,0 GJ/t de cloro, respectivamente (IEA, 2009). Estes valores incluem os consumos energéticos envolvidos na preparação da salmoura, na eletrólise do cloreto de sódio e na concentração da soda cáustica até 50%.

O sulfato de amônio é o composto mais energointensivo entre os produtos químicos intermediários na cadeia de fabricação dos fertilizantes; seu melhor consumo energético específico total é 8,47 GJ/t, com um consumo específico de energia elétrica de 1,77 GJ/t (Bajay, Beissmann e Gorla, 2009).

A amônia e a uréia também possuem consumos energéticos específicos mínimos elevados: 7,3 GJ/t e 2,5 GJ/t, respectivamente. Seu consumo específico mínimo de eletricidade, no entanto, é baixo – 0,3 GJ/t, igual para os dois produtos (IEA, 2009).

Segundo Bajay, Beissmann e Gorla (2009), a melhor prática industrial para produzir ácido fosfórico requer um consumo energético específico de 1,75 GJ/t e um consumo específico de eletricidade de 0,43 GJ/t.

Os demais produtos químicos intermediários para a fabricação de fertilizantes analisados no projeto Eficind possuem consumos energéticos específicos mínimos inferiores a 1 GJ/t: fosfato de monoamônio – 0,75 GJ/t, ácido nítrico – 0,54 GJ/t, nitrato de amônio – 0,50 GJ/t e ácido sulfúrico – 0,14; seus consumo específicos mínimos de energia elétrica são inferiores a 0,2 GJ/t: 0,19 GJ/t, 0,004 GJ/t, 0,13 GJ/t e 0,07 GJ/t, respectivamente (Bajay, Beissmann e Gorla, 2009).

A Agência Internacional de Energia – AIE, considera que a melhor prática industrial atualmente para reaproveitar plásticos pós-consumo é reciclar 25% deles e incinerar os restantes 75% com aproveitamento energético (IEA, 2009).

## 7. Modelagem e aplicações

Após visitas técnicas e uma densa e detalhada revisão da literatura técnica concernente a boas práticas e inovações tecnológicas que podem propiciar ganhos de eficiência energética nos segmentos industriais energo-intensivos de papel e celulose, cimento, siderúrgico e químico, este capítulo da dissertação apresenta alguns modelos e planilhas que permitem quantificar os ganhos de economia de energia associados à adoção de algumas das medidas apresentadas nos capítulos anteriores.

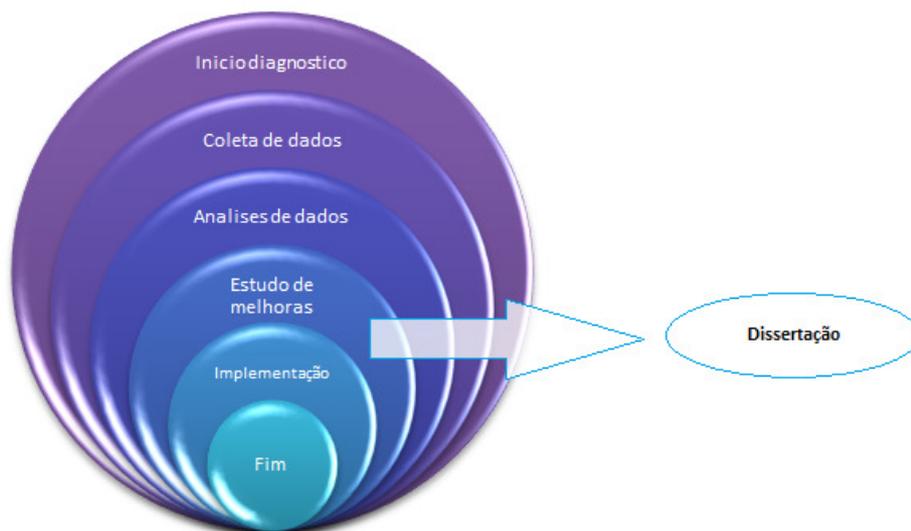
No capítulo 2 se discute as principais medidas que aumentam a eficiência energética de sistemas motrizes acionados por motores elétricos; e geradores de vapor. Estes dois tipos de equipamentos de uso geral na indústria são amplamente empregados nos quatro segmentos industriais energo-intensivos analisados nesta dissertação. A dissertação de mestrado de Silva (2013) avaliou diversos *softwares* livres, disponíveis na Internet, que permitem calcular as economias de energia possíveis de serem obtidas com medidas de racionalização de energia como as discutidas no capítulo 2 desta dissertação. Neste capítulo se exemplifica o uso de alguns destes modelos.

Para estimar, de uma forma preliminar, as economias de energia que se pode obter implantando algumas das medidas específicas de eficiência energética para os processos de fabricação dos quatro segmentos industriais aqui analisados, discutidas nos capítulos 3 a 6, se apresenta e se exemplifica, neste capítulo, planilhas em Excel desenvolvidas com esta finalidade nesta dissertação.

Na próxima seção se mostra como os modelos e as planilhas apresentadas nesta seção podem ser utilizados no diagnóstico energético de uma instalação industrial.

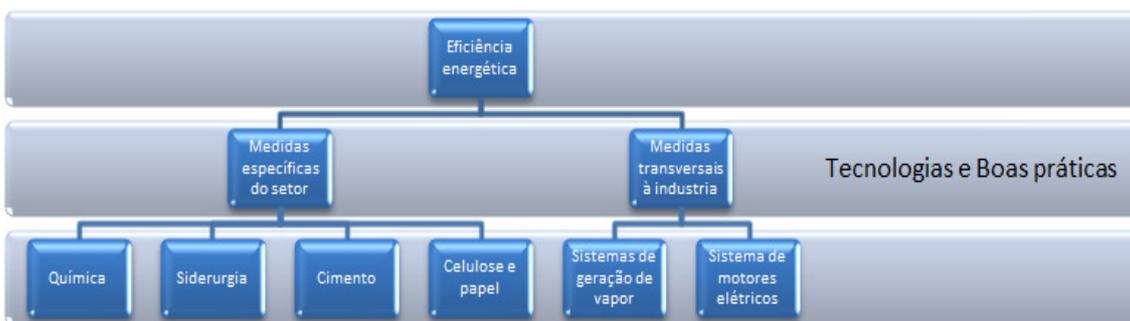
### 7.1 Utilização dos modelos e planilhas em um diagnóstico energético

Segundo a norma UNE 216.501- AENOR, um diagnóstico energético possui as grandes etapas ilustradas na Figura 7.1.

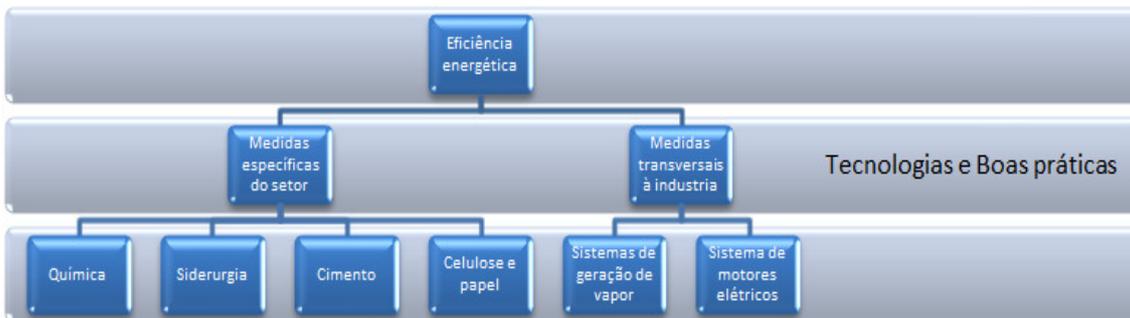


Fonte: Elaboração própria com informações da norma UNE 216.501- AENOR.  
**Figura 7.1 Estrutura geral de um diagnóstico energético e a etapa onde se inserem as contribuições desta dissertação**

As contribuições, qualitativas e quantitativas, desta dissertação estão ilustradas na



. Elas se inserem na etapa de estudo de melhoras, de um diagnóstico energético (vide Figura 7.1).



**Figura 7.2 Contribuição desta dissertação**

Os modelos de avaliação da eficiência energética de sistemas motrizes utilizando motores elétricos e de geradores de vapor podem propiciar, dependendo da base de dados utilizada, resultados detalhados e precisos para esta etapa do diagnóstico energético.

Por outro lado, as planilhas em Excel desenvolvidas nesta dissertação para avaliar potenciais ganhos de eficiência energética com boas práticas e novas tecnologias específicas para os processos de fabricação dos quatro segmentos energo-intensivos analisados podem prover resultados abrangentes porém preliminares, que precisam ser detalhados e aprofundados utilizando outras ferramentas/modelos e análises econômicas. Estas características tornam estas planilhas particularmente úteis em pré-diagnósticos energéticos de fábricas destes segmentos industriais, que têm a finalidade de detectar potenciais técnicos de conservação de energia e identificar os maiores potenciais, para posterior detalhamento, nestas instalações.

As planilhas foram desenvolvidas para serem aplicadas em instalações industriais individuais, mas elas também podem ser úteis para estimar potenciais técnicos de conservação de energia para um conjunto de instalações de um dos quatro segmentos industriais analisados, em um dado estado, região, ou o País como um todo.

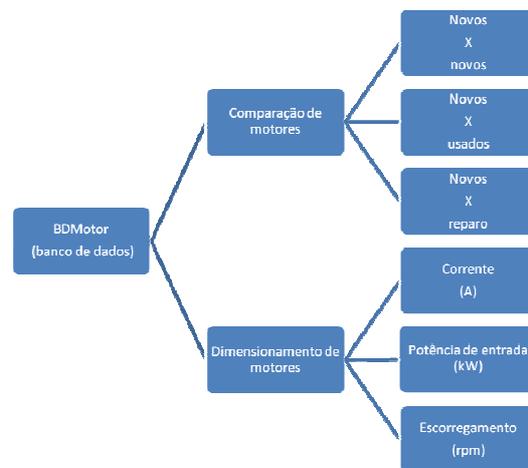
## **7.2 Modelo de avaliação da eficiência energética de geradores de vapor e sistemas motrizes utilizando motores elétricos**

### **7.2.1 Sistemas com motores elétricos**

No diagnóstico da eficiência energética de sistemas motrizes acionados por motores elétricos destacam-se os modelos BDMotor, MotorMaster+ International e Mark IV Plus. O BD Motor e o Mark IV foram desenvolvidos no âmbito do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) e podem ser baixados no portal Procel-Info da Internet, enquanto que o MotorMaster+ International faz parte dos *softwares* de apoio a diagnósticos energéticos disponibilizado pelo *Department of Energy* do governo norte-americano.

O modelo BDMotor é composto por três módulos, conforme ilustrado na Figura 7.3. Os dados do módulo de banco de dados alimentam os módulos de comparação de motores e de dimensionamento de motores. O modelo contempla um amplo banco de

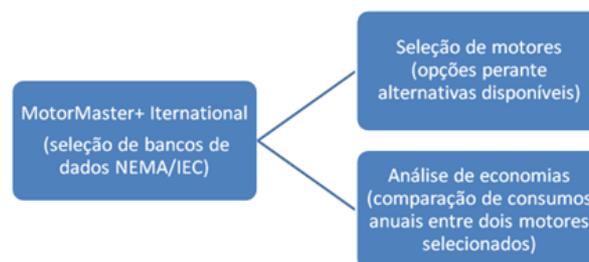
dados de motores elétricos fabricados no País, que está um pouco desatualizado; além disso, o usuário pode inserir seus próprios dados de motores não constantes no banco. As comparações de desempenho energético podem ser entre dois motores novos do banco de dados, um motor novo e um usado, e um motor novo versus um motor rebobinado. O módulo de dimensionamento permite determinar se o motor elétrico está superdimensionado, subdimensionado, ou se sua capacidade está adequada para o seu carregamento atual; o carregamento do motor pode ser determinado através de medições de corrente de entrada, escorregamento do motor, ou potência de entrada.



Fonte: Silva, 2013.

**Figura 7.3 Módulos do BDMotor e suas opções**

O modelo MotorMaster+ International também realiza comparações de consumos energéticos entre dois motores elétricos selecionados (vide Figura 7.4), permitindo calcular, por exemplo, a economia de energia que se pode obter com a troca de um motor por um outro mais eficiente. O banco de dados embutido neste modelo contempla tanto motores elétricos cuja especificação técnica segue a norma americana NEMA, como motores que seguem a norma internacional IEC; eventualmente alguns motores elétricos fabricados no Brasil não façam parte deste banco de dados.



Fonte: Silva, 2013.

**Figura 7.4 Módulos do MotorMaster+ International**

O *software* CRC (Cálculo de Rendimento de Caldeiras) foi implantado em uma plataforma MS-Excel com macros. Ele efetua o cálculo do rendimento de uma caldeira usando o método direto, ou o método indireto, de acordo com a opção feita pelo usuário. A Figura 7.5 ilustra a tela inicial deste software, onde se escolhe o método de cálculo desejado.



Fonte: Silva, 2013

**Figura 7.5 Tela inicial de seleção do método, direto ou indireto, de cálculo do rendimento de uma caldeira pelo *software* CRC**

O módulo de caldeiras do modelo Mark IV Plus também calcula o rendimento de caldeiras. Neste caso, o cálculo é feito através do método indireto. O módulo gera recomendações sobre a operação destes equipamentos e sobre práticas de segurança de acordo com a norma NR13<sup>13</sup>. O método indireto de cálculo da eficiência de caldeiras permite vislumbrar onde residem oportunidades de ganhos de eficiência, mas exige uma maior quantidade de dados para a análise.

