

# ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS



## SEGMENTO CELULOSE E PAPEL

**29.05.2018**

Pesquisa/Produto/Trabalho executado com recursos provenientes do Acordo de Empréstimo nº 8.095-BR, formalizado entre a República Federativa do Brasil e o Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – Bird, em 1º de março de 2012.

**Elaborado por:**

**Consultor Jose M. de Moura**

**Consultores Júniores: Thiago Mattos de Souza e**

**Gabriel Zorthea Lourenço**

**Estatístico: Teresa Aparicio Villegas**

**Coordenador do Projeto: Fernando Moreno Pinzón**

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	8
2. PERFIL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL.....	9
a. Comportamento da produção em nível de subsegmento e suas tendências.....	9
b. Informação do consumo de energia no segmento de celulose e papel e sua participação na demanda industrial.....	25
c. Indicadores que serão quantificados a partir da análise da realidade brasileira atual .....	26
3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL.....	28
a. Processos de produção principais do subsegmento de celulose .....	28
b. Processos de produção principais do subsegmento produção de papel .....	34
c. Processos de produção principais das plantas integradas de celulose e papel.....	37
d. Processos de produção principais do subsegmento de recicladores de papel .....	38
4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO .....	41
a. Seleção da amostra da pesquisa .....	41
b. Seleção das etapas do processo de produção .....	42
c. Tratamento de dados .....	43
5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO .....	44
a. Subsegmento de Celulose.....	44
I. SITUAÇÃO ATUAL .....	44
II. CONDIÇÕES COM TECNOLOGIAS MAIS EFICIENTES .....	50
b. Subsegmento de Produção de Papel .....	60
I. SITUAÇÃO ATUAL.....	60
II. CONDIÇÕES COM TECNOLOGIAS MAIS EFICIENTES .....	64
c. Subsegmento de Plantas Integradas de Celulose e Papel.....	70
I. SITUAÇÃO ATUAL .....	70
II. TECNOLOGIAS MAIS EFICIENTES.....	75
d. Subsegmento de recicladores de papel.....	84
I. SITUAÇÃO ATUAL .....	84
II. TECNOLOGIAS MAIS EFICIENTES.....	88
6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETREÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO ..	92
a. Subsegmento de Celulose.....	92
I. CONDICIONANTES TÉCNICOS .....	92
II. CONDICIONANTES ECONÔMICO-FINANCEIROS .....	93
III. OUTROS CONDICIONANTES .....	93
b. Subsegmento de produção de papel .....	94
I. CONDICIONANTES TÉCNICOS .....	94
II. CONDICIONANTES ECONÔMICO-FINANCEIROS .....	94

III. OUTROS CONDICIONANTES .....	94
c. Subsegmento de plantas integradas de celulose e papel.....	96
I. CONDICIONANTES TÉCNICOS .....	96
II. CONDICIONANTES ECONÔMICO-FINANCEIROS .....	97
III. OUTROS CONDICIONANTES .....	97
d. Subsegmento de recicladores de papel.....	98
I. CONDICIONANTES TÉCNICOS .....	98
II. CONDICIONANTES ECONÔMICO-FINANCEIROS .....	98
III. OUTROS CONDICIONANTES .....	98
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	99
8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS .....	101
<b>ANEXOS</b> .....	106
A. ESTRUTURA DO QUESTIONÁRIO UTILIZADO NA PESQUISA .....	108
B. RELAÇÃO DE QUESTIONÁRIOS RESPONDIDOS.....	118
C. DETALHAMENTO DA SELEÇÃO DE AMOSTRAS.....	244
D. MEMÓRIA DE CÁLCULO .....	263
<b>ANEXOS</b>	

## Lista de tabelas

Tabela 1: Ranking dos 10 países - Produção e exportação mundial de celulose .....	12
Tabela 2: Ranking dos 10 países - Produção e importação mundial de celulose .....	12
Tabela 3: Consumo de aparas em relação ao papel produzido .....	23
Tabela 4: Universo de empresas amostradas .....	41
Tabela 5: Distribuição de unidade de serviço na produção de celulose.....	46
Tabela 6: Distribuição e consumo energético por etapa de produção de celulose.....	47
Tabela 7: Rendimento energético atual, Subsegmento de Celulose.....	48
Tabela 8: Coeficiente de destinação atual, Subsegmento de Celulose .....	49
Tabela 9: Investimento para reposição de equipamentos de mesma eficiência .....	50
Tabela 10: Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de celulose .....	51
Tabela 11: Eficiência energética em motores elétricos .....	54
Tabela 12: Equivalência entre lâmpadas LED e convencionais .....	55
Tabela 13: Rendimento energético alternativo, Subsegmento de Celulose.....	56
Tabela 14: Coeficiente de destinação alternativo, Subsegmento de Celulose .....	57
Tabela 15: Investimento de equipamentos de maior eficiência .....	58
Tabela 16: Investimento de medidas aplicadas no segmento de celulose .....	58
Tabela 17: Potencial de economia do segmento de produção de celulose .....	59
Tabela 18: Consumo específico por etapa produtiva de papel .....	61
Tabela 19: Classificação por unidade de serviço no subsegmento de papel .....	61
Tabela 20: Rendimento energético atual, Subsegmento de papel .....	62
Tabela 21: Coeficiente de destinação atual, Subsegmento de papel.....	63
Tabela 22: Investimento para reposição de equipamentos de mesma eficiência.....	64
Tabela 23: Medidas de melhoria na eficiência energética de produção de papel.....	64
Tabela 24: Rendimento energético alternativo, Subsegmento de Papel.....	66
Tabela 25: Coeficiente de destinação alternativo, Subsegmento de Papel.....	67
Tabela 26: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência.....	68
Tabela 27: Investimento de medidas aplicadas no segmento de papel.....	68
Tabela 28: Potencial de economia do segmento de produção de papel .....	69
Tabela 29: Distribuição de unidade de serviço plantas integradas .....	71
Tabela 30: Consumo específico por etapa produtiva de plantas integradas.....	72
Tabela 31: Rendimento energético atual, de plantas Integradas de celulose e papel.....	73
Tabela 32: Coeficiente de destinação atual, de plantas Integradas de celulose e papel.....	74
Tabela 33: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência.....	75
Tabela 34: Medidas de eficiência energética de Plantas Integradas de Celulose e Papel .....	76
Tabela 35: Medidas gerais de eficiência energética na etapa de preparo de cavaco.....	77
Tabela 36: Medidas gerais de eficiência energética a partir de processo mecânico .....	77
Tabela 37: Medidas gerais de eficiência energética a partir de processo químico .....	78
Tabela 38: Medidas de melhoria na produção de vapor .....	78
Tabela 39: Rendimento energético alternativo, de plantas Integradas de celulose e papel.....	80
Tabela 40: Coeficiente de destinação alternativo, de plantas Integradas de celulose e papel ....	81
Tabela 41: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência.....	82
Tabela 42: Investimento de medidas aplicadas em plantas integradas de celulose e papel .....	82
Tabela 43: Potencial de economia do segmento integrado de produção de celulose e papel ....	83
Tabela 44: Distribuição e consumo energético por produção de reciclado.....	85
Tabela 45: Distribuição e consumo energético por produção de reciclado.....	85
Tabela 46: Classificação por unidade de serviço no subsegmento de reciclados .....	85
Tabela 47: Rendimento energético atual, Subsegmento de Reciclados.....	86

Tabela 48: Coeficiente de destinação atual, Subsegmento de Reciclados.....	87
Tabela 49: Investimento para reposição de equipamentos de mesma eficiência.....	88
Tabela 50: Rendimento energético alternativo, Subsegmento de Reciclados.....	89
Tabela 51: Coeficiente de destinação alternativo, Subsegmento de Reciclados .....	90
Tabela 52: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência.....	91
Tabela 53: Investimento das melhorias propostas no segmento de produção de reciclados.....	91
Tabela 54: Potencial de economia do segmento de produção de reciclados.....	91

## Lista de figuras

Figura 1: Ranking dos dez maiores produtores mundiais de celulose .....	9
Figura 2: Ranking dos dez maiores produtores mundiais de papel .....	20
Figura 3: Participação (%) do mercado na produção mundial de papel. ....	21
Figura 4: Esquema de produção de cavaco.....	29
Figura 5: Esquema de cozimento e depuração no processo químico .....	31
Figura 6: Esquema de branqueamento por processo livre de cloro (TCF) .....	32
Figura 7: Esquema do sistema de recuperação do processo kraft .....	33
Figura 8: Esquema Das Etapas De Caustificação E Do Forno De Cal.....	34
Figura 9: Esquema Das Etapas da Máquina de papel.....	36
Figura 10: Esquema Das Etapas de produção .....	38
Figura 11: Esquema Das Etapas De Recicladores de papel .....	39
Figura 12: Esquema Das Etapas De produção de Celulose .....	44
Figura 13: Esquema Das Etapas De recuperação química na produção de celulose .....	45
Figura 14: Esquema Das Etapas De produção de papel .....	60
Figura 15: Capota de alto rendimento. ....	65
Figura 16: Esquema das etapas das plantas integradas .....	70
Figura 17: Controle de injeção de ar independente .....	76
Figura 18: Etapas do processo de reciclagem .....	84

## Lista de gráficos

Gráfico 1: Preço médio da celulose por tonelada exportada - 2015 (em US\$) .....	10
Gráfico 2: Custos de produção de celulose no Brasil e nos principais países produtores .....	10
Gráfico 3: Rotação (em anos) e rendimento (m <sup>3</sup> /ha/ano) da área plantada .....	11
Gráfico 4: Evolução da produção de celulose por tipo .....	13
Gráfico 5: Tipos de celulose (%) .....	13
Gráfico 6: Participação (%) dos principais países produtores de pasta de alto rendimento .....	14
Gráfico 7: Produção de pasta de alto rendimento Top 5 + Brasil .....	14
Gráfico 8: Produção mundial de celulose oriunda do processo químico .....	14
Gráfico 9: Ranking da Produção mundial de celulose oriunda do processo químico.....	15
Gráfico 10: Projeção do consumo de fibra para papel por região. ....	16
Gráfico 11: Crescimento do consumo de fibra para papel por região .....	17
Gráfico 12: Taxa de crescimento do consumo global de fibras para papel por tipo .....	17
Gráfico 13: Evolução mundial da produção de papel - 2005 a 2015 .....	18
Gráfico 14: Evolução mundial do consumo aparente per capita de papel .....	19
Gráfico 15: Consumo aparente per capita de papel <sup>1</sup> por país .....	19
Gráfico 16: Exportações de papel nos dez maiores países produtores. ....	21
Gráfico 17: Produção mundial de papel, por tipo de papel produzido, participação (%). ....	22
Gráfico 18: Crescimento do consumo de papéis e cartões por tipo (2014-2030).....	22
Gráfico 19: Evolução da taxa de recuperação de papéis .....	24
Gráfico 20: Consumo de papel reciclado por região até 2015 .....	25



## 1. INTRODUÇÃO

### Descrição geral do objetivo do relatório

O presente relatório tem como objetivo identificar e avaliar a eficiência energética nas indústrias da cadeia de produção de celulose e papel assim como a geração de dados básicos relativos ao uso de energia (elétrica e térmica) através da realização de pesquisa em âmbito nacional. Estes dados subsidiarão a estimação pela EPE e pelo MME do potencial de eficiência do uso da energia neste segmento industrial.

O estudo, inicialmente, caracteriza este segmento sob os pontos de vista técnico, econômico, energético e ambiental e, em seguida, é mostrada a metodologia utilizada para o cálculo dos potenciais de conservação de energia e comparados os resultados com os encontrados na literatura técnica. São comentadas, por fim, algumas barreiras existentes para as ações de conservação de energia na indústria da cadeia de produção de celulose e papel.

### Abrangência deste relatório

Este trabalho destina-se em particular à EPE e ao MME, contribuindo para o aprimoramento das atividades de planejamento e para as pesquisas no âmbito do setor industrial.

O alcance deste estudo no segmento de papel e celulose, está definido para os seguintes subsegmentos: celulose, plantas integradas de celulose e papel, produção de papel e recicladores de papel.

O estudo aborda os seguintes temas específicos:

- Descrição do processo produtivo de cada subsegmento;
- Consumo de energia no segmento de celulose e papel e sua participação na demanda industrial;
- Consumo de energia de cada subsegmento e sua distribuição fonte e uso;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento nas condições da situação atual de produção;
- Indicadores de consumo energético em cada subsegmento considerando a utilização de tecnologias mais eficientes;
- Análises dos condicionantes de penetração de tecnologias eficientes de energia por subsegmento;
- Conclusões gerais do estudo.

## 2. PERFIL DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL

### a. Comportamento da produção em nível de subsegmento e suas tendências

O setor de papel e celulose é bastante representativo para a economia nacional e também para o cenário mundial. Isto é devido à receita gerada, aos elevados investimentos e devido, também, ao impacto que esse setor tem sobre os outros diversos setores econômicos, tanto para os que se encontram antes quanto depois de sua cadeia produtiva (GEDF - CD/FIEP-2016).

Para facilitar o entendimento, este tópico será dividido por subsegmentos e serão apresentados alguns dados, como: a produção e as exportações mundiais, e os principais países exportadores de celulose, papel e reciclado.

#### Segmento de celulose

A indústria de celulose apresenta características diferentes dos demais mercados, devido ao fato de possuir um elevado nível de desenvolvimento tecnológico que utiliza instalações industriais com grande capacidade de produção, uma ampla base de recursos florestais plantados e intenso capital aplicado em tecnologia.

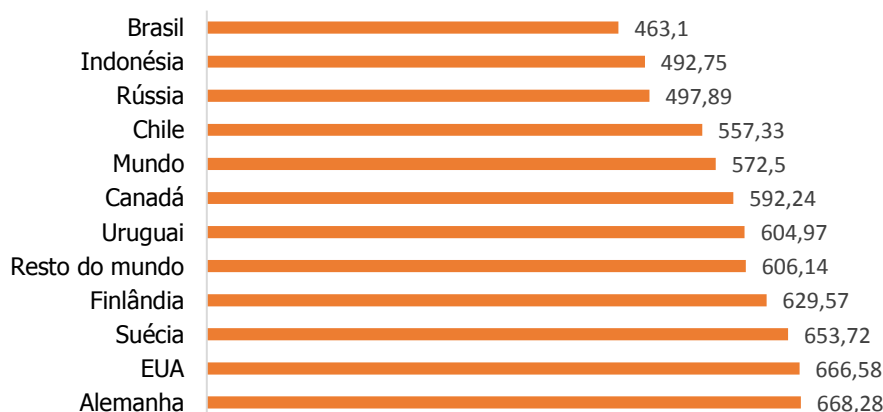
Analisando a Figura 1, observa-se que dez países nesse segmento são considerados como principais produtores mundiais de celulose, sendo juntos responsáveis, em 2015, por mais de 82% da produção mundial (FAO, 2016).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Figura 1: Ranking dos dez maiores produtores mundiais de celulose em 2015

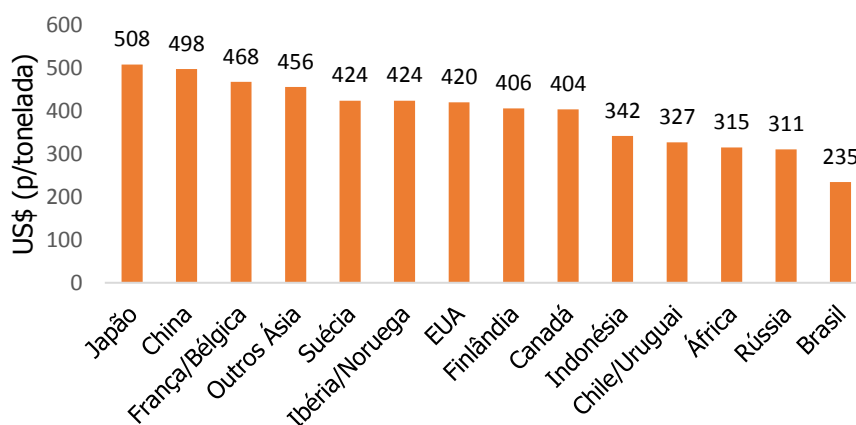
No Gráfico 1, verifica-se que o preço médio da celulose por tonelada exportada obteve variação, em 2015, de US\$ 463,10 para US\$ 668,28 com preço médio mundial de US\$ 572,50 por tonelada exportada. O Brasil possui o menor preço por tonelada, US\$ 463,10. A Alemanha ficou em primeiro lugar, com um preço de US\$ 668,28. É importante destacar que o mercado internacional determina os preços de venda da celulose, logo são vulneráveis às oscilações do dólar e às variações da economia mundial. Também são impactados por questões microeconômicas como as mudanças na capacidade industrial, o nível de estoques que existem no setor e os custos de produção, que podem justificar essa amplitude dos preços (GEDF - CD/FIEP-2016).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 1: Preço médio da celulose por tonelada exportada - 2015 (em US\$)

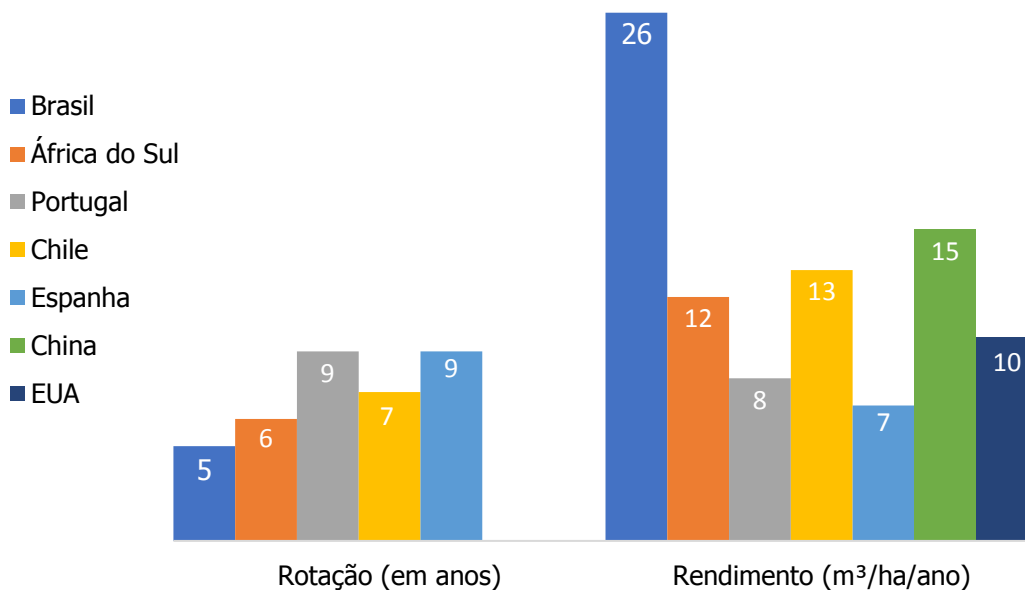
O menor preço do Brasil (Gráfico 2) se deve ao menor custo de produção encontrado nele, devido ao clima favorável do país e às características de produção das empresas brasileiras, como a utilização de biotecnologia e de engenharia genética que colaboram para a produtividade brasileira, principalmente na etapa florestal, que é maior em comparação com os outros países (DEPEC/BRADESCO,2016).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FIBRIA apud DEPEC/BRADESCO (2016)

Gráfico 2: Custos de produção de celulose no Brasil e nos principais países produtores - 2014 (US\$ por tonelada)

Exemplificando, para produção de 1,0 milhão de toneladas de celulose, no Brasil são necessários 93 mil hectares de área plantada, enquanto que na Escandinávia e na China, são requeridos 480 mil e 200 mil hectares respectivamente. Isso se deve ao rendimento da área plantada brasileira que equivale a 26 m<sup>3</sup>/ha/ano, enquanto na China, país com o segundo maior rendimento por área plantada no cenário mundial, o rendimento é de 15 m<sup>3</sup>/ha/ano, o que representa um rendimento 41% menor na comparação com o Brasil (Gráfico 3).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da DEPEC/BRADESCO (2016)

Gráfico 3: Rotação (em anos) e rendimento (m<sup>3</sup>/ha/ano) da área plantada dos países selecionados - 2015

Cada tipo de madeira resulta em características distintas. A celulose de fibra longa é mais resistente, já a de fibra curta possui maior capacidade absorvente, e a pasta de alto rendimento, pode ser obtida de ambos os tipos de madeira.

O tempo de rotação no Brasil é menor, devido ao fato do eucalipto (fibra curta), que é a principal fibra da celulose brasileira, atingir mais rapidamente a idade boa para corte, em média 7 anos, do que o pinus (fibra longa), que leva em média 15 a 20 anos (DEPEC/BRADESCO, 2016). Esses fatores contribuem para a maior produtividade do Brasil, que favorece o menor custo de produção do mesmo.

Em 2015, o Brasil lidera o *ranking* mundial, por exportar mais de 10,6 milhões de toneladas de celulose, o que o torna um grande fornecedor mundial desse insumo. O Canadá ocupa a segunda colocação, por exportar 9,3 milhões de toneladas. Os Estados Unidos ficam na terceira posição com 7 milhões de toneladas de celulose exportadas (GEDF - CD/FIEP-2016).

Em 2015, o Chile e o Brasil exportaram, respectivamente, 90% e 62% de sua produção de celulose, ao mesmo tempo que os Estados Unidos exportou uma pequena parte de sua produção, apenas 14% (Tabela 1).

Produção			Exportações						
País	Milhões (t)	Participação (%)	Ranking	País	Milhões (t)	Participação (%)	Valores (bilhões US\$)	% Produção	
<b>Mundo</b>	<b>180,9</b>	<b>100</b>	<b>Total Mundial</b>					30,8	30
<b>∑ 10 países</b>	<b>150,8</b>	<b>85</b>	<b>∑ 10 países</b>					25,7	25
EUA	48,5	27	1º	<b>Brasil</b>	10,6	20	4,9	62	
China	17,8	10	2º	Canadá	9,3	17	5,5	53	
Canadá	17,6	10	3º	EUA	7	13	4,6	14	
<b>Brasil</b>	17,2	10	4º	Chile	4,6	9	2,6	90	
Suécia	11,1	6	5º	Indonésia	3,5	7	1,7	52	
Finlândia	10,2	6	6º	Finlândia	2,9	5	1,8	28	
Japão	8,7	5	7º	Suécia	2,9	5	1,9	26	
Rússia	7,9	4	8º	Rússia	2,2	4	1,1	28	
Indonésia	6,7	4	9º	Uruguai	1,4	3	0,9	21	
Chile	5,1	3	10º	Alemanha	1,1	2	0,7	22	
Resto do mundo	30,1	16	Resto do mundo		7,7	14	4,7	26	

Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Tabela 1: Ranking dos 10 países - Produção e exportação mundial de celulose - 2015

Analisando as importações, do mesmo modo como ocorre com a exportações, dez países possuem a concentração do mercado. Estes são responsáveis por mais de 70% das importações mundiais, onde apenas EUA, Indonésia e Alemanha se encontram na lista dos dez maiores exportadores e importadores (Tabela 2).

Produção				Importações				
Ranking	País	Milhões (t)	Participação (%)	Ranking	País	Milhões (t)	Participação (%)	% Produção
<b>Total Mundial</b>		180,9	100	<b>Total Mundial</b>		52,8	100	29,3
<b>∑ 10 países</b>		89,6	49,7	<b>∑ 10 países</b>		37,8	71,6	42,2
1º	EUA	48,5	26,9	1º	China	15,8	29,9	88,8
2º	China	17,8	9,9	2º	EUA	5,2	9,8	10,7
7º	Japão	8,7	4,8	3º	Alemanha	4,4	8,3	176,0
9º	Indonésia	6,7	3,7	4º	Itália	3,4	6,4	566,7
13º	Espanha	2,6	1,4	5º	Coreia do Sul	2,2	4,2	550,0
14º	Alemanha	2,5	1,4	6º	França	2,0	3,8	125,0
15º	França	1,6	0,9	7º	Japão	1,6	3	18,4
26º	Itália	0,6	0,3	8º	Reino unido	1,1	2,1	550,0
32º	Coreia do Sul	0,4	0,2	9º	Espanha	1,1	2,1	42,3
37º	Reino unido	0,2	0,1	10º	Indonésia	1,0	1,9	14,9
Resto do mundo		92,3	51,2	Resto do mundo		14,4	27,3	15,6

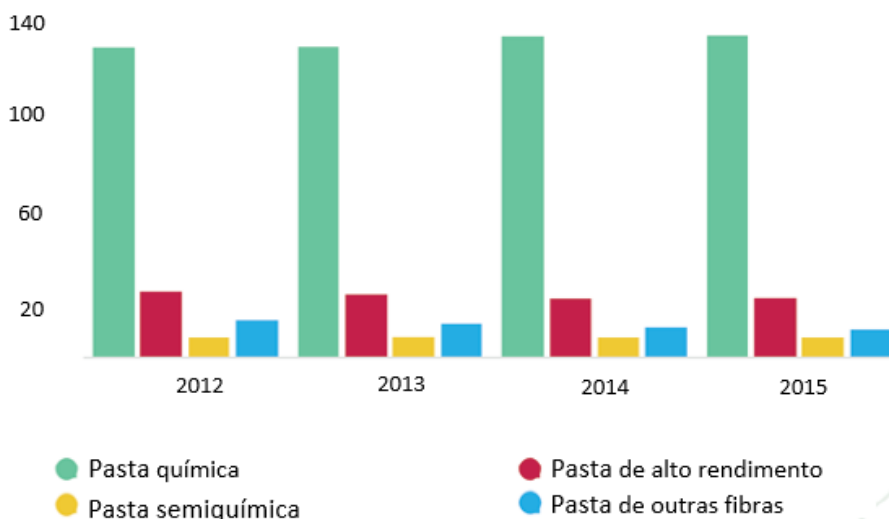
Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Tabela 2: Ranking dos 10 países - Produção e importação mundial de celulose - 2015

A China, segundo maior produtor mundial de celulose, importou 89% de sua produção em 2015, o que a torna uma grande consumidora mundial desse insumo.

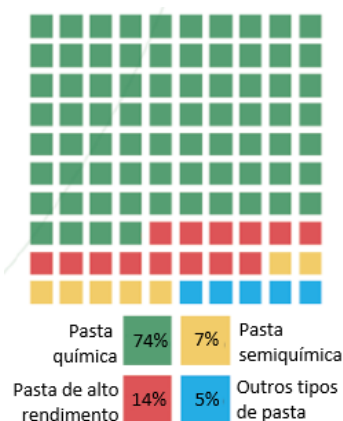
A produção de celulose mundial equivale a 180,9 milhões de toneladas. Segundo os diferentes tipos de processos (químicos, de alto rendimento, semiquímico e pastas de outras fibras), onde 74% da produção mundial equivale à produção de celulose pelo processo químico, o que representa aproximadamente 135 milhões de toneladas.

