

GUILHERME DE PAULA MOREIRA FRACARO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTENSIDADE DE EMISSÕES NO
SETOR DE PAPEL E CELULOSE BRASILEIRO

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2012

GUILHERME DE PAULA MOREIRA FRACARO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTENSIDADE DE EMISSÕES NO
SETOR DE PAPEL E CELULOSE BRASILEIRO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura, para obtenção do título de Mestre.

CASCADEL
PARANÁ – BRASIL
FEVEREIRO – 2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central do Campus de Cascavel – Unioeste
Ficha catalográfica elaborada por Jeanine da Silva Barros CRB-9/1362

F866e Fracaro, Guilherme de Paula Moreira
 Eficiência energética e intensidade de emissões no setor de papel e
 celulose brasileiro. / Guilherme de Paula Moreira Fracaro — Cascavel,
 PR: UNIOESTE, 2012.
 90 p.

 Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do
 Paraná.
 Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na
 Agricultura, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas.
 Bibliografia.

 1. Eficiência energética. 2. Análise de decomposição.. 3. Consumo
 energético. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título.

CDD 21.ed. 333.79

GUILHERME DE PAULA MOREIRA FRACARO

“Eficiência energética e intensidade de emissões
no setor de celulose e papel brasileiro”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovada** pela seguinte Banca Examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira
Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Marcelo Cardoso
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG/Belo Horizonte

Cascavel, 16 de fevereiro de 2012.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas, às quais registro aqui minha homenagem:

Aos meus pais pelos incentivos em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, pelas orientações prestadas, pelo apoio incondicional e pelo conhecimento transmitido durante esta caminhada.

Ao professor PhD Esa Vakkilainen e ao MSc Marcelo Hamaguchi, da Lappeenranta University of Technology, pelo imenso apoio dado para a viabilização deste trabalho, pelas valiosas sugestões e orientações e por compartilharem seus conhecimentos comigo.

Ao professor Dr. Marcelo Cardoso, pelas importantes sugestões concedidas no início da elaboração desta dissertação.

À CAPES pelo apoio financeiro durante boa parte do período de curso e aos demais professores do programa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos e contextos de aplicação de políticas energéticas para o setor industrial.....	13
Figura 2. Fluxograma da produção de celulose química.....	22
Figura 3. Configuração de uma máquina de papel.....	25
Figura 4. Evolução da produção mundial de papel e celulose entre 1979 e 2010. ...	28
Figura 5. Evolução da produção brasileira de papel e celulose entre 1979 e 2010. .	29
Figura 6. Evolução das participações dos diferentes tipos de celulose na produção brasileira.	30
Figura 7. Evolução das participações dos diferentes tipos de papel na produção brasileira.	31
Figura 8. Taxa de utilização de fibras recuperadas no Brasil.....	32
Figura 9. Evolução da energia final consumida no Brasil.....	33
Figura 10. Evolução do consumo energético no setor de papel e celulose brasileiro.	33
Figura 11. Evolução das participações dos combustíveis fósseis e renováveis no consumo de combustíveis do setor brasileiro de celulose e papel.....	34
Figura 12. Evolução das participações dos diferentes combustíveis consumidos pelo setor brasileiro de celulose e papel.	35
Figura 13. Evolução do índice de emissão de dióxido de carbono equivalente por tonelada de celulose exportada e papel produzido.....	46
Figura 14. Evoluções dos índices de eficiência energética no setor de celulose e papel brasileiro entre 1979 e 2010.....	47
Figura 15. Evoluções das taxas de utilização da capacidade instalada para a produção de papel e celulose entre 1991 e 2010.	49
Figura 16. Evoluções dos preços nos insumos energéticos no Brasil entre 1979 e 2010.....	50
Figura 17. Evoluções dos índices trienais de eficiência energética IEE ₃ no setor de celulose e papel brasileiro entre 1979 e 2010.....	52
Figura 18. Influências do nível de atividade, estrutura e eficiência energética no desenvolvimento do consumo de eletricidade do setor brasileiro de celulose e papel.	54
Figura 19. Influências do nível de atividade, estrutura e eficiência energética no desenvolvimento do consumo de combustíveis do setor brasileiro de celulose e papel.	55
Figura 20. Influências do nível de atividade, estrutura e eficiência energética no desenvolvimento do consumo de energia primária do setor brasileiro de celulose e papel entre 1979 e 2009.	56
Figura 21. Comparação internacional índices trienais de eficiência energética no setor de celulose e papel entre 1979 e 2009.	57
Figura 22. Comparação internacional das influências dos níveis de atividade, estrutura e eficiência energética nos consumos de energia primária entre 1979 e 2009.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade específica de energia demandada para a produção de diferentes tipos de papel e celulose	37
Tabela 2. Potenciais de aquecimento global para o CH ₄ e o N ₂ O.....	41
Tabela 3. Fatores de emissão para combustão estacionária em indústrias.....	41
Tabela 4. Fatores de conversão da quantidade de combustível baseada em seu PCS para a quantidade baseada em seu PCI.....	42
Tabela 5. Produção brasileira de papel entre 1979 e 2010, em 10 ³ toneladas	70
Tabela 6. Produção brasileira de celulose entre 1979 e 2010, em 10 ³ toneladas.....	71
Tabela 7. Produção canadense de papel entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas	72
Tabela 8. Produção canadense de celulose entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas..	73
Tabela 9. Produção estadunidense de celulose entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas	74
Tabela 10. Produção estadunidense de celulose entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas	75
Tabela 11. Produção finlandesa de papel entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas	76
Tabela 12. Produção finlandesa de celulose entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas ..	77
Tabela 13. Produção sueca de papel entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas	78
Tabela 14. Produção sueca de celulose entre 1979 e 2009, em 10 ³ toneladas.....	79
Tabela 15. Consumo energético dos setores de papel e celulose dos países envolvidos na comparação internacional	80