O Scorecard para sistemas de vapor, desenvolvido pela DOE, é uma abordagem inteiramente qualitativa baseada nas respostas de 32 questões de múltipla escolha. O seu objetivo é criar uma pontuação (ou *score*) para o sistema analisado, sobre os potenciais ganhos de eficiência energética. O modelo é de aplicação simples e rápida. Ele pode

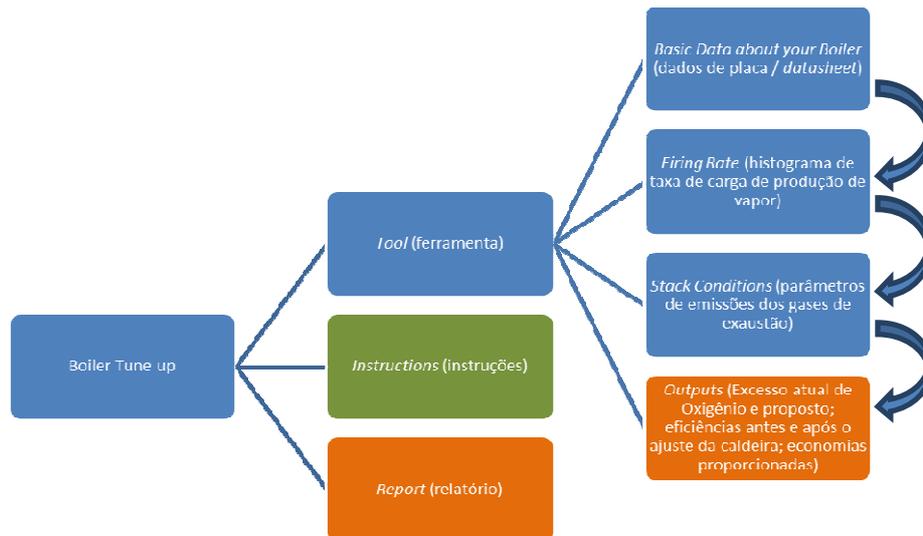
<sup>13</sup> NR13: É uma norma regulatória do Ministério de Trabalho e Emprego que tem como objetivo condicionar inspeção de segurança e operação de caldeiras e vasos de pressão.

servir como um guia inicial para diagnósticos energéticos de sistemas de vapor, com recomendações padronizadas de boas práticas.

O Boiler Tune-up auxilia o usuário no ajuste da relação ar-combustível, visando aumentar a eficiência da caldeira e sua vida útil. O modelo possui três módulos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). No primeiro deles são registrados os dados de placa da caldeira, um histórico de carregamento do equipamento e a composição das emissões dos gases de exaustão; com estas informações, o módulo calcula o atual excesso de ar e o proposto, as eficiências antes e após o ajuste da caldeira e a economia propiciada pelo ajuste. O segundo módulo fornece as instruções e o terceiro elabora um relatório sobre o ajuste e suas consequências.

O Steam System Tool Suite (SSTS), desenvolvido pela DOE, é um software que permite realizar simulações detalhadas de um sistema de vapor, para analisar o desempenho energético da operação atual do sistema e calcular os eventuais ganhos de eficiência energética ocasionados por modificações nas condições atuais. Trata-se de uma ferramenta de análise particularmente útil quando se tem vários níveis de pressão e turbinas a vapor no sistema.

No modelo 3EPlus é possível se escolher um material de isolamento térmico entre várias opções disponibilizadas. O *software* calcula a espessura necessária do material para satisfazer um dos seguintes requerimentos: (i) proteção pessoal; (ii) controle de condensação, no caso de superfícies frias; (iii) perda de calor pré-estabelecida; e (iv) obtenção da espessura econômica ótima, que minimiza o custo do isolamento e de sua instalação mais o custo das perdas de calor através do isolamento. Os resultados do modelo 3EPlus são dados de entrada para o modelo SSAT.



Fonte: Silva, 2013.

**Figura 7.6 Módulos do modelo Boiler Tune-up**

### **7.3 Planilha para avaliar potenciais ganhos de eficiência energética com boas práticas e novas tecnologias específicas para os processos de fabricação de segmentos industriais**

Nas planilhas foram inseridos consumos energéticos específicos (SEC's – *Specific Energy Consumptions*), reais ou típicos, por processos e/ou por etapas do processo de fabricação, assim como estimativas de reduções potenciais nestes consumos específicos (economias de energia) associadas a boas práticas e inovações tecnológicas nos quatro segmentos energo-intensivos analisados neste trabalho.

As boas práticas e inovações tecnológicas inseridas nas planilhas são as apresentadas e discutidas nos capítulos 3 a 6 desta dissertação. As boas práticas e inovações para as quais não foi possível se obter estimativas de potenciais economias de energia, evidentemente, não foram colocadas nas planilhas.

Nas aplicações das planilhas em pré-diagnósticos de energia deve-se utilizar, sempre que disponíveis, consumos energéticos específicos (SEC's) reais dos processos, ou etapas do processo de fabricação da instalação industrial sendo diagnosticada. Quando não se dispuser destes valores, pode-se utilizar valores típicos de SEC's. Nas

ilustrações de montagem e exemplificação de uso das planilhas, neste capítulo, foram utilizados SEC's típicos.

Algumas das boas práticas e inovações tecnológicas discutidas nos capítulos 3 a 6 são mutuamente exclusivas, ou, então, as magnitudes de seus potenciais de economias de energia são mutuamente dependentes. Cabe aos usuários das planilhas identificar estas situações em cada estudo de pré-diagnóstico, evitar a aplicação de medidas mutuamente exclusivas e ajustar os potenciais de economias de energia de medidas mutuamente dependentes.

Para o desenvolvimento das planilhas foram utilizadas tabelas dinâmicas da plataforma MS-Excel. Inicialmente foi inserida a base de dados dos processos com suas respectivas etapas e SEC's (Tabela 7.1). Em seguida foi realizada a inclusão das boas práticas e inovações tecnológicas (Tabela 7.2).

**Tabela 7.1 Exemplo de base de dados dos processos com suas etapas e respectivos SEC's, nas planilhas**

<b>TIPO DE PLANTA</b>	<b>PROCESSO</b>	<b>ETAPA</b>	<b>SEC - Eletricidade (GJ/t)</b>	<b>SEC - Térmica (GJ/t)</b>
Integrada	Preparação da carga	Produção de Coque	0,06	0,8
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Preparação da carga	Sinterização ou peletização	0,13	1,9
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Alto forno	0,17	12,2
Integrada	Redução	Redução direta	0	11,7
Integrada	Refino	Aciaria	0,17	0,49
Integrada	Refino	Aciaria	0,17	0,49
Integrada	Lingotamento	Lingotamento contínuo	0	1,8

As visitas técnicas e a extensa pesquisa bibliográfica realizadas indicaram, em geral, mais de um valor de economia potencial de energia para cada boa prática e inovação tecnológica inserida na planilha. Logo, faixas entre valores mínimos e máximos de economia de energia térmica e elétrica foram definidas nas planilhas, conforme ilustrado na Tabela 7.2.

As planilhas completas dos quatro segmentos industriais energo-intensivos analisados nesta dissertação estão no Anexo.

**Tabela 7.2 Exemplo de representação, nas planilhas, de boas práticas e novas tecnologias, com estimativas de suas economias de energia**

MEDIDAS TECNOLOGIASE BOAS PRÁTICAS	Elet. Min	Elet. Max	Térmica Min.	Térmica Max.
Otimização da relação ar-combustível dos queimadores do forno	0	0	5%	25%
Limpeza regular dos queimadores e áreas de troca de calor	0	0	5%	10%
Redução das perdas de calor do forno. Atráves de isolamento térmico	0	0	2%	5%
Redução da infiltração de ar no forno	0	0	5%	10%
Otimização do controle do regime operacional do forno	0	0	2%	10%
Recuperação de calor dos gases de exaustão do forno	0	0	8%	18%
Pinch point	0	0	20%	30%
Redução da pressão de vapor	0	0	6%	8%
Melhorias isolamento da caldeira	0	0	6%	26%
Recuperação de calor dos gases residuais	0	0	5%	10%
Recuperação de calor das descargas de fundo das caldeiras	0	0	1%	1%
Utilização de sistema de controle mais avançados nas caleiras	0	0	0%	3%
Melhorias no isolamento das redes de distribuição de vapor	0	0	3%	13%
Vistoria regular ou automatizada e manutenção adequada dos purgadores das redes de distribuição de vapor	0	0	10%	15%
Vistoria regular e manutenção adequada de vazamentos de vapor nas redes	0	0	3%	5%
Aumento na taxa de retorno do condensado	0	0	0%	10%
Boa manutenção da bomba	0	0	2%	7%
Troca da bomba por uma mais eficiente	0	0	2%	10%
troca do motor elétrico (bomba)	0	0	2%	5%

### **7.3.1 Exemplo de utilização da planilha em uma instalação que fabrica papel e/ou celulose**

Inicialmente, deve-se indicar na planilha o tipo de fábrica, isto é, se ela fábrica só celulose de mercado, só papel, ou se é uma fábrica integrada, produzindo tanto celulose como papel (vide Figura 7.7).

Em seguida, é necessário selecionar na planilha os processos, ou etapas de processos que se quer simular e se inserir, para eles, valores reais de consumos energéticos específicos, ou, então, utilizar valores típicos encontrados na literatura técnica consultada. Este passo está ilustrado na Figura 7.8, onde se mostra o tipo de fábrica, o processo e, dependendo do processo, as suas etapas.

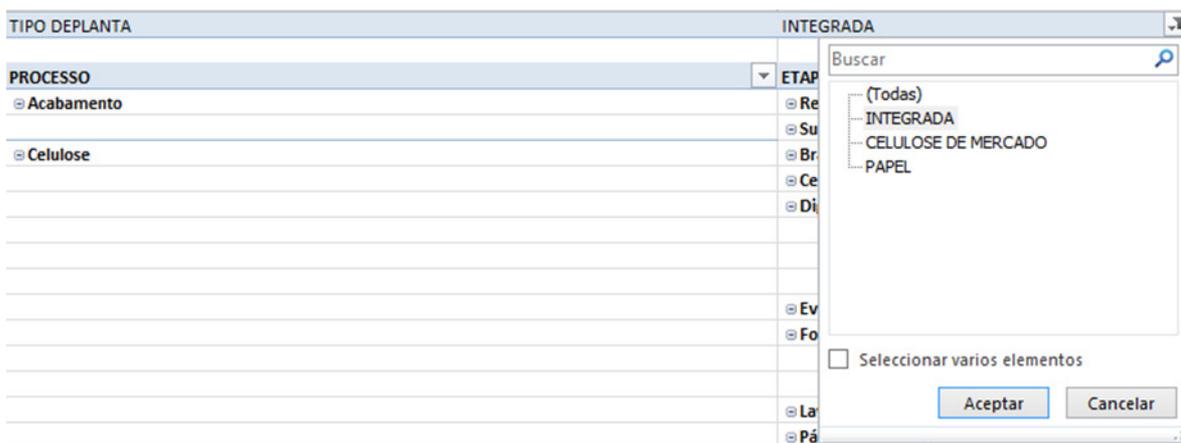


Figura 7.7 Indicação do tipo de fábrica, na planilha.

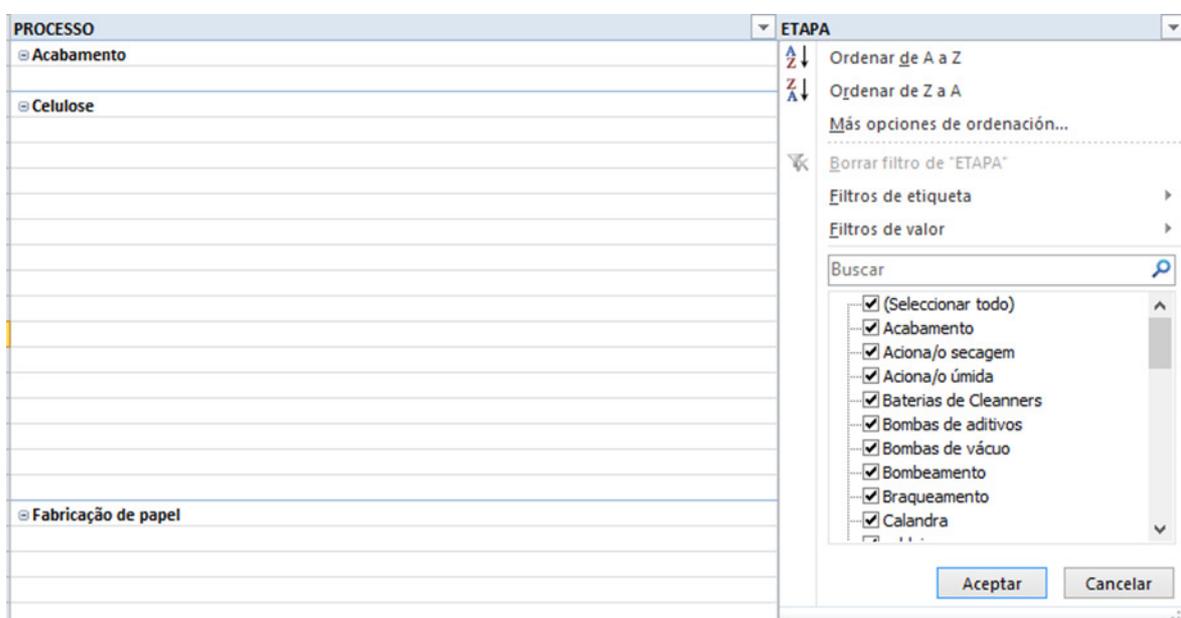


Figura 7.8 Seleção, na planilha, dos processos, ou etapas dos processos a serem analisados

Finalmente, se escolhe, na planilha, as boas práticas, ou inovações tecnológicas que se quer simular a introdução na instalação industrial analisada. A Figura 7.9 ilustra as economias de energia térmica e elétrica, máximas e mínimas, que se pode obter após a realização deste passo. Os consumos energéticos específicos mínimos (máximos) são obtidos com as máximas (mínimas) economias de energia passíveis de serem obtidas com as medidas de eficiência energética analisadas.

TECNOLOGIA	SEC - Eletricidade mín. (GJ/t)	SEC - Eletricidade máx. (GJ/t)	SEC - Térmica mín. (GJ/t)	SEC - Térmica máx. (GJ/t)
ND	0	0	0	0
ND	0	0	0	0
TCF	0,481	0,0481	2,004	0,01002
ND	0	0	0	0
controle baseado em lógica fuzzy e redes neurais	0,193	0	2,162	0
Pré-tratamento biológico para a polpação mecânica	0,193	0,0193	2,162	0
Rotores eficientes de polpamento desfibramento	0,193	0,0193	2,162	0
Utilização do licor verde no despolpamento	0,193	0	2,162	0
elevação da concentração do licor negro	0	0	9,887	0
Forno de cal enriquecido com oxigênio	0,197	0	2,65	0,1855
Refratário tijolo de isolamento	0,197	0	2,65	0
sistema compacto da Tampella	0,197	0	2,65	0
Lavagem com ciclo de vapor para pasta crua	0,086	0	0,147	0
Automatização de manuseio de cavacos e triagem de espessura	0,115	0,00575	0	0
descascadores de tambor (cradle debarkers)	0,115	0	0	0
gaseificação do licor negro	0,029	0	0,627	0
sistemas de recuperação direta dos produtos alcalinos	0,029	0	0,627	0
cilindros ociosos aquecidos por vapor,	0,42	0	0,335	0
Sensor laser de ultra-sônico de rigidez web	0,395	0,00395	0	0

**Figura 7.9** Potenciais de economia de energia térmica e elétrica, máximos e mínimos, que se pode obter para as boas práticas e inovações tecnológicas selecionadas na planilha

## 7.4 Exemplificação do uso de modelos de análise de medidas que possibilitam ganhos de eficiência energética em sistemas de geração de vapor e sistemas motrizes utilizando motores elétricos

### 7.4.1 Modelagem de ganho de eficiência energética em motor elétrico

O motor WEG modelo 609 possui uma potência nominal de 100 CV (73,6 kW), corrente nominal de 248 A e opera com um nível de tensão de 440 V.