Logo após vem a pasta de alto rendimento, resultado do processo mecânico, que representa 14% da produção mundial (25,3 milhões de toneladas). As pastas semiquímicas e originárias de outras fibras representam juntas 12% da produção mundial de celulose, o que corresponde a 21 milhões de toneladas (Gráficos 4 e 5).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

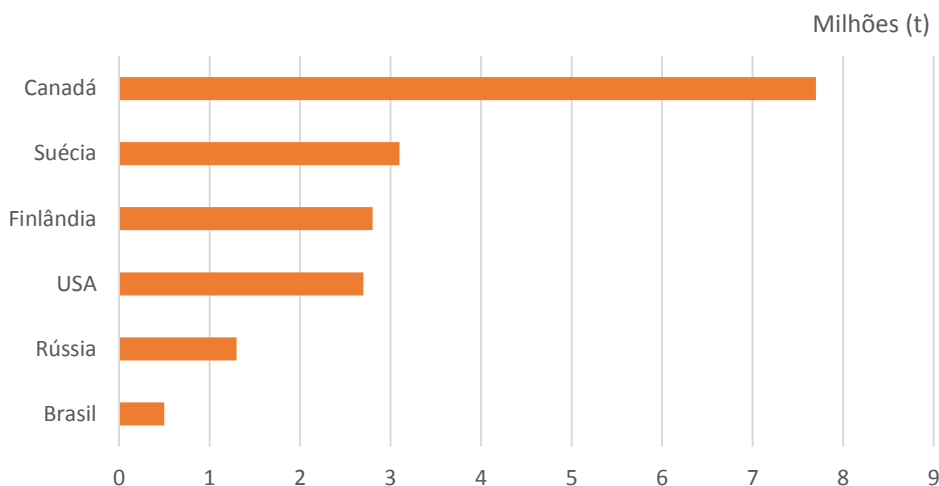
Gráfico 4: Evolução da produção de celulose por tipo - 2012 a 2015



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 5: Tipos de celulose (%) - 2015

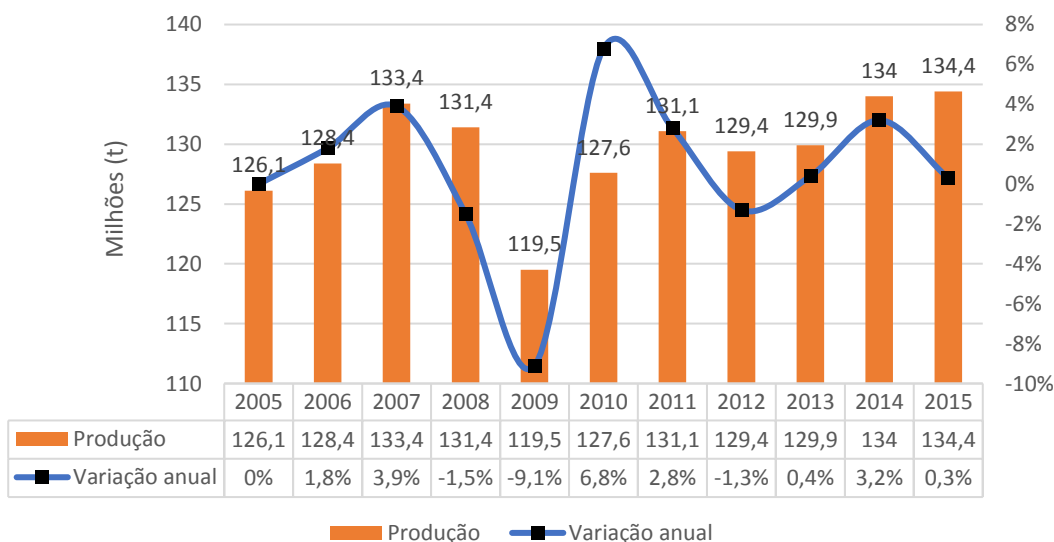
A produção mundial de pasta de alto rendimento (processo mecânico) se concentra em seis países que são responsáveis por mais de 73% da produção mundial. Quatro deles são: Canadá (30%), Suécia (12%), Finlândia (11%) e Estados Unidos (11%), que detêm juntos mais de 64% da produção mundial (GEDF - CD/FIEP-2016).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 7: Produção de pasta de alto rendimento Top 5 + Brasil - 2015 (milhões de toneladas)

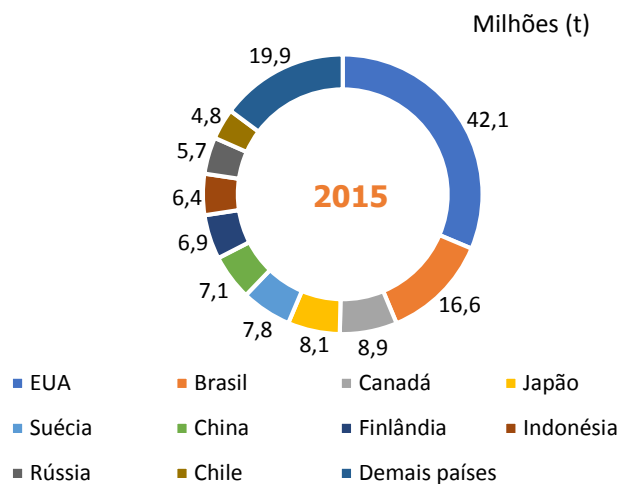
Analisando a produção de celulose proveniente do processo químico, nota-se em 2015 um aumento de 6,6% comparados com o total que foi produzido em 2005 (Gráfico 8).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 8: Produção mundial de celulose oriunda do processo químico - 2005 a 2015 (em milhões de toneladas)

A produção de celulose, que é proveniente do processo químico, está concentrada em 9 países que juntos representam mais de 84% da produção mundial. Observa-se os EUA como maior produtor, com a produção de 42,1 milhões de toneladas de celulose, provenientes do processo químico, em 2015 (Gráfico 9).



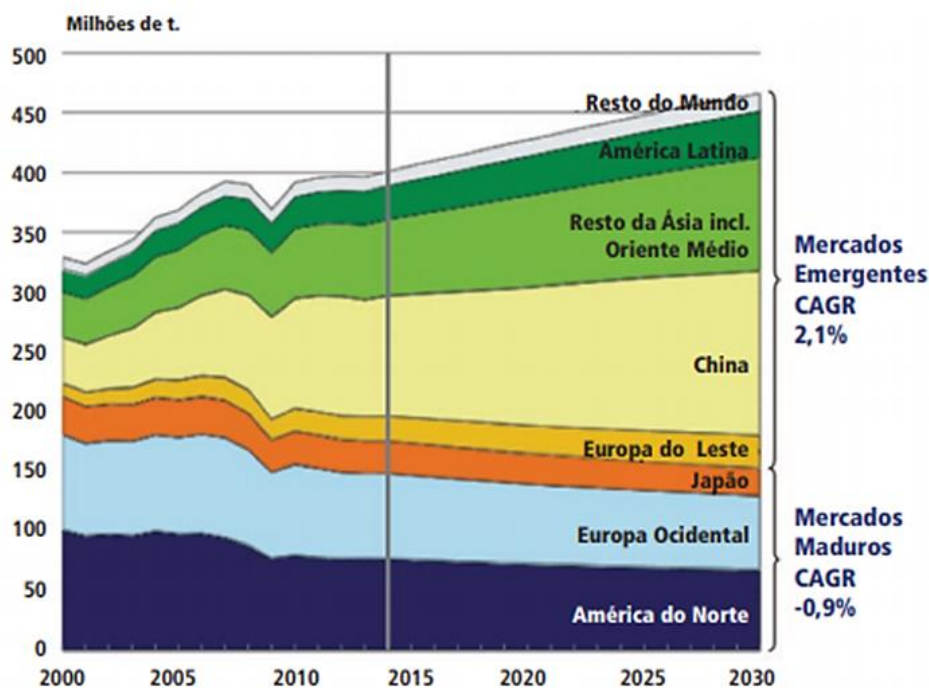
Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 9: Ranking da Produção mundial de celulose oriunda do processo químico - 2015 (em milhões toneladas)



## Tendências mundiais do mercado de celulose

A projeção do consumo de fibra para papel muda consideravelmente de uma região para a outra, com perspectiva negativa para os países desenvolvidos, motivada pela diminuição na demanda do papel de imprensa e dos papéis de imprimir e escrever, mas com considerável potencial para os mercados emergentes devido ao aumento da qualidade de vida e do poder aquisitivo da população, que impulsiona o crescimento da demanda por embalagens, papéis sanitários e cartões (POYRY, 2015, p. 1). Esse comportamento é visível no Gráfico 10.



Fonte: Guia ABTCP (2016/2017)

Gráfico 10: Projeção do consumo de fibra para papel por região (2014-2030).

Até 2030, o consumo de fibra para papel crescerá no mundo com uma média de 1,1% ao ano. Os mercados emergentes como o Leste Europeu e a América Latina continuam a crescer. O crescimento na China, apesar da atenuação considerável comparando com os últimos 10-15 anos, irá representar metade do crescimento projetado (Guia ABTCP – 2016/2017).

No Japão, a taxa de decréscimo deverá ficar por volta de -1,2%, enquanto na América do Norte e na Europa Ocidental os mercados deverão sofrer uma contração de -0,5% e -0,4%, respectivamente (Guia ABTCP – 2016/2017). O Gráfico 11, relativo ao crescimento do consumo de fibra para papel por região, mostra o potencial de demanda, variando consideravelmente por região.

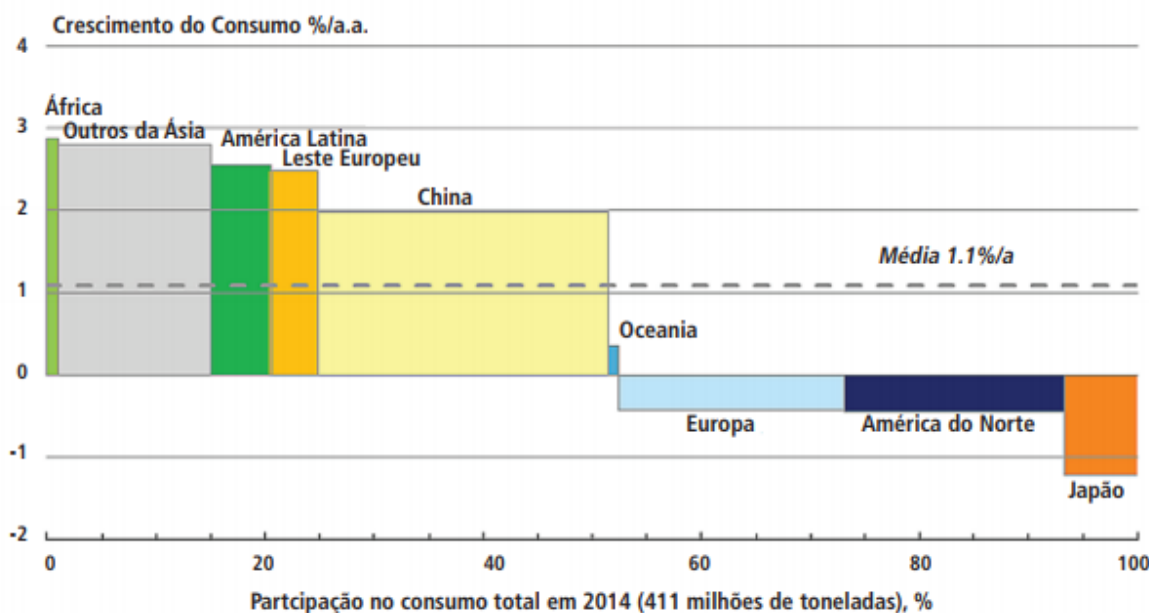
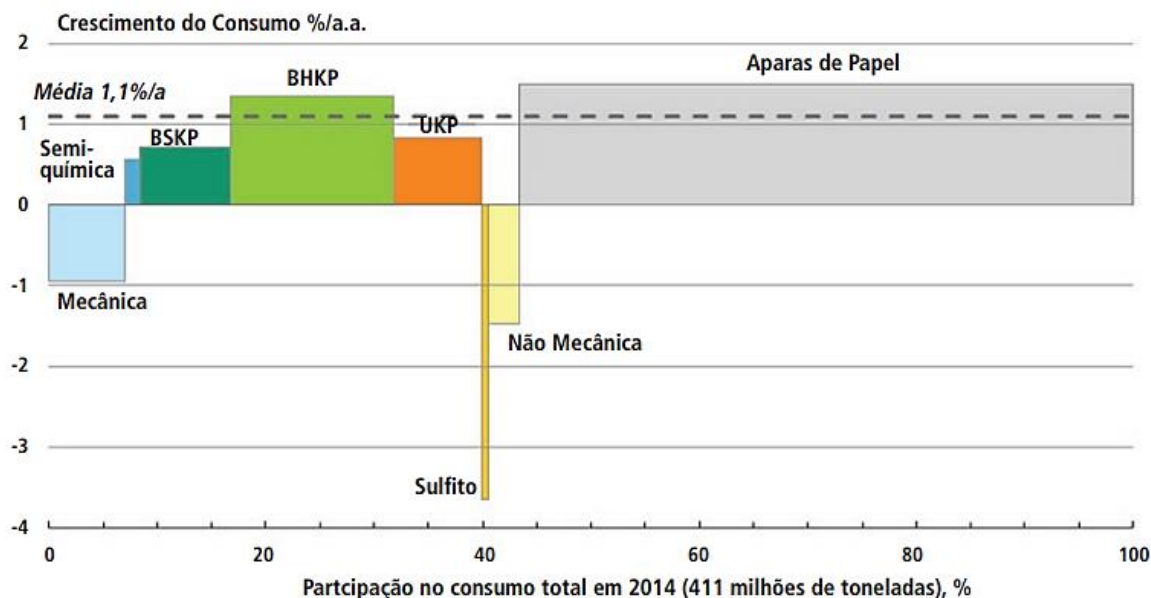


Gráfico 11: Crescimento do consumo de fibra para papel por região (2014-2030).

O gráfico 12 mostra uma projeção segundo a qual a demanda de BHKP (celulose branqueada) deve crescer por volta de 1,3% ao ano até 2030, ou seja, mais rápido que o consumo de fibras para papel em geral.



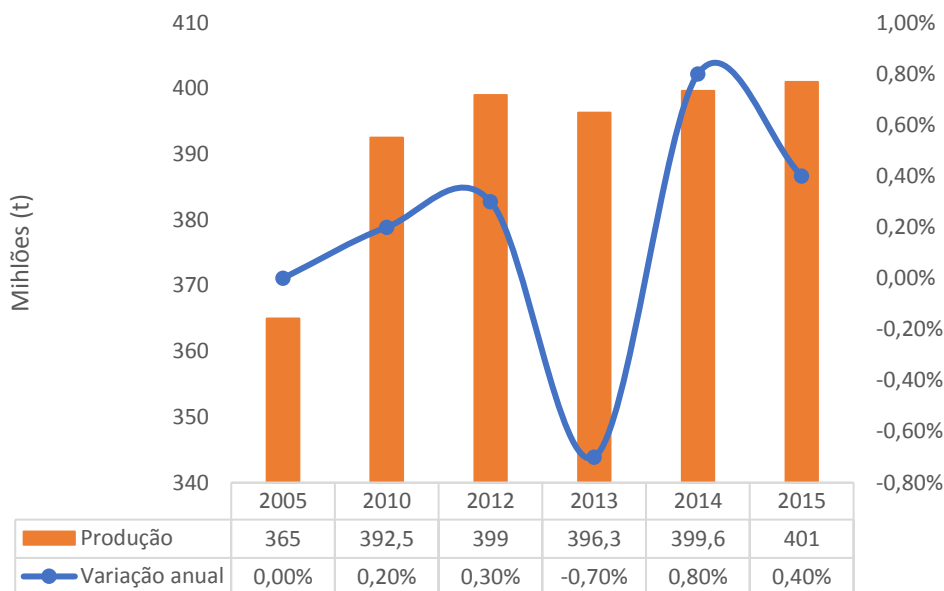
Fonte: Guia ABTCP (2016/2017)

Gráfico 12: Taxa de crescimento do consumo global de fibras para papel por tipo - 2014 a 2030

## Produção de papel

A indústria de papel possui características importantes que a difere da indústria de celulose, isso porque essa possui uma demanda regional menos concentrada, grande número de consumidores e produtores, além de uma maior diferenciação de produto em comparação com o mercado de celulose. Há atuação de médias empresas, os preços são cíclicos e tendem acompanhar os preços da celulose (FIEPR, 2016).

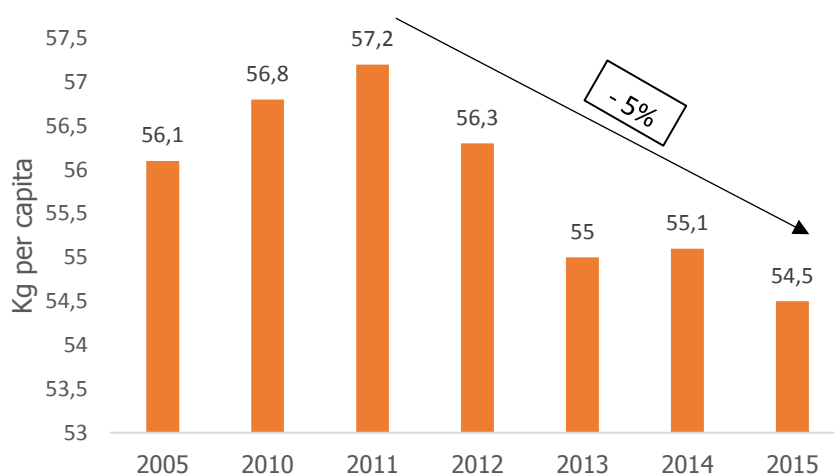
Segundo dados da FAO (2016), em 2015 a produção mundial de papel foi de 401 milhões de toneladas, é possível observar que no período de 2005 a 2015, ocorreu um aumento de, aproximadamente, 10% na produção mundial, o que representa um crescimento médio anual de 1% (Gráfico 13).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

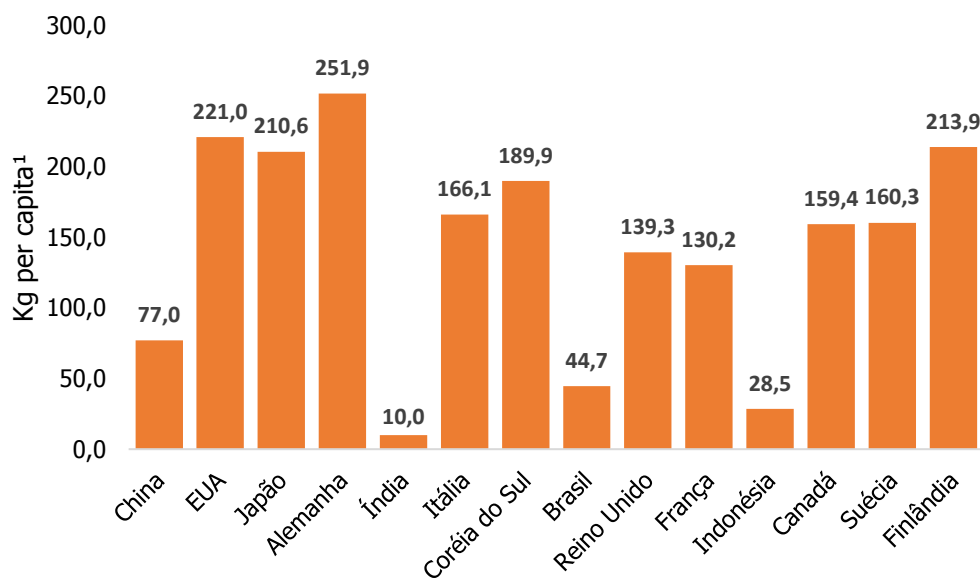
Gráfico 13: Evolução mundial da produção de papel - 2005 a 2015 (em milhões toneladas).

Quando analisamos o consumo aparente per capita de papel em 2015, a média mundial foi de 54,5 Kg por habitante. Observa-se que em 2015, houve uma pequena redução de 1% em relação ao ano anterior. No entanto, comparando com 2011, ano com o registro de maior consumo per capita, nota-se uma redução de 5%, aproximadamente (Gráfico 14).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 14: Evolução mundial do consumo aparente per capita de papel – 2010 a 2015 (em kg per capita).



Fonte: Elaboração própria¹ a partir dos dados do Banco Mundial (2015) e do Statista (2015)

Gráfico 15: Consumo aparente per capita de papel¹ por país - 2015 (em kg per capita).

**NOTA:**

¹ O consumo aparente per capita de papel foi calculado a partir da divisão do consumo de papel pela população do país

Na análise do consumo aparente per capita de papel por país em 2015, o Brasil possui um dos menores valores, 44,7 Kg por habitante, o que significa que no Brasil o consumo de papel (em Kg) por pessoa é menor em relação aos outros países (Gráfico 14), o que também é visível com relação à média mundial (Gráfico 15).

Também é possível observar que a China, apesar de ter uma população bem maior do que os outros países, possui um consumo de papel por habitante menor do que EUA, Japão, Alemanha e Finlândia.

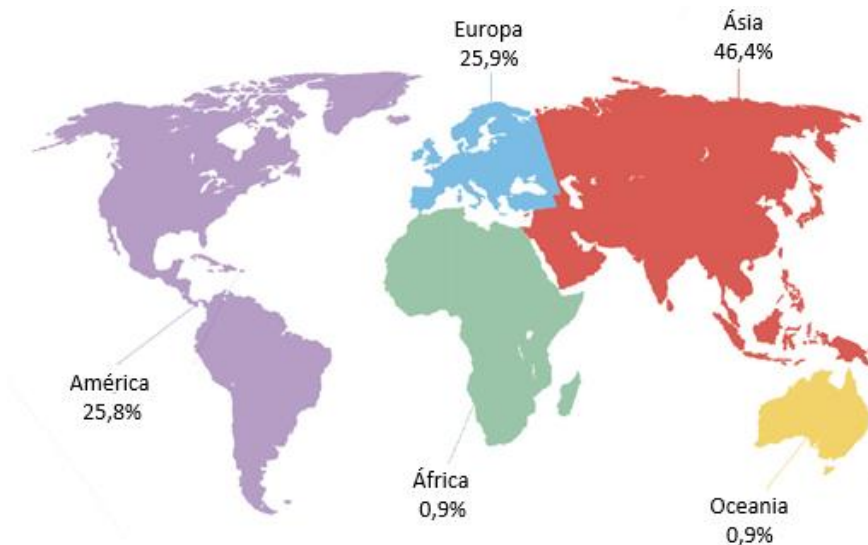
No panorama mundial, o Brasil está em sétimo lugar como produtor de papel, precedido pela China, Estados Unidos, Japão, Alemanha, Coreia do Sul, Índia e Indonésia.



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Figura 2: Ranking dos dez maiores produtores mundiais de papel - 2015.

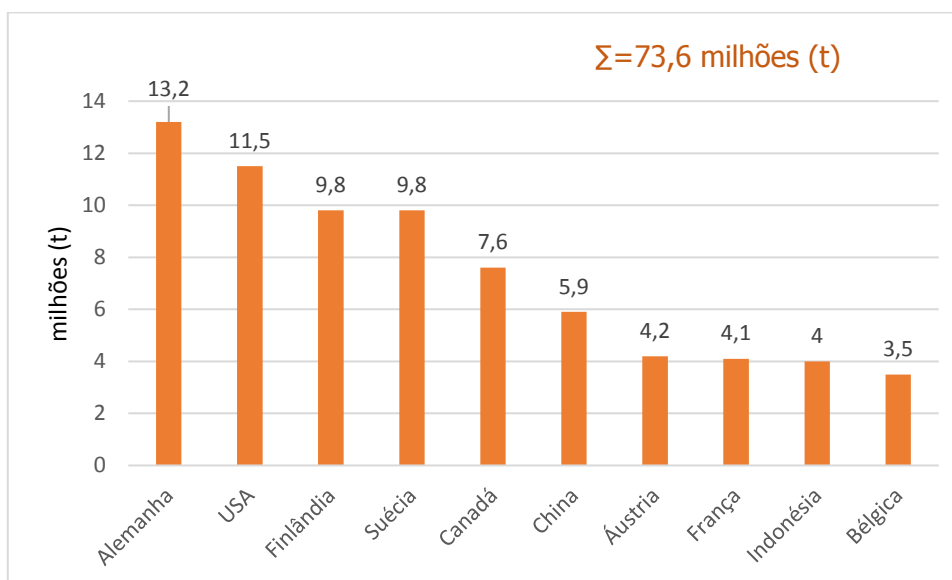
Na análise das principais regiões produtoras de papel, a Ásia possui, 46% de participação no mercado mundial. Logo após está a Europa e as Américas, ambas com aproximadamente 26% de participação. Juntas, África e Oceania somam menos de 2% (FIEPR - 2016).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Figura 3: Participação (%) do mercado na produção mundial de papel, segundo as grandes regiões produtoras - 2015.

Bem como na produção, 10 países se responsabilizaram pela maior parte das exportações mundiais de papel em 2015, que movimentaram juntos mais de 73 milhões de toneladas de papel, um representativo de 67% do total exportado (Gráfico 16).



Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 16: Exportações de papel nos dez maiores países produtores – 2015 (em milhões de toneladas).

Ao se dividir o mercado de papel, segundo as diferentes categorias, verifica-se que os papéis para embalagem representam 56% da produção total de papel, seguido

pela produção de papel para imprimir e escrever, que responde por 25% (Gráfico 17).

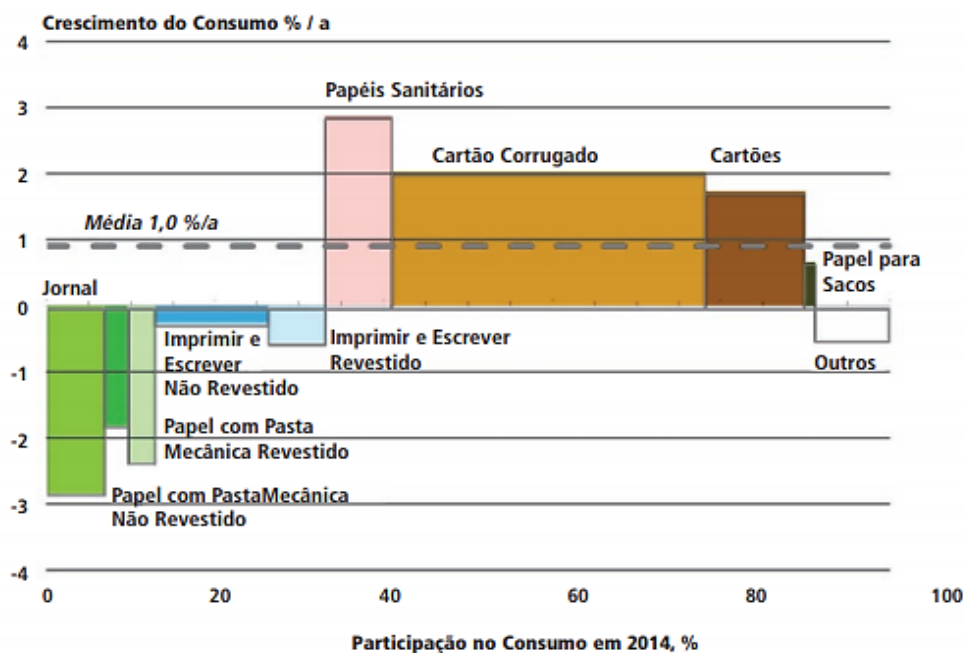


Fonte: GEDF-CD/FIEP (2016) a partir dos dados da FAO (2016)

Gráfico 17: Produção mundial de papel, por tipo de papel produzido, participação (%) 2015.