RESUMO

FRACARO, Guilherme de Paula Moreira; MSc; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Fevereiro - 2012; Eficiência energética e intensidade de emissões no setor de papel e celulose brasileiro; prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

A eficiência energética industrial vem recebendo crescente atenção em diversos países por sua importância na busca por segurança de suprimento energético, aumento de competitividade na economia e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Esta dissertação teve por objetivo avaliar o desenvolvimento do consumo energético da indústria de papel e celulose no Brasil, setor classificado como energia-intensivo e com significativa importância tanto em termos energéticos quanto econômicos no país. Analisou-se o desenvolvimento da intensidade de emissões de gases de efeito estufa, decorrentes do consumo energético do setor, e os desenvolvimentos dos níveis de eficiência energética, estimando-se os potenciais de conservação de energia existentes. Através de uma análise de decomposição, avaliou-se as influências das mudanças estruturais, de intensidade de produção e dos níveis de eficiência energética no aumento do consumo de energia pelo setor ao longo do tempo. Afim de contextualizar as alterações ocorridas no país, realizou-se uma comparação internacional dos desenvolvimentos dos níveis de eficiência e da decomposição do consumo energético em outros importantes países produtores: Canadá, Finlândia, Suécia e Estados Unidos da América. Concluiu-se neste estudo foram que a intensidade das emissões de dióxido de carbono equivalente pela indústria nacional reduziu significativamente entre 1979 e 2010, de 1,24 para 0,31 tCO₂e por tonelada de celulose exportada e papel produzido. Apesar de um importante aumento dos níveis de eficiência energética, responsável por uma economia de 5,5 PJ em eletricidade e 37,6 PJ em combustíveis entre 1979 e 2009, identificou-se ainda um potencial de aproximadamente 7,3 PJ e 105,5 PJ para a conservação anual de eletricidade e combustíveis, respectivamente, na indústria brasileira de celulose e papel. Entre os países envolvidos na comparação internacional, as indústrias sueca e finlandesa mostraram-se como as mais eficientes, seguidas pelas indústrias brasileira, estadunidense e canadense, sendo esta última a única onde ocorreu uma redução nos níveis de eficiência energética para o período analisado.

Palavras-chave: eficiência energética; análise de decomposição; comparação internacional.