O carregamento deste motor em uma dada aplicação foi mensurado através da corrente de alimentação. O valor encontrado foi de 143 A.

Conforme ilustrado na Figura 7.10, o software BDMotor, cuja base de dados contempla este motor, revelou que a potência correspondente a esta corrente é de 80,6 kW e que o motor pode estar subdimensionado. Esta condição significa um rendimento abaixo do nominal e uma diminuição da vida útil do motor.

Decidiu-se, então, diminuir o carregamento para 75% da potência nominal e utilizar este software para avaliar a troca deste motor por um outro de mesma capacidade mas tipo Premium, de elevado rendimento. Escolheu-se o motor da WEG modelo 2641.

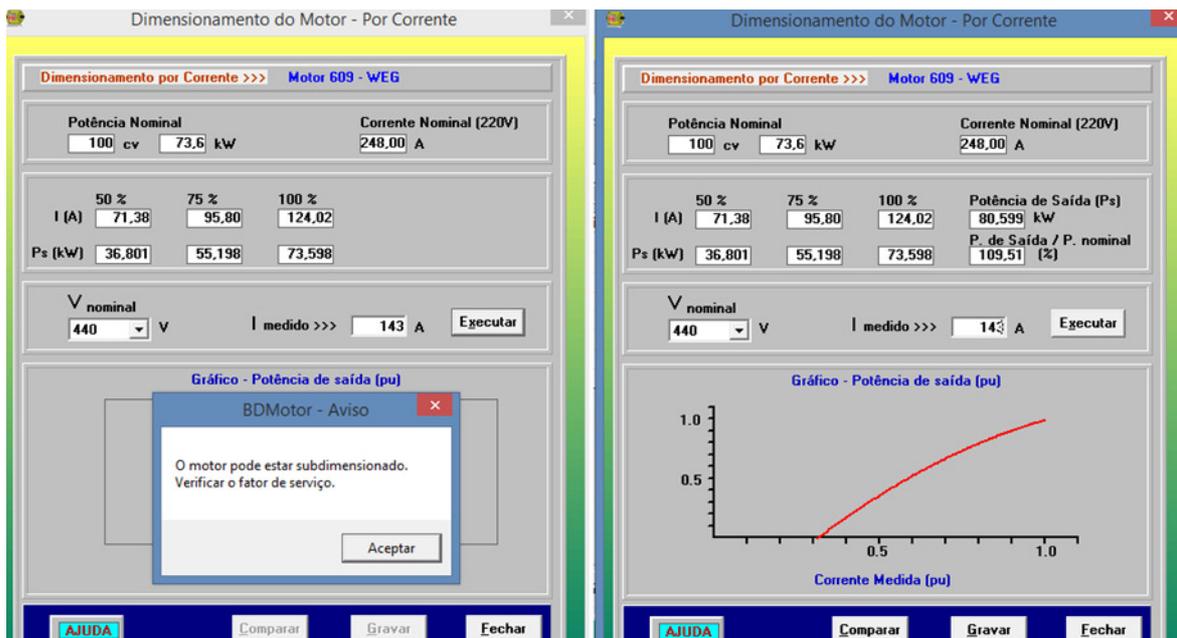


Figura 7.10 Análise do dimensionamento do motor modelo 609 da WEG para uma corrente medida de 143 A

As comparações entre os motores modelos 609 e 2641 da WEG no BDMotor, para um fator de carga de 75%, indicaram uma elevação do rendimento de 92,2% para 95,4% e uma economia de energia elétrica de 26.685,63 kWh por ano, que, para uma tarifa de R\$ 0,386/kWh, propicia uma economia anual de R\$ 10.300,65 e um período de retorno do investimento de 31 meses (Figura 7.11).

**Comparação Entre Motores (Uso X Novo)**

Motor 609 - WEG		Motor 2641 - WEG	
Potência (cv)	100	Potência (cv)	100
Carga (%)	75	Carga (%)	75
Rendimento (%)	92,2	Rendimento (%)	95,4
Perda Rend. (%)	2	Preço (R\$)	26544,54
Total Horas (Ano)	8000	Desconto (%)	0
Tarifa média de energia		Carga Centrífuga	
0,386 (R\$/kWh)		<input checked="" type="radio"/> Sim <input type="radio"/> Não	
Consumo Ativo no Ano (kWh - R\$)			
489578,71 kWh		462893,08 kWh	
188977,38 R\$		178676,73 R\$	
Retorno da diferença do investimento (Payback) - Motor 2641			
31 meses			
Diferença Invest. :		Economia por Ano :	
R\$26544,54		R\$10300,65   26685,63 kWh	

**Figura 7.11** Ganho de rendimento, economia de energia e economia com o custo da energia elétrica com a substituição de um motor WEG modelo 609 por um motor WEG modelo 2641, para um fator de carga de 75%, segundo o BDMotor

#### **7.4.2 Cálculo do rendimento de um gerador de vapor**

O primeiro passo de uma análise que vise melhorias ou mesmo a substituição de um gerador de vapor antigo, ou que aparentemente não esteja tendo um consumo de combustível satisfatório é calcular o rendimento do equipamento. Para esta finalidade, nesta seção se exemplifica o uso do software CRC.

O gerador de vapor escolhido para esta exemplificação é uma caldeira mista flamotubular/aquotubular que consome cavaco de eucalipto e possui uma capacidade de gerar 15 toneladas de vapor por hora a 9,8 bar e 200 °C. Em média, a caldeira gera 10 t/h de vapor a 8,8 bar e 190 °C. Estes e outros dados desta caldeira estão indicados na Tabela 7.3.

Esta caldeira não conta com controle dos gases da combustão, não tem pré-aquecedor do ar de combustão e os isolamentos térmicos não estão em boas condições.

Estes dados foram inseridos no software CRC e se selecionou o método direto para calcular o rendimento da caldeira. A Figura 7.12 ilustra a página do software que apresenta o resultado alcançado – um rendimento de 61,33%, junto com os dados utilizados no cálculo por este método.

Tabela 7.3 Dados da caldeira cujo rendimento é calculado pelo modelo CRC

<b><i>Dados nominais da caldeira</i></b>	
Tipo	Mista
Combustível	Biomassa (cavaco de eucalipto)
Pressão	9,8 bar
Temperatura	200 °C
Produção de vapor	15 Ton/h
<b><i>Condições médias de operação</i></b>	
Combustível	Biomassa (cavaco de eucalipto)
PCI	10.590 kJ/kg
Densidade	350 kg/m <sup>3</sup>
Consumo de combustível	1,16 kg/s
Pressão	8,8 bar
Temperatura	190 °C
Produção de vapor	10 Ton/h

### Rendimento de caldeiras - Método Direto

Tipo de vapor :	Vapor superaquecido	
Pressão do vapor :	8,80	bar
Temperatura do vapor :	190,00	° C
Entalpia do vapor :	2813,55	kJ / kg
Vazão de vapor :	2,78	kg / s
Temperatura da água de alimentação :	25,00	° C
Entalpia da água de alimentação :	103,48	kJ / kg
Tipo de combustível:	Lenha 30% umidade	
Poder calorífico do combustível :	10590	kJ / kg
Vazão de combustível :	1,16	kg / s
<b>Rendimento da caldeira :</b>	<b>61,33</b>	<b>%</b>

**Figura 7.12 Dados e resultados do cálculo do rendimento de uma caldeira pelo software CRC, usando o método direto.**

O rendimento calculado para esta caldeira mostra que o seu atual desempenho energético é baixo. Nascimento e Martin (2010) afirmam que rendimentos entre 80% e 87% podem ser obtidos em uma caldeira HBFS-04 combustíveis sólidos triturados oriundos da biomassa, tais como lenha em toras, cavacos, serragem, cascas de arroz, cascas de café, cascas de cacau, cascas de coco, cascas de amendoim, cascas de pinus, bagaço de cana, entre outros.

Melhorias nesta caldeira, como a troca de isolamentos térmicos, controle regular da relação ar/combustível e colocação de um pré-aquecedor do ar de combustão poderiam aumentar substancialmente o seu atual rendimento médio. Dependendo da idade da caldeira e do custo para se implantar estas melhorias, pode ser mais vantajoso trocar a caldeira por uma mais moderna e eficiente.

Mantidas as atuais condições de produção média de vapor, pressão e temperatura do vapor, um rendimento de 87% implicaria na redução de 31,8% no consumo de combustível, comparado com a situação atual.

## **7.5 Exemplificação do uso das planilhas para simular ganhos de eficiência energética com boas práticas e inovações tecnológicas nos quatro segmentos industriais analisados na dissertação**

### **7.5.1 Fabrica de papel e celulose**

Para exemplificar o uso da planilha em uma fábrica da indústria de papel e celulose foi escolhida uma fábrica integrada no Brasil, cujos dados de produção e consumos energéticos específicos foram levantados em 2010. Os dados de produção e de consumos específicos de energia elétrica e de energia térmica estão indicados na Tabela 7.4, enquanto que a desagregação dos consumos energéticos específicos por etapas dos processos produtivos estão na Tabela 7.5.

**Tabela 7.4 Produção horária e consumos energéticos específicos de energia elétrica e de energia térmica de uma fábrica integrada de papel e celulose no Brasil em 2010**

	Produção de celulose	Fabricação de papel
Produção horária	78,75 t/h	42,90 t/h
Consumo específico de energia elétrica	1,402 GJ/t	2,910 GJ/t
Consumo específico de energia térmica	16,488 GJ/t	5,843 GJ/t

Pode-se observar, na Tabela 7.4, que os consumos específicos de energia térmica são mais elevados do que os consumos específicos de energia elétrica tanto na produção de celulose como na fabricação de papel; esta diferença é mais marcante na produção de celulose.

**Tabela 7.5 Desagregação dos consumos específicos de energia elétrica e de energia térmica pelas etapas dos processos produtivos de uma fábrica de papel e celulose no Brasil em 2010**

<i>Etapa</i>	<i>Consumo específico de energia elétrica (GJ/t)</i>	<i>Consumo específico de energia térmica (GJ/t)</i>
<i>Pátio da madeira/picadores</i>	0,115	
<i>Digestor</i>	0,193	2,162
<i>Lavagem</i>	0,086	0,147
<i>Evaporadores</i>		8,997
<i>Preparação de químicos</i>	0,029	0,627
<i>Forno de cal</i>		2,650
<i>Branqueamento</i>	0,560	1,570
<i>Secagem da celulose (10%)</i>	0,420	0,335
<i>Preparação de massa</i>	0,245	
<i>Refinação</i>	0,395	
<i>Máquina de papel</i>	1,283	
<i>Secagem</i>		5,843
<i>Acabamento</i>	0,987	

A Tabela 7.5, por seu turno, revela que, nesta fábrica, os maiores consumos específicos de energia térmica ocorrem nos evaporadores do licor negro, na secagem do papel e no forno de cal, enquanto que os maiores consumos específicos de eletricidade são na máquina de papel, nas operações de acabamento do papel e no branqueamento da celulose.

As boas práticas e inovações tecnológicas escolhidas para esta exemplificação do uso da planilha desenvolvida para a indústria de papel e celulose estão indicadas na Tabela 7.6.

Os consumos específicos de energia elétrica e de energia térmica mínimos e máximos que cada uma das medidas de boas práticas e/ou inovações tecnológicas da Tabela 7.6 podem propiciar economia de energia foram calculadas pela planilha e estão indicados na Figura 7.13, junto com a sua soma, se todas estas medidas forem adotadas.

### **7.5.1 Fabricação de cimento**

A fábrica de cimento escolhida para ilustrar a aplicação da planilha setorial utiliza o processo de via seca. Seus consumos específicos de energia térmica e energia elétrica estão indicados na Tabela 7.7.

**Tabela 7.6 Boas práticas e inovações tecnológicas selecionadas para a aplicação da planilha em uma fábrica integrada de papel e celulose**

<i>Processo</i>	<i>Etapa</i>	<i>Boas práticas e/ou inovações</i>
Produção de celulose	Pátio de madeira	Descascador de tambor
Produção de celulose	Digestor	Controle baseado em lógica <i>fuzzy</i> e redes neurais
Produção de celulose	Lavagem	Lavagem com ciclo de vapor para pasta crua
Produção de celulose	Preparação de químicos	Sistema de recuperação direta dos produtos alcalinos
Produção de celulose	Forno de cal	Forno de cal enriquecido com oxigênio
Fabricação de papel	Preparação de massa	Aumento da consistência inicial da mistura fibra/água
Fabricação de papel	Máquina de papel	Aditivos minerais
Sector de utilidades	Caldeira de biomassa ou de recuperação	Recuperação de calor

TIPO DE PLANTA	INTEGRADA							
PROCESSO	ETAPA	SEC - Eletricidade atual (GJ/t)	SEC - Térmica atual (GJ/t)	SEC. Ele. Máx. Red. (GJ/t)	SEC. Ele. Mím. Red. (GJ/t)	SEC. Tér. Máx. Red. (GJ/t)	SEC. Tér. Mím. Red. (GJ/t)	
⊗ Celulose	Digestor	0,193	2,162	0,193	0,193	2,162	1,859	
	Forno de cal	0,000	2,650	0	0,000	2,465	2,332	
	Lavagem	0,086	0,147	0,086	0,068	0,147	0,088	
	Pátio da madeira/Picadores	0,115	0,000	0,115	0,077	0,000	0,000	
	Preparação de químicos	0,029	0,627	0,029	0,029	0,627	0,439	
⊗ Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0,000	1,283	1,283	0,000	0,000	
	Preparação de massa	0,245	0,000	0,245	0,225	0,000	0,000	
	Secagem	0,000	5,843	0	0,000	5,259	3,506	
⊗ Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0,000	0,000	0	0,000	0,000	0,000	

**Figura 7.13 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos atuais e consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da fábrica integrada de papel e celulose com a adição das boas práticas e inovações tecnológicas listadas na Tabela 7.6.**

**Tabela 7.7 Consumos específicos de energia térmica e energia elétrica, em GJ/t clínquer, por etapa do processo de fabricação de uma fábrica de cimento no Brasil**

Consumo específico de energia térmica (no forno)	3,3472
Consumo específico de energia elétrica na moagem do cru	0,1285
Consumo específico de energia elétrica no forno	0,0035
Consumo específico de energia elétrica na moagem de clínquer e aditivos	0,1285
Consumo específico de energia elétrica em outras atividades da fábrica	0,1077
Consumo específico total de energia elétrica na fábrica	0,3682

Esta fábrica utiliza moinhos de bolas e classificadores comuns tanto na moagem do cru como na do cimento (clínquer e aditivos). As boas práticas e inovações tecnológicas selecionadas para melhorar a eficiência energética da fábrica são a instalação de classificadores de elevada eficiência na moagem da matéria prima (economia de 0,0101 GJ/t a 0,0227 GJ/t), a otimização da recuperação de calor no resfriador de clínquer (economia de 0,0500 GJ/t a 0,3700 GJ/t) e a substituição do moinho de bolas por um moinho horizontal de rolos tipo Horomill na etapa de moagem do cimento (economia de 0,1000 GJ/t).