## Tendências mundiais do mercado de papel

O Gráfico 18 mostra a evolução do consumo de papéis em nível global por região. A demanda global de papéis e cartões deve crescer a uma taxa de cerca de 1,0% ao ano, devendo chegar em 467 milhões de toneladas no ano de 2030. Os mercados desenvolvidos deverão manter a tendência de decréscimo de consumo a uma taxa de -0,9% ao ano (Guia ABTCP – 2016/2017).



Fonte: Guia ABTCP (2016/2017)

Gráfico 18: Crescimento do consumo de papéis e cartões por tipo (2014-2030).

Vale ressaltar que o consumo na China, que vem se mostrando como a principal para o crescimento da demanda global, subindo 2,4% por ano entre 2010 e 2014, começa a apresentar uma evolução cada vez mais parecida com as verificadas nas regiões desenvolvidas, devendo atingir a maturidade por volta da década de 2020 (Guia ABTCP – 2016/2017).

## Recicladores de papel

A reciclagem de papel é muito importante na procura pela sustentabilidade. Uma tonelada de aparas pode evitar o corte de 10 a 12 árvores oriundas de reflorestamentos e o uso de aparas para reciclar, fazendo com que se economize os insumos, como exemplo a água utilizada na produção a partir da celulose (Portal Resíduos Sólidos - 2017).

No Brasil, é estimado um gasto de 2 toneladas de madeira (o que equivale a quinze árvores) para fabricar 1 tonelada de papéis corrugados, além de 44 a 100 mil litros de água e de 5 a 7,6 mil KW de energia elétrica. Para se produzir essa mesma quantidade de papel, são gerados, ainda, 18 Kg de poluentes orgânicos que são descartados nos efluentes e 88 Kg de resíduos sólidos. Os poluentes são compostos por fibras, breu (material insolúvel) e celulose (de difícil degradação). Já para reciclar o papel no Brasil, é usado um volume de 2 mil litros de água e o consumo de energia elétrica diminui para 2,5 mil kW.

Portanto, reciclar o papel ao invés de produzi-lo através da celulose pode ser uma opção mais viável com relação a redução do consumo de energia, da emissão de gases poluentes e do papel descartado como resíduo sólido (Portal Resíduos Sólidos - 2017). O papel reciclado deve continuar tendo um maior crescimento. O consumo desse tipo de papel deverá aumentar com uma taxa aproximada de 1,5% a.a. até o ano de 2030, e sua participação no consumo mundial de fibras para papel deverá passar do valor de 57% no ano de 2014 para um valor de 60% no ano de 2030 (Portal Resíduos Sólidos - 2017). Na tabela abaixo pode-se observar considerável quantia de consumo de aparas em relação ao papel produzido:

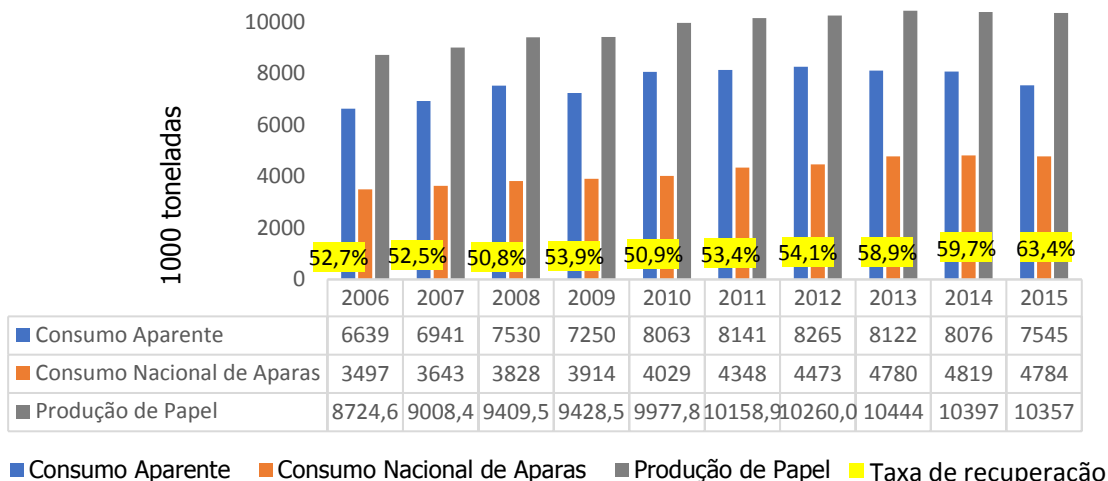
Ano	Consumo de Aparas		Produção de Papel	
	mil t	%	mil t	%
2000	2611,8	-	7200,1	-
2001	2777	6,3%	7437,8	3,3%
2002	3017,4	8,7%	7773,9	4,5%
2003	3004,7	-0,4%	7915,5	1,8%
2004	3360,2	11,8%	8452,4	6,8%
2005	3437,8	2,3%	8597,3	1,7%
2006	3496,5	1,7%	8724,6	1,5%
2007	3642,5	4,2%	9008,4	3,3%
2008	3827,9	5,1%	9409,5	4,5%
2009	3914,4	2,3%	9428,5	0,2%
2010	4028,6	2,9%	9977,8	5,8%
2011	4347,5	7,9%	10158,9	1,8%
2012	4362,7	0,3%	10260,0	1,0%
2013	4780	9,6%	10444	1,8%
2014	4818,5	0,8%	10397	-0,5%
2015	4784	-0,7%	10357	-0,4%

Fonte: Relatório estatístico anual – ANAP 2015/2016

Tabela 3: Consumo de aparas em relação ao papel produzido – 2015



Quando analisamos o consumo aparente (que é a produção menos as exportações, mais as importações de papéis, que podem realmente ser reciclados), não levando em conta os papéis de fins sanitários e especiais (que, por sua natureza e uso, não podem ser reutilizados), chega-se a uma taxa de recuperação de 63,4% da produção de papel no Brasil em 2015 (ANAP - 2015/2016).

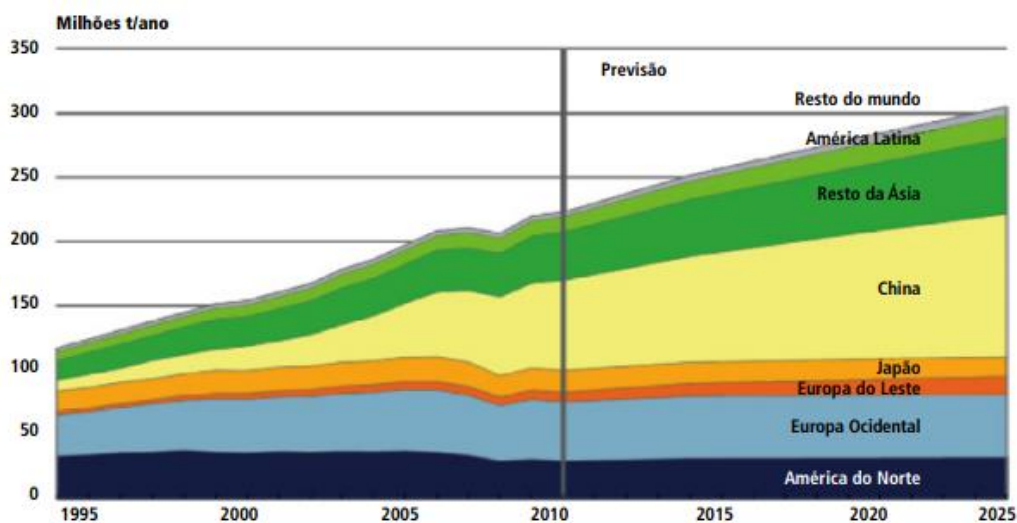


Fonte: Relatório estatístico anual – ANAP 2015/2016  
Gráfico 19: Evolução da taxa de recuperação de papéis – 2015

## Tendências mundiais do mercado de recicladores de papel

As aparas são a principal matéria-prima para se produzir o papel reciclado, e irá continuar sendo no futuro. O consumo de aparas no mundo crescerá aproximadamente 2,3% a.a. no longo prazo, devendo atingir em torno de 230 milhões de toneladas em 2025. A sua maior utilização deverá acontecer na Ásia, seguindo a mesma tendência do consumo de papel. A celulose kraft de fibra curta (BHKP), principalmente de eucalipto, deve aumentar sua participação (Guia ABTCP - 2016/2017).

Os países em desenvolvimento, dependem muito do fornecimento de aparas, sendo boa parte importada dos países desenvolvidos, principalmente da América do Norte e da Europa, cada vez mais escassas e de pior qualidade. Essa escassez intensifica o uso de fibra virgem, com grande importância para celulose kraft de eucalipto branqueada (BEKP).



Fonte: Guia ABTCP (2016/2017)

Gráfico 20: Consumo de papel reciclado por região até 2015 – milhões t/ano

## b. Informação do consumo de energia no segmento de celulose e papel e sua participação na demanda industrial

Em 2016, a indústria de papel e celulose foi responsável por 14,7 % do consumo energético industrial, e o segmento da cadeia de papel e celulose foi responsável por 4,8 % do consumo energético total do País, revelando a marcante característica eletrointensiva desta indústria, sendo responsável por 21,93% do consumo final de energia elétrica do setor industrial brasileiro, algo em torno de 18.284 GWh. Esse setor é marcante por ser responsável a gerar grande parte da energia elétrica consumida, sendo responsável por 48,1% da energia total autoproduzida em todo segmento industrial brasileiro, algo em torno de 11.639 GWh (EPE – 2017/2026).

O consumo de energia é diferente nos subsegmentos integrantes da cadeia de papel e celulose.

Segundo o estudo aqui presente, o subsegmento de celulose tem um consumo específico elétrico médio calculado de 0,061 tep/ton, e o consumo específico térmico médio calculado na ordem de 0,373 tep/ton. As principais fontes de energia térmica e elétrica utilizadas são originárias de **biomassa/lixívia**. A lixívia é consumida na caldeira de recuperação e a lenha na caldeira de força, onde juntas geram vapor em alta pressão que alimenta turbogeradores para geração de eletricidade. Outra parcela da energia desses energéticos é consumida em forma de vapor de baixa pressão nas etapas de: cozimento, branqueamento, evaporação do licor negro e nos processos de secagem. Outro energético utilizado é o óleo combustível destinado ao aquecimento direto na etapa de calcinação. Foi constatado que algumas empresas utilizam gás natural para acionamento das caldeiras.

Já na análise de plantas integradas de celulose e papel, o consumo específico será apresentado por tipo de produto final a seguir, e seu consumo. A principal fonte de energia térmica utilizada é a biomassa originária de lixívia e lenha que possuem a mesma finalidade das plantas de celulose, como também óleo combustível na etapa de calcinação. Algumas empresas usam gás natural e GLP para acionamento das caldeiras. (Capítulo 5.b)

O subsegmento de produção de papel utiliza em todos os processos acionamento por força motriz, e o consumo específico elétrico será apresentado no capítulo a seguir por tipo de produto final. O consumo térmico é impulsionado pela a etapa de secagem do papel, e o consumo específico térmico será apresentado no capítulo a seguir por tipo de produto final. (Capítulo 5.c)

O processo de reciclagem de papel tem consumo específico elétrico médio calculado de 0,047 tep/ton e consumo específico térmico médio calculado de 0,121 tep/ton.

### **c. Indicadores que serão quantificados a partir da análise da realidade brasileira atual**

Os indicadores energéticos são uma ferramenta importante para analisar interações entre a atividade econômica e humana, o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Os indicadores que serão quantificados neste estudo serão:

#### **Consumo específico**

Para cada equipamento, planta ou instalação caracterizada por um parâmetro de atividade único, pode-se calcular o consumo específico de energia como o cociente entre o consumo final de energia da instalação e cada unidade de cada atividade. Mede-se em (unidades de energia)/(unidades de produção), por exemplo [GJ/tonelada] ou [kWh/tonelada].

O consumo específico é característico da tecnologia de produção, só muda no caso em que as instalações perdem ou ganham eficiência por modificação nas condições de operação ou manutenção, assim como em caso de mudança das tecnologias de processo por outras de maior eficiência.

#### **Rendimento energético**

A relação entre a quantidade de energia útil e a energia fornecida é o chamado rendimento energético de uma máquina. Se uma máquina tem um alto rendimento, significa que ela possui poucas perdas de energia, enquanto se uma máquina possui um rendimento baixo, significa que ela tem grande perda de energia.

O conceito de rendimento energético adotado neste estudo se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo. Esta simplificação facilita a determinação dos rendimentos energéticos de equipamentos em uso e introduz algumas distorções quanto ao significado das perdas energéticas estimadas pelo estudo (BEU, 2005).

Ao usar esse conceito, o modelo não vai estimar todas as perdas do processo produtivo. As perdas reais serão sempre maiores do que as estimadas, portanto, as possibilidades reais de economia de energia serão maiores que as estimadas através do modelo (BEU, 2005).

Outra questão que se levanta é a de que o rendimento estimado deve retratar a média dos rendimentos de transformação de uma forma de energia final para um dado uso final dentro de um setor de atividade.

### **Coeficiente de destinação**

Os coeficientes de destinação fazem referência às porcentagens de energia que são destinadas a cada uso final de energia (BEU, 2005):

- Força motriz: energia usada em motores estacionários ou de veículos de transporte, individual ou coletivo, de carga, tratores, etc.
- Calor de Processo: Energia usada em caldeiras e aquecedores de água e fluidos térmicos.
- Aquecimento Direto: Energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e micro-ondas.
- Refrigeração: energia usada em geladeiras, freezers, equipamentos de refrigeração e ar condicionado, tanto de ciclo de compressão como de absorção.
- Iluminação: energia usada em iluminação de interiores e externa.
- Eletroquímica: Energia usada em células eletrolíticas, processos de galvanoplastia, eletroforese e eletrodeposição.
- Outros usos: energia usada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de controle.

Os coeficientes são coletados por meio de entrevistas a empresas, pesquisas junto a fornecedores de equipamentos, programas de governo e outras bases de dados. O Coeficiente de Destinação de uma determinada forma de energia final é impactado por mudanças estruturais nos padrões de consumo da sociedade. O Coeficiente de Eficiência Energética de um determinado equipamento expressa seu rendimento na transformação da energia final em algum uso final, e é impactado por alterações tecnológicas e culturais.

### 3. DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS PRODUTIVOS PRINCIPAIS DO SEGMENTO INDUSTRIAL

A celulose é uma substância presente na maioria dos vegetais, e suas moléculas agrupadas através da lignina, têm a função de ser o componente principal da parede celular dessas plantas. A fibra de celulose é insolúvel em água e somente se dissolve em ácidos minerais concentrados, alguns hidróxidos e algumas soluções de sais.

A celulose é amplamente utilizada na produção de papel, que é o produto oriundo de um processo com múltiplos estágios, que começa com a produção de cavacos, seguido da produção de celulose, o processo continua na formação da folha, adição de aditivos químicos e secagem, para pôr fim adquirir as características de consumo.

As fibras de celulose também são utilizadas na fabricação de certos tipos de plásticos, vernizes, filmes, seda artificial e diversos produtos químicos.

#### a. Processos de produção principais do subsegmento de celulose

##### Plantio e Colheita

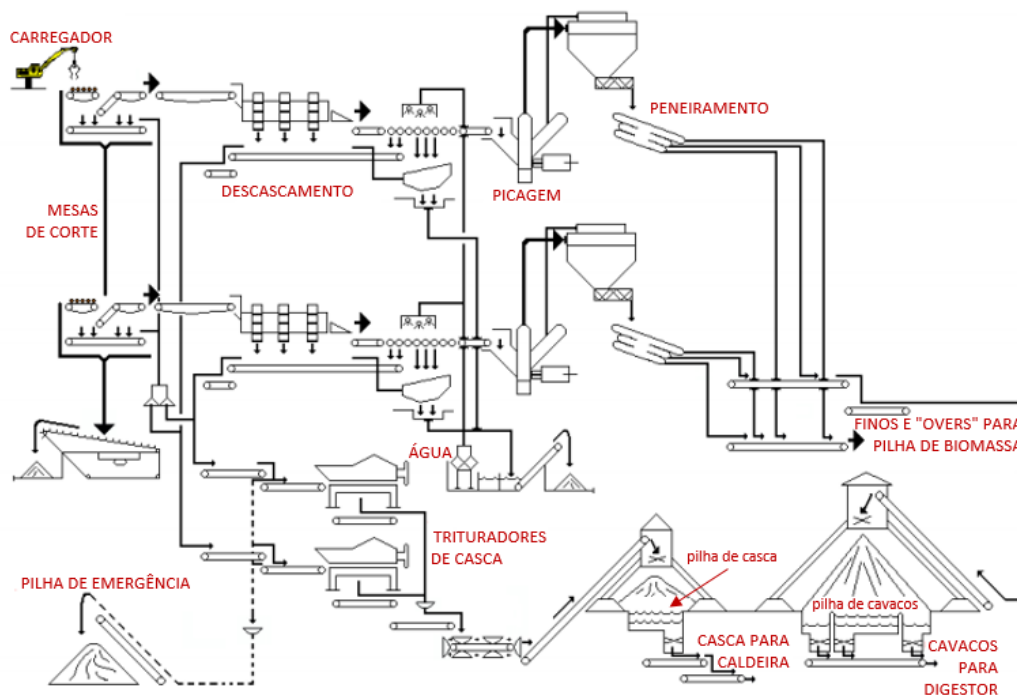
O plantio é feito principalmente em áreas de reflorestamento e a colheita do produto florestal, ocorre entre 6 e 15 anos após o plantio (EMBRAPA, s.d). Nesta área florestal, as toras de madeira são cortadas em tamanhos apropriados e transportadas para a fábrica. Além disso, os resíduos da floresta são devolvidos diretamente para o solo da plantação, contribuindo para a reciclagem de nutrientes.

Na área florestal, o ganho de competitividade passa pela adoção de modernas práticas silviculturais e de um programa intenso de pesquisa. Nesta etapa, são utilizadas as mais modernas tecnologias de plantio, colheita, armazenamento e transporte, com um sistema totalmente mecanizado na sua maioria.

##### Produção de cavaco

Linha de produção onde as toras são lavadas, picadas em tamanho pré-estabelecido e peneiradas. Na saída do picador segue, via esteira transportadora, até uma série de peneiras vibratórias, que fazem a seleção e separam os materiais que apresentam tamanho adequado para cozimento. Depois disso os cavacos costumam ser armazenados em locais fechados, como silos.

Os produtos gerados no corte da lenha, cavacos menores e as cascas das toras, que não são utilizados na produção da celulose são recuperados e utilizados como combustível para produzir parte do vapor e eletricidade nas plantas de celulose requerida para o funcionamento da fábrica.



Fonte: UFPR – DETF (s.d.)

Figura 4: Esquema de produção de cavaco

## Produção de Polpa de celulose

A madeira é feita principalmente de fibras celulósicas aderidas umas às outras com uma "cola" chamada lignina. Para converter madeira em polpa, se deve separar estas fibras, ou seja, remover a lignina. Existem duas maneiras de romper as ligações na madeira e liberar as fibras:

- Processo Mecânico
- Processo Químico

- **Processo mecânico:** Utiliza predominantemente energia mecânica, com pouca ou nenhuma substância química. Esse processo se divide em:
  - *Desfibramento:* toretes de madeira são forçados contra uma pedra em revolução que possui superfície abrasiva. (Processo mecânico convencional).

- *Refinação:* Um avanço, mais recente, na produção mecânica, os cavacos de madeira são lançados entre dois discos metálicos de superfícies abrasivas, sendo que um deles em revolução. (Processo Mecânico de Refinador)

O consumo de energia elétrica para produzir uma tonelada de polpa é significativamente maior no primeiro caso.

A celulose que resulta desse processo é conhecida como pasta de alto rendimento e possui um elevado teor de lignina e, por isso, tende a amarelar mais rápido. Devido a essa característica, a celulose mecânica é considerada um bem de

qualidade menor e é utilizada para a fabricação de papéis menos nobres, como o papel de imprensa.

- **Processo Químico:** Esse processo é muito utilizado na indústria de celulose e papel com a utilização de produtos químicos e calor para dissolver a lignina. A celulose permanece quase intacta e uma fração de polioses permanece na polpa. O equipamento mais utilizado no processo químico de produção de pastas de celulose é um recipiente aquecido e pressurizado que se chama digestor, no qual os cavacos de madeira são inseridos, junto com produtos químicos.

- **Cozimento:** Consiste em submeter os cavacos de madeira a uma ação química do licor branco forte e do vapor d'água no digestor a fim de dissociar a lignina entre a fibra e a madeira. Esse processo pode ocorrer em dois meios: alcalino (Kraft e Soda) e ácido (Sulfito) e tem como principais processos:

- Kraft ou Sulfato ( $\text{NaOH}$  e  $\text{Na}_2\text{S}$ ) ou Soda ( $\text{NaOH}$ )
- Sulfito ( $\text{SO}_2$  e bases :  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NH}_4(\text{OH})$ )

**Processo alcalino:** No processo de polpação alcalina, também denominado de kraft ou sulfato, os cavacos de madeira são digeridos em solução química, sob uma pressão de 6,8 a 9,2 atm, temperatura de 170 a 177° C, durante 2 a 5 h, podendo ser aplicado a uma grande variedade de espécies de madeira. Após a reação, os produtos de hidrólise da lignina e das hemiceluloses, assim como os extraíveis, permanecem em solução, formando o que é denominado de licor negro (Rev. Virtual Quim. - 2017).

**Processo Sulfito:** No processo de polpação ácido, os cavacos de madeira são digeridos em uma mistura de ácido sulfuroso e íons bissulfito a uma pressão de 6,1 a 7,5 atm, a uma temperatura de 125 a 160° C por um período de 6 a 12 h. A polpa obtida nesse processo é muito utilizada para a produção de papéis brancos (Rev. Virtual Quim. - 2017).

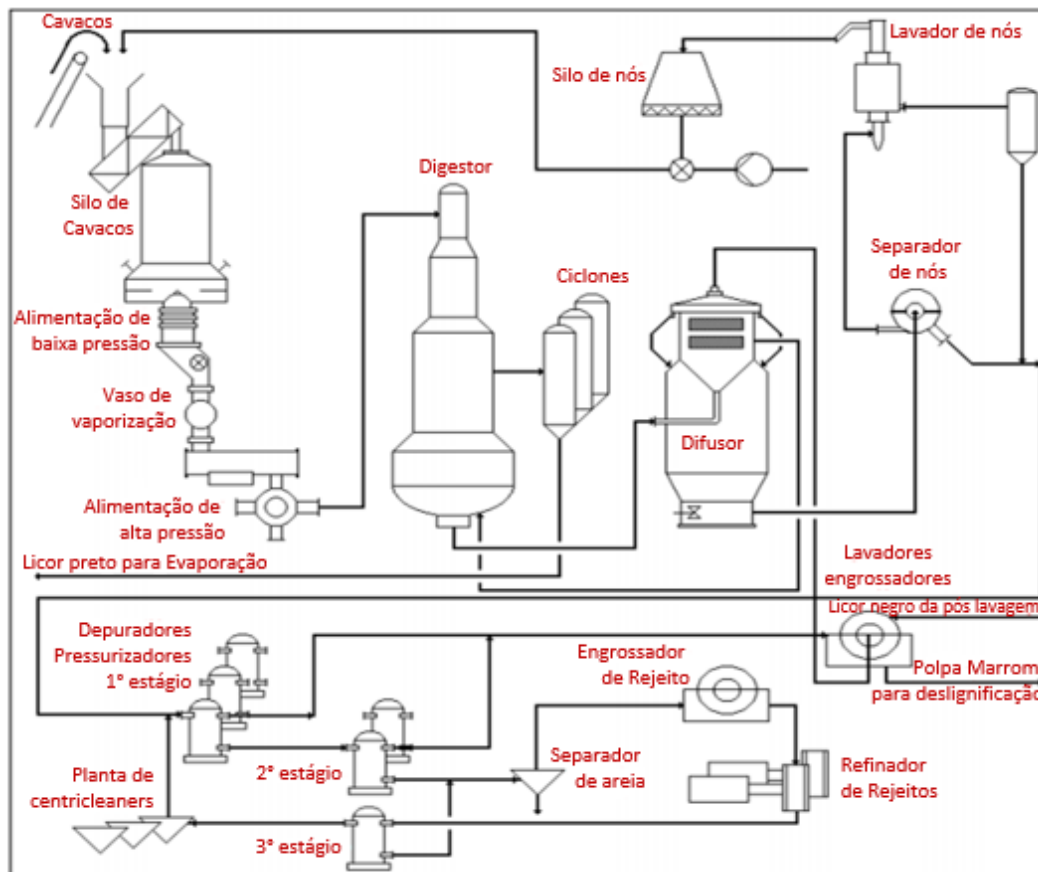
Dentro do biodigestor realiza-se também uma operação de lavagem sendo que em seguida a celulose é submetida a outra operação de lavagem nos difusores para então ser depurada.

- **Lavagem**

Após cozimento, a pasta vai para lavagem com o objetivo de remover a máxima quantidade de materiais misturados na polpa durante o cozimento. As tecnologias encontradas nessa etapa são: filtros rotativos especiais operados em série, com lavagem em contracorrente ou um tanque de descarga que pode ser de fundo cônico ou de fundo chato.

### - Depuração

Após a série de lavagem a pasta vai aos depuradores centrífugos (peneiras finas) e serve para separar pedaços de cavacos que não foram devidamente desfibrados.



Fonte: UFPR – DETF (s.d.)