ABSTRACT

FRACARO, Guilherme de Paula Moreira; MSc; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; February - 2012; Energy efficiency and emissions intensity in the Brazilian pulp and paper sector; prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

Industrial energy efficiency has received increasing attention in many countries because of its importance in the pursuit of security of energy supply, increased competitiveness in the economy and in the mitigation of greenhouse gases emissions. This dissertation aimed to evaluate the energy consumption development of Brazilian pulp and paper industry, a sector classified as energy-intensive and with significant importance both in terms of energy and economic. Both the emissions intensity of greenhouse gases, arising from the sector energy consumption, and the developments of the energy efficiency levels were analysed, estimating the existing energy saving potentials. Through a decomposition analysis, the influences of changes in the structure, production intensity and energy efficiency levels in the increased sector energy consumption over time were evaluated. In order to contextualize the changes occurred in the country, an international comparison of the development of both the energy efficiency levels and the energy consumption decomposition of other important producing countries: Canada, United States of America, Finland and Sweden were held. It was concluded in this study that the emissions intensity of carbon dioxide equivalent by the national industry decreased significantly between 1979 and 2010, from 1.24 to 0.31 CO₂e per tonne of exported pulp and produced paper. Despite a significant increase in the energy efficiency levels, responsible for 5.5 PJ savings in electricity consumption and for 37.6 PJ savings in fuels consumptions between 1979 and 2009, it was identified a saving potential of 7.3 PJ and 105.5 PJ related to the annual consumption of electricity and fuels, respectively, in the Brazilian pulp and paper industry. Among the countries evolved in the international comparison, both Swedish and Finnish industries were the most efficient, followed by the Brazilian, American and Canadian, being the latter the only one where there was a reduction in the energy efficiency levels over the analysed period.

Keywords: energy-efficiency; decomposition analysis; international comparison.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Eficiência energética industrial	5
2.1.1	Problemas na utilização de indicadores de eficiência energética.....	9
2.1.2	Barreiras à implantação de medidas de eficiência energética.....	10
2.1.3	Políticas públicas de eficiência energética industrial.....	12
2.1.3.1	Contextualização das políticas energéticas aplicadas em alguns países.....	15
2.1.3.1.1	Brasil	15
2.1.3.1.2	Canadá.....	18
2.1.3.1.3	Estados Unidos da América	18
2.1.3.1.4	Finlândia.....	20
2.1.3.1.5	Suécia	20
2.2	A indústria de papel e celulose.....	21
2.2.1	Processo produtivo.....	21
2.2.2	Demanda energética	26
2.2.3	Evolução da produção de papel e celulose no mundo	28
2.2.4	O setor brasileiro de celulose e papel	28
2.2.4.1	Produção.....	28
2.2.4.2	Consumo energético	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	Índice de eficiência energética	36
3.2	Análise de decomposição.....	38
3.3	Intensidade de emissões de dióxido de carbono equivalente	39
3.4	Aquisição dos dados	42
3.4.1	Produção de papel e celulose	42
3.4.2	Consumo energético	43
3.4.3	Preço dos insumos energéticos	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1	Intensidade das emissões de dióxido de carbono equivalente.....	45
4.2	Índices de eficiência energética	47
4.3	Análises de decomposição.....	53
4.4	Comparação internacional.....	57
4.4.1	Índices de eficiência energética	57
4.4.2	Análises de decomposição.....	59
5	CONCLUSÕES	62
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
7	ANEXOS	70

1 INTRODUÇÃO

A energia é um item essencial para a promoção do desenvolvimento em uma sociedade, indispensável tanto para a provisão de qualidade de vida aos seus cidadãos quanto como insumo em qualquer processo produtivo. Após a revolução industrial, as economias ocidentais desenvolveram-se baseadas em um processo de industrialização e crescente consumo per capita de energia.

Com as crises do petróleo na década de 1970, houve um grande aumento no interesse dos países industrializados em buscar e adotar medidas que pudessem aumentar os níveis de segurança no suprimento energético de suas sociedades (SIITONEN, 2010). No início da década de 1990, a preocupação com as consequências do aquecimento global decorrente da acumulação de gases de efeito estufa na atmosfera, em grande parte causada pela queima de combustíveis fósseis, emergiu fortemente como outra importante força motriz na busca destes países por soluções que possam viabilizar a redução da intensidade do consumo de energia sem prejuízos às suas economias. Entre algumas das estratégias de mitigação apontadas pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*IPCC*, na sigla em inglês) das Nações Unidas estão o uso de combustíveis mais limpos e eficientes e a adoção de medidas que aumentem a eficiência no suprimento, conversão e uso final de energia (IPCC, 1990).