A instalação do classificador de elevada eficiência propicia uma economia mínima de energia elétrica de 7,9% e uma economia máxima de 17,7% na etapa de moagem do cru, as economias mínima e máxima de energia térmica alcançáveis pela otimização da recuperação de calor no resfriador de clínquer são de 1,5% e 11,0%, respectivamente, enquanto que a substituição do moinho de bolas por um moinho tipo Horomill reduz o consumo específico de energia elétrica desta fábrica na moagem de clínquer e aditivos em 77,8%.

A adoção destas três medidas reduz o consumo específico de energia térmica desta fábrica para valores entre 2,9772 GJ/t clínquer e 3,2972 GJ/t clínquer e o consumo específico total de energia elétrica entre 0,2455 GJ/t clínquer e 0,2581 GJ/t clínquer.

Os consumos específicos de energia elétrica e de energia térmica mínimos e máximos que cada uma das medidas de boas práticas e/ou inovações tecnológicas foram calculadas pela planilha e estão indicados na Figura 7.14.

TIPO DE PLANTA							
	via seca						
Etapa	SEC - Eletricidade atual (GJ/t)	SEC - Térmica atual (GJ/t)	Sec. Elet. Máx. Red. (GJ/t)	Sec. Elet. Mím. Red. (GJ/t)	Sec. Ter. Máx. Red. (GJ/t)	Sec. Ter. Mím. Red. (GJ/t)	
Moagem	0,1285	0	0,1171	0,1058	0,0000	0,0000	
Moagem do clínquer	0,1285	0	0,1285	0,0285	0,0000	0,0000	
Resfriamento	0,0035	3,3472	0,0000	0,0000	3,2972	2,9772	

**Figura 7.14 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da fábrica de cimento com a incorporação das boas práticas e inovações tecnológicas analisadas.**

A adoção destas três medidas reduz o consumo específico de energia térmica desta fábrica para valores entre 2,9772 GJ/t clínquer e 3,2972 GJ/t clínquer e o consumo específico total de energia elétrica entre 0,2455 GJ/t clínquer e 0,2581 GJ/t clínquer.

### 7.5.2 Usina siderúrgica

A Tabela 7.8 mostra as produções de coque, sinter, ferro-gusa, aço bruto e aço laminado à quente em uma siderúrgica integrada brasileira em 2012. Logo, pegando como base a produção de aço bruto, como é usual na indústria siderúrgica, os consumos específicos de coque, sinter e ferro-gusa nesta siderúrgica, naquele ano, foram 0,4523 t coque / t aço bruto, 1,2538 t sinter / t aço bruto e 1,0053 t ferro-gusa / t aço bruto, respectivamente.

**Tabela 7.8 Produção de aço bruto e de aço laminado e de seus principais insumos, em t, em uma siderúrgica integrada em 2012**

Produção de coque	1.495.097
Produção de sinter	4.144.663
Produção de ferro-gusa	3.323.320
Produção de aço bruto	3.305.624
Produção de aço laminado à quente	2.666.826

Os consumos específicos de combustíveis e de energia elétrica na coqueria, na sinterização, nos altos-fornos, na aciaria LD, no lingotamento contínuo e na laminação a quente desta siderúrgica estão indicados na Tabela 7.9.

**Tabela 7.9 Consumos energéticos específicos, de combustíveis e de energia elétrica, em GJ/t aço bruto, em algumas etapas do processo de fabricação de uma siderúrgica integrada no Brasil em 2012**

	Combustíveis	Energia Elétrica
Coqueria	3,29	0,11
Sinterização	2,66	0,53
Altos-fornos	11,23	0,11
Aciaria LD	0,10	0,42
Lingotamento contínuo	0,12	0,19
Laminação a quente	1,66	1,08

Considerando as perdas de energia na fábrica, os consumos energéticos em outros setores e, sobretudo, os consumos e a produção de energia no setor de utilidades, tem-se que os consumos específicos totais de combustíveis e de energia elétrica naquele ano foram de 23,98 GJ/t aço bruto e 3,71 GJ/t aço bruto, respectivamente.

As boas práticas e inovações tecnológicas consideradas nesta aplicação da planilha são: (i) a recuperação de calor dos gases de exaustão da sinterização para pré-aquecer a carga, através da qual se pode recuperar 0,55 GJ/t sinter, ou seja, 0,69 GJ/t aço bruto ( $0,55 \cdot 1,2538$ ); (ii) a instalação de turbinas de topo, de recuperação de pressão, substituindo a válvula septum, que converte energia cinética e de pressão do gás de topo dos altos-fornos em eletricidade; estas turbinas podem gerar entre 40 e 60 kWh/t ferro-gusa, ou seja, na faixa de 0,14 a 0,22 GJ/t aço bruto, tornando os altos-fornos exportadores líquidos de eletricidade na fábrica; e a instalação de queimadores recuperativos nos fornos de reaquecimento, que podem propiciar uma economia de combustíveis de 0,7 GJ/t aço laminado à quente, ou seja, 0,56 GJ/t aço bruto ( $0,7 \cdot 2.666.826 / 3.305.624$ ).

A adoção destas três medidas pode reduzir o consumo específico de combustíveis desta siderúrgica para 22,73 GJ/t aço bruto, ou seja, uma redução de 5,2%, e o consumo específico de energia elétrica para a faixa entre 3,49 e 3,57 GJ/t aço bruto (economia entre 3,8 e 5,9%).

Os impactos de cada uma destas medidas nos consumos energéticos específicos das etapas correspondentes do processo produtivo, assim como nos consumos energéticos específicos finais da siderúrgica foram calculados pela planilha e estão indicados na Figura 7.15.

TIPO DE PLANTA	Integrada						
Etiquetas de fila	SEC - Eletricidade atual	SEC - Térmica atual	Sec. Elet. Máx. Red. (GJ/t)	Sec. Elet. Mím.Red. (GJ/t)	Sec. Tér. Mím. Red. (GJ/t)	Sec. Tér Máx. Red. (GJ/t)	
<b>Alto forno</b>							
Turbina de topo de recuperação de pressão	0,11	11,23	-0,03	-0,11	0	0	
<b>Forno de reaquecimento</b>							
Queimadores recuperativos e regenerativos	1,08	1,66	0	0	0	1,1	
<b>Sinterização ou peletização</b>							
Recuperação de calor dos gases de exaustão	0,53	2,66	0	0	0	1,97	
<b>Total</b>							
Todas as medidas	3,71	23,98	3,57	3,49	23,98	20,91	

**Figura 7.15 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da siderúrgica integrada com a incorporação das boas práticas e inovações tecnológicas analisadas.**

### 7.5.3 Planta química

A instalação da indústria química que foi escolhida para exemplificar o uso da planilha setorial correspondente é uma central petroquímica de produtos básicos tais

como eteno, propeno, benzeno, tolueno, xilenos e butadieno, produzidos a partir de nafta, no Brasil. O seu consumo energético específico total em 2012 foi de 20,34 GJ/t de produtos comercializáveis e o seu consumo específico de eletricidade foi de apenas 0,72 GJ/t.

Não se dispõe de dados para se desagregar este consumo energético específico por etapa do processo produtivo.

Os principais equipamentos utilizados nesta central são fornos de pirólise, fornos dos produtos aromáticos, outros reatores químicos, caldeiras de recuperação térmica, caldeiras convencionais, torres de destilação, compressores, bombas, ventiladores e motores elétricos.

As boas práticas simuladas aqui estão indicadas na Tabela 7.10, junto com as correspondentes reduções de consumos energéticos específicos, estimadas em um diagnóstico energético realizado em 2012.

**Tabela 7.10 Boas práticas e as economias de energia que elas podem propiciar em uma central petroquímica de produtos básicos no Brasil**

<i>Boas práticas</i>	<i>Economia de energia (GJ/t)</i>
Fornos de pirólise da nafta: melhorias na combustão na zona de radiação, redução da formação de coque na zona de convecção e redução das infiltrações de ar; fornos dos produtos aromáticos: melhor controle da relação ar/combustível	0,37
Instalação de aquecedores a vapor no tambor de lama de uma caldeira em operação visando eliminar a necessidade de se ter uma caldeira de reserva aquecida, recuperação de vapor <i>flash</i> descarregado para a atmosfera, para pré-aquecimento da água de reposição de caldeiras, aumento na recuperação de calor das descargas de fundo das caldeiras, melhorias na manutenção dos purgadores, recuperação de partes do isolamento térmico de tubulações, eliminação de vazamentos de vapor em turbinas de acionamento de um compressor e um ventilador, eliminação de fugas de ar em aquecedor de ar regenerativo e reinstalação de sopradores de fuligem	0,26
Necessidade de aprimoramento do sistema de controle da coluna, sobretudo um controle do inventário na base da coluna, e de otimização das taxas de refluxo	0,05
A pressão do ar utilizado em instrumentos pode ser reduzida de 7 para 6 bar, a custo zero. Foram detectados vazamentos de ar comprimido. Instalação de variadores eletrônicos de velocidade em bombas de duas torres de destilação do sistema de produção de	0,02

---

 propeno.
 

---

No seu conjunto, a adoção de todas as boas práticas apontadas na Tabela 7.10 é capaz de reduzir o consumo energético específico desta central petroquímica de 20,34 GJ/t de produtos comercializáveis para 19,64 GJ/t de produtos comercializáveis, ou seja, uma economia de energia de 3,4% (vide Figura 7.16). A menos das medidas descritas na última linha da Tabela 7.10, que diminuem o consumo específico de energia elétrica, as demais reduzem o consumo específico de energia térmica.

TIPO DE PLANTA	Petroquímicos básicos				
Etiquetas de fila	SEC - Eletricidade atual (GJ/t)	SEC - Térmica atual(GJ/t)	SEC. Ele. reduzido (GJ/t)	SEC. Tér. reduzido (GJ/t)	
Ajuste no sistema de ar comprimido e melhorias nas bombas	0,72	19,62	0,7	0	
Melhorias do sistema de controle da coluna de destilação	0,72	19,62	0	19,57	
Melhorias no sistema de vapor	0,72	19,62	0	19,36	
Melhorias nos fornos de pirólise da nafta e dos produtos aromaticos	0,72	19,62	0	19,25	
Todas as medidas	0,72	19,62	0,7	18,94	

**Figura 7.16 Consumos energéticos específicos mínimos e máximos esperados da planta petroquímica de primeira geração com a incorporação das boas práticas e inovações tecnológicas analisadas.**

## 8. Conclusões e recomendações

### 8.1 Conclusões

A realização de diagnósticos energéticos ainda não é uma prática comum no Brasil, mesmo nos setores industriais energo-intensivos.

Há um grande número de boas práticas e inovações tecnológicas que podem ser avaliadas durante um diagnóstico energético em uma instalação industrial que, frequentemente, não são de conhecimento pleno por quem realiza o diagnóstico.

A avaliação destas boas práticas e inovações tecnológicas pode ser bastante facilitada com o emprego de planilhas eletrônicas e modelos computacionais.

Com base em visitas técnicas e uma ampla pesquisa bibliográfica, esta dissertação apresenta um levantamento detalhado de boas práticas e inovações tecnológicas em quatro segmentos industriais energo-intensivos da maior importância econômica e energética no Brasil: a indústria de papel e celulose, a indústria química, a indústria siderúrgica e a indústria de cimento. O levantamento compreende tanto algumas tecnologias de uso geral na indústria – motores elétricos e geradores de vapor, como tecnologias específicas dos processos de fabricação destes ramos industriais.

Duas outras contribuições deste trabalho são: (i) a seleção e exemplificação de alguns modelos computacionais, de livre acesso na Internet, que permitem avaliar quantitativamente potenciais economias de energia em sistemas envolvendo motores elétricos e geradores de vapor; e (ii) o desenvolvimento e exemplificação de planilhas eletrônicas que permitem avaliar o impacto, em termos de potenciais ganhos de eficiência energética, de boas práticas e inovações tecnológicas em cada um dos quatro segmentos industriais energo-intensivos analisados neste trabalho. Estas planilhas podem ser particularmente úteis em estudos de pré-diagnóstico energético, onde o objetivo é analisar, de uma forma simplificada, um grande número de alternativas, do ponto de vista de potenciais técnicos de conservação de energia, para posterior detalhamento das alternativas consideradas mais interessantes.

## 8.2 Recomendações

Estudos semelhantes a este poderiam beneficiar outros segmentos industriais energo-intensivos importantes no Brasil, tais como a fabricação de metais não ferrosos, com destaque para o alumínio, produção de ferro-ligas, mineração e pelletização, indústria cerâmica, etc.

Conforme salientado no capítulo 7, algumas boas práticas e inovações tecnológicas são mutuamente exclusivas, ou, então, suas economias potenciais de energia são correlacionadas entre si. Na atual versão das planilhas, desenvolvidas nesta dissertação, cabe ao usuário pré-selecionar medidas que não sejam mutuamente exclusivas, assim como pré-ajustar as potenciais economias de energia de medidas correlacionadas entre si. Em versões futuras das planilhas, isto pode ser automatizado através do uso de macros apropriadas.

Algumas inovações tecnológicas analisadas neste trabalho ainda se encontram na fase de pesquisa e desenvolvimento, sem estimativas confiáveis das potenciais economias de energia que elas poderão propiciar. Logo, elas não foram contempladas na atual versão das planilhas. Tão logo se conheça tais estimativas, elas podem ser inseridas nas planilhas.