Figura 5: Esquema de cozimento e depuração no processo químico

### - Branqueamento

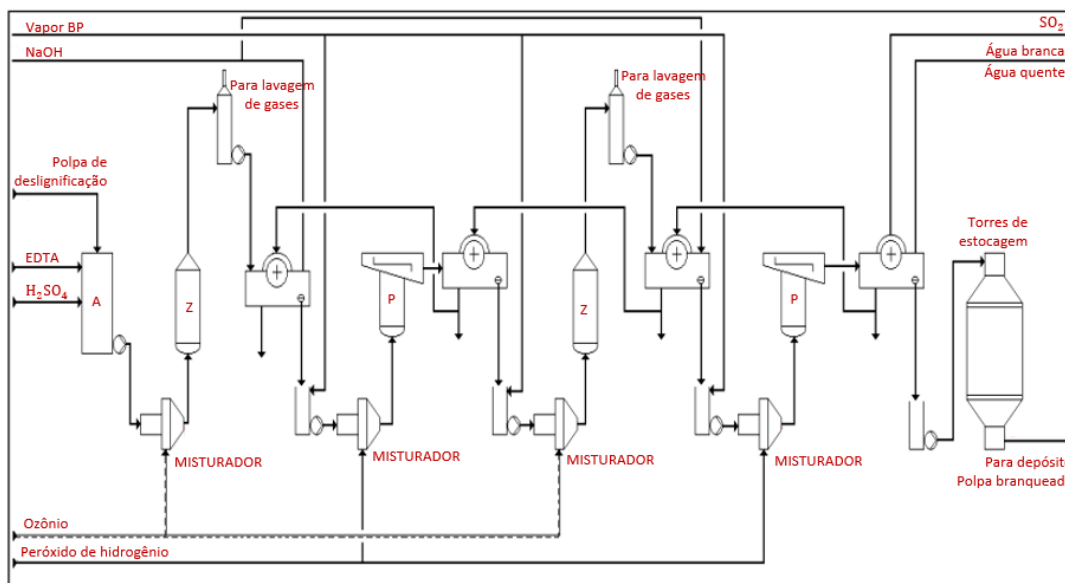
A celulose é então encaminhada para o branqueamento ou então, para fabricação de papel Kraft. O branqueamento tem como objetivo deixar a celulose em sua cor natural por meio de tratamento químico ou pelo tratamento enzimático. Esse processo obedece 3 etapas:

- (I) a deslignificação, realizada por oxidantes como cloro, oxigênio, entre outros;
- (II) um tratamento cáustico, para remoção das cloroligninas solúveis em álcalis;
- (III) o branqueamento propriamente dito, efetuado por agentes fortemente oxidantes, como o cloro, hipocloritos, peróxidos, dióxidos de cloro, etc.

Nos últimos anos, os consumidores de celulose, especialmente na Europa, têm preferido a celulose que é branqueada com pouco ou sem compostos de cloro, devido a preocupações ambientais relacionadas ao processo de branqueamento.



Todas as fases no processo de produção de celulose que reduziram as quantidades de cloro criam efluentes, que são enviados para uma estação de tratamento de efluente, onde aproximadamente 90% da carga orgânica é removida (FIBRIA – s.d.).



Fonte: UFPR – DETF (s.d.)

Figura 6: Esquema de branqueamento por processo livre de cloro (TCF)

#### - Secagem

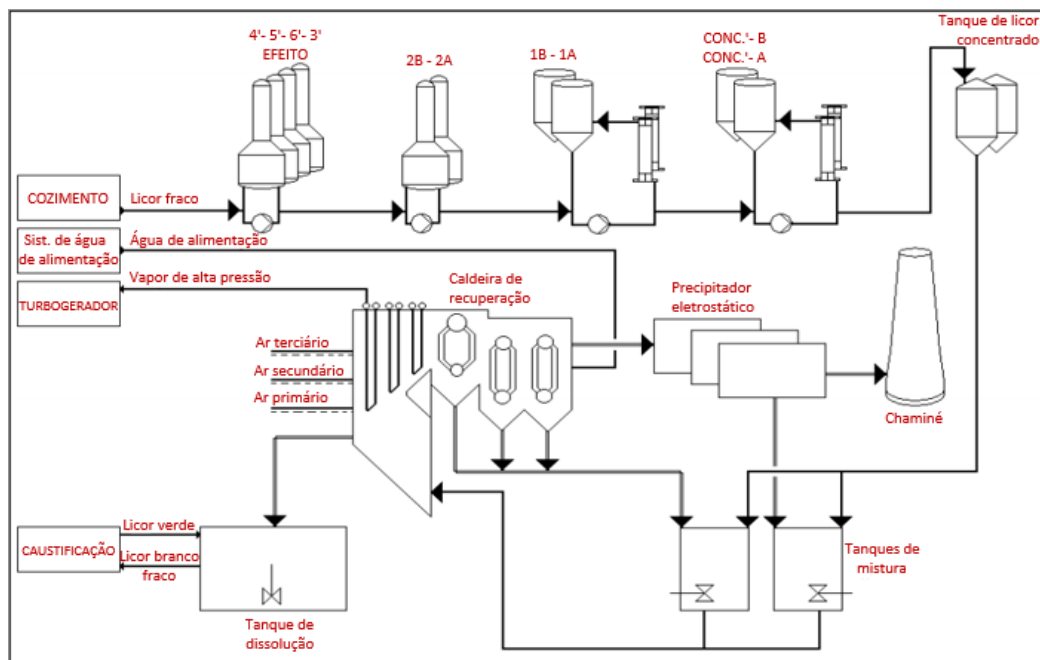
Quando se trata de venda a terceiros, a celulose é filtrada, pressionada e enviada para a etapa de secagem, e pode ser de dois tipos:

- Utilizando uma máquina tipo *fourdrinier*, para drenagem e posterior secagem convencional, com secadores à vapor ou ar quente;
- Sistema *flash drying*, que consiste em secar a celulose com ar quente, contracorrente e posteriormente prensá-la em blocos.

Por fim, a celulose seca é cortada em folhas e embalada, resultando na celulose de mercado.

#### - Recuperação Do Licor de Cozimento

Na lavagem da celulose é obtido um líquido escuro com aproximadamente 15% de sólidos totais, rico em compostos de sódio e matéria orgânica, denominado licor negro. Parte deste licor retorna ao digestor para completar volume em um novo cozimento e parte é encaminhada à recuperação (UFPR – DETF, s.d.). O processo de recuperação química é fundamental nas modernas fábricas de celulose, pois permite o reaproveitamento dos produtos químicos utilizados no cozimento da madeira.



Fonte: UFPR – DETF (s.d.)

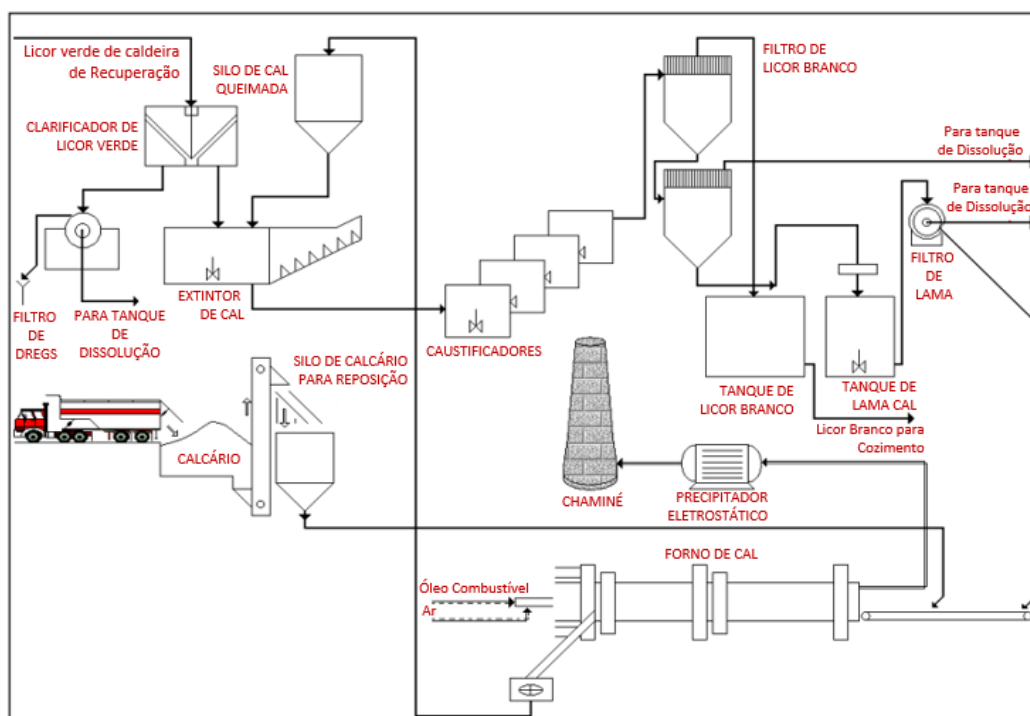
Figura 7: Esquema do sistema de recuperação do processo kraft, incluindo evaporadores, caldeira de recuperação e caustificação

Na evaporação, o licor negro formado no digestor é constituído pelos materiais dissolvidos que resultam da solubilização da lignina e pelos químicos que são utilizados no tratamento. Esse licor possui um teor de sólidos, porém o seu principal componente é a água. A evaporação reduz esse teor de água e libera voláteis da fase líquida: compostos de enxofre, terebentina e metanol.

Já na queima do Licor na Caldeira de Recuperação e Dissolução dos Sais Fundidos existem as seguintes etapas:

- Converter o sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) presente no licor negro a sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), que é um dos agentes ativos na produção de celulose pelo processo Kraft;
- Gerar vapor por meio da queima dos compostos orgânicos presentes no licor negro;
- Recuperar parte de um subproduto (licor negro) da produção de celulose que é gerado no digestor, a fim de reduzir o problema de descarte deste material e, ao mesmo tempo, funcionar como incinerador de compostos indesejáveis para a rota produtiva de celulose.

A caustificação tem a finalidade de converter o licor verde em licor branco (de cozimento), que é utilizado na etapa de cozimento no digestor. Essa conversão é obtida através da adição de cal ao licor verde, que após reações químicas gera carbonato e cálcio.



Fonte: UFPR – DETF (s.d.)

Figura 8: Esquema Das Etapas De Caustificação E Do Forno De Cal

## b. Processos de produção principais do subsegmento produção de papel

Embora os diversos tipos de papéis se diferenciem segundo suas especificações físicas e químicas e formas de acabamento, as principais etapas da produção do papel após a obtenção da celulose são as mesmas etapas básicas, resumidas a seguir:

### Desagregação

A desagregação (*pulper*) é a primeira etapa do sistema de preparo de massa, onde a celulose em folhas ou blocos são fragmentados e hidratados. Esse equipamento é um grande batedor com um rotor ao centro que faz com que a massa se movimente, e com isto se fragmente até que suas fibras sejam individualizadas.

### Refinação

A pasta de celulose precisa ser refinada depois da desagregação. Onde as fibras de celulose são submetidas a uma reação de corte, esmagamento ou fibrilação, então a celulose vai para os refinadores onde ocorre o aumento do nível de resistência das fibras e, assim, são produzidos tipos específicos de papel. Os refinadores são equipamentos que podem ser cônicos e/ou discos. O processo de

refinação (corte, fibrilação e hidratação) ocorre quando o rotor trabalha pressionando o estator e a celulose passa entre eles.

## Preparação da Receita

Certos materiais são então adicionados à celulose refinada para fortalecer e melhorar a qualidade do papel. Esses aditivos incluem cola sintética e carbonato de cálcio precipitado (o processo alcalino).

## Depuração

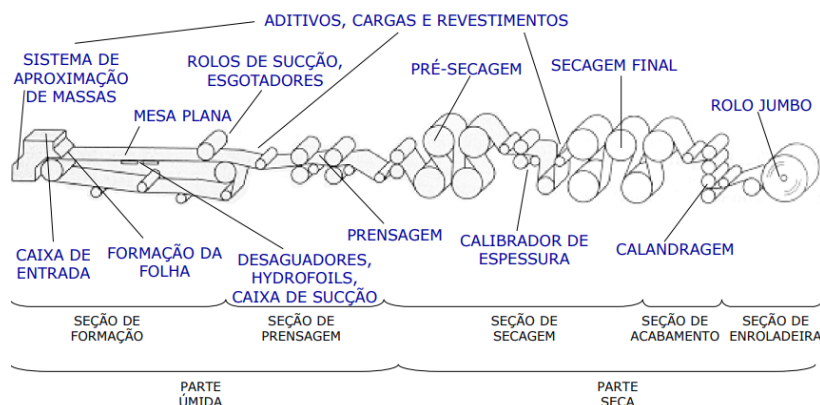
Depuração é processo de limpeza da mistura de pasta com os outros componentes da receita. Onde ocorre a retirada de corpos estranhos, contaminantes ou fibras enroladas que não são desejáveis para a aparência e finalidade da folha de papel. Os depuradores centrífugos ou ciclones e os depuradores verticais são os sistemas de depuração mais conhecidos.

- Depuradores centrífugos: São cones, onde a suspensão de fibras entra tangencialmente sob pressão gerando um movimento de rotação interna (vórtice). Isso gera uma força centrífuga que retira todas as impurezas ou contaminantes mais pesados que as fibras, por diferença de densidade.
- Depuradores verticais: São formados por uma carcaça cilíndrica vertical, onde existe uma peneira perfurada, no interior, que retém todos os corpos estranhos e fibras enroladas, passando somente a massa.

## Máquina de Papel

A mistura é bombeada para a máquina de papel, onde o papel é pressionado e secado. Finalmente, o papel resultante é enviado para ser terminado de acordo com as especificações do cliente. A máquina de papel segue as seguintes etapas, conforme a figura abaixo:

A 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.



Fonte: UFPR – DETF (s.d.)

Figura 9: Esquema Das Etapas da Máquina de papel

#### - Caixa de Entrada

A caixa de entrada é um compartimento onde a folha de papel é formada e tem a função de distribuir a suspensão de fibras sobre a tela, o mais uniformemente possível, como uma lâmina contínua.

#### - Mesa Plana

Mesa plana é a parte onde a folha é formada. É constituída por uma mesa com suporte e colunas de aço, sobre a qual corre a tela formadora, apoiada sobre os elementos de drenagem, rolo de cabeça, rolo de sucção e rolos guia. A tela formadora é feita de plástico ou metal (bronze fosforoso ou aço inox) e tem a malha bastante fechada (80 *mesh* para papéis grossos e 100 *mesh* para papéis finos). As fibras ficam retidas na superfície e a água passa através da tela, caindo em calhas apropriadas. Esta água, rica em partículas de fibras e cargas, é recirculada para diluir a massa e realimentar a máquina. Os elementos de drenagem (cilindros esgotadores, lâminas foi, caixas de sucção), além de apoiar a tela, ajudam a retirar a água em suspensão (RENOVA – s.d.).

#### - Prensas

Quando sai da mesa plana, a folha de papel já está formada, porém 80 a 85 % de sua constituição ainda é pura água. As prensas têm a finalidade de retirar parte dessa água (RENOVA – s.d.).

Dois rolos cilíndricos formam a prensa, sendo o inferior de borracha ou ebonite e o superior, de material mais duro como granito ou microrock.

As máquinas de papel têm, geralmente, duas ou três prensas. As prensas trabalham com feltro especial, agulhado, que serve para apoio e condução da folha. O papel e o feltro são prensados no ponto de encontro entre os dois rolos. A água que existe no papel é transferida, então, para o feltro.

Saindo das prensas para a fase seguinte do processo (secagem), a folha de papel ainda contém 60 a 65 % de água. Em algumas máquinas, com determinados tipos de papel, pode-se chegar a 50 - 55 % (RENOVA – s.d.).

#### - *Secagem*

A secagem é o lugar onde ocorre a secagem final da folha e é realizada a cura das resinas adicionadas.

A secagem é composta por diversos cilindros secadores. O número de secadores depende do tipo e do tamanho da máquina. Esses são cilindros de aço com superfície polida e trabalham com pressão de vapor. Utilizam-se feltros ou telas secadoras, entre os cilindros secadores, para que a folha seja conduzida. A água evaporada do papel é retirada por campânulas especiais. A umidade da folha, ao deixar a secagem, varia de 3 a 8 % (RENOVA – s.d.).

#### - *Calandra e Enroladeira*

A calandra é utilizada para acertar a espessura e lisura do papel. Já na enroladeira, a folha contínua de papel é bobinada até um determinado diâmetro, e parte para vários processos de acabamentos.

### **c. Processos de produção principais das plantas integradas de celulose e papel**

Nas plantas integradas, os processos de produção da celulose a partir da madeira e de produção de papel a partir da celulose, formam um único grande processo com pequenos detalhes de mudança se comparados aos dois processos descritos em separado. Resumindo essas etapas, temos:

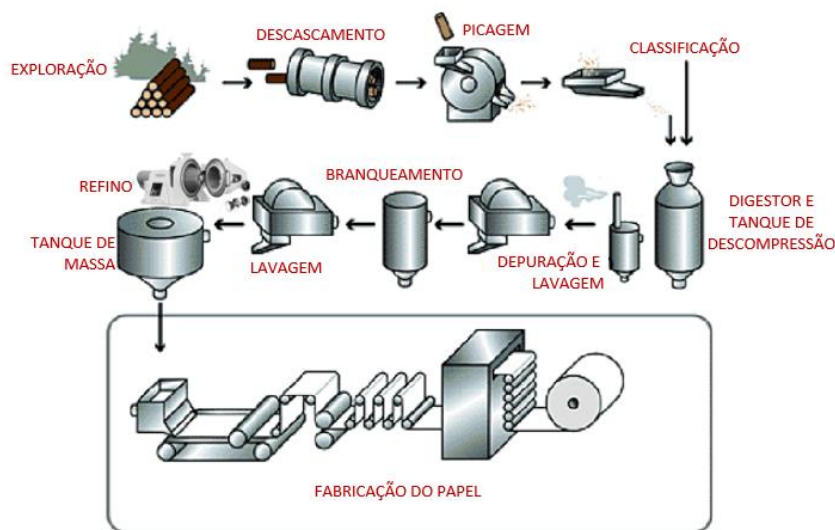
A madeira passa pelo cilindro descascador e em seguida as toras passam por um moinho, onde são reduzidas de tamanho (UFPR – DETF, s.d.).

Depois as fibras são separadas cozinhando a madeira com produtos químicos para dissolver a lignina, então os cavacos e produtos químicos permanecem sob pressão até que a mistura seja reduzida a uma pasta de celulose com coloração escura, aí então ela é lavada para remover os produtos químicos e passa por um processo de branqueamento (UFPR – DETF, s.d.).

A celulose pasta já vem em suspensão e é armazenada em tanques de distribuição de massa e então segue para máquina de papel, adicionando aditivos e água, em seguida é pulverizada em uma tela formadora de folha (UFPR – DETF, s.d.).

Com a máquina rodando em alta velocidade, o papel é pressionado entre telas e a água absorvida em cilindros secadores, após a secagem, o papel atravessa um processo de prensagem e alisamento para retirar o excesso de umidade da folha, alisar sua superfície e controlar a espessura (UFPR – DETF, s.d.).

Finalmente o papel sai da calandra e vai para a enroladeira, onde a folha é transformada em um grande rolo de papel, em seguida cortada em tamanhos pré-determinados (UFPR – DETF, s.d.).



Fonte: UFPR – DETF (s.d.)

Figura 10: Esquema Das Etapas de produção

Quando a fábrica é integrada a pasta já vem em suspensão e é armazenada em tanques de distribuição de massa, ganhando um ganho térmico, já que não há a etapa de secagem da celulose.

#### d. Processos de produção principais do subsegmento de recicladores de papel

##### Coleta Seletiva

Todo o processo de reciclagem do papel se inicia na coleta seletiva, onde se é evitado a sua contaminação, contribuindo para um menor gasto econômico no restante do processo e consequentemente aumentando seu valor.

##### Triagem

Após a coleta, o papel sofre uma seleção rigorosa, inicialmente retirando matérias perigosas para o equipamento ou processo (metais, vidros). Depois resíduos que normalmente vêm junto com o papel, como grampos, cliques, elásticos. Então são retirados materiais impróprios, como papéis sulfurizados, encerados ou parafinados). A eficiência desta operação será determinante para a futura formação dos lotes.

##### Classificação

A classificação do papel usado é feita em função da sua qualidade, origem e presença de matérias toleradas. Por exemplo, papéis muito impregnados

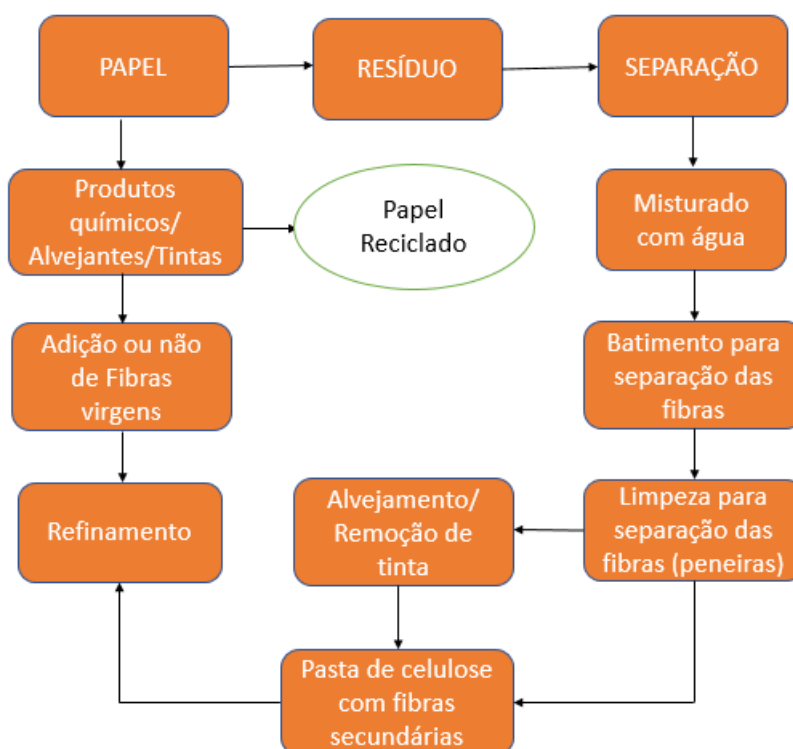
de tintas e vernizes (capas de revista e cartões de visita) têm menos valor que papéis de escritório.

### Trituração

Esta operação consiste na fragmentação, em dimensões pré-determinadas, de alguns lotes de papel, como revistas, jornais e aparas.

As operações finais do processo correspondem ao enfardamento e a venda do papel usado as indústrias de reciclagem, que farão a sua transformação em papel pronto para ser reutilizado.

O processo industrial de transformação de papel usado é semelhante ao de papel virgem, conforme se nota no fluxograma abaixo:



Fonte: Portal Resíduos Sólidos (2017)

Figura 11: Esquema Das Etapas De Recicladores de papel

A reciclagem do papel é conseguida através do reaproveitamento das fibras de celulose existentes nos papéis usados. O papel pode ser fabricado exclusivamente com fibras secundárias (papel 100% reciclado) ou ter a incorporação de pasta para papel. As fibras podem ser recicladas de cinco a sete vezes. A degradação das fibras implica na adição de alguma porcentagem de pasta de papel virgem para manter a qualidade.



As fases mais importantes em relação ao consumo energético do processo industrial de reciclagem de papel são: desagregação, depuração e lavagem, dispersão, destintagem, branqueamento e refino.

### **Desagregação ou maceração**

Mistura do papel velho com água, de modo a enfraquecer as ligações entre as fibras.

### **Depuração e lavagem**

Têm como objetivo eliminar os contaminantes. O processo é semelhante a peneirar o papel, com peneiras cada vez mais menores.

### **Dispersão**

São utilizadas temperaturas de 50°C a 125°C para dissolver os contaminantes, que são depois dispersos (Revista Florestal – 1996).

### **Branqueamento**

Para a maioria dos produtos reciclados, a destintagem é suficiente para obter um grau de brancura adequado. Se o intuito for obter produtos de alta qualidade, pode ser feito um branqueamento à base de alvejantes.

### **Refino (opcional)**

De modo a conseguir uma maior resistência do produto, às vezes é necessário “abrir” e reorientar as fibras de celulose, melhorando sua ligação (efeito de entrelaçamento). Isso é feito no equipamento denominado refinador ou “despastilhador”, composto de dois discos face a face que giram em sentidos opostos, aplicando determinada tensão de cisalhamento à massa.

## 4. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA NO ESTUDO

### a. Seleção da amostra da pesquisa

Na primeira análise, para proceder à seleção das amostras significativas para a pesquisa, se estabeleceram subsegmentos dentro de celulose e papel resultando na seguinte divisão, cujos processos de produção principais já foram descritos anteriormente:

- Produção de Celulose;
- Plantas integradas de Celulose e Papel;
- Produção de Papel;
- Recicladores de Papel.

Em sequência, se estabeleceu um universo de 61 empresas que, atualmente, estão produzindo papel e/ou celulose, tomando como base a informação disponível na Associação Brasileira de Arvores – IBÁ. Com isso, foram coletados dados de produção e dados de consumo de energia de **17 empresas**, que foram escolhidas para o estudo dentre esse universo.

PLANTA	Nº EMPRESAS	Nº EMPRESAS VISITADAS
CELULOSE	11	
INTEGRADA	15	
PAPEL	27	
RECICLAGEM	8	
<b>Total</b>	61	17

Fonte: elaboração própria

Tabela 4: Universo de empresas amostradas – 2016

Com base nas informações de consumo de energia anteriormente levantadas, foi feita uma análise estatística utilizando neste caso o critério de estatística de proporcionalidade.

Os dados de produção correspondem ao ano 2016 e foram estratificados a partir dos dados do Ibá. O consumo específico médio de energia total foi calculado a partir do Relatório Setorial do Procel (FIESTP/ CETESB/ BRACELPA - 2010).

Com esses dados, foi possível obter as porcentagens relativas ao número total de empresas e à quantidade de energia consumida total correspondentes aos quatro subsegmentos. A partir dessas duas porcentagens pode-se estimar uma aproximação do número de empresas representativo dentro de cada subsegmento.

Para essa realidade, a relação entre o número de empresas e o consumo de energia difere em maior ou menor medida nos diferentes subgrupos, destacando, por exemplo, o Papel, que ocupa quase 44% do total das empresas do setor, mas só consome 5,2% da energia total. Para equilibrar essa variância, pode-se tomar

como tamanho amostral mais próximo ao ideal uma média entre os tamanhos amostrais propostos a partir das duas diferentes porcentagens.

Com o número da amostra estabelecido, desenvolve-se o procedimento de amostragem nos quatro subsegmentos. E foi feita assim uma estratificação segundo a idade da empresa, parâmetro quantitativo que está diretamente relacionado com o tipo de **tecnologia** da planta, supondo que fábricas dentro da mesma faixa etária terão tecnologia semelhante na maioria dos casos.

Uma vez estratificados cada um dos subsegmentos, em cada um dos estratos a seleção das empresas poderá ter critérios qualitativos importantes, como: a **associação ou não associação das empresas com grupos maiores**, de maneira a evitar que todas as empresas de um mesmo setor pertençam a um mesmo grupo empresarial.