Além dos benefícios ambientais, o consumo mais eficiente de energia é capaz de reduzir investimentos em infraestrutura energética, diminuir a dependência nas importações de combustíveis fósseis, aumentar a competitividade da economia e o bem-estar da população (IEA, 2008c), tendo os governos, através da criação e implementação de políticas públicas, um papel fundamental na criação de condições favoráveis para estas estratégias.

Para o desenvolvimento de políticas de eficiência energética eficazes, faz-se primeiramente necessário o conhecimento dos níveis atuais de eficiência energética de um determinado país ou setor específico, bem como da economia potencial de energia que este país, ou setor, pode alcançar. Estes potenciais podem ser classificados como potencial técnico (baseado na aplicação das melhores

tecnologias disponíveis ou na comparação com algum setor ou país de referência), potencial econômico (considerando a viabilidade econômica da implementação das melhores tecnologias disponíveis) ou potencial de mercado (no qual são também consideradas as barreiras à implantação destas tecnologias) (BAJAY; GORLA; BORDONI, 2009; MME, 2007).

Como a indústria é o setor responsável pela maior parte da energia final consumida no mundo, 36% de um total de aproximadamente 350 EJ em 2009, a adoção de medidas de eficiência energética neste setor tem sido apontada como uma das maneiras mais custo-efetivas para a redução tanto do consumo de energia quanto das emissões dos gases de efeito estufa (EC, 2005, 2009; FRANCIS; TOWERS; BROWNE, 2002; IEA, 2011b; IPCC, 1990; NAGESHA, 2008; SIITONEN, 2010; SOUZA et al., 2009; WORRELL et al., 2009).

Um dos setores industriais de maior relevância é o setor de celulose e papel, caracterizado como intensivo em termos capital e consumo energético, sendo o quarto maior consumidor de energia do setor industrial no mundo, responsável por 6% da energia consumida em 2005 (FARLA; BLOK; SCHIPPER, 1997; IEA, 2008b; SZABÓ et al., 2009; THOLLANDER e OTTOSSON, 2008).

Este trabalho tem por objetivo avaliar as mudanças nos níveis de eficiência energética e nas intensidades de emissões de gases de efeito estufa do setor de papel e celulose brasileiro entre 1979 e 2010, buscando identificar as principais causas das mudanças em seu consumo energético e comparando sua performance energética com a de outros países, Canadá, Estados Unidos da América, Finlândia e Suécia, que, historicamente, figuram entre os principais produtores mundiais de papel e celulose.

A escolha deste setor justifica-se pela relevância da indústria brasileira de celulose e papel no cenário mundial, sendo o país o 4º maior produtor de celulose e o 10º maior produtor de papel do mundo (FAO, 2011). Bem como pela importância deste setor para o país, tanto em termos econômicos, sendo responsável por aproximadamente 1,8% do PIB industrial e 3,4% dos produtos exportados (em valor) no ano de 2010 (MDIC, 2010; MME, 2011a), quanto em termos de consumo energético, com 12% da energia consumida por todo o setor industrial em 2010 (MME, 2011b).

Os objetivos específicos deste estudo são os seguintes:

- Descrever o perfil do setor brasileiro de celulose e papel e suas principais mudanças entre 1979 e 2010;
- Mensurar as emissões de gases de efeito estufa decorrentes do consumo energético do setor e analisar o desenvolvimento da intensidade de emissões neste período;
- Mensurar o potencial de economia de energia primária, combustíveis e eletricidade que pode ser atingindo elevando-se os níveis de eficiência energética do setor;
- Identificar as mudanças no consumo energético da indústria e suas principais causas;
- Avaliar o desenvolvimento dos níveis de eficiência energética do setor brasileiro, sob a ótica de uma comparação internacional.