Nas duas últimas décadas, preocupações ambientais, sobretudo com as emissões de gases que causam o efeito estufa, têm impulsionado a realização de diagnósticos energéticos e a adoção de programas de eficiência energética. Um desdobramento interessante deste trabalho seria a ampliação do escopo das planilhas para contemplar as reduções específicas das emissões destes gases propiciadas por cada uma das boas práticas e inovações tecnológicas analisadas.

## Referências

- Abipet, 9º censo da reciclagem de PET – Brasil: O ano 2012, Associação Brasileira da Indústria do PET (Abipet), 2013.
- Abiquim, Quantificação das emissões de gases nos processos produtivos com potencial de gerar o efeito estufa no setor químico, apresentação feita no I Simpósio de Inovação Tecnológica e Soluções para o Meio Ambiente, promovido pelo Sindicato dos Químicos do Estado de São Paulo, São Paulo, 1 de junho de 2011
- Andrade, C. T. C., Magalhães, F. R. P. e Pontes, R. S. T., Análise de resultados da regulamentação de índices de eficiência energética de motores de indução – Um estudo de caso. In: Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 3. Belém, PA, 2009. *Anais*. Associação Brasileira de Eficiência Energética
- Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate, The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook, December 2007.
- Bajay, S. V., Eficiência Energética, Nota técnica do Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico Brasileiro, Fase I – Panorama Setorial, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, Brasília, DF, fevereiro de 2009, 27 p.
- BAJAY, S. V., PEREIRA, J. T. V., ROSSI, L. A., GALLO, W. L. R., BERNI, M. D., SANT’ANA, P. H. M., ESPÍRITO SANTO, D. B., MELLO, G., SILVA, R. R. e MATHIAS, F. R. C., Relatório técnico da meta física 4, atividade 2 do Projeto Eficind: Caracterização setorial final dos segmentos selecionados dos setores industrial e de serviços em nível nacional, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP, 2015.
- BAJAY, S. V. and AMANO, S., *Energy efficiency in Brazil and in the State of São Paulo – Electricity*. In: *International Seminar on Biomass, Biogas and Energy Efficiency*. São Paulo, SP, Brazil, 2013. *Proceedings*. Government of the State of São Paulo, São Paulo, Brazil, p. 54-68.
- BAJAY, S. V., A indústria de papel e celulose: Seu consumo energético, por usos finais e tipos de plantas, evolução tecnológica e perspectivas de conservação de energia. In: Congresso Latino-Americano sobre Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 3. Campos de Jordão, SP, 1997. *Anais*, v. 2. UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, p. 699-704.
- BAJAY, S. V., BEISSMANN, A. e GORLA, F. D., *Indústria química*, Projeto: Análise e Desenvolvimento de Metodologia Visando a Implementação de Projetos de Eficiência Energética na Indústria, contrato CNI/Funcamp/Unicamp, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE, Universidade Estadual de Campinas, fevereiro de 2009, 151p.
- BAJAY, S. V., BERNI, M. D. e LIMA, C. R., Papel e celulose. In: Rosillo-Calle, F., Bajay, S. V. e Rothman, H. (Organizadores), *Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira*, Editora da Unicamp, Campinas, SP, 2005, p. 269-312.
- BAJAY, S. V., WALTER, A. C. S., FERREIRA, A. L., CARVALHO, E. B. e ATHAYDE, M. A. P., Desenvolvimento de Programas de Conservação de Energia Elétrica e Modulação de Carga nos Segmentos Industriais de Papel e Celulose e Fundação, na Região Administrativa de Campinas. Relatório da Atividade I: Caracterização técnica, econômica e ambiental dos segmentos industriais energo-intensivos objeto de análise, Contrato Eletrobrás (Procel) / Unicamp / Funcamp no 4065/95, NIPE/Unicamp, Campinas, SP, 1995.

- BAJAY, S. V., PEREIRA, J. T. V., ROSSI, L. A., GALLO, W. L. R., BERNI, M. D., SANT'ANA, P. H. M., ESPÍRITO SANTO, D. B., MELLO, G., SILVA, R. R. E MATHIAS, F. R. C., Relatório técnico da meta física 4, atividade 2 do Projeto Eficind: Caracterização setorial final dos segmentos selecionados dos setores industrial e de serviços em nível nacional, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP, 2015a
- BAKHTIARI, B., FRADETTE, L., LEGROS, R. and PARIS, J., *Opportunities for the integration of absorption heat pumps in the pulp and paper process*, *Energy*, 35: 4600-06, 2010.
- BARBELI, M. C. e BAJAY, S. V., Produção e consumo de energia na indústria de papel e celulose: P&D e o estado da arte das principais tecnologias disponíveis. In: Congresso Brasileiro de Energia, 9. Rio de Janeiro, 2002. Anais, v. 3. COPPE/UFRJ, Clube de Engenharia e SBPE, Rio de Janeiro, p. 1188-93.
- BASTOS, V. D., Desafios da petroquímica brasileira no cenário global, In: BNDES Setorial, nº 29, Rio de Janeiro, RJ, p. 321–358, março de 2009
- BERNI, M. D. e BAJAY, S. V., Eficiência energética e impactos ambientais nos processos de produção de papel. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 4. Itajubá, MG, 2004. *Anais*. SBPE e Unifei, Itajubá, MG, 6 p (anais distribuídos na forma de CD-ROM, sem numeração das páginas).
- BERNI, M. D., BAJAY, S. V. e GORLA, F. D., Oportunidades de eficiência energética para a indústria – Relatório setorial: Setor papel e celulose, Confederação Nacional da Indústria – CNI e Procel Indústria / Eletrobras, Brasília, DF, 2010, 88p.
- BERNI, M.D., BAJAY, S.V. AND ATHAYDE, M.A.P.; The potential of the black liquor and forestry residues for the generation of electricity and the corresponding environmental impacts in the Brazilian pulp and paper industry. In: World Renewable Energy Congress. Denver, CO, USA, 1996. *Proceedings*, v. 3. Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, p. 1970-3
- Bracelpa, Dados - Setor de Celulose e Papel, Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa), São Paulo, SP, 2014a, 29 p.
- Bracelpa, Conjuntura Bracelpa 64, Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa), São Paulo, SP, 2014b, 5 p.
- Bracelpa, Dados do Setor, junho de 2012a, Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/estatisticas>>. Acesso em 15/07/2012.
- Bracelpa, Estatísticas Bracelpa: Relatório Anual 2010/2011, Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa), São Paulo, SP, 2012b. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/estatisticas>>. Acesso em 15/07/2012.
- Braskem, Processo de produção, relatório técnico, 2006.
- BROWN, H. L., HAMEL, B. B. and HEDMAN, B. A., *Energy Analysis of 108 Industrial Processes*, Fairmont Press Editions, USA, 1985.
- CAMPOS, D. V., Cogeração em uma fábrica de cimento, trabalho de conclusão de curso (TCC), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- CEC (1983) *Energy Audit No 3: Pulp, Paper and Board Industry in the European Economic Community*, Commission of the European Communities, Bruxelas.
- CGEE, Modernização da produção de carvão vegetal: subsídios 2014 ao Plano Siderurgia do MDIC, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), Brasília, 2014.

- CIRAS (coord.), *Energy-related best practices: A sourcebook for the chemical industry*, Center for Industrial Research and Services (CIRAS), Iowa State University Extension, Ames, IA, USA, November, 2005.
- CIBO, *Energy Efficiency Handbook*, Council of Industry Boiler Owners (CIBO), USA, 1997.
- CLAYTON, D.W., Impact of selected technologies on the Canadian pulp and paper industry in 2010. In: *Energy Efficiency Improvement Utilizing High Technology - An Assessment of Energy Use in Industry and Buildings*, World Energy Council, London, UK, 1995, p. 8.1 - 8.16.
- CNI, *Novas tecnologias para processos industriais: Eficiência energética na indústria, relatório técnico, convênio entre a Confederação Nacional da Indústria (CNI) e a Eletrobrás/Procel*, 2010.
- CONAE, *Eficiencia em calderas y combustion*, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), Secretaria de Energía (SENER), México, 2002.
- da SILVA, R. R., *Modelos para Análises de Sistemas Energéticos Industriais Aplicados a Estudos de Eficiência Energética*, dissertação de mestrado em planejamento de sistemas energéticos, FEM/Unicamp, fevereiro de 2013.
- de PAULA, G. M., *Produção independente de ferro-gusa (“guzeiros”)*, Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono, Ribeirão Preto, 2014.
- de PAULA, G. M., *Siderurgia*, Núcleo de Estudos de Economias de Baixo Carbono, Ribeirão Preto, 2012.
- DECHEMA/IEA/ICCA, *Energy and GHG reductions in the chemical industry via catalytic processes: Annexes*, 2013.
- DoE, *Energy Technology Solutions: Public-Private Partnerships Transforming Industry*, U.S. Department of Energy, December 2010.
- DORILEO, I. L., *Eficiência Energética e Prospecção Tecnológica na Indústria Brasileira*, Editorial EduFMT, Cuiabá, MT, 2013.
- DORILEO, I. L., BAJAY, S. V. e GORLA, F. D., *Oportunidades de eficiência energética para a indústria – Relatório setorial: Setor cimenteiro*, Confederação Nacional da Indústria – CNI e Procel Indústria / Eletrobras, Brasília, DF, 2010, 66p.
- DTTM/SGMTM/MME, *Anuário Estatístico do Setor Transformação de Não Metálicos*, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral (DTTM), Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (SGMTM), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2013.
- ELEKTROBRAS. *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), Eficiencia Energética no Uso de Vapor*, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <[http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf](http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf)>. Acesso em: 10/08/2014.
- ELEKTRO, *Manuais Elektro de Eficiência Energética Segmento Industrial, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL/ELETROBRÁS*, Disponível em: <[https://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO\\_DE\\_VAPOR\\_E\\_CALOR.pdf](https://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO_DE_VAPOR_E_CALOR.pdf)> Acesso em: 10/02/2015.
- EPA, *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from Industrial, Commercial, and Institutional Boilers*, United States Environmental Protection Agency (EPA), 2010.

- EPA, Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel industry, Office of Air and Radiation, United States Environmental Protection Agency (EPA), September 2012.
- EPE/MME, Balanço Energético Nacional 2014, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2014.
- EPE/MME, *Balanço Energético Nacional 2012*, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2012.
- EPE/MME, Caracterização do uso da energia no setor siderúrgico, Nota Técnica DEA 02/09, Série Estudos Setoriais, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, abril de 2009.
- EPE/MME, *Balanço Energético Nacional 2014*, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2014.
- EPE/MME, Plano Nacional de Eficiência Energética, Premissas e Diretrizes Básicas na Elaboração do Plano, Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2007.
- ETSAP/IEA, *Cement Production*, Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP), International Energy Agency (IEA), Paris, 2010. Disponível em: <[http://www.iea-etsap.org/web/E-techDS/PDF/I03\\_cement\\_June%202010\\_GS-gct.pdf](http://www.iea-etsap.org/web/E-techDS/PDF/I03_cement_June%202010_GS-gct.pdf)>
- EWING, A. J., *Energy Efficiency in the Pulp and Paper Industry with Emphasis on Developing Countries*, World Bank Technical Paper No. 34, Washington, D.C., 1985.
- FOELKEL, C., Um guia referencial sobre ecoeficiência energética para a indústria de papel e celulose kraft de eucalipto no Brasil, Eucalyptus Online Book & Newsletter, maio de 2010.
- FONSECA, M. G., Estudo da competitividade de cadeias integradas no Brasil: impactos das zonas de livre comércio, cadeia de papel e celulose, Unicamp, Campinas, SP, 2003. Disponível em: <<http://www.revistaopapel.org.br/publicacoes.php?id=1465>>, acessado em: dezembro de 2014.
- FRANCIS, D. W., TOWERS, M. T. and BROWNE, T. C., *Energy cost reduction in the pulp and paper industry – An energy benchmarking perspective, report produced by the Pulp and Paper Research Institute of Canada (Paprican) for the Canadian Industry Program for Energy Conservation (CIPEC)*, Natural Resources Canada, 2002.
- FURUMOTO, H., Advanced control strategies for digester analytical model - fuzzy control - neural networks. In: *Proceedings of the 28th Pulp and Paper Annual Meeting*, ABTCP, São Paulo, SP, 1995, p. 241-5.
- IEC, IEC 60034-30: Standard on efficiency classes for low voltage AC motors, International Electrotechnical Commission (IEC), 2008
- IEC, IEC 60034-31: Rotating electrical machines - Part 31: Guide for the selection and application of energy-efficient motors including variable-speed applications, International Electrotechnical Commission (IEC), 2009
- HASANBEIGI, A., MORROW, W., MASANET, E., SATHAYE, J. and XU, T., Energy efficiency improvement and CO<sub>2</sub> emission reduction opportunities in the cement industry in China, *Energy Policy*, 57: 287-97, 2013.
- HEIZIR F. D. C. 2009, Processos Químicos Industriais II, Papel e Celulose, Escola de Engenharia Lorena, Universidade de São Paulo, SP, 2009.
- Ibá, Anuário 2014, Indústria Brasileira de Árvores (Ibá), 2015, 97 Disponível em: <[www.iba.org](http://www.iba.org)> , acessado em janeiro de 2015.

- IEA, *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions*, International Energy Agency (IEA), Paris, 2007.
- IEA, *Energy Technology Perspectives 2006 – Scenarios and Strategies to 2050*, International Energy Agency (IEA), Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, 2006
- IEA, Chemical and petrochemical sector: Potential of best practice technology and other measures for improving energy efficiency, IEA Information Paper, International Energy Agency (IEA), Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, 2009.
- IEA, *Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency*, International Energy Agency (IEA), Organization for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, 2008
- IEA, *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions*, International Energy Agency (IEA), Paris, 2007
- IEA's Iron and Steel break out group, Energy technology perspectives 2014, presentation at the IEA Global Industry Dialogue and Expert Review Workshop, Paris, October 7, 2013
- IPT, Desenvolvimento e Implantação do Sistema Integrado de Planejamento Energético. Estudos Setoriais: Volume II - Papel e Celulose, relatório técnico elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas para a Eletrobrás, Rio de Janeiro, 90p., 1990.
- IPT, *Manual de Recomendações: Conservação de Energia na Indústria de Celulose e Papel, Vols. I e II*, Publicação IPT nº 1628, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo, SP, 1985
- KRAMER, J. K., MASANET, E., WORRELL, E., *Energy Efficiency Opportunities In the U.S. Pulp and Paper Industry*, v. 107, p. 21-50, 2009.
- LAURIJSSSEN, J., De Gram, F. J., WORRELL, E. and FAAIJ, A., Optimizing the energy efficiency of conventional multi-cylinder dryers in the paper industry, *Energy*, 35: 3738-50, 2010.
- LEITE, L. F., *Olefinas leves: tecnologia, mercado e aspectos econômicos*, Interciência, Rio de Janeiro, 2013.
- MADLOOL, N. A., SAIDUR, R., HOSSAIN, M. S. and RAHIM, N. A., A critical review on energy use and savings in the cement industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2042-2060, 2011.
- MANNINEN, J., PORANEN, J., *Energy is always a major cost factor, presentation at the International Symposium on Energy Efficiency in Pulp and Paper Industry*, September 20, 2011.
- MARÍNGOLO, V., Produto de Tecnologia Integrada para Sustentabilidade e Competitividade da Indústria de Cimento, Pós-Graduação em Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, SP, 2001.
- MARTIN, I., Application note – *Options to decarbonize industrial energy use*, ECI Publication no. Cu0203, European Copper Institute, January 2015.
- MARTIN, N., WORRELL, E, RUTH, M., PRICE, L., ELLIOTT, N., SHIPLEY, A. M. AND THORNE, J., Emerging energy-efficient industrial technologies, LBNL Report Number 46990, Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 2000
- MATEOS-ESPEJEL, E., SAVULESCO, L., MARÉCHAL, F. and PARIS, J., *Systems interactions analysis for the energy efficiency improvement of a Kraft process*, *Energy*, 35: 5132-42, 2010.