Para a seleção final considerou-se em primeiro lugar o número de amostras por subsegmento calculado pelo critério estatístico de proporcionalidade e partindo dessa base, a seleção foi feita seguindo os seguintes critérios:

A produção de papel é apresentada pela associação Ibá e estratificada por produto final. Nessa estratificação é contabilizada a fabricação de produtos oriundos das etapas principais e de etapas de conversão. A conversão é um processo no qual o papel é utilizado para fabricar outro produto de papel, sendo que muitas empresas oferecem este serviço. A soma da produção por tipo de produto pode conter dupla contagem para o cálculo do consumo energético, considerando o papel produzido em uma empresa e a conversão deste mesmo papel em outra empresa (por exemplo: produção de bobina kraft e produção de embalagens). Portanto, para avaliar a questão energética, não serão considerados os valores de produção provenientes de conversão na análise estatística.

#### **b. Seleção das etapas do processo de produção**

Para fins de pesquisa de consumo energético serão consideradas as seguintes etapas de processo por subsegmento.

**Produção de celulose:** preparação da madeira, produção e lavagem da pasta de celulose, branqueamento, secagem da pasta e recuperação de reagentes químicos (produção de vapor e geração de eletricidade.)

**Plantas integradas de celulose e papel:** preparação da madeira, produção e lavagem da pasta de celulose, branqueamento, preparação do estoque de matérias primas, formação da folha de papel, prensagem do papel, secagem do papel e acabamento do papel, e a recuperação de reagentes químicos (produção de vapor e geração de eletricidade).

**Produção de papel:** Desagregação, Depuração, Refinação e Máquina de papel.

**Recicladores de Papel:** Desagregação, Depuração, Refinação, Formação, Secagem e Rebobinagem.

### c. Tratamento de dados

Todos os dados referentes aos consumos energéticos utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelas empresas visitadas.

Os dados utilizados são referentes ao ano de 2016. Algumas informações foram estimadas pelas empresas pois elas não a tinham ou não faziam seu acompanhamento conforme o desenvolvido nesse estudo.

Para a obtenção do **tamanho amostral** realizou-se uma média simples entre os valores proporcionais ao número de empresas e ao proporcional ao consumo de energia, por subsegmento.

Os dados consolidados de **rendimento energético**, que virão a seguir, foram calculados a partir dos dados informados nas fábricas utilizando uma média ponderada dos valores de produção das empresas visitadas. E os dados de **coeficiente de destinação** foram calculados a partir de uma média ponderada relativa ao consumo total do energético por destinação com a produção física da fábrica.

Ainda no cálculo coeficientes de destinação, foi considerado a tecnologia por compressores, em **sistemas de refrigeração**, um sistema considerado como **força motriz para efeito de cálculos**, por este equipamento nesse sistema ser o maior responsável pelo consumo de energia dessa tecnologia. (Eletrobrás, 2016).

Para os cálculos dos diferentes combustíveis utilizados (gás natural, óleo combustível, GLP, biomassa e lixívia), foi feita a transformação para uma base única tonelada equivalente de petróleo - Tep, onde possibilitou calcular as percentagens (%) e suas distribuições. Para se estimar o equivalente energético dos combustíveis lixívia e madeira, utilizou-se de **valores de poder calorífico inferior e densidade** fornecidos por literatura devidamente referenciadas ou pela própria fábrica. No caso dos outros energéticos foi utilizado os valores constantes do Balanço Energético Nacional (EPE).

Com base nos valores da produção física informados das plantas, os valores informados como **consumo específico** foram estimados através da divisão do consumo total de energia pela produção.

O uso da tecnologia por compressores nos **sistemas de refrigeração** é o maior responsável pelo consumo de energia, então esse sistema será considerado como **força motriz** para efeito de cálculos, nas tabelas de destinação apresentadas no capítulo a seguir (Eletrobras,2016).

## 5. INDICADORES DE CONSUMO ENERGÉTICO POR SUBSEGMENTO

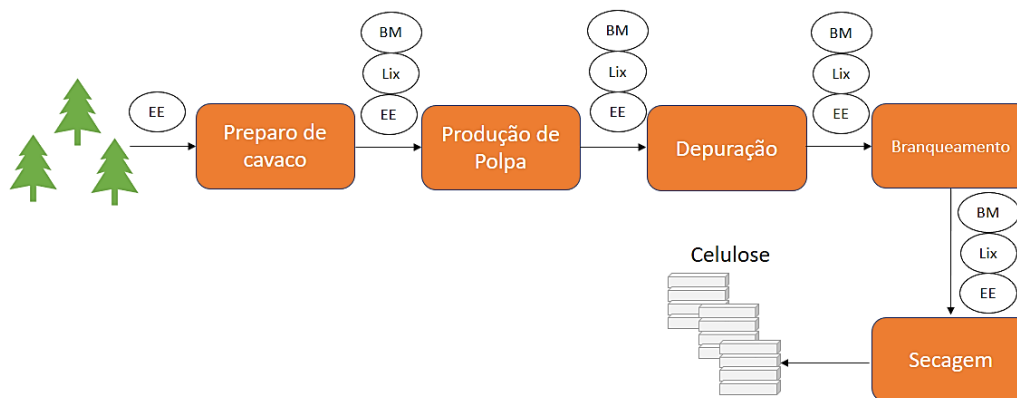
### a. Subsegmento de Celulose

#### i. Situação atual

#### Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

Embora as empresas selecionadas sejam distintas em função da sua produção e ano de início de operação, essas utilizam o mesmo processo produtivo na produção de celulose, o Kraft, e apresentam algumas etapas fundamentais, como: produção de cavaco, produção de polpa, depuração, branqueamento e secagem, como informado no item 3a.

Na figura 12, é apresentado um fluxograma que indica as principais etapas do processo, que começa com o preparo de cavaco, onde a madeira é cortada e classificada, logo esse material segue para os digestores, onde ocorre o cozimento com vapor direto aquecido sob pressão e adição de licor branco. Posteriormente ocorre a etapa de deslignação que consiste na separação do material nos depuradores e a lavagem da pasta de celulose, logo o produto das fibras segue para o branqueamento (BHKP) e por uma filtragem de segurança, onde retém a maior parte de sólidos. Essa solução retida contém material orgânico do processo do cozimento, e este segue para o processo de recuperação química. Por fim a celulose segue para a secagem e enfardamento e é enviada para expedição.



Fonte: Elaboração própria

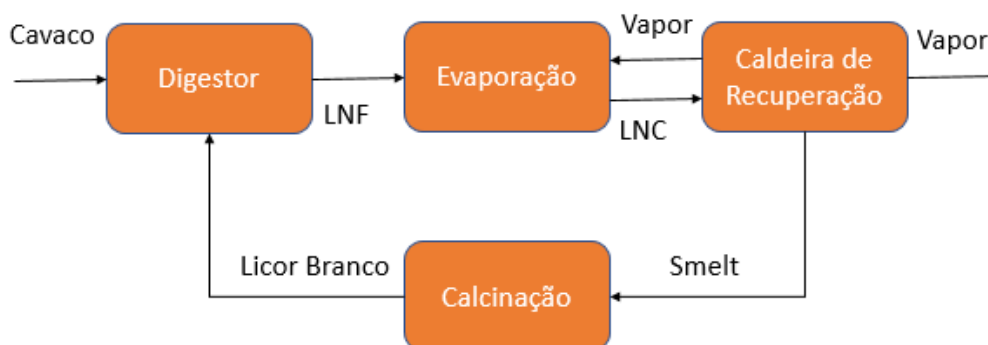
Figura 12: Esquema Das Etapas De produção de Celulose

Legenda: Energia Elétrica (EE), Lixívia (LIX) e Biomassa (BM).

#### Recuperação Química:

O processo Kraft permite a recuperação do hidróxido de sódio do licor negro, além da geração de vapor, que pode ser empregado na produção de energia elétrica.

As etapas envolvidas na recuperação de produtos químicos do licor negro são: Evaporação, queima do Licor na Caldeira de Recuperação e Dissolução dos Sais Gerados e calcinação, como informado no item 3a.



Fonte: Elaboração própria

Figura 13: Esquema Das Etapas De recuperação química na produção de celulose

Legenda: Licor Negro Fraco (LNF); Licor Negro Concentrado (LNC); Lavado Fraco (LF) e Licor Verde (LV).

## Fontes de energia

No processo de produção de celulose, predominantemente as plantas industriais utilizam o processo químico para obtenção da celulose, onde utiliza-se energia elétrica nos motores dos acionamentos mecânicos e energia térmica nas caldeiras e calcinadores consumida nas etapas de: cozimento, branqueamento, evaporação do licor negro e nos processos de secagem.

A lixívia, produzida durante o processo de fabricação de celulose, aparece como o combustível mais utilizado, com um consumo bem acima do de madeira e eletricidade. Ela é consumida na caldeira de recuperação gerando vapor de alta pressão que alimenta os turbogeradores para a geração de eletricidade. O crescimento do consumo de lixívia, ou licor negro, deste composto químico acompanha o ritmo de produção de celulose, de modo que alterações no volume da produção induzem alterações no consumo de lixívia.

Nos calcinadores existe a possibilidade de utilizar óleo combustível, como verificado nas visitas, sendo este utilizado de forma direta.

Predominantemente as empresas são autossuficientes em energia elétrica e alguns grandes grupos exportam energia para rede.

## Principais equipamentos consumidores de energia

De acordo com os dados amostrados, o consumo de energia total das plantas, apresenta a média de 13,17% para energia elétrica e os outros 86,83%, para energia térmica. O mesmo valor se aproxima na literatura com 14,74% (684kWh/t) e 85,26% (14,24GJ/t) respectivos ao consumo elétrico e térmico. (fonte: de McIlroy e Wiczinsky, 1999)

As etapas de secagem, recuperação de reagentes químicos e branqueamento são as etapas que mais utilizam energia elétrica e as etapas de concentração de licor, secagem, recuperação de reagentes químicos, polpação são as etapas que mais utilizam vapor. Portanto, os maiores equipamentos consumidores de energia elétrica estão nas etapas, de:

- Acionamento do branqueamento
- Acionamento do digestor
- Sistema de ETA/ETAC/ETE
- Produção de cavaco
- Sistemas de Compressão
- Acionamento das Máquinas em geral

Os principais equipamentos que consomem energia térmica estão nas etapas de:

- Evaporação
- Secagem da celulose
- Cozimento de celulose
- Branqueamento


Dessa forma, para melhor entendimento, se classifica as principais etapas produtivas por unidade de serviço da seguinte forma:

Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Electr	Outros
Produção de cavaco/ polpação							
Depuração (Deslignificação)							
Branqueamento							
Secagem da pasta de celulose							
Calcinação							
Concentração de licor							
Recuperação de reagentes químicos							
Tratamento de água e afluentes							

Fonte: elaboração própria

Tabela 5: Distribuição de unidade de serviço na produção de celulose.

### Legenda:

-  Utilização por unidade de serviço.
- FM Força motriz
- CP Calor de Processo

AD	Aquecimento direto
Refr	Refrigeração
Illum	Iluminação
Electr	Eletroquímica
Outros	Outros usos finais

## Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de celulose apresenta consumo específico médio calculado de energia elétrica em **0,060 tep/t** (698,42 kwh por tonelada, variando de 620 a 850) e **0,373 tep/t** (15,623 GJ por tonelada, variando de 11 a 18) em energia térmica, estimados através da divisão do consumo total de energia pela produção das plantas visitadas.

Etapas de processo	Elétrico (kWh/t)	%	Vapor (GJ/t)	%
produção de celulose:	698,42		15,623	
Produção de cavaco/ polpação	45,95	6,6%	2,32	14,9%
Depuração (Deslignificação)	76,58	11,0%	0,97	6,2%
Branqueamento	122,53	17,5%	1,73	11,1%
Secagem da pasta de celulose	146,02	20,9%	2,88	18,4%
Calcinação	23,48	3,4%	0,37	2,4%
Concentração de licor	100,07	14,3%	0,37	2,4%
Recuperação de reagentes químicos	126,61	18,1%	4,28	27,4%
Tratamento de água e afluentes	57,18	8,2%	2,68	17,1%

Fonte: Dados médios obtidos na pesquisa baseado na distribuição energética da referência de McIlroy e Wiczinsky, 1999

Tabela 6: Distribuição e consumo energético por etapa de produção de celulose.

Vale ressaltar que o vapor gerado nas caldeiras é utilizado para atender parte da demanda térmica e geração de energia elétrica. O consumo de vapor observado acima é destinado apenas para fabricação de celulose. O monitoramento do consumo de combustível que entra nas caldeiras é mais preciso do que a quantidade de vapor consumida em cada etapa. E a comparação por quantidade de energético utilizado para geração de uma tonelada de vapor entre plantas não foi possível, pois as fábricas utilizam vapor em diferentes pressões e temperaturas.



## Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, conforme explicado no item 4.c deste relatório, segue a tabela abaixo com os valores obtidos:

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	90%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	83,38%	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	86,54%	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	55,50%	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	91,7%	-	-	-	52,23%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 7: Rendimento energético atual, Subsegmento de Celulose

## Coefficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, conforme explicado no item 4.c deste relatório, segue a abaixo tabela com os valores obtidos:

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	100%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	100%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	100%	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	100%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,86%	-	-	-	0,14%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 8: Coeficiente de destinação atual, Subsegmento de Celulose

## Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Com base no grande número de equipamentos instalados, não será objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos, portanto, realizamos uma amostragem com base 2017 de alguns equipamentos e seus preços, em reais, sem o transporte e custo de instalação, pois esse difere de região para região. Abaixo segue a lista de reposição para os equipamentos atuais:

Equipamentos	Valor unitário (R\$)
Lâmpada vapor de sódio 200 W	22,00
Lâmpada vapor de sódio 400 W	46,90
Motores 5 cv	1.712,00
Motores 50 cv	11.727,00
Motores 75 cv	16.602,00
Motores 100 cv	20.687,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 - Baldor

Tabela 9: Investimento para reposição de equipamentos de mesma eficiência

As recomendações em relação à gestão e manutenção das caldeiras, as oportunidades de redução não possuem investimento de reposição de equipamentos com eficiência similar, pois as ações se tratam de melhorias no sistema e não a simples substituição de equipamentos.

### ii. Condições com tecnologias mais eficientes

#### Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As medidas de eficiência energética específicas nos processos já estão sendo empregadas no setor de celulose e estão consideradas como tecnologias mais eficientes nesse estudo.

A tecnologia atual só estará ameaçada a partir do momento em que as tecnologias de gaseificação tiverem condições de concorrer comercialmente com a atual tecnologia. A gaseificação é o principal processo alternativo para a conversão de biomassa, que consiste em um processo onde é feita a conversão de combustíveis sólidos ou líquidos na produção de um combustível gasoso, envolvendo vapor e ar. Seu transporte é mais simples e sua combustão mais eficiente.

Mesmo assim, percebem-se oportunidades típicas em sistemas de caldeiras, como: a melhora do processo de controle, a redução das perdas de calor, a melhor recuperação de calor e a melhoria do isolamento térmico da caldeira e da instalação.

Além das medidas que serão apresentadas, é importante notar que os sistemas de caldeiras de pressão muitas vezes podem não estar melhor ajustadas para atender aos requisitos do sistema de geração de vapor da maneira mais eficiente.

No consumo elétrico, em geral, é aconselhado a utilização de motores de alto rendimento, e adequação dos sistemas motrizes quando mal dimensionados. Além do uso iluminação a LED e uma maior utilização dos recursos de automação.

As propostas apresentadas a seguir possibilitam economias na faixa de 2-26%, no sistema térmico, 1-3% nos sistemas de motrizes e até 63% nos sistemas de iluminação variando os valores de acordo de quantas e quais medidas seriam adotadas.

Medidas de melhoria na eficiência energética	
Térmicas	Controle de combustão (injeção de ar)
	Redução das quantidades de gases de combustão
	Melhora no isolamento térmico na caldeira
	Manutenção da caldeira
	Retorno do condensado na caldeira
	Recuperação de vapor
	Recuperação de calor nos gases de combustão
Elétricas	Troca dos motores standard por motores de alto rendimento
	Iluminação LED

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10: Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de celulose

### Controle de combustão

Uma ação de eficiência energética típica em sistemas de caldeiras é a instalação de **um sistema de automação com monitores de CO e oxigênio nos gases de escape após a combustão**, controlando o fluxo de ar (oxigênio) e mantendo o excesso de ar mínimo necessário para a combustão completa, possibilitando uma redução do consumo de combustível para a mesma produção de vapor.

Esta ação vai depender de cada situação e em muitos casos já se encontra implantada, e se apresenta economicamente atrativa para grandes sistemas de caldeiras, enquanto que para sistemas menores se faz necessário avaliar o quanto o custo inicial dos sistemas impacta no retorno do investimento. O tempo de retorno médio desta ação é de 1,7 anos, com casos em que este tempo é inferior a 6 meses. Nesta situação o rendimento pode ser melhorado em até 3% (LBNL, 2009)

### Redução das quantidades de gases de combustão.

Muitas vezes, gases de combustão excessivos resultam de vazamentos na caldeira e / ou no tubo de combustão. Estes vazamentos podem reduzir o calor transferido para o vapor e aumentar requisitos de bombeamento. Contudo, tais vazamentos são facilmente reparados, economizando 2% a 5% de a energia anteriormente usada pela caldeira (Galitsky et al., 2005a). Esta medida difere do monitoramento dos gases de combustão, na medida em que **consiste em um reparo periódico baseado na inspeção visual**. A melhoria de eficiência dessa medida e a monitoramento dos gases de combustão não são cumulativas, pois ambos abordam as mesmas perdas.

### Melhoria no isolamento térmico.

Manter o **isolamento térmico** das caldeiras, tubulações e equipamentos consumidores em condições ideais do ponto de vista de sua funcionalidade é uma ação de eficiência energética também típica de sistemas de vapor. As perdas térmicas de uma caldeira bem conservada devem ser inferiores a 1%. (LBNL, 2009).

### Manutenção da caldeira

Um programa de manutenção para garantir que todos os componentes de uma caldeira estão operando no máximo desempenho pode resultar em economias substanciais. Na ausência de um bom sistema de manutenção, queimadores e sistemas de retorno de condensado podem sair de ajuste. Esses fatores podem acabar custando a um sistema de vapor até 30% da eficiência inicial em dois a três anos (Galitsky et al., 2005a). Em média, as economias de energia associadas com a melhor manutenção da caldeira são estimadas em até 10%. A melhor manutenção também pode reduzir a emissão de poluentes atmosféricos.

A fuligem no lado do fogo dos tubos da caldeira ou cinzas no lado da água das caldeiras também deve ser controlada. A fuligem e as cinzas são um problema com as caldeiras alimentadas a carvão do que com gás natural ou óleo (as caldeiras que queimam combustíveis sólidos como o carvão devem ser verificadas com mais frequência, pois têm uma tendência de incrustação mais alta do que as caldeiras de combustível líquido). Testes relatados pelo CIPEC mostram que uma camada de fuligem do lado do fogo de 0,8 mm reduz a transferência de calor em 9,5%, e que 0,18 mm na camada de fuligem de reduz a transferência de calor em 69% (CIPEC 2001). Para o dimensionamento do lado da água, 1 mm de acumulação podem aumentar o consumo de combustível em 2% (CIPEC 2001).

### Retorno do condensado

Quando o vapor é utilizado indiretamente em um equipamento, ele transfere calor ao processo e se condensa. Esse condensado pode ser reaproveitado, economizando no tratamento da água anterior ao ingresso da caldeira e energia.

Esta ação apresenta um tempo de retorno do investimento econômico estimado em 15 meses e uma melhoria da eficiência de até **3%** (LBNL, 2009).

#### Recuperação de calor do vapor flash

Purga das caldeiras (*Blow-down*) e purgas de condensado ao longo da linha de vapor geram vapor flash que pode ser aproveitado no pré-aquecimento da água de reposição de alimentação da caldeira.

A purga das caldeiras é um processo fundamental para a manutenção das condições operacionais adequadas das caldeiras, permitindo que se reduza as impurezas químicas presentes na água do processo. Uma taxa abaixo do necessário aumenta a possibilidade de incrustações e uma taxa muito elevada acarreta em perdas térmicas excessivas.

Neste caso, deve-se primeiro dimensionar o volume purgado dentro das condições mínimas de segurança no sentido de evitar um descarte em excesso. Um sistema automático de purga para controlar esse processo apresenta um tempo de retorno estimado em 6 meses. Após isso, um sistema de recuperação de calor é projetado para atuar no preaquecimento. Este sistema de recuperação apresenta um tempo de retorno do investimento econômico de 1 a 1,5 anos (LBNL, 2009).

Para os purgadores de condensado da linha, um sistema de recuperação de vapor flash apresenta um tempo de retorno do investimento de 1,8 anos (LBNL, 2009).

#### Aumento do teor de sólidos do licor negro

O aumento do teor de sólidos do licor negro, que pode ser alcançada através do processo de evaporação da água do licor negro para aumentar seu conteúdo de sólidos, o que torna o processo de combustão da caldeira de recuperação muito mais eficiente.

A maioria dos moinhos emprega evaporadores de efeito múltiplo para concentrar licor negro usando calor indireto do vapor. Alguns moinhos também podem usar evaporadores de contato direto, que usam o gases da caldeira de recuperação para aumentar a concentração final de sólidos. A evaporação é o maior uso de vapor na produção de celulose Kraft. Vários evaporadores de efeito maximizar a eficiência deste uso de vapor; o uso de sete efeitos é atualmente considerado uma das melhores práticas da indústria (Ackel 2009). Além disso, muito deste vapor pode ser reutilizado sob a forma de condensado ou água quente em outras aplicações da instalação (US DOE 2005a).

#### Recuperação de calor nos gases de combustão.

O calor contido nos gases de combustão pode ser aproveitado em um economizador para o pré-aquecimento da água que abastece a caldeira, mantendo-se as condições ambientais determinadas para estes gases de escape.

Uma economia típica de 1% no consumo de combustível pode ser alcançada para cada 25 °C de redução na temperatura dos gases de escape. Um economizador convencional possibilita economias de combustível na faixa de 2 a 4%, enquanto que um economizador de condensação pode atingir economias de 5 a 8% (LBNL, 2009).

A conversão de biomassa em energia térmica e/ou eletricidade envolve combustão direta em grande parte das indústrias. Nesse processo ocorre a oxidação completa da biomassa gerando gases aquecidos que serão utilizados para processo e geração de eletricidade.

No sistema de **eletricidade**, uma oportunidade típica encontrada na maioria das plantas é a melhoria nos sistemas de força motriz e iluminação, essas medidas são:

#### Troca dos motores standard por motores de alto rendimento.

A alteração dos motores mais antigos por outros de alto rendimento é uma medida para melhoria da eficiência da planta, porém não alterando o fato de que ainda continuarão como maiores consumidores elétricos.

O percentual de economia varia de acordo com a potência do motor e sua aplicação. Um exemplo para um motor de 40 cv:

Indicadores	Motor Standard (Antigo)	Motor Alto Rendimento (Novo)
Horas de operação / ano	7.920	
kWh médio consumido	33	29,9
Consumo anual (kWh)	261.360	236.808
Redução no consumo de energia elétrica (kWh/ano)	24.552	
Economia de energia elétrica (%)	9,4	
Retorno sobre o investimento (ROI)	10 meses	

Fonte: WEG - 2010

Tabela 11: Eficiência energética em motores elétricos

Outro ponto importante também relacionado a motores é o uso de soft-starters (que já é tecnologia muito difundida) que aumenta o desempenho e vida útil das máquinas, também reduzindo o consumo de energia.

Foi observado plantas com equipamentos superdimensionados, pois foram projetados para uma capacidade produtiva maior, em alguns casos o dimensionamento adequado desses equipamentos gerará economias de energia.

## Iluminação por lâmpadas eletrônicas

Também é aconselhável, onde possível, a total alteração do sistema de iluminação das fábricas por tecnologia de lâmpadas LED. A tabela abaixo mostra as equivalências e o potencial de economia de energia entre as lâmpadas LED e as lâmpadas mais utilizadas no segmento.

Lâmpada LED	Lâmpada Convencional	Economia de energia
LED High Power 30W	Vapor Metálico/Sódio 70W+21W (reator)	67%
LED High Power 60W	Vapor Metálico/Sódio 150W+45W (reator)	69%
LED High Power 72W 360°	Vapor Metálico/Sódio 150W+45W (reator)	63%
Refletor LED 30W	Vapor Metálico/Sódio 70W+21W (reator)	67%
Refletor LED 50W	Vapor Metálico/Sódio 100W+30W (reator)	61%
Refletor LED 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
Refletor LED 200W	Vapor Metálico/Sódio 400W+120W (reator)	63%
High Bay LED Industrial 50W	Vapor Metálico/Sódio 100W+30W (reator)	61%
High Bay LED Industrial 100W	Vapor Metálico/Sódio 200W+60W (reator)	61%
High Bay LED Industrial 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
High Bay LED Industrial 200W	Vapor Metálico/Sódio 400W+120W (reator)	63%
LED Outdoor 84W	Vapor Metálico/Sódio 200W+60W (reator)	67%
LED Outdoor 112W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%
LED Outdoor 120W	Vapor Metálico/Sódio 250W+75W (reator)	63%

Fonte: HTL instalação e manutenção elétrica..

Tabela 12: Equivalência entre lâmpadas LED e convencionais

## Indicadores energéticos

Em função da troca da tecnologia no sistema de iluminação, a utilização de motores com rendimento melhor, de 95,5%, e de ações de gestão que permitem uma otimização do consumo energético, seja por dimensionamento ou operação diferente da projetada, o consumo específico energia elétrica total da planta proposto fica na ordem de 695,04 kWh/tonelada. (0,42% do consumo específico atual)

E utilizando as medidas típicas em sistemas de caldeiras, como: a melhora do processo de controle de combustão, a redução das perdas de calor, a melhor recuperação de calor e o melhora do isolamento térmico, o consumo específico energia elétrica total da planta proposto fica na ordem de 15,093 GJ/t. (0,036% do consumo específico atual)



## Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a tabela abaixo apresenta as melhores referências identificadas no segmento de celulose:

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrônica	Outras
Gás Natural	-	94,0%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	88,0%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	90,0%	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	55,5%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	-	85,0%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria, com base em dados obtidos na pesquisa de campo e entrevista com fornecedores (para o caso de força motriz e iluminação)

Tabela 13: Rendimento energético alternativo, Subsegmento de Celulose

## Coeficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a tabela abaixo apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrônica	Outras
Gás Natural	-	100%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	100%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	100%	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	100%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,96%	-	-	-	0,04%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 14: Coeficiente de destinação alternativo, Subsegmento de Celulose

### Investimentos necessários para implantação de medidas básicas de eficiência.

As recomendações no sistema térmico, como: a redução das perdas de calor, a melhor recuperação de calor e a melhoria do isolamento térmico da caldeira, não possuem investimento de equipamentos com eficiência superior, pois as ações se tratam de melhorias no sistema e não a simples substituição de equipamentos. Onde a eficiência da caldeira estiver comprometida e for recomendado a troca da caldeira, o investimento aplicado será particular a cada caso. Já a recomendação da medida de melhora do controle de combustão, já aplicada amplamente no setor, já estão incorporados ao preço da caldeiras novas e também viável instalação em caldeiras já instaladas, essa medida é uma facilmente encontrada com os fornecedores (Tabela 16).