Esta dissertação foi desenvolvida em 5 seções, incluindo esta introdução. Na segunda seção são apresentadas informações a respeito dos problemas relacionados ao consumo energético e qual o papel da eficiência energética na solução destes. São apresentadas ainda descrições dos tipos de indicadores de eficiência energética e suas aplicações, das principais barreiras à implementação de medidas de eficiência energética e os tipos de políticas de eficiência energética e suas características. Ao fim desta seção são descritas as principais etapas envolvidas no processo produtivo do setor de papel e celulose, os diferentes tipos de produtos e as evoluções, em termos de produção e consumo energético, ocorridas nos últimos tempos neste setor tanto em nível nacional quanto mundial.

Na terceira seção são apresentadas as metodologias utilizadas para a construção dos índices de eficiência energética, para as análises de decomposição dos consumos energéticos ocorridos, utilizados nas comparações internacionais dos setores de celulose e papel de importantes países produtores, e para a determinação das intensidades de emissões de gases de efeito estufa em consequência do consumo energético do setor brasileiro.

A quarta apresenta os resultados das análises realizadas por meio das metodologias descritas na seção anterior. Apresenta-se primeiramente a evolução da intensidade de emissões de gases de efeito estufa pela indústria brasileira de celulose e papel entre 1979 e 2010, descrevendo algumas das mudanças no setor que tiveram influência nas mudanças mais significativas dos níveis de intensidade

neste período. Na sequência são apresentadas as evoluções dos índices de eficiência energética e as análises de decomposição do consumo energético referentes ao consumo de eletricidade, combustíveis e energia primária no setor brasileiro. Ao final desta seção apresenta-se a comparação internacional das evoluções dos índices de eficiência energética e das análises de decomposição do consumo energético dos setores de celulose e papel estadunidense, finlandês, canadense, sueco e brasileiro, identificando-se os potenciais de economia de energia no setor que podem ser obtidos através de melhorias nos níveis de eficiência energética.

A quinta e última seção traz as principais conclusões principais conclusões obtidas nesta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Eficiência energética industrial

Segundo Patterson (1996), “eficiência energética” é um termo que, em geral, refere-se à um menor consumo de energia para a produção da mesma quantidade de um serviço ou produto útil. Por ser um termo genérico, não existe uma maneira inequívoca de mensurá-lo quantitativamente, sendo necessária a utilização de uma série de indicadores para quantificar as mudanças nos níveis de eficiência energética de uma indústria, setor ou país.

O consumo energético industrial ocorre de maneira mais eficiente através de progresso autônomo, ou seja, por iniciativa do mercado e sem interferência de políticas públicas, e/ou de progresso induzido, devido a estímulos criados por ações de governo (MME, 2011c). De forma geral, o incremento dos níveis de eficiência energética na indústria dá-se por uma série de ações técnicas, entre elas (KAYGUSUZ, 2012; TANAKA, 2011):

- A manutenção, reforma e ajustes de equipamentos contra a degradação natural da eficiência de suas performances;
- Modernização, substituição e retirada de equipamentos, linhas de processo e instalações obsoletas, para a implantação de novas tecnologias;
- Gerenciamento do uso de calor para diminuir perdas energéticas através, por exemplo, do aproveitamento de calor e materiais rejeitados e do uso adequado de isolamentos;
- Melhoria no controle de processos para a melhor utilização de energia e materiais;
- Processos de racionalização, eliminando-se etapas de processamento e implementando-se novos conceitos de produção;
- Reutilização e reciclagem de produtos e materiais;

- Aumento da produtividade do processo, reduzindo-se as taxas de rejeição dos produtos e elevando-se os rendimentos do uso de materiais.

O uso de indicadores dos níveis de eficiência energética tem significativa importância para a avaliação de políticas de eficiência energética, ou no estabelecimento de objetivos para as mesmas, ou ainda na identificação de potenciais de redução do consumo energético de um país ou de um setor específico da sua economia. No entanto, a utilidade de um indicador de eficiência energética está relacionada ao seu grau de comparabilidade (APEC, 2000). Os inúmeros indicadores utilizados para o monitoramento das mudanças nos níveis de eficiência energética são classificados em quatro grupos (PATTERSON, 1996):