- MATHIAS, F. R. C., Diagnóstico energético e gestão da energia em uma planta petroquímica de primeira geração, dissertação de mestrado em planejamento de sistemas energéticos, FEM/Unicamp, março de 2014.
- MATHIAS, F. R. C., MEJIA, C. S. e BAJAY, S. V., Inovações tecnológicas para se obter ganhos de produtividade e de eficiência energética nas centrais petroquímicas de 1ª geração instaladas no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 9. Florianópolis, SC. 2014. Anais. SBPE, Itajubá, MG, 12 p. (anais distribuídos na forma de CD-ROM, sem numeração das páginas).
- MME, Avaliação da Eficiência Energética, Ministério de Minas e Energia (MME), Rio de Janeiro, DF, 2012.
- NAPP, T. A., GAMBHIR, A., HILLS, T. P., FLORIN, N. and FENNELL, P. S., A review of the technologies, economics and policy instruments fo decarbonizing energy-intensive manufacturing industries, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30: 615 – 640, 2014.
- NEELIS, M., WORRELL, E. and MASANET, E., Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the petrochemical industry, an ENERGY STAR® guide for energy and plant managers, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, CA, USA, 2008. Disponível em: <[https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Petrochemical\\_Industry.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/Petrochemical_Industry.pdf)>. Acesso em: 26/07/13.
- PAULA, L. G., Análise termo econômica do processo de produção de cimento Portland com co-processamento de misturas de resíduos, dissertação de mestrado em engenharia mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2009.
- PENNA, E. M., Estudo do aumento da produção de propeno em uma unidade de FCC, dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, agosto de 2012.
- PERRONE, O. V., Disponibilidade de matérias-primas para a indústria petroquímica no Brasil, XXIV Fórum Nacional Rumo ao Brasil Desenvolvido (Em Duas Décadas): Estratégia de Desenvolvimento para Transformar Crise em Oportunidade, através de Três Propostas Básicas (Economia do Conhecimento, Mobilização pela Competitividade Nacional e Uso Universal do Mercado de Capitais), aproveitando Grandes Oportunidades, Rio de Janeiro, 14 a 17 de maio de 2012
- PETRO, J., Beyond IE4: *Future efficiency improvements in electric motor systems, paper presented at the Energy Efficiency in Motor Driven Systems 13 (eemods'13) Conference*, Rio de Janeiro, 2013.
- Polysius, POLYCOM® high pressure grinding roll, Polysius, a company of ThyssenKrupp Technologies, 2014.
- REITZER, R., Technology Roadmap: Applications of Nanotechnology in the Paper Industry, Nanoscience Center (NSC), University of Jyväskylä, Finland, February 2007.
- Ren, T., Patel, M. and Blok, K., Olefins from conventional and heavy feedstocks: Energy used in steam cracking and alternative processes, *Energy* 31: 425-451, 2006
- ROMANO, G., Soluções Voith para o aumento da competitividade na produção de papel e celulose: Otimizações na seção de secagem, apresentação realizada em um workshop promovido pela Voith e ABTCP em 2008.

- SALUM, A. D., Eficiência Energética em sistemas de Combustão de Caldeira, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BH, 2011.
- SANTANA. P. H. D. M., BAJAY. S. V., Novas Abordagens para Programas de Eficiência Energética na Indústria Brasileira, Revista Brasileira de Energia, v. 19, n. 1, p. 77-89. 2013.
- SANTI, A. M. M., Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer: investigação no maior polo produtor de cimento do País, Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais e propostas para a segurança química, tese de doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2003.
- SILVA, A. A., Potencial de conservação de energia na indústria cimenteira no Brasil, dissertação de mestrado em energia, Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, 2012.
- SILVA, H. V. O., SOUSA, D. S., LIMA, J. P. P. N., CAVALCANTI, P. M. P.S. e VON KRÜGER, P., Estudo 56: Siderurgia, relatório do projeto “Perspectivas dos Investimentos Sociais no Brasil”, Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- SNIC, Relatório Anual 2012-2013, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- TANAKA, K, Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector, Energy Policy, v. 39, p. 6532– 6550, 2011.
- The Swedish Energy Agency, Swedish pulp mill biorefineries – A vision of future possibilities, report ER 2008:26, Stockholm, Sweden, 2008.
- TOLMASQUIM, M. T. e SZKLO, A. S. (coordenadores), *A Matriz Energética Brasileira na Virada do Milênio*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2000.
- TOLMASQUIM, M. T., SZKLO, A. S. e Soares, J. B., *Mercado de Gás Natural na Indústria Química e no Setor Hospitalar no Brasil*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- TOWERS, M., BROWNE, T., KEREKES, R., PARIS, J. AND TRAN, H., Biorefinery opportunities for the Canadian pulp and paper industry, *Pulp & Paper Canada*, 108 (6): 26-9, 2007.
- WORLD ENERGY COUNCIL, *Energy Efficiency Improvement Utilising High Technology - An Assessment of Energy Use in Industry and Buildings*, London, UK, 1995.
- WORRELL, E. and NEELIS. M., World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors. LBNL-62806, Rev.1., Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, 2007.
- WORRELL, E., PRICE, L., NEELIS, M., GALITSKY, C. and NAN, Z., World best practice energy intensity values for selected industrial sectors, LBNL-62806, Rev.2, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA, February 2008.
- WORRELL, E, and GALITSKY, C., Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for cement making, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, March 2008.

## Anexo

### Planilha segmento papel e celulose

<b>TIPO DEPLANTA</b>	<b>PROCESSO</b>	<b>ETAPA</b>	<b>SEC - Eletricidade (GJ/t)</b>	<b>SEC - Térmica (GJ/t)</b>	<b>MEDIDAS TECNOLOGIASE BOAS PRÁTICAS</b>	<b>Elet. Min</b>	<b>Elet. Max</b>	<b>Tér Min.</b>	<b>Tér Max.</b>	<b>SEC. Ele. Máx. Red</b>	<b>SEC. Ele. Mín. Red</b>	<b>SEC. Tér. Máx. Red</b>	<b>SEC. Tér. Mín. Red</b>
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Pátio da madeira/Picadores	0,065	0	descascadores de tambor (cradle debarkers)	0	0,33	0	0	0,065	0,04355	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Pátio da madeira/Picadores	0,065	0	Automatização de manuseio de cavacos e triagem de espessura	0,05	0,1	0,1	0,1	0,06175	0,0585	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Pátio da madeira/Picadores	0,065	0	preaquecimento das toras	0	0	0	0	0,065	0,065	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Digestor	0,117	2,194	Utilizacão do licor verde no despulpamento	0	0,25	0	0	0,117	0,08775	2,194	2,194
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Digestor	0,117	2,194	Sistema de controle digestores contínuos	0	0	0	0,01	0,117	0,117	2,194	2,17206
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Digestor	0,117	2,194	controle baseado em lógica fuzzy e redes neurais	0	0	0	0,14	0,117	0,117	2,194	1,88684
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Digestor	0,117	2,194	recuperação de calor no digestores	0	0	0	0	0,117	0,117	2,194	2,194
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Separação/Limpeza	0	0,837	ND	0	0	0	0	0	0	0,837	0,837
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Lavagem	0,085	0	Lavagem com ciclo de vapor para pasta crua	0	0,21	0	0,4	0,085	0,06715	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Evaporadores	0	3,325	ND	0	0	0	0	0	0	3,325	3,325
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Preparação de químicos	0	1,507	ND	0	0	0	0	0	0	1,507	1,507
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Caustificação	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Forno de cal	0,197	0	Forno de cal enriquecido com oxigênio	0	0	0,07	0,12	0,197	0,197	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Forno de cal	0,197	0	Refratário tijolo de isolamento	0	0	0	0,05	0,197	0,197	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Forno de cal	0,197	0	sistema compacto da Tampella	0	0	0	0,3	0,197	0,197	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Forno de cal	0,197	0	Precipitadores eletrostáticos	0	0	0	0,01	0,197	0,197	0	0

<b>MERCADO</b>					para fornos de cal								
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Braqueamento	0,893	2,871	TCF	0,1	0,2	0,01	0,5	0,8037	0,7144	2,84229	1,4355
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Evaporadores	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Celulose desaguadoras (50%)	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Secagem celulose (10%)	0,665	2,349	ND	0	0	0	0	0,665	0,665	2,349	2,349
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Celulose	Outros	0,255	0	ND	0	0	0	0	0,255	0,255	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Recuperação de calor	0	0	0,2	0,4	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Quema combustíveis restos de madeira e cavacos	0	0	0	0,8	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Recuperação de condensados	0	0	0,01	0,1	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Manutenção nos purgadores (trampas)	0	0	0	0,1	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	processo de controle	0	0	0	0,028	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	redução da quantidade de gás	0	0	0,02	0,05	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Melhoras no isolamento	0	0	0,06	0,07	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	perdas de carga	0	0	0,26	0,33	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Manutenção	0	0	0	0,065	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	monitoramento de steam trap	0	0	0	0,05	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Meio ambiente	Tratamento água bruta e efluentes	0,378	0	fechamento do sistema de água	0	0,5	0,02	0,03	0,378	0,189	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Meio ambiente	Tratamento água bruta e efluentes	0,378	0	tecnologia de membranas	0	0	0	0	0,378	0,378	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Rede Elétrica Inteligente ( <i>smart grid</i> )	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	<i>Light Emission Diode (LED's)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Sistema de Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motor elétrico de alto rendimento	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Acionadores de velocidade ajustável (AVA's): Conversores de frequência	0,15	0,5	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Equipamentos de aquecimento, Ventilação e ar condicionado	0	0,75	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Cogeração	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	seleção de uma bomba mais eficiente	0	0,03	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Seleção de uma bomba corretamente dimensionada	0	0,04	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhores práticas de instalação e manutenção	0	0,03	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhor sistema de controle	0	0,2	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhoria no isolamento	0	0	0,01	0,03	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motores eficientes - premium	0	0,35	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Optimização de sistemas de ar comprimido	0	0	0	0,12	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhoramento no sistema de iluminação	0,12	0,25	0	0	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Processo de integração análises PINCH	0,1	0,35	0	0,15	0	0	0	0
<b>CELULOSE DE MERCADO</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motor - <i>Magnetically coupled adjustable speed drives</i>	0	0,5	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	<b>PROCESSO</b>	<b>ETAPA</b>	<b>SEC - Eletricidade (GJ/t)</b>	<b>SEC - Térmica (GJ/t)</b>	<b>TECNOLOGIA</b>	<b>Elet. Min</b>	<b>Elet. Max</b>	<b>Térmica Min.</b>	<b>Térmica Max.</b>	<b>Eco. Elet Min</b>	<b>Eco. Elet Max</b>	<b>Eco. Ter Min</b>	<b>Eco. Ter Max</b>
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Pátio da madeira/Picadores	0,115	0	descascadores de tambor (cradle debarkers)	0	0,33	0	0	0,115	0,07705	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Pátio da madeira/Picadores	0,115	0	Automatização de manuseio de cavacos e triagem de espessura	0,05	0,1	0	0	0,10925	0,1035	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Digestor	0,193	2,162	Utilização do licor verde no despulpamento	0	0,25	0	0	0,193	0,14475	2,162	2,162
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Digestor	0,193	2,162	Rotores eficientes de polpamento desfibramento	0,1	0,3	0	0	0,1737	0,1351	2,162	2,162
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Digestor	0,193	2,162	Pré-tratamento biológico para a polpação mecânica	0,1	0,4	0	0	0,1737	0,1158	2,162	2,162

<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Digestor	0,193	2,162	controle baseado em lógica fuzzy e redes neurais	0	0	0	0,14	0,193	0,193	2,162	1,85932
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Lavagem	0,086	0,147	Lavagem com ciclo de vapor para pasta crua	0	0,21	0	0,4	0,086	0,06794	0,147	0,0882
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Evaporadores	0	8,997	elevacao da concentracao do licor negro	0	0	0	0	0	0	8,997	8,997
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Preparação de químicos	0,029	0,627	gaseificação do licor negro	0	0	0	0,3	0,029	0,029	0,627	0,4389
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Preparação de químicos	0,029	0,627	sistemas de recuperação direta dos produtos alcalinos	0	0	0	0,3	0,029	0,029	0,627	0,4389
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Forno de cal	0	2,65	Forno de cal enriquecido com oxigênio	0	0	0,07	0,12	0	0	2,4645	2,332
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Forno de cal	0	2,65	Refratário tijolo de isolamento	0	0	0	0,05	0	0	2,65	2,5175
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Forno de cal	0	0	sistema compacto da Tampella	0	0	0	0,3	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Braqueamento	0,56	1,57	TCF	0,1	0,2	0,005	0,01	0,504	0,448	1,56215	1,5543
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Celulose desaguadoras (50%)	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Celulose	Secagem celulose (10%)	0,42	0,335	cilindros ociosos aquecidos por vapor,	0	0	0	0,32	0,42	0,42	0,335	0,2278
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Preparação de massa	0,245	0,646	refinadores de baixa consistência	0	0,4	0	0	0,245	0,147	0,646	0,646
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Preparação de massa	0,245	0,646	O aumento da consistência inicial da mistura fibra/água	0	0,08	0	0	0,245	0,2254	0,646	0,646
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Desagregador refugos e refilos	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Separação/Depuração	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Polpação	0,265	0	Rotores eficientes de polpamento desfibramento	0,1	0,3	0	0	0,2385	0,1855	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Polpação	0,265	0	Pré-tratamento biológico	0	0	0	0,1	0,265	0,265	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Polpação	0,265	0	Polpação continua	0	0	0	0	0,265	0,265	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Polpação	0,265	0	Fracionamento de fibra reciclada	0	0	0	0	0,265	0,265	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Polpação	0,265	0	Termo-Polpação	0,2	0	0	0	0,212	0,265	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Polpação	0,265	0	Pré-tratamento químico com ácido oxálico para polpação mecânica	0,01	0,25	0	0	0,26235	0,19875	0	0