Para recomendações de troca de motores e sistema de iluminação, foram indentificados alguns equipamentos que poderiam ser substituídos por outros mais eficientes (Tabela 15).

A tabela 16, apresenta o custo de investimento estimado, obtidos em Reais (R\$), direto com fornecedores, valor base do ano de 2017, sem considerar transporte e instalação:

Equipamentos	Valor unitário (R\$)
LED 18W	20,00
High Bay LED Industrial 120W	499,00
Motores 5 cv	2.707,00
Motores 50 cv	14.180,00
Motores 75 cv	26.767,00
Motores 100 cv	33.309,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 - Baldor

Tabela 15: Investimento de equipamentos de maior eficiência

Afim de comparar os custos aplicados das medidas, a tabela abaixo apresenta os custos de investimento R\$ por tonelada de celulose e o % de economia encontradas nas empresas pesquisadas.

Medidas de melhoria na eficiência energética <sup>1</sup>	Investimento atual	Custo de investimento (R\$/ t produzida)	% economia de energia	Economia de energia (tep/ t produzida)
Controle de combustão (injeção de ar) <sup>2</sup>	não se aplica	0,28-2,35	2,91%	0,02245
Redução das quantidades de gases de combustão <sup>3</sup>	não se aplica	0,21	0,20%	0,00164
Melhora no isolamento térmico na caldeira <sup>4</sup>	melhoria no sistema	0,21	0,20%	0,00148
Manutenção da caldeira <sup>5</sup>	melhoria no sistema	0,17-1,41	0,50%	0,001-0,00383
Retorno do condensado na caldeira <sup>4</sup>	melhoria no sistema	0,21	0,20%	0,00148
Recuperação de vapor <sup>4</sup>	melhoria no sistema	0,21	0,20%	0,00148
Recuperação de calor nos gases de combustão <sup>2</sup>	não se aplica	0,28-2,35	2,91%	0,002245
Troca dos motores standard por motores de alto rendimento <sup>6</sup>	(tabela 9)	21,67	5,76%	0,00629
Iluminação LED <sup>7</sup>	(tabela 9)	0,34	55,64%	0,00013

Tabela 16: Investimento de medidas aplicadas no segmento de celulose

<sup>1</sup> Foi estabelecido para o preço de referência para uma caldeira de força, R\$ 220.000 / t de vapor e R\$ 200.000/ t de vapor para caldeiras de recuperação e gás natural (Bertinotti,2016).

<sup>2</sup> Para o preço do controle de automatização para combustão da caldeira, se assumiu 2,5% do custo da caldeira.

<sup>3</sup> Baseado no preço da caldeira se assumiu um custo de 1,5% do custo da caldeira, para as melhoras com economizador de ar.

<sup>4</sup> Baseado no preço das caldeiras se assumiu 0,2% para manutenção do sistema de distribuição de vapor e condensados.

<sup>5</sup> Baseados no preço da caldeira se assumiu o custo de 1,5% para manutenção da caldeira em geral.

<sup>6</sup> Foi estimado a troca de 100% dos motores, utilizando a ferramenta de investimento do fabricante (WEG, 2018)

<sup>7</sup> Foi estimado a quantidade lâmpadas e calculado energia adotando 12h de utilização. O preço do investimento foi consultado com um fornecedor (HTL instalação e manutenção elétrica).

De acordo com as melhores tecnologias apresentadas nota-se o potencial total de 1,93%, impulsionados pelas medidas de troca de motores e melhora no sistema de vapor.

FONTE DE ENERGIA (tep/t)	FM	CP	Illum	Total (%)
GÁS NATURAL	-	0,001	-	4,26%
LENHA	-	0,001	-	5,25%
OUTRAS FONTES PRIM.	-	0,012	-	3,85%
ÓLEO DIESEL	-	-	-	
ÓLEO COMBUSTÍVEL	-	-	-	0,00%
ELETRICIDADE	0,002393	-	0,0000	4,04%
TOTAL (%)	3,99%	3,96%	38,55%	1,93%

Fonte: Elaboração Própria

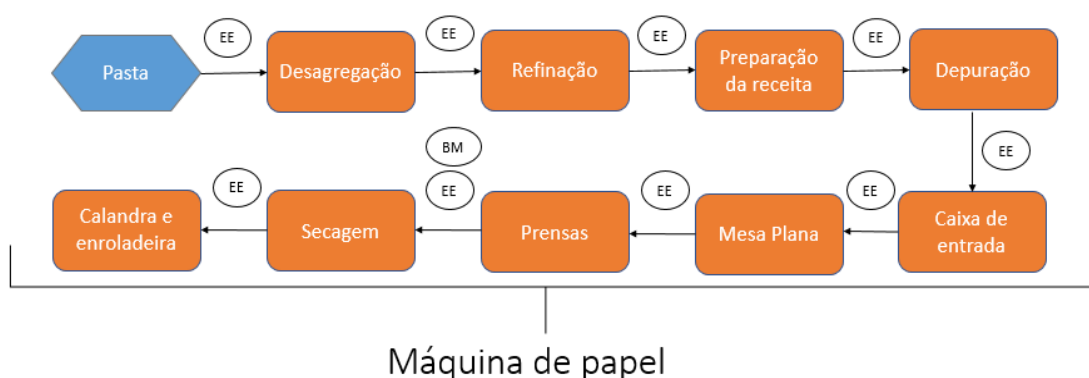
Tabela 17: Potencial de economia do segmento de produção de celulose

## b. Subsegmento de Produção de Papel

### i. Situação Atual

#### Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados

Após o processo de extração da pasta da madeira, começa-se o ciclo da produção do papel em si, que é descrito de maneira mais sucinta anteriormente nesse relatório. De maneira geral tem-se:



Fonte: Elaboração própria

Figura 14: Esquema Das Etapas De produção de papel

Legenda: BM – Biomassa, EE – Energia elétrica

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

#### Fontes de energia

O processo de produção de papel, como já visto, possui diversas etapas, e as fontes de energia utilizadas são variadas. De maneira geral as fábricas utilizam eletricidade da rede para cargas motrizes, iluminação e refrigeração, e como combustível de energia térmica o gás natural. Em alguns casos encontra-se utilização de óleo combustível, e também autoprodução por meio de biomassa ou até mesmo com PCH.

#### Principais equipamentos consumidores de energia

Como o processo tem diversas etapas e basicamente todas utilizam motores, as cargas motrizes são as principais consumidoras de eletricidade: os *pulpers*, hidro

ciclones, bombas, etc. E de maneira geral os equipamentos da etapa de secagem são os maiores consumidores de energia térmica de uma planta.

### Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de papel apresenta consumo específico médio calculado de energia elétrica e térmica. Por se tratar de consumos específicos distintos segue abaixo segue a tabela com consumo específico, estimados através da divisão do consumo total de energia pela produção das plantas visitadas.

Etapas de processo	Elétrico (kWh/t)	%	Vapor (GJ/t)	%
<b>consumo específico por etapa (papel):</b>	960,786		7,27	
Preparo de massa	292,03	30%	1,15	16%
Formação da folha	414,69	43%	0,08	7%
Secagem e acabamento	131,41	14%	0,06	77%
Sistema auxiliares	122,65	13%		

Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados de distribuição energética da referência de McIlroy e Wiczinsky, 1999

Tabela 18: Consumo específico por etapa produtiva de papel

Vale ressaltar que o valor obtido na pesquisa, foi obtido através de um levantamento dos energéticos utilizados e foi realizado a amostragem de plantas de anos de operação distintos, e alguns casos a planta fabrica mais e um tipo de papel. (papel especial/outros)


Dessa forma, para melhor entendimento, se classifica as principais etapas produtivas por unidade de serviço da seguinte forma:

Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Illum	Electr	Outros
Preparo de massa							
Formação de folha							
Secagem e acabamento							
Sistemas auxiliares							

Fonte: elaboração própria

Tabela 19: Classificação por unidade de serviço no subsegmento de papel

Legenda:

	Utilização por unidade de serviço.
FM	Força motriz
CP	Calor de Processo
AD	Aquecimento direto
Refr	Refrigeração
Illum	Iluminação
Electr	Eletroquímica
Outros	Outros usos finais

## Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, conforme explicado no item 4.c deste relatório, segue a tabela abaixo com os valores obtidos:

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrouímica	Outras
Gás Natural	-	89,5%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	80,84%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	88%	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	91,1%	-	-	-	62,1%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 20: Rendimento energético atual, Subsegmento de papel

## Coeficientes de Destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, conforme explicado no item 4.c deste relatório, segue a abaixo tabela com os valores obtidos:

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrônica	Outras
Gás Natural	-	100%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	100%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	100%	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	98,92%	-	-	-	1,08%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 21: Coeficiente de destinação atual, Subsegmento de papel

## **Investimentos necessários para reposição de equipamentos**

Algumas medidas de economia de energia podem ser executadas com facilidade, sem que sejam necessárias intervenções significativas nas instalações das caldeiras. Como primeiras providências para a promoção de economia de energia, é recomendado a regulação na combustão, controle de fuligem e das incrustações e monitoramento de perdas de calor, vapor e água quente (ELEKTRO).

Para medidas de reposição de motores e sistema de iluminação, devido ao grande número de equipamentos instalados, e pelo objetivo desse estudo não ser realizar um levantamento completo de todos os equipamentos, foi feito uma amostragem com base 2017 de alguns equipamentos e seus preços, em reais e sem o transporte, pois esse difere de região para região, abaixo segue a lista de reposição para os equipamentos atuais:



Equipamentos	Valor unitário (R\$)
Lâmpada vapor de sódio 200 W	22,00
Lâmpada vapor de sódio 400 W	46,90
Motores 5 cv	1.712,00
Motores 50 cv	11.727,00
Motores 75 cv	16.602,00
Motores 100 cv	20.687,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 - Baldor

Tabela 22: Investimento para reposição de equipamentos de mesma eficiência

## ii. Condições com tecnologias mais eficientes

### Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Percebem-se oportunidades típicas de sistemas de eletricidade, onde os maiores consumidores de energia elétrica de uma planta de produção de papel são os equipamentos motrizes. Logo adotaremos a mesma medida já apresentada no item anterior 5.a (Tabela 11).

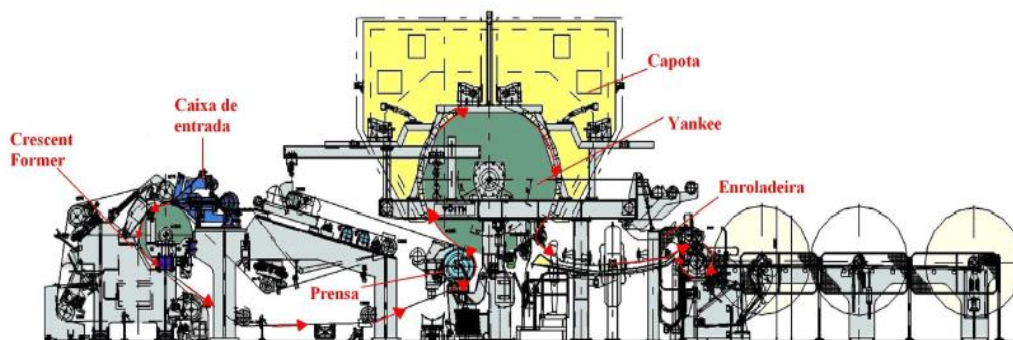
É também aconselhável assim como mencionado no item 5.a, a total alteração da iluminação das fábricas por lâmpadas LED, onde for possível. Outras medidas apresentadas serão nos sistemas de secagem e no sistema de geração de vapor a fim de torná-los mais eficientes, e estão relacionadas na tabela abaixo:

Medidas de eficiência energética	
Térmicas	Economizadores na caldeira
	Caldeiras de alto rendimento
Elétricas	Troca dos motores <i>standard</i> por motores de alto rendimento
	Adoção de iluminação LED
	Uso de <i>soft-starters</i>
Outras	Capota de alto rendimento na máquina de papel
	Tecnologia por absorção em <i>chillers</i>

Fonte: Elaboração própria

Tabela 23: Medidas de melhoria na eficiência energética do subsegmento de produção de papel

Na vertente térmica, uma opção para a melhora do consumo de energia é a utilização de **Capotas de alto rendimento**, que podem melhorar todo o processo de secagem, por meio de transferência de calor por condução e convecção.



Fonte: Lucas Bitar Moraes Barros (s.d.)  
Figura 15: Capota de alto rendimento.

De maneira geral, a depender da capacidade de produção da fábrica e demanda de vapor, **Caldeiras de alto rendimento** (já encontradas no mercado, com eficiência entre 95-96%) podem ser muito úteis na economia de energia da planta, que muitas vezes já possui tecnologias mais recentes como: **economizadores de caldeira**, ou reaproveitamento de calor.

Outro ponto considerável é onde houver energia térmica disponível e com baixo custo ou vapor residual de processo, a **Tecnologia por absorção em Chillers** é uma boa alternativa em relação ao sistema de refrigeração da planta. As fábricas de papel possuem condições vantajosas, uma vez que já desenvolveram processos de conversão de biomassa em energia.

Os gastos com energia e manutenção dessa tecnologia são menores quando comparados aos gastos com chillers de compressão. Uma ressalva no consumo de energia para refrigeração, é o ponto de que usualmente na indústria se faz uso da tecnologia por compressores.

### Fontes de energia

As fontes de energia irão se manter as mesmas, mas alterando a proporção do uso de cada, uma vez que as fábricas de papel já fazem bom uso de seus insumos para **Autoprodução** de energia elétrica, sendo ainda indispensável a utilização de outras fontes, só devendo melhorar a eficiência do maquinário descrito nesse relatório.

### Principais equipamentos consumidores de energia

Os equipamentos que mais consumirão energia também se manterão os mesmos, uma vez que não há alteração nas etapas do processo, mas sim na forma que a energia será demandada e utilizada em cada vertente.

## Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de papel apresenta consumo específico médio melhorado de energia elétrica de 945,15kwh por tonelada de papel (melhora de 1,62% do consumo específico atual) e o consumo específico médio melhorado de energia térmica de 6,93 GJ cpor tonelada de papel (melhora de 4,60% do consumo específico atual) , calculado através da divisão do consumo total de energia pela produção das plantas visitadas.

Embora o consumo específico tenha modificado, a distribuição do consumo de energia térmica e elétrica continuam o mesmo, pois o maior impacto de melhora sugerida, foi nos sistemas térmicos e elétricos e não na troca de tecnologia ou equipamentos da indústria.

### Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a tabela abaixo apresenta as melhores referências identificadas no segmento de papel:

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	94,0%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	88,0%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	90,0%	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	55,5%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	-	85,0%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 24: Rendimento energético alternativo, Subsegmento de Papel

## Coeficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a tabela abaixo apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrônica	Outras
Gás Natural	-	100%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	100%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	100%	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eleticidade	99,42%	-	-	-	0,58%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 25: Coeficiente de destinação alternativo, Subsegmento de Papel

### Investimentos necessários para implantação de medidas básicas de eficiência.

As recomendações em relação à gestão, ajuste e melhoria de perdas térmicas e manutenção das caldeiras se tratam de melhorias no sistema e não a simples substituição de equipamentos. Onde a eficiência da caldeira estiver comprometida e for recomendado a troca da caldeira, o investimento aplicado será particular a cada caso.

Para recomendações de troca de motores e sistema de iluminação, foram identificados alguns equipamentos que poderiam ser substituídos por outros mais eficientes (Tabela 26).

A tabela 27, apresenta o custo de investimento estimado para substituição de equipamentos com tecnologia mais eficiente.

Equipamentos	Valor unitário (R\$)
LED 18W	20,00
High Bay LED Industrial 120W	499,00
Motores 5 cv	2.707,00
Motores 50 cv	14.180,00
Motores 75 cv	26.767,00
Motores 100 cv	33.309,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 - Baldor

**Tabela 26: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência**

Afim de comparar os custos aplicados das medidas, a tabela abaixo apresenta os custos de investimento R\$ por tonelada de celulose e o percentual de economia encontrada nas empresas pesquisadas.

Medidas de melhoria na eficiência energética <sup>2</sup>	Investimento atual	Custo de investimento (R\$/ t produzida)	% economia de energia	Economia de energia (tep/ t produzida)
Controle de combustão (injeção de ar) <sup>3</sup>	não se aplica	1,622-2,29	2,91%	0,0062-0,0084
Redução das quantidades de gases de combustão <sup>4</sup>	não se aplica	0,918	0,99%	0,0029
Melhora no isolamento térmico na caldeira <sup>5</sup>	melhoria no sistema	0,21	0,20%	0,00148
Manutenção da caldeira <sup>6</sup>	melhoria no sistema	1,377	0,50%	0,0014
Retorno do condensado na caldeira <sup>5</sup>	melhoria no sistema	0,178	0,20%	0,006
Recuperação de vapor <sup>5</sup>	melhoria no sistema	0,178	0,20%	0,006
Recuperação de calor nos gases de combustão <sup>3</sup>	Melhoria do sistema	1,622-2,29	2,91%	0,0062-0,0084
Troca de caldeira de força <sup>2</sup>	Não se aplica	122,055	7,87%	0,0236
Troca de caldeira de gás <sup>2</sup>	Não se aplica	83,337	6,54%	0,0124
Troca de caldeira de óleo <sup>2</sup>	Não se aplica	88,407	2,91%	0,0062
Capota de alto rendimento <sup>9</sup>	Não se aplica	0,092	11,24%	0,0184
Troca dos motores standard por motores de alto rendimento <sup>7</sup>	(tabela 22)	72,925	6,63%	0,0264
Iluminação LED <sup>8</sup>	(tabela 22)	2,616	70,31%	0,00012

**Tabela 27: Investimento de medidas aplicadas no segmento de papel**

<sup>2</sup> Foi estabelecido para o preço de referência para uma caldeira de força, R\$ 220.000 / t de vapor e R\$ 200.000/ t de vapor para caldeiras de recuperação, óleo combustível e gás natural (Bertinotti,2016).

<sup>3</sup> Para o preço do controle de automatização para combustão da caldeira, se assumiu 2,5% do custo da caldeira.

<sup>4</sup> Baseado no preço da caldeira se assumiu um custo de 1,5% do custo da caldeira, para as melhoras com economizador de ar.

<sup>5</sup> Baseado no preço das caldeiras se assumiu 0,2% para manutenção do sistema de distribuição de vapor e condensados.

<sup>6</sup> Baseados no preço da caldeira se assumiu o custo de 1,5% para manutenção da caldeira em geral.

<sup>7</sup> Foi estimado a troca de 100% dos motores, utilizando a ferramenta de investimento do fabricante (WEG, 2018)

<sup>8</sup> Foi estimado a quantidade lâmpadas e calculado energia adotando 12h de utilização. O preço do investimento foi consultado com um fornecedor (HTL instalação e manutenção elétrica).

<sup>9</sup> Preço obtido por consulta aos fornecedores e gestores das unidades visitadas.

De acordo com a melhor tecnologia apresentada nota-se o maior potencial na parte elétrica, para substituição de todos os motores da fábrica.

FONTE DE ENERGIA (tep/t)	FM	CP	Ilum	Total (%)
GÁS NATURAL	-	0,008	-	4,84%
LENHA	-	0,014	-	8,13%
ÓLEO COMBUSTÍVEL	-	0,005	-	2,22%
ELETRICIDADE	0,004	-	0,000	4,87%
Total (%)	4,62%	4,85%	26,90%	4,85%

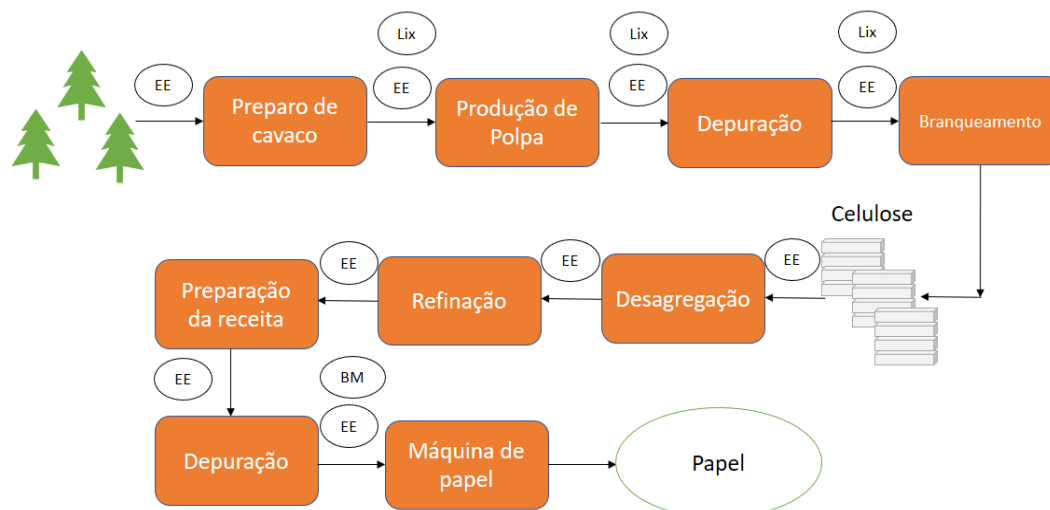
Fonte: Elaboração Própria

Tabela 28: Potencial de economia do segmento de produção de papel

## c. Subsegmento de Plantas Integradas de Celulose e Papel

### i. Situação atual

#### Produção, etapas de processo e equipamentos utilizados



Fonte: Elaboração própria

Figura 16: Esquema das etapas das plantas integradas

Legenda: BM - Biomassa, EE – Energia Elétrica, Lix - Lixívia

No caso das plantas integradas, o processo engloba todas as etapas desde a matéria-prima até o papel em si. Os equipamentos utilizados são os mesmos utilizados na produção de papel e celulose individualmente, como por exemplo: *hydropulpers*, depuradores, torres de branqueamento, máquina de papel, etc.

As plantas integradas são mais eficientes em termos de energia do que a combinação de uma fábrica de celulose e fábrica de papel já que a secagem da polpa pode ser evitada. A maioria das melhorias na eficiência energética alcançadas até agora vieram de fábricas integradas de celulose e papel em que a maior parcela do calor recuperado está no processo de secagem de papel.

A polpa química produz o licor negro como subproduto, que pode então ser processado em uma recuperação caldeira para produzir vapor e gerar eletricidade. Aproximadamente 22 GJ de licor negro podem ser queimados por tonelada de polpa. As grandes fábricas modernas de celulose química são mais do que autossuficientes em termos energéticos, vendendo energia excedente à rede elétrica (LBNL, 2008).

As fábricas integradas de pasta de celulose e papel também 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. 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.

### Fontes de energia

Um grande ponto positivo das fábricas integradas é que usualmente elas possuem as próprias unidades de produção de energia elétrica. No geral utilizam combustíveis fósseis ou biomassa para geração de energia térmica.

### Principais equipamentos consumidores de energia


Entre os principais equipamentos consumidores de energia, os que consomem energia térmica estão na ordem de grandeza de 80% do total de uma planta. O restante é consumo de energia elétrica, onde mais de 95% do consumo de energia elétrica é proveniente de cargas motrizes.

Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Electr	Outros
Produção de cavaco/ polpação							
Depuração (Deslignificação)							
Branqueamento							
Calcinação							
Concentração de licor							
Recuperação de reagentes químicos							
Tratamento de água e afluentes							
Preparo de Massa							
Formação de folha							
Secagem e acabamento							
Sistemas auxiliares							

Fonte: elaboração própria

Tabela 29: Distribuição de unidade de serviço no segmento de plantas integradas de produção de celulose e papel.

#### Legenda:

	Utilização por unidade de serviço.
FM	Força motriz
CP	Calor de Processo
AD	Aquecimento direto
Refr	Refrigeração
Ilum	Iluminação
Electr	Eletroquímica
Outros	Outros usos finais



## Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção integrada de papel e celulose apresenta consumo específico médio calculado de energia elétrica e térmica distintos por tipo de papel, a seguir segue na tabela abaixo os consumos específicos, estimados através da divisão do consumo total de energia pela produção das plantas visitadas.

Vale ressaltar que o valor obtido na pesquisa, foi obtido através de um levantamento dos energéticos utilizados, e no tipo de papel embalagem as plantas integradas estão utilizando cada vez mais aparas de boa qualidade o que em alguns casos torna o consumo específico melhor. Para o caso de papel de imprimir e escrever as fábricas apresentaram um rendimento térmico baixo e por isso o consumo específico estar um pouco maior que a referência. Os demais tipos de papel foi utilizado na média o valor de referência para maior confiabilidade dos dados.

Etapas de processo	Elétrico (kWh/t)	%	Vapor (GJ/t)	%
Planta integradas	1.309,13		14,632	
produção de celulose:	649,13	49,58%	11,232	76,76%
Produção de cavaco/ polpação	53,99	8,32%	2,32	14,9%
Depuração (Deslignificação)	89,99	13,9%	0,97	6,2%
Branqueamento	143,98	22,8%	1,73	11,1%
Calcinação	27,60	4,2%	0,37	2,4%
Concentração de licor	117,59	18,1%	0,37	2,4%
Recuperação de reagentes químicos	148,78	22,9%	4,28	27,4%
Tratamento de água e afluentes	67,19	10,3%	2,68	17,1%
produção de papel:	660	50,4%	3,4	23,23%
Preparo de massa	200,61	30%	0,54	16%
Formação de folha	284,86	43%	0,24	7%
Secagem e acabamento	90,27	14%	2,61	77%
Sistemas auxiliares	84,26	13%	-	-

Fonte: Elaboração própria, a partir dos dados de distribuição energética da referência de McIlroy e Wiczinsky, 1999

**Tabela 30: Consumo específico por etapa produtiva de plantas integradas de celulose e papel**

## Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação, conforme explicado no item 4.c deste relatório, segue a tabela abaixo com os valores obtidos:

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	88,0%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	84,0%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	90,0%	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	55,5%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	88,7%	-	-	-	37,0%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 31: Rendimento energético atual, Subsegmento de plantas Integradas de celulose e papel.