1. Indicadores termodinâmicos: são indicadores baseados inteiramente em medidas termodinâmicas. Alguns destes indicadores são simples razões, como por exemplo, a razão entre a quantidade de um determinado produto e os insumos utilizados em sua manufatura, todos mensurados em termos energéticos, enquanto outros referem-se à medidas mais sofisticadas, que relacionam a real energia consumida em um dado processo com a energia consumida em um processo “ideal”.
2. Indicadores físico-termodinâmicos: são indicadores híbridos que referem-se à relação entre a energia consumida, ainda em termos termodinâmicos, com uma quantidade física de produção ou serviço prestado.
3. Indicadores econômico-termodinâmicos: são também considerados indicadores híbridos, onde a energia consumida, em termos termodinâmicos, é também relacionada com a quantidade produzida ou de serviço prestado, estes, porém, mensurados em termos econômicos.
4. Indicadores econômicos: são indicadores utilizados para mensurar mudanças na eficiência energética totalmente em termos econômicos. Assim sendo, tanto a energia consumida quanto a produção ou serviço prestado são utilizados em termos financeiros.

Dois indicadores comumente utilizados na avaliação das mudanças nos níveis de eficiência energética de um setor ou país são a intensidade energética e o

consumo específico de energia (SEC, na sigla em inglês). A diminuição do consumo específico de energia na produção de um dado setor ou país (indicador físico-termodinâmico) resulta no aumento de seu nível de eficiência energética. Ao termo “intensidade energética” está usualmente relacionado o uso de indicadores econômico-termodinâmicos (PHYLIPSEN; BLOK; WORRELL, 1997).

O uso de indicadores econômicos, ou econômico-termodinâmicos, faz-se útil na comparação dos níveis de eficiência energética entre diferentes indústrias em uma mesma economia, uma vez que, através da conversão dos diferentes tipos de produtos ou serviços em termos econômicos, estes indicadores permitem comparar as quantidades específicas de energia consumidas por unidade monetária gerada em cada setor. Um exemplo do uso de indicadores econômicos está em Reddy e Ray (2010), onde foram comparadas as variações na intensidade energética de 13 setores e subsetores da economia indiana entre 1992 e 2005.

No entanto, o uso destes indicadores possui alguns pontos fracos, entre eles (APEC, 2000; WU et al., 2007):

- Não permite mensurar a influência de mudanças estruturais ocorridas em um determinado setor ou país na variação de seu nível de intensidade energética;
- Estes indicadores incorporam as influências de uma variedade de fatores que não necessariamente estão relacionados ao consumo energético, como variações de preços;
- Nem todos os setores da economia são representados adequadamente em termos econômicos, como o setor residencial e o setor de transporte individual;
- Diferenças na agregação dos dados e nas técnicas de mensuração entre países também podem limitar as análises, principalmente se estas análises envolvem diferentes setores. Nas análises de economias centralmente planejadas ou em desenvolvimento, onde atividades informais podem ser significativas, distorções na conversão dos dados em termos monetários são um problema potencial.

Para a utilização de indicadores físico-termodinâmicos, faz-se necessário que estes sejam elaborados para setores específicos, uma vez que diferentes setores tendem a apresentar diferentes padrões na quantificação de suas produções ou serviços prestados. Estes indicadores tem como principais vantagens a

capacidade de fornecer mais detalhes sobre variações reais nos níveis de eficiência energética e a facilidade para serem utilizados em análises das variações na eficiência energética ao longo do tempo (PATTERSON, 1996; PHYLIPSEN; BLOK; WORRELL, 1997).

Os principais problemas relacionados à utilização de indicadores físico-termodinâmicos são (APEC, 2000; PATTERSON, 1996):

- Limitações na comparabilidade entre setores, quando os indicadores físicos estão mensurados em diferentes formas;
- Os dados necessários para a elaboração destes indicadores são geralmente mais complexos e difíceis de serem obtidos e interpretados;
- Dificuldades de particionamento da energia consumida em setores onde ocorre produção conjunta, ou seja, a dificuldade na alocação de uma unidade de energia consumida nos diferentes produtos de um mesmo setor.

O consumo energético de um setor da economia é determinado pelo seu nível de atividade (ou sua intensidade de produção), pela sua estrutura e por seu nível de eficiência energética (PHYLIPSEN, 2003; REDDY e RAY, 2010). Esses fatores possuem níveis independentes de influência, que podem ser mensurados através de análises de decomposição do consumo energético de um setor. Existe na literatura inúmeros trabalhos descrevendo diferentes técnicas e aplicações destas análises (ANG, 1995; DEMIRBAS, 2011).