<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Polpação	0,265	0	Polpação RTS - (Lower retention time-R, higher temperature-T, higher refiner speed-S)	0,1	0,15	0	0	0,2385	0,22525	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Refinação	0,395	0	ND	0	0	0	0	0,395	0,395	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Refinação	0,395	0	ND	0	0	0	0	0,395	0,395	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Refinação	0,395	0	ND	0	0	0	0	0,395	0,395	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	secagem por impulso	0	0	0,18	0,3	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	recuperacao de vapor	0	0	0	0,5	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	fechamento da capota	0	0	0	0,1	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	Requisitos de ar reduzido	0	0	0	0	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	secagem em cinta condensadora (condebelt)	0	0	0,1	0,2	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	utilizacao prensa sapata	0	0	0,02	0,15	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	aditivos minerais	0	0	0	0,25	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Máquina de papel	1,283	0	ND	0	0	0	0	1,283	1,283	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Secagem	0	5,843	Ar de contato na secagem	0	0,05	0,1	0,4	0	0	5,2587	3,5058
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Secagem	0	5,843	prensas de deslocamento	0	0	0	0,3	0	0	5,843	4,0901
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Secagem	0	5,843	secagem a gás	0	0	0,1	0,2	0	0	5,2587	4,6744
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Secagem	0	5,843	secagem microondas	0	0	0,12	0,2	0	0	5,14184	4,6744
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Secagem	0	5,843	Caixa de vapor	0	0	0	0	0	0	5,843	5,843
<b>INTEGRADA</b>	Fabricação de papel	Secagem	0	5,843	Sensor laser de ultra-sônico de rigidez web	0,01	0,03	0	0	0	0	5,843	5,843
<b>INTEGRADA</b>	Acabamento	Recobrimento com amido/Coating	0,987	0	ND	0	0	0	0	0,987	0,987	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Acabamento	Supercalandragem	0,395	0	ND	0	0	0	0	0,395	0,395	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou	0	0	Recuperação de calor	0	0	0,2	0,4	0	0	0	0

		recuperação											
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	elevacao da concentracao do licor negro	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Recuperação de condensados	0	0	0,01	0,1	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Manutenção nos purgadores (trampas)	0	0	0	0,1	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	processo de controle	0	0	0	0,028	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	redução da quantidade de gás	0	0	0,02	0,05	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Melhoras no insolamento	0	0	0,06	0,07	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	Manutenção	0	0	0	0,065	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Utilidades	caldeira biomassa ou recuperação	0	0	monitoramento de steam trap	0	0	0	0,05	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Meio ambiente	Tratamento água bruta e efluentes	2,301	0	fechamento do sistema de água	0	0,005	0,02	0,03	2,301	2,289495	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Meio ambiente	Tratamento água bruta e efluentes	2,301	0	tecnologia de membranas	0	0	0	0	2,301	2,301	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Rede Elétrica Inteligente ( <i>smart grid</i> )	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	<i>Light Emission Diode (LED's)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Sistema de Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motor elétrico de alto rendimento	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Acionadores de velocidade ajustável (AVA's): Conversores de frequência	0,15	0,5	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Equipamentos de aquecimento, Ventilação e ar condicionado	0	0,75	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Cogeração	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	seleção de uma bomba mais eficiente	0	0,03	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Seleção de uma bomba corretamente dimensionada	0	0,04	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhores práticas de instalação e manutenção	0	0,03	0	0	0	0	0	0

<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhor sistema de controle	0	0,2	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhoria no insolamento	0	0	0,01	0,03	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motores eficientes - premium	0	0,35	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Optimização de sistemas de ar comprimido	0	0	0	0,12	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhoramento no sistema de iluminação	0,12	0,25	0	0	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Processo de integração análises PINCH	0,1	0,35	0	0,15	0	0	0	0
<b>INTEGRADA</b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motor - <i>Magnetically coupled adjustable speed drives</i>	0	0,5	0	0	0	0	0	0
<b>PAPEL</b>	<b>PROCESSO</b>	<b>ETAPA</b>	<b>SEC - Eletricidade (GJ/t)</b>	<b>SEC - Térmica (GJ/t)</b>	<b>TECNOLOGIA</b>	<b>Elet. Min</b>	<b>Elet. Max</b>	<b>Térmica Min.</b>	<b>Térmica Max.</b>	<b>Eco. Elet Min</b>	<b>Eco. Elet Max</b>	<b>Eco. Ter Min</b>	<b>Eco. Ter Max</b>
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Destintamento	0	0	Recuperação de calor a partir dos efluentes de destintagem	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Pulper	0,295	0	Fracionamento de fibra reciclada	0	0	0	0	0,295	0,295	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Pulper	0,295	0	Termo-Polpação	0	0,2	0	0	0,295	0,236	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Pulper	0,295	0	Pré-tratamento químico com ácido oxálico para polpação mecânica	0,01	0,25	0	0	0,29205	0,22125	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Pulper	0,295	0	Polpação RTS - (Lower retention time-R, higher temperature-T, higher refiner speed-S)	0,1	0,15	0	0	0,2655	0,25075	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Pulper	0,295	0	Rotores eficientes de polpamento desfibramento	0,1	0,3	0	0	0,2655	0,2065	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Pulper	0,295	0	Pré-tratamento biológico para a polpação mecânica	0,1	0,4	0	0	0,2655	0,177	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Pulper	0,295	0	Polpação contínua	0	0	0	0	0,295	0,295	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Refinação	0,204	0	ND	0	0	0	0	0,204	0,204	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Desagregador refugos e refilos	0,023	0	ND	0	0	0	0	0,023	0,023	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Baterias de Cleaners	0,088	0	ND	0	0	0	0	0,088	0,088	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Separação/Depuração	0,092	0	ND	0	0	0	0	0,092	0,092	0	0
<b>PAPEL</b>	Reciclagem	Deflaking	0,075	0	ND	0	0	0	0	0,075	0,075	0	0

<u>PAPEL</u>	Fabricação de papel	Aciona/o úmida	0,106	0	ND	0	0	0	0	0,106	0,106	0	0
<u>PAPEL</u>	Fabricação de papel	Aciona/o secagem	0,13	0	ND	0	0	0	0	0,13	0,13	0	0
<u>PAPEL</u>	Fabricação de papel	Bombeamento	0,163	0	ND	0	0	0	0	0,163	0,163	0	0
<u>PAPEL</u>	Fabricação de papel	Bombas de vácuo	0,196	0	ND	0	0	0	0	0,196	0,196	0	0
<u>PAPEL</u>	Fabricação de papel	Bombas de aditivos	0,196	0	ND	0	0	0	0	0,196	0,196	0	0
<u>PAPEL</u>	Fabricação de papel	Secaria - cilindros	0,196	6,3	ND	0	0	0	0	0,196	0,196	0	0
<u>PAPEL</u>	Acabamento	Calandra	0,196	0	ND	0	0	0	0	0,196	0,196	0	0
<u>PAPEL</u>	Meio ambiente	Tratamento água bruta e efluentes	0,39	0	fechamento do sistema de água	0	0,005	0,02	0,03	0,39	0,38805	0	0
<u>PAPEL</u>	Meio ambiente	Tratamento água bruta e efluentes	0,39	0	tecnologia de membranas	0	0	0	0	0,39	0,39	0	0
<u>PAPEL</u>	Utilidades	caldeira	0,1	0	Recuperação de condensados	0	0	0,01	0,1	0,1	0,1	0	0
<u>PAPEL</u>	Utilidades	caldeira	0,1	0	Manutenção nos purgadores (trampas)	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0
<u>PAPEL</u>	Utilidades	caldeira	0,1	0	processo de controle	0	0	0	0,028	0,1	0,1	0	0
<u>PAPEL</u>	Utilidades	caldeira	0,1	0	redução da quantidade de gás	0	0	0,02	0,05	0,1	0,1	0	0
<u>PAPEL</u>	Utilidades	caldeira	0,1	0	Melhoras no isolamento	0	0	0,06	0,07	0,1	0,1	0	0
<u>PAPEL</u>	Utilidades	caldeira	0,1	0	Manutenção	0	0	0	0,065	0,1	0,1	0	0
<u>PAPEL</u>	Utilidades	caldeira	0,1	0	monitoramento de steam trap	0	0	0	0,05	0,1	0,1	0	0
<u>PAPEL</u>	Planta	Uso Geral	0	0	Rede Elétrica Inteligente ( <i>smart grid</i> )	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>PAPEL</u>	Planta	Uso Geral	0	0	<i>Light Emission Diode (LED's)</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>PAPEL</u>	Planta	Uso Geral	0	0	Sistema de Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>PAPEL</u>	Planta	Uso Geral	0	0	Motor elétrico de alto rendimento	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>PAPEL</u>	Planta	Uso Geral	0	0	Acionadores de velocidade ajustável (AVA's): Conversores de frequência	0,15	0,5	0	0	0	0	0	0
<u>PAPEL</u>	Planta	Uso Geral	0	0	Equipamentos de aquecimento, Ventilação e ar condicionado	0	0,75	0	0	0	0	0	0

<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Cogeração	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	seleção de uma bomba mais eficiente	0	0,03	0	0	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Seleção de uma bomba corretamente dimensionada	0	0,04	0	0	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhores práticas de instalação e manutenção	0	0,03	0	0	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhor sistema de controle	0	0,2	0	0	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhoria no isolamento	0	0	0,01	0,03	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motores eficientes - premium	0	0,35	0	0	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Optimização de sistemas de ar comprimido	0	0	0	0,12	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Melhoramento no sistema de iluminação	0,12	0,25	0	0	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Processo de integração análises PINCH	0,1	0,35	0	0,15	0	0	0	0
<b><u>PAPEL</u></b>	Planta	Uso Geral	0	0	Motor - <i>Magnetically coupled adjustable speed drives</i>	0	0,5	0	0	0	0	0	0

### Planilha segment cimento

<b><u>TIPO DEPLANTA</u></b>	<b>ETAPA</b>	<b>SEC - Eletricidade (GJ/t)</b>	<b>SEC - Térmica (GJ/t)</b>	<b>MEDIDAS TECNOLOGIASE BOAS PRÁTICAS</b>	<b>Elet. Min</b>	<b>Elet. Max</b>	<b>Tér Min.</b>	<b>Tér Max.</b>	<b>SEC. Ele. Máx. Red</b>	<b>SEC. Ele. Mín. Red</b>	<b>SEC. Tér. Máx. Red</b>	<b>SEC. Tér. Mín. Red</b>
via seca	Materia prima	0,0054	0	Sistema de transporte eficientes - Pipe conveying	0	0	2%	3,5%	0,0054	0,0054	0	0
via seca	Moagem	0,06	0	Ventilador de alto rendimento, com controle tiristorizado, no moinho das matérias-primas	0	0,001296	0	0	0	0,00007776	0	0
via seca	Moagem	0,06	0	Sistemas avançados de controle de moinhos de rolos	0,00288	0,00612	0	0	0,0001728	0,0003672	0	0
via seca	Moagem	0,06	0	Moinhos verticais de rolos	30%	50%	0	0	0,042	0,03	0	0
via seca	Moagem	0,06	0	Classificadores	0	8%	0	0	0	0,0552	0	0

via seca	Moagem	0,06	0	Silos fluidizado de ar	0,0036	0,01548	0	0	0,000216	0,0009288	0	0
via seca	Moagem	0,06	0	Classificadores de alta eficiência	0,011448	0,02268	0,02	0,057	0,048552	0,03732	0	0
via seca	Moagem	0,06	0	Moinhos de bolas	5%	10%	0	0	0,057	0,054	0	0
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Queima e residuos	0	0	0	0,6	0	0	0	4
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Fornos rotativos	0	0	21%	27%	0	0	3,634	3,358
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Uso de Pré-calcinador	0	0	8%	11%	0	0	4,232	4,094
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Substituição de fornos verticais por fornos rotativos com pré-aquecimento e pré-calcinador	0	0	0	2,4	0	0	0	2,2
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Recuperação de calor de baixa temperatura para geração de eletricidade	0,089028	0,14112	0,25	0,345	0,069972	0,01788	4,35	4,255
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Adição de um pré-calcinador a um forno rotativo com pré-aquecimento	0	0	0,13	0,65	0	0	4,47	3,95
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Adição de mais ciclones de pré-aquecimento a fornos com pré-aquecimento e pré-calcinador	0	0	0,16	0,7	0	0	4,44	3,9
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Adoção de tijolos refratários melhores no forno de clínquer	0	0	0,12	0,6	0	0	4,48	4
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Adoção de ciclones de baixa perda de carga nos pré-aquecedores	0,0018	0,01584	2%	4%	0,1572	0,14316	4,508	4,416
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Adoção de sistemas eficientes para o acionamento do forno rotativo	0,00198	0,014	1%	1%	0,15702	0,145	4,577	4,5724
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Melhorias no sistema de combustão do forno rotativo	0	0	0,11	0,47	0	0	4,49	4,13
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Controle tiristorizado dos ventiladores do forno de clínquer	0	0	0	0	0	0	0	4,6
via seca	Forno rotativo	0,159	4,6	Queima indireta no forno rotativo	0	0	0,015	0,023	0	0	4,585	4,577