## Coeficientes de destinação

Os coeficientes de destinação referem-se à distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem segundo os usos finais da energia, conforme explicado no item 4.c deste relatório, segue a abaixo tabela com os valores obtidos:

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrouímica	Outras
Gás Natural	-	29,5%	70,5%	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	100%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	77,30%	22,70%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	100%	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,49%	-	-	-	0,51%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 32: Coeficiente de destinação atual, Subsegmento de plantas Integradas de celulose e papel

## Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Algumas medidas de economia de energia podem ser executadas com facilidade, sem que sejam necessárias intervenções significativas nas instalações das caldeiras. Como primeiras providências para a promoção de economia de energia, é recomendado a regulagem na combustão, controle de fuligem e das incrustações e monitoramento de perdas de calor, vapor e água quente. (ELEKTRO)

Para medidas de reposição de motores e sistema de iluminação, devido ao grande número de equipamentos instalados, e pelo objetivo desse estudo não ser realizar um levantamento completo de todos os equipamentos, foi feito uma amostragem com base 2017 de alguns equipamentos e seus preços, em reais e sem o transporte, pois esse difere de região para região, abaixo segue a lista de reposição para os equipamentos atuais:

Equipamentos	Valor unitário (R\$)
Lâmpada vapor de sódio 200 W	22,00
Lâmpada vapor de sódio 400 W	46,90
Motores 5 cv	1.712,00
Motores 50 cv	11.727,00
Motores 75 cv	16.602,00
Motores 100 cv	20.687,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 - Baldor

Tabela 33: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência

## ii. Tecnologias mais eficientes

### Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

As etapas em si de produção não serão alteradas, mas sim determinados equipamentos para melhora do gasto energético. A troca dos motores *standard* por motores de alto rendimento sempre é a principal oportunidade de melhoria da eficiência energética. O percentual de economia varia de acordo com a potência do motor e sua aplicação. Logo adotaremos a mesma medida já apresentada no item anterior 5.a (Tabela 11).

Outro método de economia de energia importante em motores (e já mais difundido, porém nem sempre adotado) é a utilização de **soft-starters** e **VFDs**, a economia vai depender do tamanho da planta e onde essa tecnologia vai ser aplicada.

Outras medidas já mencionadas no segmento anterior, de produção de papel, utilização de Capotas de alto rendimento, que podem melhorar todo o processo de secagem, por meio de transferência de calor por condução e convecção (Figura 15).

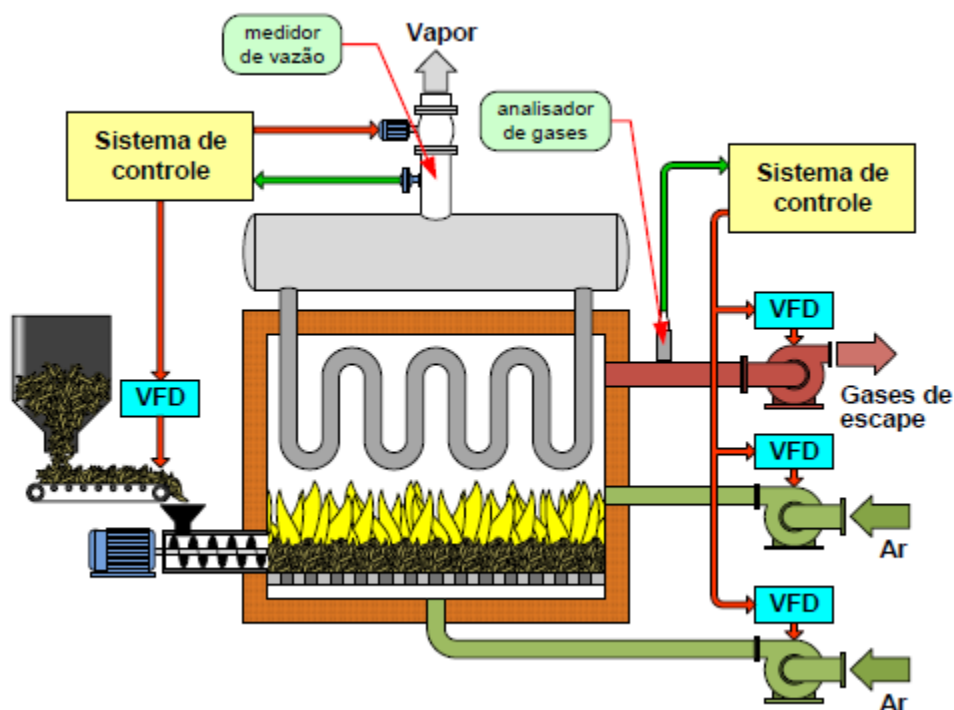
Outro ponto considerável é onde houver energia térmica disponível e com baixo custo ou vapor residual de processo, também já mencionado no segmento de produção de papel é a **Tecnologia por absorção em Chillers**, essa medida é uma boa alternativa em relação ao sistema de refrigeração da planta. As fábricas de papel possuem condições vantajosas, uma vez que já desenvolveram processos de conversão de biomassa em energia.

Medidas de eficiência energética	
Elétricas	Uso de soft-starters
	Adoção de iluminação LED
	Troca dos motores standard por motores de alto rendimento
Outras	Capota de alto rendimento na máquina de papel
	Tecnologia por absorção em chillers

Fonte: Elaboração própria

Tabela 34: Medidas de eficiência energética do subsegmento de Plantas Integradas de Celulose e Papel

Pode-se melhorar o rendimento térmico de uma planta com o uso de caldeiras de alta eficiência, onde aplicáveis, que podem chegar a 95-96% de eficiência. Outro método para melhora do rendimento da caldeira é a **automatização da injeção de ar**, deixando-a independente do carregamento de combustível da caldeira.



Fonte: Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira, UFBA.

Figura 17: Controle de injeção de ar independente

A instalação de **retentores de calor da capota** da máquina de papel também representa um aumento da eficiência de energia térmica, podendo representar uma economia em torno de 15% do combustível utilizado na etapa de secagem. (Albany International).

Também na etapa de secagem, pode ser vantajosa a troca dos secadores a gás pelos elétricos, mas somente em plantas onde o custo de energia elétrica é baixo.

Algumas tecnologias empregadas predominantemente estão listadas:

- **Processo de preparo do cavaco**

Medidas de eficiência energética já identificadas nas plantas de celulose e papel para o processo de preparação de cavaco:

Medidas de eficiência energética
Utilização de descascadores de tambor
Utilização de transportadores pneumáticos com correia transportadores
Pré-aquecimento das toras
Triagem de cavaco automatizada

Fonte: Elaboração própria

Tabela 35: Medidas gerais de eficiência energética na etapa de preparo de cavaco

Foi notado que a aplicação das medidas relacionadas na tabela acima são importantes medidas de eficiência energética nos processos de preparo de cavaco. E ainda não são encontradas maciçamente no segmento de integradas. No entanto, a estimativa de economia de energia e investimento dessas tecnologias não são fáceis de estimar devido à complexidade de implantação e custos diferentes de logística para cada planta industrial. E essas tecnologias são estimadas através de estudo de caso particulares.

- **Processo de preparo da polpa**

Foi notado que a aplicação das medidas relacionadas na tabela abaixo são importantes medidas de eficiência energética nos processos na linha de fibras. E essas tecnologias só serão citadas devido por se tratar de medidas particulares e só estudadas caso a caso.

- Processo Mecânico:

Foi notado ainda a oportunidade das medidas de eficiência energética específicas do processo de preparação de polpa a partir do processo mecânico, como:

Melhorias no processo mecânico
Otimização do uso de energia no refinador
Recuperação de calor no TMP
Motores eficientes no prepare da polpa

Fonte: Elaboração própria

Tabela 36: Medidas gerais de eficiência energética na etapa de preparo de polpa a partir de processo mecânico

#### - Processo Químico:

Foi notado ainda a oportunidade das medidas de eficiência energética específicas do processo de preparação de polpa a partir do processo químico, mediante as seguintes medidas:

Melhorias no processo químico
Otimização do controle de diluição
Sistema de controle contínuo no digestor
Teor de sólidos no licor negro
Recuperação de calor no digestor
Troca de calor para dióxido de cloro (ClO <sub>2</sub> )

Fonte: Elaboração própria

Tabela 37: Medidas gerais de eficiência energética na etapa de preparo de polpa a partir de processo químico

Dentre as medidas verificadas o maior ganho identificado foi a partir do aumento do teor de sólidos do licor negro, aumento de área de troca térmica na caldeira. Já mencionadas no item 5.a.

#### • Sistema de Vapor

O vapor utilizado nas plantas de celulose é produzido nas caldeiras de recuperação, biomassa, algumas plantas possuem caldeiras auxiliares que utilizam outros energéticos. E nestes subsistemas essenciais encontram-se oportunidades típicas, como: a melhoria do processo de controle, a redução das perdas de calor, a melhor recuperação de calor e a melhora do isolamento térmico. Além das medidas que serão apresentadas, é importante notar que os sistemas de caldeiras de pressão muitas vezes, podem não estar melhor ajustadas para atender aos requisitos do sistema de geração de vapor da maneira mais eficiente.

As medidas de melhoria da eficiência nesse ponto são as mesmas as já ilustradas no item 5.a deste trabalho:

Medidas de melhoria na eficiência energética
Controle de combustão (injeção de ar)
Melhora no isolamento térmico na caldeira
Retorno do condensado na caldeira
Recuperação de calor nos gases de combustão
Redução das quantidades de gases de combustão
Manutenção da caldeira
Recuperação de vapor

Fonte: Elaboração própria

Tabela 38: Medidas de melhoria na produção de vapor

## Fontes de energia

Como o processo de produção não se altera, as fontes de energia também se mantêm as mesmas, exceto na etapa de secagem onde for viável a troca dos secadores a gás.

## Principais equipamentos consumidores de energia

No geral a máquina de papel é o maior consumidor de energia térmica de uma planta integrada, nas etapas de secagem e calandra. No que se refere a energia elétrica, as cargas motrizes representam em média 80-90% do consumo elétrico.

## Indicadores energéticos

A partir dos dados coletados no âmbito desta pesquisa, a indústria de produção de integrada de papel e celulose apresenta consumo específico melhorado médio calculado de energia elétrica em 2149,759kwh por tonelada (melhora de 4,53% do consumo específico atual) e energia térmica em 13,552 GJ (melhora de 7,38% do consumo específico atual) por tonelada, estimados através da divisão do consumo total de energia pela produção das plantas visitadas.



## Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a tabela abaixo apresenta as melhores referências identificadas no segmento de plantas integradas de papel e celulose:

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrônica	Outras
Gás Natural	-	88,0%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	84,0%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	90,0%	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	55,5%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	88,7%	-	-	-	37,0%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 39: Rendimento energético alternativo, Subsegmento de plantas Integradas de celulose e papel

## Coeficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a tabela abaixo apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrouímica	Outras
Gás Natural	-	29,5%	70,5%	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	100%	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	77,30%	22,70%	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	100%	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,49%	-	-	-	0,51%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 40: Coeficiente de destinação alternativo, Subsegmento de plantas Integradas de celulose e papel

## Investimentos necessários para implantação de medidas básicas de eficiência.

As recomendações que envolvem à gestão, ajuste, melhoria de perdas térmicas e manutenção das caldeiras, são medidas de melhorias no sistema e não a simples substituição de equipamentos (tabela 42). Na situação onde a eficiência da caldeira estiver comprometida pode ser recomendado a troca da caldeira. Para todas essas medidas o investimento aplicado será particular a cada caso, conforme já ilustrado nos itens 5.a e 5.b. Outras medidas de processo de preparo de cavaco, cozimento estão listadas como melhoria e já são predominantes no segmento e adoção dessas medidas requer um projeto e uma maior intervenção no processo, e o investimento será particular também caso a caso. (Tabela 36-38)

Para recomendação de troca de motores e sistema de iluminação, foram identificados alguns equipamentos que poderiam ser substituídos por outros mais eficientes (Tabela 41).

Equipamentos	Valor unitário (R\$)
LED 18W	20,00
High Bay LED Industrial 120W	499,00
Motores 5 cv	2.707,00
Motores 50 cv	14.180,00
Motores 75 cv	26.767,00
Motores 100 cv	33.309,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 - Baldor  
Tabela 41: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência

Medidas de melhoria na eficiência energética <sup>3</sup>	Investimento atual	Custo de investimento (R\$/ t produzida)	% economia de energia	Economia de energia (tep/ t produzida)
Controle de combustão (injeção de ar) <sup>4</sup>	não se aplica	1,79 - 15,40	2,91%	0,0295-0,1700
Redução das quantidades de gases de combustão <sup>5</sup>	não se aplica	0,720-6,162	0,99%	0,0010-0,0578
Melhora no isolamento térmico na caldeira <sup>6</sup>	melhoria no sistema	1,305	0,20%	0,9584
Manutenção da caldeira <sup>7</sup>	melhoria no sistema	1,08-9,24	0,50%	0,005-0,210
Retorno do condensado na caldeira <sup>6</sup>	melhoria no sistema	1,305	0,20%	0,9584
Recuperação de vapor <sup>6</sup>	melhoria no sistema	1,305	0,20%	0,9584
Recuperação de calor nos gases de combustão <sup>4</sup>	Melhoria do sistema	1,79 - 15,40	2,91%	0,0295-0,1700
Troca de caldeira de força <sup>3</sup>	Não se aplica	97,232	7,87%	0,0236
Troca de caldeira de recuperação <sup>3</sup>	Não se aplica	1132,58	2,91%	0,0062
Troca dos motores standard por motores de alto rendimento <sup>8</sup>	(tabela 33)	287,627	7,18%	0,0257
Iluminação LED <sup>9</sup>	(tabela 33)	8,984	55,43%	0,0009

Fonte: Elaborada própria

Tabela 42: Investimento das medidas aplicadas no segmento de plantas integradas de celulose e papel

<sup>3</sup> Foi estabelecido para o preço de referência para uma caldeira de força, R\$ 220.000 / t de vapor e R\$ 200.000/ t de vapor para caldeiras de recuperação, óleo combustível e gás natural (Bertinotti,2016).

<sup>4</sup> Para o preço do controle de automatização para combustão da caldeira, se assumiu 2,5% do custo da caldeira.

<sup>5</sup> Baseado no preço da caldeira se assumiu um custo de 1,5% do custo da caldeira, para as melhoras com economizador de ar.

<sup>6</sup> Baseado no preço das caldeiras se assumiu 0,2% para manutenção do sistema de distribuição de vapor e condensados.

<sup>7</sup> Baseados no preço da caldeira se assumiu o custo de 1,5% para manutenção da caldeira em geral.

<sup>8</sup> Foi estimado a troca de 100% dos motores, utilizando a ferramenta de investimento do fabricante (WEG, 2018)

<sup>9</sup> Foi estimado a quantidade lâmpadas e calculado energia adotando 12h de utilização. O preço do investimento foi consultado com um fornecedor (HTL instalação e manutenção elétrica).

De acordo com a melhor tecnologia disponível, nota-se o potencial conforme tabela abaixo:

FONTES DE ENERGIA (tep/t)	FM	CP	Ilum	Total (%)
GÁS NATURAL	-	0,0002	-	1,88%
LENHA	-	0,0016	-	3,35%
OUTRAS FONTES PRIM.	-	0,0180	-	<b>6,71%</b>
ELETRICIDADE	0,008	-	0,000	7,35%
TOTAL (%)	7,10%	5,76%	55,43%	5,89%

Fonte: Elaboração Própria

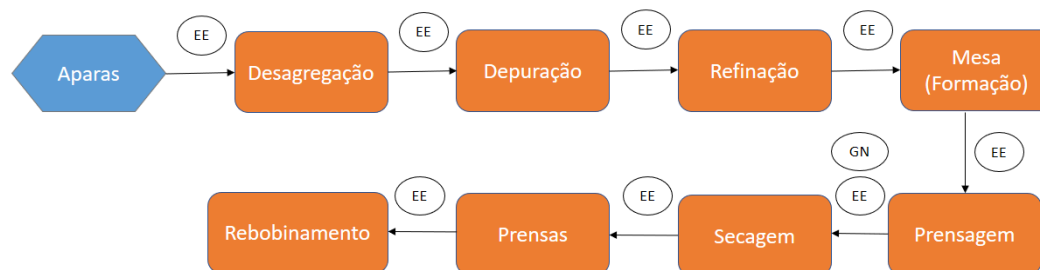
Tabela 43: Potencial de economia do segmento integrado de produção de celulose e papel

## d. Subsegmento de recicladores de papel

### i. Situação atual

#### Produção etapas de processo e equipamentos utilizados

O processo de reciclagem depende do tipo de apara a ser processada e do tipo de papel a ser fabricado. De maneira geral e sintetizada:



Fonte: Elaboração própria

Figura 18: Etapas do processo de reciclagem

Legenda: EE – Energia Elétrica, GN – Gás Natural

A reciclagem do papel se assemelha em alguns aspectos ao processo de produção do papel virgem. Após triturados e separados em fardos (aparas), o papel é posto em meio aquoso e sofre ação mecânica no *Hydrapulper* no processo de desagregação. Na continuação do processo o papel passa pelo depurador, onde são removidas impurezas do material velho, e depois pelo refino para melhora da resistência do papel. Depois dessas etapas o material passa pela formação, prensagem e secagem, que são exatamente iguais ao procedimento do papel virgem. Por fim o rebobinamento para melhora logística.

#### Fontes de energia

O processo de reciclagem do papel difere da produção de papel e celulose, já que não produz biomassa para utilizar na autoprodução de energia. Assim utiliza-se da rede elétrica para alimentação predominantemente das forças motrizes e de gás natural como fonte de energia térmica (basicamente na etapa de secagem).

#### Principais equipamentos consumidores de energia

Todas as etapas ilustradas no fluxograma utilizam equipamentos que funcionam por meio de motores de médio e grande porte que são alimentados pela rede elétrica.

Etapas de processo	Elétrico (kWh/t)	%
produção de reciclado:	543,84	
Desagregação (Hydra-pulper)	18,78	3,45%
Depuração	38,27	7,04%
Refinação	252,59	46,45%
Formação de folha	163,29	30,03%
Secagem	42,52	7,82%
Rebobinamento	0,24	0,04%
Serviço auxiliares	28,14	5,17%

Fonte: Valor médio de consumo de eletricidade por tonelada de reciclado, obtido durante a pesquisa, e pode ser modificado de acordo com a qualidade de aparas

Tabela 44: Distribuição e consumo energético por produção de reciclado

O uso de energia térmica, proveniente da queima gás natural, é utilizada predominantemente em uma etapa do processo, porém com consumo comparativamente maior ao consumo de energia elétrica que compõem o restante das etapas.

Etapas de processo	Vapor (GJ/t)	%
produção de reciclado:	4,97	
Preparo de matéria prima	0,79	15,87%
Formação de folha	0,36	7,21%
Secagem e acabamento	3,82	76,92%
Sistema auxiliares	-	-

Fonte: Valor médio de consumo de vapor por tonelada de reciclado, obtido durante a pesquisa, e pode ser modificado de acordo com a qualidade de aparas

Tabela 45: Distribuição e consumo energético por produção de reciclado

Para melhor entendimento, o segmento de reciclado será classificado de acordo com as principais etapas produtivas por unidade de serviço, da seguinte forma:

Etapas de processo	FM	CP	AD	Refr	Ilum	Electr	Outros
Preparo de massa							
Formação de folha							
Secagem e acabamento							
Sistemas auxiliares							

Fonte: elaboração própria

Tabela 46: Classificação por unidade de serviço no subsegmento de reciclados

Legenda:



Utilização por unidade de serviço.

FM	Força motriz
CP	Calor de Processo
AD	Aquecimento direto
Refr	Refrigeração
Ilum	Iluminação
Electr	Eletroquímica
Outros	Outros usos finais

## Indicadores energéticos

O consumo específico energia elétrica da planta é de aproximadamente 543,84 kWh /tonelada. Já o consumo específico de gás natural fica em torno de 138 m<sup>3</sup>/tonelada.

### Rendimento energético

O conceito de rendimento energético se refere apenas à primeira transformação de energia do processo produtivo, e ele retrata a média dos rendimentos de transformação.

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	91,0%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	94%	-	-	-	37,0%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 47: Rendimento energético atual, Subsegmento de Reciclados

## Coeficientes de Destinação

O coeficiente de destinação é a distribuição dos energéticos utilizados em porcentagem, no caso do subsegmento de reciclados utiliza-se a energia elétrica em força motriz e em menor proporção, iluminação. E a energia térmica em calor de processo, conforme tabela abaixo:

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrouímica	Outras
Gás Natural	-	100%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	98,2%	-	-	-	1,8%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 48: Coeficiente de destinação atual, Subsegmento de Reciclados

## Investimentos necessários para reposição de equipamentos

Conforme mencionado nos segmentos anteriores deste relatório, existem medidas de economia de energia podem ser executadas com facilidade, sem que sejam necessárias intervenções significativas nas instalações das caldeiras. Como primeiras providências para a promoção de economia de energia, é recomendado a regulagem na combustão e monitoramento de perdas de calor, vapor e água quente. (ELEKTRO)

Adotando a mesmas premissa utilizada nos segmentos anteriores deste relatório, foi feito uma amostragem com base 2017, de alguns equipamentos empregados no sistema motriz e de iluminação para reposição. Essa estimativa foi feita devido ao grande número de equipamentos instalados, e não ser objeto desse estudo fazer um levantamento completo de todos os equipamentos. Os preços informados, em Reais, sem considerar custos de transporte que difere de região para região, são:



Equipamentos	Valores unitários (R\$)
Lâmpada vapor de sódio 200 W	22,00
Lâmpada vapor de sódio 400 W	46,90
Motores 5 cv	1.712,00
Motores 50 cv	11.727,00
Motores 75 cv	16.602,00
Motores 100 cv	20.687,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 - Baldor

Tabela 49: Investimento para reposição de equipamentos de mesma eficiência

## ii. Tecnologias mais eficientes

### Produção, etapas de processo e oportunidades de eficiência energética

Como já observado anteriormente, o maior consumo de energia elétrica na planta é proveniente da alimentação das forças motrizes do processo, ligado diretamente a rede elétrica.

Já a utilização de energia térmica, na etapa de secagem, se dá em caldeiras flamotubulares de alta eficiência, pela queima de gás natural possuindo bom rendimento comparado a outros combustíveis. O que pode ser melhorado nessa etapa é a troca dos rolos de ferro-fundido por rolos de aço, que possuem maior capacidade de secagem, melhorando assim a eficiência do processo.

### Fontes de energia

Pode-se aumentar o rendimento dos motores para se ter uma melhora no consumo de energia elétrica da rede. A caldeira, para produção de energia térmica, faz uso de gás natural que já é altamente eficiente (Sulgás, 2013). Desta forma, não podendo haver alteração no processo de produção, as fontes de energia continuam se resumindo a elétrica (Rede) e térmica (gás).

### Principais equipamentos consumidores de energia

De maneira geral o consumo da planta continuará sendo pelos mesmos equipamentos, já que se trata de uma planta com basicamente só dois tipos grandes de consumo (elétrico para motores e gás na caldeira). A diferença será devido a escolha de motores com rendimento mais altos, gerando assim uma economia energética. E o consumo específico melhorado será 532,5kwh/t (equivalente a 2,05% de melhora do consumo específico atual) e 4,81GJ/t (equivalente a 5,32% do consumo específico atual).

## Indicadores energéticos

### Rendimento energético

De acordo com as tecnologias encontradas no âmbito da pesquisa, a tabela abaixo apresenta as melhores referências identificadas no segmento de produção de papel reciclado:

FORMAS DE ENERGIA	RENDIMENTO ENERGÉTICO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletroquímica	Outras
Gás Natural	-	94,0%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	95,5%	-	-	-	85,0%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 50: Rendimento energético alternativo, Subsegmento de Reciclados

## Coefficientes de Destinação

Com base nas medidas identificadas, a tabela abaixo apresenta a distribuição com a utilização das medidas, utilizando uma média proporcional as plantas industriais dessa pesquisa.

FORMAS DE ENERGIA	COEFICIENTE DE DESTINAÇÃO (%)						
	Força Motriz	Calor de Processo	Aquecimento Direto	Refrigeração	Iluminação	Eletrouímica	Outras
Gás Natural	-	100%	-	-	-	-	-
Carvão Vapor	-	-	-	-	-	-	-
Carvão Metalúrgico	-	-	-	-	-	-	-
Lenha	-	-	-	-	-	-	-
Produtos da Cana	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Primárias	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Diesel	-	-	-	-	-	-	-
Óleo Combustível	-	-	-	-	-	-	-
Gasolina	-	-	-	-	-	-	-
GLP	-	-	-	-	-	-	-
Querosene	-	-	-	-	-	-	-
Gases de Processo	-	-	-	-	-	-	-
Coque de Carvão Mineral	-	-	-	-	-	-	-
Eletricidade	99,18%	-	-	-	0,82%	-	-
Carvão vegetal	-	-	-	-	-	-	-
Álcool Etílico	-	-	-	-	-	-	-
Outras Fontes Secundárias de Petróleo	-	-	-	-	-	-	-
Alcatrão	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria

Tabela 51: Coeficiente de destinação alternativo, Subsegmento de Reciclados

## **Investimentos necessários para reposição de equipamentos de tecnologia mais eficiente**

As recomendações que envolvem à gestão, ajuste, melhoria de perdas térmicas e manutenção das caldeiras, são medidas de melhorias no sistema e não a simples substituição de equipamentos (tabela 53). Na situação onde a eficiência da caldeira estiver comprometida pode ser recomendado a troca da caldeira. Foi consultado em um fabricante o custo do cilindro secador, esse investimento pode ser particular também caso a caso.

Para recomendação de troca de motores e sistema de iluminação, foram indentificados alguns equipamentos que poderiam ser substituídos por outros mais eficientes (Tabela 52).

Equipamentos	Valor unitário (R\$)
LED 18W	20,00
High Bay LED Industrial 120W	499,00
Motores 5 cv	2.707,00
Motores 50 cv	14.180,00
Motores 75 cv	26.767,00
Motores 100 cv	33.309,00
Motores 450 cv	80.000,00
Cilindros secadores*	R\$ 1.500.000,00

Fonte: Ar Brasil Compressores, WEG, FG ano base 2017, ABB 2016 – Baldor. \*Valor do cilindro secador informado pelo fabricante Hergen

Tabela 52: Investimento para reposição de equipamentos de maior eficiência

Medidas de melhoria na eficiência energética <sup>4</sup>	Investimento atual	Custo de investimento (R\$/ t produzida)	% economia de energia	Economia de energia (tep/ t produzida)
Melhora no isolamento térmico na caldeira <sup>5</sup>	melhoria no sistema	0,86	0,20%	0,020
Manutenção da caldeira <sup>6</sup>	melhoria no sistema	0,64	0,50%	0,005
Troca da caldeira a gás <sup>4</sup>	Não se aplica	42,92	3,10%	0,018
Troca dos motores standard por motores de alto rendimento <sup>7</sup>	(tabela 49)	29,29	1,59%	0,0006
Iluminação LED <sup>8</sup>	(tabela 49)	3,65	55,58%	0,00047

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 53: Investimento das melhorias propostas do segmento de produção de reciclados

De acordo com a melhor tecnologia disponível nota-se o potencial de 6,11% para o segmento de reciclados.

FONTE DE ENERGIA (tep/t)	FM	CP	Ilum	Total (%)
GÁS NATURAL	-	0,0250	-	3,80%
ELETRICIDADE	0,0006	-	0,00047	2,26%
TOTAL (%)	1,59%	3,80%	55,58%	6,11%

Fonte: Elaboração Própria

Tabela 54: Potencial de economia do segmento de produção de reciclados

<sup>4</sup> Foi estabelecido para o preço de referência para uma caldeira de força, R\$ 220.000 / t de vapor e R\$ 200.000/ t de vapor para caldeiras de recuperação, óleo combustível e gás natural (Bertinotti,2016).

<sup>4</sup> Para o preço do controle de automatização para combustão da caldeira, se assumiu 2,5% do custo da caldeira.

<sup>5</sup> Baseado no preço das caldeiras se assumiu 0,2% para manutenção do sistema de distribuição de vapor e condensados.

<sup>6</sup> Baseados no preço da caldeira se assumiu o custo de 1,5% para manutenção da caldeira em geral.

<sup>7</sup> Foi estimado a troca de 100% dos motores, utilizando a ferramenta de investimento do fabricante (WEG, 2018)

<sup>8</sup> Foi estimado a quantidade lâmpadas e calculado energia adotando 12h de utilização. O preço do investimento foi consultado com um fornecedor (HTL instalação e manutenção elétrica).

## 6. ANÁLISE DE CONDICIONANTES À PENETREÇÃO DE TECNOLOGIAS EFICIENTES DE ENERGIA POR SUBSEGMENTO

Entende-se como condicionante algo que condiciona ou restringe a aplicação das medidas de eficiência energética propostas, sendo muito importante a sua avaliação antes de iniciar o plano de implementação destas medidas. Neste estudo foram avaliados os condicionantes técnicos, econômico-financeiros, e outros condicionantes adicionais para cada subsegmento.

### a. Subsegmento de Celulose

#### i. Condicionantes Técnicos

Há alguns anos a indústria de celulose e papel tinha de comprar energia elétrica para suprir a demanda de seus processos fabris, mas hoje já vivencia uma realidade bem distinta: as plantas industriais mais atuais são capazes de produzir toda a energia necessária ao processo fabril, e com sobra.

O excedente dessa energia verde, obtida por meio do licor negro e da biomassa florestal, vem sendo, inclusive, comercializado no Sistema Interligado Nacional (SIN) e se fortalecendo como frente adicional de negócios do setor. A realidade atual é que todos os grandes fabricantes de celulose estão vendendo energia no mercado livre.

O aumento da classe de pressão desses equipamentos, em especial caldeiras e turbogeradores, e a utilização de sistemas de recuperação de calor despontam como os avanços mais importantes da área, a partir dos quais foram desenvolvidos materiais que possibilitaram a queima do licor negro de forma mais eficiente, levando a uma cogeração mais elevada.

Enquanto as fábricas da década de 1960 e 1970 operavam numa média de pressão de 40 bar, hoje a média é de 80 bar, sendo que fábricas mais recentes têm caldeiras de até 100 bar. Para acompanhar o ritmo de aumento de escala produtiva de celulose, há a exigência de **caldeiras de recuperação** denominadas "**extralargas**" para processar todo o licor negro gerado no processo. Os projetos precisaram evoluir em alguns aspectos importantes, a começar pelo metalúrgico, já que foi necessário **desenvolver novos materiais** para suportar o calor contido nas grandes fornalhas. O aspecto dimensional também teve de ser considerado, já que os equipamentos auxiliares passaram a ter tamanhos que o setor ainda não havia utilizado, como os acessórios ventiladores de ar, trocadores de calor e precipitadores eletrostáticos (ABTCP, 2017).

A troca dos motores das plantas tem a capacidade de gerar grandes economias de energia, porém ao mesmo tempo é uma medida muito invasiva, gerando assim um tempo longo de parada de produção. Já a adoção de **inversores de frequência** e **soft-starters** também geram reduções de consumo (porém

menores do que a troca dos motores) e não são tão invasivos, mas por outro lado, por serem tecnologias de cargas não-lineares aumentam a quantidade de harmônicos na rede, causando assim perdas por aquecimento dos equipamentos, flutuações de tensão e etc, mas ainda assim sendo mais eficientes que o não uso dessas tecnologias.

No que tange ao **controle de injeção de ar**, o uso de sistemas sofisticados de controle passou a ser de fundamental importância para garantir a estabilidade da combustão da caldeira de recuperação, mas esse controle também se dá por **cargas não-lineares**, tendo as mesmas consequências citadas acima no controle de motores.

A adoção de **iluminação LED** também é uma medida de eficiência energética, com potencial pouco representativo, já que a iluminação representa 0,14% consumo de eletricidade no segmento. Porquanto quando avaliar essa medida, deve-se **adequar a instalação** para a nova tecnologia, já que de maneira geral o segmento utiliza lâmpadas de vapor de sódio/metálico e fluorescentes.

## ii. Condicionantes econômico-financeiros

A troca das caldeiras atuais por caldeiras de melhor eficiência reduzirá substancialmente o consumo de combustíveis utilizados na produção de vapor de processo, gerando redução de custos da aquisição do combustível. Porém há que se observar que o investimento em equipamentos desse nível é vultoso, devendo avaliar-se as possibilidades de adoção dessa medida.

A adaptação do controle de injeção do ar por meio de conversores de frequência também traz economia na utilização dos combustíveis, e ao mesmo tempo requer um menor investimento inicial quando comparado a troca das caldeiras.

## iii. Outros condicionantes

Um grande condicionante está nas pessoas que operam os equipamentos e tomam conta das plantas industriais. Deve-se visar pela formação e contratação de profissionais capacitados na questão de energia, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação também, auxiliando no uso dessas tecnologias.

Uma alternativa para as organizações obterem consciência de eficiência energética é o emprego da ABNT NBR ISO 50.001 – Sistemas de Gestão de Energia, que demonstra o mínimo necessário para ter um consumo energético eficiente

## b. Subsegmento de produção de papel

### i. Condicionantes Técnicos

Os maiores consumidores de energia elétrica em plantas de produção de papel são as cargas motrizes. Se torna um grande motivador para a redução de consumo de energia elétrica, a troca dos motores atuais por outros de maior rendimento (em torno de 95,5%), e também a utilização de controle e acionamentos eletrônicos, que além de tudo podem aumentar o tempo de vida útil das máquinas.

O consumo de combustíveis utilizados em caldeiras pode ser reduzido com medidas já bem estabelecidas no mercado. O uso de caldeiras com economizadores, permitindo o pré-aquecimento da água, gera redução no consumo do combustível. A troca por **caldeiras de maior eficiência** térmica (94-95%), atualmente 89%, também se mostra como boa opção, mas sendo melhor aplicada em plantas onde se usam caldeiras do tipo flamotubular com **maior pressão de trabalho**.

### ii. Condicionantes econômico-financeiros

As motivações financeiras estão altamente entrelaçadas as motivações técnicas, ainda mais no cenário onde as empresas se encontram em um ambiente altamente competitivo. Nesse ambiente, a busca pelo uso racional de energia assume um caráter estratégico, alinhado com a adoção de medidas para: eliminar desperdícios, reduzir perdas e racionalizar a produção, que são os elementos de grande importância no custo final dos produtos finais.

Por este lado, a **possibilidade de investimento** disponíveis para eficiência nos usos de energia e água são amplamente estimados, entretanto, o nível atual para estes investimentos são muito menores, representando apenas uma fração das oportunidades financeiramente atrativas existentes, inviabilizando investimentos em economias de energia e adoção de todas as alternativas existentes na melhoria da eficiência energética.

### iii. Outros condicionantes

Um grande condicionante está nas pessoas que operam os equipamentos e tomam conta das plantas industriais. Deve-se visar pela formação e contratação de profissionais capacitados na questão de energia, pois eles podem atuar tanto em projetos, garantindo que as tecnologias mais eficientes sejam utilizadas, quanto na operação também, auxiliando no uso dessas tecnologias.

Já no chamado chão de fábrica, ou seja, no dia a dia da operação dos complexos industriais, observa-se que, em geral:

- No caso das unidades menor porte, há desconhecimento sobre as tecnologias mais eficientes e de seus potenciais benefícios;

- Alguns investimentos envolvem tempo de retorno alto. Nesses horizontes de tempo os ganhos de eficiência não são facilmente identificados e por vezes não são considerados nas análises de investimentos;
- Há restrição associada à capacidade de investimento no caso das empresas de menor porte, mas mesmo nas grandes empresas a prioridade de investimentos (quando os recursos são limitados, o que é usual) dificilmente é posta no uso racional de energia;
- Há dificuldade de acesso à linhas de financiamento, principalmente por parte das pequenas empresas;
- Dificuldades de mão de obra especializada, notadamente em empresas de pequeno e médio porte.



## c. Subsegmento de plantas integradas de celulose e papel

### i. Condicionantes Técnicos

Assim como as plantas de produção de celulose, as plantas integradas são grandes consumidoras de energia, porém diferentemente das primeiras, de modo geral ainda não são autossuficientes em energia. As plantas integradas fazem uso de combustíveis fósseis, aproximadamente 10% do consumo, sendo que possuem alto potencial na conversão da energia por queima de biomassa e lixívia, como também na redução das perdas de compostos orgânicos nas unidades de recuperação.

A adaptação para melhor uso da biomassa e lixívia, ainda é uma barreira visto que a maioria das tecnologias de conversão de biomassa ainda requer avanços técnico-econômicos. O principal processo alternativo para a conversão de biomassa, já mencionado no segmento de celulose, trata-se de um processo onde é feito a conversão de combustíveis sólidos ou líquidos, envolvendo vapor e ar, na produção de um combustível gasoso, cujo transporte é mais simples, e a combustão é mais eficiente.

Atualmente as medidas plantas utilizam mais energia do que conseguem recuperar durante o ciclo produtivo. A melhoria no processo com caldeiras de recuperação com maior capacidade de produção de vapor e também todo o conjunto caldeira-turbogerador trabalhando a pressões mais elevadas se torna um ótimo caminho para a redução do consumo de combustíveis fósseis, podendo inclusive se tornarem também plantas autossuficientes em energia.

As alternativas para melhoria da eficiência energética nas plantas integradas no geral são as mesmas das plantas de celulose e papel, em vista de que, em um ponto de vista mais geral, as fábricas integradas possuem etapas de produção muito parecidas com as fábricas de celulose e fábricas de papel, com algumas nuances.

O consumo térmico é mais representativo que o elétrico, o que motiva a adoção de tecnologias mais modernas, como caldeiras de alta eficiência, controle na injeção de ar, ou capotas de alto rendimento, reduzindo assim o consumo de combustíveis na produção de vapor de processo, ou até mesmo melhorando a eficiência no conjunto caldeira-turbogerador para autoprodução nas plantas.

As medidas que podem ser adotadas para melhoria da eficiência energética em cargas motrizes e iluminação, seguem os mesmos critérios já citados em celulose e papel.

## ii. Condicionantes econômico-financeiros

Um contraponto é que a mudança de tecnologia em qualquer etapa do processo pode interferir severamente na produção, então essas mudanças só ocorrem em cenários mais críticos, onde essas alterações justificarão tais intervenções, com melhor oportunidade para as medidas que tragam redução de custos mais significativos no processo produtivo.

No cenário, onde a produção se encontra em crescimento, a expansão da capacidade produtiva das plantas pode ser realizada de maneira a empregar uma tecnologia mais moderna do que aquela empregada na capacidade produtiva já instalada, gerando ganhos de eficiência.

Assim como para novos projetos é importante que as empresas de engenharia desenvolvam seus projetos utilizando as medidas mais eficientes demonstrando ganhos ao cliente.

## iii. Outros condicionantes

Vapor d'água é o principal fluido térmico utilizado em fábricas de celulose e papel nos seguintes usos finais: aquecimento de processos, secagem e produção de potência mecânica em turbinas a vapor. Nas fábricas mais antigas e/ou onde **não há manutenção apropriada**, há perdas substanciais de vapor através de vazamentos, sobretudo nos purgadores utilizados na rede de distribuição. Monitoramento e manutenção adequada dos purgadores podem minimizar seu bloqueio e diminuir substancialmente as perdas a um custo bastante reduzido.

Em fábricas de celulose e papel mais antigas, frequentemente, a taxa de recuperação de condensado é baixa. Incrementar essa taxa aumenta a eficiência total do sistema de vapor das fábricas, além de propiciar **economias no consumo** e no tratamento da água de reposição das caldeiras.

## **d. Subsegmento de recicladores de papel**

### **i. Condicionantes Técnicos**

Sabe-se que o grande consumidor de energia elétrica nas fábricas recicladoras de papel é o motor elétrico. Por essa razão a substituição por motores de alto rendimento se mostra ótima alternativa, já que os custos e frequência de manutenção aumentam com o tempo de uso do motor. A utilização de soft-starters e inversores de frequência também se torna fundamental, aumentando a vida útil do motor e diminuindo custos de operação, porém aumentando harmônicos na rede. Porém a substituição dos equipamentos pode requerer um tempo longo de parada de produção e adequações conforme já mencionado.

### **ii. Condicionantes econômico-financeiros**

Os condicionantes econômicos estão diretamente relacionados aos técnicos, em vista de que a economia energética e de custos de operação, afetarão consideravelmente nos gastos da planta, assim como a implementação dessas novas tecnologias, já que não se tratam apenas de adequações, mas também trocas de equipamentos.

Hoje, as indústrias que desejarem modernizar os motores instalados em suas linhas de montagem têm à disposição recursos competitivos de várias fontes para esse fim.

Empreendedores têm à sua mão soluções desenhadas com consultorias de energia, empresas de eficiência energética, linhas de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) ou chamadas públicas de distribuidoras de energia. Por sua vez, os fabricantes de máquinas mantêm planos de troca de motores elétricos, nos quais concedem desconto de até 12% no valor de aquisição do novo motor na entrega do equipamento antigo.

### **iii. Outros condicionantes**

Desde de 2010 com a sanção da Política Nacional de Resíduos Sólidos, há gradativamente um aumento da demanda de papel reciclado no país. Em decorrência desse aumento de demanda, as plantas de reciclagem tenderão a aumentar a produção e por consequência seus gastos. Será de extrema importância assim, o investimento na melhora de rendimento de seu maquinário, para redução de custos e melhoria de eficiência energética.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A implementação de tecnologias mais modernas já disponíveis e estudo de viabilidade da aplicação de tecnologias recentes, porém menos difundidas, irá permitir ao setor reduzir significativamente seu consumo energético (e até mesmo reduzir também a emissão de dióxido de carbono).

O setor deve continuar focando na melhoria da eficiência energética, através de adoção de tecnologias mais modernas e o contínuo crescimento da reciclagem, e também mantendo o apoio a P&D de novos processos e tecnologias para o setor.

O setor no médio e longo prazo, poderá também ter uma grande parcela de contribuição de energia no país, injetando eletricidade no Sistema Interligado Nacional através da queima de biomassa e lixívia, predominantemente pelos subsegmentos de Celulose e plantas integradas, onde grande parte das fábricas de celulose já possuem contratos de venda de eletricidade para a rede e as integradas tem alto potencial de geração, já que possuem boa margem de melhorias de eficiência energética, podendo assim aproveitar melhor os combustíveis da planta.

O potencial encontrado no estudo a partir do rendimento atual das plantas e o rendimento das melhores tecnologias disponíveis é de: 1,93% para o subsegmento de celulose, 5,89% para o subsegmento de integradas, 4,85% para o segmento de papel e 6,11% para o segmento de reciclados.

No geral as medidas que se aplicam a todos os subsegmentos são:

- Motores de alto rendimento;
- Iluminação LED;
- Uso de controle e acionamentos eletrônicos;
- Caldeiras de alta eficiência;
- Controle de injeção de ar nas caldeiras;
- Economizadores nas caldeiras;
- Melhora do isolamento térmico;
- Manutenção contínua.

Outras medidas são direcionadas a só alguns subsegmentos, como:

- Utilização de picadores tipo tambor;
- Capotas de alto rendimento na máquina de papel;
- Cilindros secadores de aço carbono;
- Controle no teor de sólidos do licor negro;
- Etc.

Um fator de suma importância é que as empresas tenham profissionais capacitados, e que possam supervisionar e garantir a ação das melhorias de eficiência energética. As empresas também devem possuir o planejamento correto

para os novos projetos que irão entrar em vigor nas empresas, para que a implementação das novas tecnologias e procedimentos seja mais facilmente adotada.

## 8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS

- ABB (2016) Baldor - *Lista de precios Productos de electrificación y automatización Vigente a partir de Julio de 2016* - Acesso em 2018, disponível em: [http://www.interelectricas.com.co/pdf/ABB/ABB\\_LISTA\\_DE\\_PRECIOS\\_JULIO\\_2016.pdf](http://www.interelectricas.com.co/pdf/ABB/ABB_LISTA_DE_PRECIOS_JULIO_2016.pdf)
- ABTCP (2017) - *Revista O Papel | ABTCP, O Potencial da Cogeração, junho 2017* – Acesso em 2017, disponível em: [www.revistaopapel.org.br/edicoes\\_impresas.php?ano=2017](http://www.revistaopapel.org.br/edicoes_impresas.php?ano=2017)
- Albany International (2015) – *Momento Técnico* - Acesso em 2017, disponível em: <http://www.albint.com/business/mc/enus/pmc/mt/Momento%20Tecnico%20Files%20%20PT/Momento%20Tecnico%20Ed.%2033.pdf>
- Alfa laval Aalborg (s.d.) - *Poder calorífico inferior* – Acesso em 2017, disponível em: <http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/poder-calorifico-inf.pdf>
- ANAP (2015/2016) – *Relatório estatístico anual 2015-2016* – Acesso em 2017, disponível em: <http://www.anap.org.br/relatorio-anual-2015-2016/>
- Ar Brasil Compressores Ltda. - *Catálogo compressores alta pressão 2017* – Acesso em 2018, disponível em: <http://www.arbrasilcompressores.com.br/pdf/comp-alta-pressao.pdf>
- Banco Mundial (2015) – *Population, total* – Acesso em 2018, disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
- BNDES (2014) - *Perspectivas do investimento 2015-2018 e panoramas setoriais*, Acesso em 2017, disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2842/7/Perspectivas%20do%20investimento%202015-2018%20e%20panoramas%20setoriais\\_atualizado\\_BD.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2842/7/Perspectivas%20do%20investimento%202015-2018%20e%20panoramas%20setoriais_atualizado_BD.pdf)
- BEU (2005) – *Balanço de Energia Útil* – Acesso em 2018, disponível em: <http://www.feng.pucrs.br/~eberson/Balan%20de%20Energia%20%Datil%202005.pdf>
- Bertinotti, Celso Ricardo (2016) - *GUIA DE COGERAÇÃO E GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - Programa P&D e C&R Ciclo 2014\_2015*, acesso em 2017. Disponível em: <http://www.gasbrasiliano.com.br/media/upload/informacoes-tecnicas/arquivo/guia-de-cogerao-formatado.pdf>
- CETESB (2008) – *Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose* – Série P+L – Acesso em 2017, disponível em: [www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4281](http://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4281)

DEPEC/BRADESCO (Outubro-2017) – *Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos do Bradesco*, Acesso em 2017: Divulga dados econômicos setoriais no contexto macroeconômico

Edison da Silva Campos (2009) - *Curso básico de fabricação de papel* - Indaial, SC; Acesso em 2017, disponível em: [http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2009\\_Fabricacao\\_Papel.pdf](http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2009_Fabricacao_Papel.pdf)

Elektro - Eletricidade e Serviços S.A. (s.d).- Manuais Elektro de Eficiência Energética, Segmento Industrial. Geração de vapor e Calor.

Eletrobras (2016) – *Dicas de economia de energia por setor de consumo* – Acesso em 2017, disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID={78C3767C-76C3-4A2C-BBBE-AE52D88C0EDE}&ServiceInstUID={46764F02-4164-4748-9A41-C8E7309F80E1}>

EMBRAPA (s.d.) – *Plantio de Eucalipto na Pequena Propriedade Rural* – Acesso em 2018, disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/doc54\\_000fjvb9ypm02wyiv80sq98yq0mwtkuk.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/doc54_000fjvb9ypm02wyiv80sq98yq0mwtkuk.pdf)

EPE (2017/2026) – *Projeção de demanda de energia elétrica* – Acesso em 2018, disponível em: [http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001\\_2017%20-%20Proje%20A7%20B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026\\_VF\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-261/DEA%20001_2017%20-%20Proje%20A7%20B5es%20da%20Demanda%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202017-2026_VF[1].pdf)

Ernest Orlando Lawrence (2009) – *Energy efficiency improvements and cost saving opportunities for the pulp and paper industry* - Acesso em 2017, disponível em: [https://www.energystar.gov/ia/business/industry/downloads/Pulp\\_and\\_Paper\\_Energy\\_Guide.pdf](https://www.energystar.gov/ia/business/industry/downloads/Pulp_and_Paper_Energy_Guide.pdf)

FAO – *Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (s.d.):* Disponibiliza dados estatísticos referente ao cenário mundial de celulose e papel; Acesso em 2017

FG. Ferramentas Gerais LTDA. - *Catálogo de lâmpadas* – Acesso em 2018, disponível em: <http://www.fg.com.br/lampada-vapor-sodio-son-t-400w-48000lm-e40---osram/p?idsku=5322014>

FIBRIA (s.d.) – *Celulose* – Acesso em 2018, disponível em: <http://fibria.foinvest.com.br/modulos/doc.asp?arquivo=01279030.WAN&doc=ian480.doc&language=ptb>

FIEPR (2016) – *Panorama Setorial; Indústria de celulose, papel, embalagens e artefatos de papel* – Acesso em 2017, disponível em: [http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel\\_digital\[75083\].pdf](http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital[75083].pdf)

GEDF-CD/FIEP (2016) - *Federação das Indústrias do Estado do Paraná*, Acesso em 2017. Panorama Setorial Indústria de celulose, papel, embalagens e artefatos de papel

Gominho, J.; Pinto, I.; Pereira, H. (1996) A reciclagem do papel. Revista Florestal. Vol. IX, nº4

Guia ABTCP (2016/2017) - *Guia ABTCP Fornecedores & Fabricantes Celulose e Papel 2016/2017*, Acesso em 2017, disponível em: [http://www.guiacomprascelulosepapel.org.br/publicador/edicoes\\_impresas/10.pdf](http://www.guiacomprascelulosepapel.org.br/publicador/edicoes_impresas/10.pdf) P.16:28

Hergen (s.d.) – *Cilindros Secadores*, Acesso em 2017, disponível em: <http://www.hergen.com.br/produtos/papeis-planos/cilindros-secadores/>

HTL (s.d.) – *Tabela de equivalência entre lâmpadas LED e lâmpadas convencionais* – Acesso em 2017, disponível em: <http://www.htlbrasil.com/Arquitetura/PDF/tabela-de-equivalencia-de-iluminacao-e-economia-de-energia-eletrica.pdf>

Industrial Efficient Technology Database (s.d.) - *Pulp and Paper* – Acesso em 2017, disponível em: <http://ietd.iipnetwork.org>

LBNL, 2008 - *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors* - Acesso em 2018, disponível em: <https://eaei.lbl.gov/publications/world-best-practice-energy-intensity>

LBNL, 2009 - *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors* - Acesso em: 2018, disponível em: <http://www.iipnetwork.org/world-best-practice-energy-intensity-values-selected-industrial-sectors>

Lucas Bitar Moraes Barros (s.d.) – Seleção de materiais para redução de custos em uma máquina de papel tissue – USP - Acesso em 2017, disponível em: [http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2006/Artigos/Art\\_TCC\\_045\\_2006.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2006/Artigos/Art_TCC_045_2006.pdf)

McIlroy, D., Wilczinsky, J. , Chemical Pulp Mills. In (1999): *Energy cost reduction in the pulp and paper industry. PAPRICAN* - Pulp and Paper Research Institute of Canada. Point-Claire, QC, Canadá.

Portal Resíduos Sólidos (2017) - *Reciclagem de Papel*, Acesso em 2017, disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/reciclagem-de-papel-2>



POYRY (2015) – *Demanda cresce em países emergentes* - Acesso em 2018, disponível em: <http://www.poyry.com.br/pt-br/noticias/papel-demanda-capita-cresce-em-paisesemergentes?language=pt-br>

PROCEL (2010) – *Oportunidades de eficiência energética para a indústria – Relatório setorial de papel e celulose* – Acesso em 2017, disponível em: <http://admin.cni.org.br/portal/data/pages/FF808081310B1CBB01314F2230716926.htm>

PROCEL (s.d.) – *Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial* – Acesso em 2018, disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Efic%20En%20em%20Sist%20de%20Refrig%20Ind%20e%20Com-Eletronbras-05.pdf>

Prominp (s.d.) – *Tipos e aplicações de caldeiras* – Acesso em 2017, disponível em: [https://lcsimej.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras\\_prominp.pdf](https://lcsimej.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf)

RENOVA (s.d.) – *Introdução aos Processos de Produção de Celulose de Papel* – Acesso em 2018, disponível em: <http://www.tecnicpa.com/files/CelulosePapel.doc>

SALUM, A. D. – *Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira. Tese (Monografia em Engenharia Industrial)* – Escola politécnica, CEPI, Universidade Federal da Bahia (UFBA). Salvador, p. 54. 2011

Statista (2015) - *Paper consumption per capita worldwide in 2016, by region (in kilograms)* - Acesso em 2018, disponível em: <https://www.statista.com/statistics/595901/paper-consumption-per-capita-by-world-region/>

Sulgás (2013) – *Gás mais*, Acesso em 2017, disponível em: <http://www.sulgas.rs.gov.br/sulgas/images/gas-mais/gasmais-9.pdf>

TEC – Tecnologia em calor (s.d.) – *Tabela poder calorífico inferior* – Acesso em 2017, disponível em: <http://www.teccalor.com.br/PDF/TabelaPoderCalorifico.pdf>

The Statistics Portal. (s.d.). - *Pulp & Paper - Production of paper and cardboard in selected countries 2009-2015*, Acesso em 2017, disponível em The Statistic Portal: <https://www.statista.com/statistics/240598/production-of-paper-and-cardboard-in-selected-countries/>

UFPR – DETF (s.d.) – *Manual de Polpa e Papel*, Acesso em 2017, disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/fabricadepapel.pdf>

WEG (2010) - *Eficiência energética em motores elétricos* – Acesso em 2018, disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-eficiencia-energetica-em-motores-eletricos-wmo029-estudo-de-caso-portugues-br.pdf>

WEG. - *Calculadora de preços de motores* – Acesso em 2018, disponível em:  
<https://www.weg.net/see+/pages/regua.jsp>

Worrell et all (2008) - *World Best Practice Energy Intensity Values for Selected Industrial Sectors*, disponível em:

[https://eaei.lbl.gov/sites/all/files/industrial\\_best\\_practice\\_en.pdf](https://eaei.lbl.gov/sites/all/files/industrial_best_practice_en.pdf)