	curto											
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Troca do selo de vedação do forno	0	0	0,011	0,024	0	0	4,589	4,576
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Melhora no isolamento	0	0	0,12	0,63	0	0	4,48	3,97
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Melhoramento refratário	0	0	0,4	0,63	0	0	4,2	3,97
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Aumento do número de pré-aquecedor de estágios em fornos rotativos	0	0	0,08	0,11	0	0	4,52	4,49
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Gestão de energia e sistema de controle	0,0054	0,01152	0,1	0,2	0,1536	0,14748	4,5	4,4
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Otimizar a recuperação de calor	0	0	0,05	0,16	0	0	4,55	4,44
via seca	Forno rotativo curto	0,159	4,6	Ciclones queda de pressão baixa	0,00252	0,01584	0	0	0,15648	0,14316	0	4,6
via seca	Resfriamento	0,115	3,1	Adoção de grelhas móveis no resfriador de clínquer	0	0	0,19	0,3	0	0,115	0	0
via seca	Resfriamento	0,115	3,1	Otimização da recuperação de calor no resfriador de clínquer	0	0	0,05	0,37	0	0	3,05	2,73
via seca	Resfriamento	0,115	3,1	Acionamento de velocidade ajustável para fã	0,01782	0,02196	0,05	0,62	0	0	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Moinhos de bolas	0,0108	0,018	0	0	0,0001944	0,000324	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Moinhos de rolos de alta pressão, no lugar de moinhos de bolas	7%	30%	0	0	0,01674	0,0126	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Moinhos horizontais de rolos (Horomill), no lugar de moinhos de bolas	0	0,1	0	0	0,018	-0,082	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Moinhos verticais de rolo, no lugar de moinhos de bolas	0,036	0,093348	0	0	0,000648	0,001680264	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Classificadores de elevada eficiência	0,0101	0,0227	0	0	0	0	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Melhorias nas superfícies de moagem em moinhos de bolas	0,00648	0,02196	0	0	0,00011664	0,00039528	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Sistemas avançados de controle e gestão da energia	0,00576	0,01512	0	0	0,00010368	0,00027216	0	0

via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Ventilador de alto rendimento no moinho das matérias-primas	0	0,000468	0	0	0	0,000008424	0	0
via seca	Moagem do clínquer	0,018	0	Reduzir vazamentos em sistemas de ar comprimido	0	20%	0	0	0	0,0144	0	0
via seca	Despacho	0,0468	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Circuito fechado	0,018	0,0252	0	0	0,000252	0,0003528	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Controle de iluminação	0	20%	0	0	0	0,0112	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Iluminação eficiente	0	0,0018	0	0	0	0,0000252	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Sistemas avançados de controle e gestão da energia	0,00432	0,00936	0,11	0,32	0,00006048	0,00013104	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	ciclos Bottoming	0	0	0	0	0	0	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Recuperação de calor de baixa temperatura para geração de eletricidade	0,089028	0,14112	0,25	0,345	0,001246392	0,00197568	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Recuperação de calor de alta temperatura para geração de eletricidade	0,064224	0,0792	0,21	0,22	0,000899136	0,0011088	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Remplazar moinho de bolas por moinho vertical	0	0,005292	0	0	0,014	0,008708	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Substituição de moinho de bolas por moinho vertical de rolo na moagem de carvão	0,00252	0,041292	0	0	0,00003528	0,000578088	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Ventiladores de alto rendimento, com controle tiristorizado, nos filtros de manga do moinho de carvão	0	0	0	0	0	0	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Motores elétricos e acionamentos de alto rendimento	0,0108	0,09	0	0	0,0001512	0,00126	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Controles tiristorizados da rotação de motores elétricos	0,0198	0,03294	0	0	0,0002772	0,00046116	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Ventiladores de alto rendimento	0,000396	0,00252	0	0	0,000005544	0,00003528	0	0
via seca	Utilidades	0,014	0	Otimização de sistemas de ar comprimido	0	0,0072	0	0	0	0,0001008	0	0
Via umida	Materia prima	0,0054	0	Sistema de transporte eficientes - Pipe conveying	0	0	2%	3,5%	0,0054	0,0054	0	0
Via umida	Moagem	0,09	0	Sistemas avançados de controle de moinhos de rolos	0,00288	0,00612	0	0	0,08712	0,08388	0	0
Via umida	Moagem	0,09	0	Moinhos verticais de rolos	30%	50%	0	0	0,063	0,045	0	0
Via umida	Moagem	0,09	0	Classificadores	0	8%	0	0	0	0,0828	0	0
Via umida	Moagem	0,09	0	Classificadores de alta eficiência	0,011448	0,02268	0	0	0,078552	0,06732	0	0



	longo											
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Substituição de fornos rotativos longos por fornos curtos com pré-calcinador	0	0	0	0	0	0	6,7	6,7
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Adição de mais ciclones de pré-aquecimento a fornos com pré-aquecimento e pré-calcinador	0	0	0	0	0	0	6,7	6,7
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Adoção de tijolos refratários melhores no forno de clínquer	0	0	0	0	0	0	6,7	6,7
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Adoção de ciclones de baixa perda de carga nos pré-aquecedores	0	0	0	4%	0,118	0,118	6,7	6,432
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Adoção de sistemas eficientes para o acionamento do forno rotativo	0	0	0	1%	0,118	0,118	6,7	6,6598
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Controle tiristorizado dos ventiladores do forno de clínquer	0	0	0	0	0	0	6,7	6,7
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Aumento do número de pré-aquecedor de estágios em fornos rotativos	0	0	0	0	0	0	6,7	6,7
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Adoção de grelhas móveis no resfriador de clínquer	0	0	0	0	0	0	6,7	6,7
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Recuperação de calor de baixa temperatura para geração de eletricidade	0	0	0	0	0,118	0,118	6,7	6,7
Via umida	Forno rotativo longo	0,118	6,7	Troca do selo de vedação do forno	0	0	0	0	0	0	6,7	6,7
Via umida	Resfriamento	0,115	0	Acionamento de velocidade ajustável para fã	0,017712	0,02196	0	0	0,097288	0,09304	0	0
Via umida	Resfriamento	0,115	0	Adoção de grelhas móveis no resfriador de clínquer	0	0	0	0	0	0	0	0
Via umida	Moagem do clínquer	0,018	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
Via umida	Despacho	0,0468	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Circuito fechado	0	0	0	0	0,014	0,014	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Controle de iluminação	0	20%	0	0	0	0,0112	0	0

Via umida	Utilidades	0,014	0	Iluminação eficiente	0	0,0018	0	0	0	0,0122	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Sistemas avançados de controle e gestão da energia	0,00432	0,00936	0	0	0,00968	0,00464	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	ciclos Bottoming	0	0	0	0	0	0	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Recuperação de calor de baixa temperatura para geração de eletricidade	0	0	0	0	0,014	0,014	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Recuperação de calor de alta temperatura para geração de eletricidade	0	0	0	0	0,014	0,014	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Remplazar moinho de bolas por moinho vertical	0	0,005292	0	0	0	0,008708	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Substituição de moinho de bolas por moinho vertical de rolo na moagem de carvão	0,00252	0	0	0	0,01148	0,014	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Ventiladores de alto rendimento, com controle tiristorizado, nos filtros de manga do moinho de carvão	0	0	0	0	0	0	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Motores elétricos e acionamentos de alto rendimento	0,0108	0	0	0	0,0032	0,014	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Controles tiristorizados da rotação de motores elétricos	0	0	0	0	0,014	0,014	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Ventiladores de alto rendimento	0,000396	0,00252	0	0	0,000005544	0,01148	0	0
Via umida	Utilidades	0,014	0	Otimização de sistemas de ar comprimido	0	0,0072	0	0	0	0,0068	0	0



Integrada	Redução direta	0	0	Uso gases provenientes dos conversores LD como gás combustível	0	0	0	0,49	0	0	0	0
Integrada	Aciaria	0,42	0,1	sistema de recuperação de calor	0	0	0	0	0	0	0	0
Integrada	Aciaria	0,42	0,1	sistema de recuperação de calor	0	0	0,1	92%	0	0	0,01	0,092
Integrada	Lingotamento	0,19	0,12	lingotamento contínuo	0	0	1	3	0	0	0,12	0,36
Integrada	Lingotamento	0,19	0,12	Enfornamento a quente	0	0	0	0,61	0	0	0	0,0732
Integrada	Lingotamento	0,19	0,12	Controle automatico	0	0	0	0	0	0	0	0
Integrada	Forno de reaquecimento	1,08	1,66	Queimadores oxi-combustível	0	0	0	30%	0	0	0	0,498
Integrada	Forno de reaquecimento	1,08	1,66	Queimadores recuperativos e regenerativos	0	0	0	0,56	0	0	0	1,1
Integrada	Laminação	0	0	Enforcamento a quente	0	0	0	0,61	0	0	0	0
Integrada	Total	3,71	23,98	Todas as medidas	0,14	0,22	0	0	3,57	3,49	23,98	20,91
Semi-Integradas	Aciaria	0	0	Pré-aquecimento em forno a arco com os gases de exaustão	0,216	1,152	0	0	0	0	0	0
Semi-Integradas	Aciaria	0	0	Instalar queimadores oxi-combustível nos fornos a arco	0	0,14	0	0	0	0	0	0
Semi-Integradas	Aciaria	0	0	Injeções de combustíveis e oxigênio	1,08	1,296	0	0	0	0	0	0
Semi-Integradas	Aciaria	0	0	Sistemas de controle baseados em redes neurais	0	0,108	0	0	0	0	0	0
Semi-Integradas	Lingotamento	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
Semi-Integradas	Lingotamento	0	0	ND	0	0	0	0	0	0	0	0
Semi-Integradas	Forno de reaquecimento	1,08	1,66	Recuperação da energia residual dos gases de exaustão	0	0,3	0	0	0	0,498	0	0
Semi-Integradas	Forno de reaquecimento	1,08	1,66	Queimadores recuperativos e regenerativos	0	0	0	0,56	0	0	0	1,1
Semi-Integradas	Forno de reaquecimento	1,08	1,66	Controle automático da operação de um forno de reaquecimento	10%	15%	0	0	0,108	0,249	0	0
Semi-Integradas	Laminação	1,08	1,66	Controle automático dos equipamentos de laminação a frio e de acabamento	0	0,21	0,15	0,3	0	0,3486	0,249	0,498
Não Integrada	Laminação	0	1,66	<i>thin slab casting</i>	0	0	1	3	0	0	1,66	4,98
Não Integrada	Laminação	0	1,66	ND	0	0	0	0	0	0	0	0

Utilidades	Geração de energia	0	0	Aproveitamento dos gases do coqueificação	0	3,6	0	0	0	0	0	0
Utilidades	Geração de energia	0	0	Uso dos gases em uma planta carboquímica para recuperação dos condensáveis e condicionamento do gás residual para utilização em fornos e caldeiras	0	0	0	3,28	0	0	0	0
Utilidades	Geração de energia	0	0	Apagamento a seco do coque-abafamento por gás inerte para recuperação em uma caldeira de recuperação	0	0	0,8	1,2	0	0	0	0

### Planilha segmento químico

<b>TIPO DE PLANTA</b>	<b>SEC - Eletricidade (GJ/t)</b>	<b>SEC - Térmica (GJ/t)</b>	<b>MEDIDAS TECNOLOGIASE BOAS PRÁTICAS</b>	<b>Elet. Min</b>	<b>Elet. Max</b>	<b>Tér Min.</b>	<b>Tér Max.</b>	<b>SEC. Ele. Máx. Red</b>	<b>SEC. Ele. Mín. Red</b>	<b>SEC. Tér. Máx. Red</b>	<b>SEC. Tér. Mín. Red</b>
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Otimização da relação ar-combustível dos queimadores do forno	0	0	5%	25%	0,64	0,64	15,713	12,405
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Limpeza regular dos queimadores e áreas de troca de calor	0	0	5%	10%	0,64	0,64	15,713	14,886
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Redução das perdas de calor do forno. Atráves de isolamento térmico	0	0	2%	5%	0,64	0,64	16,2092	15,713
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Redução da infiltração de ar no forno	0	0	5%	10%	0,64	0,64	15,713	14,886
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Otimização do controle do regime operacional do forno	0	0	2%	10%	0,64	0,64	16,2092	14,886
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Recuperação de calor dos gases de exaustão do forno	0	0	8%	18%	0,64	0,64	15,2168	13,5628
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Pinch point	0	0	20%	30%	0,64	0,64	13,232	11,578
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Redução da pressão de vapor	0	0	6%	8%	0,64	0,64	15,58068	15,2168
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Melhorias isolamento da caldeira	0	0	6%	26%	0,64	0,64	15,5476	12,2396
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Recuperação de calor dos gases residuais	0	0	5%	10%	0,64	0,64	15,713	14,886
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Recuperação de calor das descargas de fundo das caldeiras	0	0	1%	1%	0,64	0,64	16,40768	16,32498

Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Utilização de sistema de controle mais avançados nas caldeiras	0	0	0%	3%	0,64	0,64	16,54	16,0438
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Melhorias no isolamento das redes de distribuição de vapor	0	0	3%	13%	0,64	0,64	16,0438	14,3898
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Vistoria regular ou automatizada e manutenção adequada dos purgadores das redes de distribuição de vapor	0	0	10%	15%	0,64	0,64	14,886	14,059
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Vistoria regular e manutenção adequada de vazamentos de vapor nas redes	0	0	3%	5%	0,64	0,64	16,0438	15,713
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Aumento na taxa de retorno do condensado	0	0	0%	10%	0,64	0,64	16,54	14,886
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Boa manutenção da bomba	0	0	2%	7%	0,64	0,64	16,2092	15,3822
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Troca da bomba por uma mais eficiente	0	0	2%	10%	0,64	0,64	16,2092	14,886
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	troca do motor elétrico (bomba)	0	0	2%	5%	0,64	0,64	16,2092	15,713
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Bomba em paralelo	0	0	10%	50%	0,64	0,64	14,886	8,27
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Motor com controlador de frequência	0	0	20%	50%	0,64	0,64	13,232	8,27
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Motor com controlador de frequência(ventiladores e sopradores)	0	0	14%	49%	0,64	0,64	14,2244	8,4354
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	sustituição de correias em V por correias dentadas	0	0	0%	2%	0,64	0,64	16,54	16,2092
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Redução da pressão de descarga dos compressores	0	0	2%	18%	0,64	0,64	16,2092	13,5628
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Redução de vazamentos	0	0	2%	18%	0,64	0,64	16,2092	13,5628
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Instalação de motores elétricos de alto rendimento	0	0	2%	18%	0,64	0,64	16,2092	13,5628
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Motores com controladores de frequência	0	0	2%	18%	0,64	0,64	16,2092	13,5628
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Sistemas de controle eficientes	0	0	2%	18%	0,64	0,64	16,2092	13,5628
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Cogeração turbina a gás	15%	30%	40%	60%	0,544	0,448	9,924	6,616
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Cogeração turbina a vapor	10%	40%	40%	60%	0,576	0,384	9,924	6,616
Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Cogeração motor de combustão interna a gás natural	22%	40%	40%	60%	0,4992	0,384	9,924	6,616

Petroquímicos básicos	0,64	16,54	Cogeração motor de combustão interna a óleo diesel	25%	45%	40%	60%	0,48	0,352	9,924	6,616
-----------------------	------	-------	--	-----	-----	-----	-----	------	-------	-------	-------