Os estudos relacionados a comparações dos níveis de eficiência energética de setores específicos da economia normalmente, porém não necessariamente, estão focados nas indústrias mais energo-intensivas como os setores químico e petroquímico, papel e celulose, ferro e aço, minerais não metálicos, metais não ferrosos, etc.

Worrell et al. (1997), avaliaram as mudanças no consumo energético da indústria produtora de ferro e aço em 7 países referentes ao período 1980-1991. Além de utilizarem uma análise de decomposição, avaliando as influências das alterações nas estruturas e nos níveis de eficiência energética, eles realizaram uma comparação entre o uso de indicadores físico-termodinâmicos e econômico-termodinâmicos (neste estudo, denominados apenas como indicadores físicos e econômicos) nas análises das performances energéticas deste setor nos países

envolvidos. Os autores concluíram que o uso de indicadores físicos aumenta a comparabilidade entre países, fornece maiores informações aos formadores de políticas energéticas com relação às mudanças estruturais intra setoriais e oferece explicações detalhadas para mudanças observadas na intensidade energética.

IEA (2007c) apresentou uma comparação internacional das variações nos níveis de eficiência energética e nas intensidades de emissões de gases de efeito estufa, identificando os potenciais de eficiência energética baseados na aplicação das melhores tecnologias disponíveis. Os setores estudados foram: químico e petroquímico, ferro e aço, minerais não metálicos, papel e celulose e metais não ferrosos.

Farla, Blok e Schipper (1997) apresentaram uma metodologia para a comparação internacional do desempenho da eficiência energética em setores industriais ao longo do tempo baseada na aplicação de indicadores físico-termodinâmicos. A metodologia apresentada permite a análise individual do desenvolvimento dos consumos de combustíveis e eletricidade e possui um sistema de ponderação relacionado às quantidades específicas de energia requerida para produzir diferentes produtos, através do cálculo de um índice de produção física (IPF), que possibilita que produtos mais energo-intensivos tenham maior influência no valor deste índice. Os autores também aplicaram uma análise de decomposição visando mensurar as influências das mudanças do nível de produção, *mix* de produtos e da eficiência energética, na variação do consumo energético ao longo do tempo. Os autores aplicaram esta metodologia para a indústria de papel e celulose de oito países da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD).

Os setores de produção de cerâmica para revestimentos, carnes, laticínios, têxteis, entre outros, também foram tema de estudo em comparações internacionais dos níveis de eficiência energética (ABREU, 2001; MARTÍNEZ, 2010; RAMÍREZ; PATEL; BLOK, 2006a,2006b).

2.1.1 Problemas na utilização de indicadores de eficiência energética

Apesar das conhecidas utilidades dos indicadores físico-termodinâmicos de eficiência energética, uma baixa qualidade em termos de compreensividade, consistência e validação dos dados requeridos pode limitar a profundidade e validade das análises (APEC, 2000). IEA (2008c) considerou que melhorias na disponibilidade, pontualidade, qualidade e comparabilidade dos dados são questões

de urgente necessidade. Para comparações internacionais existem questões importantes que precisam ser levadas em consideração antes da utilização destes indicadores, principalmente se obtidos em bases de dados nacionais. Os principais problemas potenciais encontrados na literatura estão relacionados aos dados de consumo energético e às diferentes definições referentes ao tipo de energia reportada, às fronteiras dos sistemas, à classificação da autoprodução de eletricidade, ao poder calorífico dos combustíveis (poder calorífico superior ou poder calorífico inferior) reportado, ao uso não energético de combustíveis, à classificação dos combustíveis e ao uso de fontes não convencionais de energia (FARLA e BLOK, 2001; KARBUZ, 1998; SIITONEN, 2010; TANAKA, 2008).

Problemas relacionados à aquisição de dados de consumo energético foram estudados por Farla e Blok (2001). Os autores compararam os dados referentes ao consumo energético da indústria de ferro e aço de quatro fontes internacionais, Agência Internacional de Energia (IEA), do Grupo Internacional de Estudos Energéticos (IES) do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley, da Eurostat e do Instituto Internacional do Ferro e Aço (IISI). Neste trabalho concluiu-se que a precisão dos indicadores é determinada principalmente pela precisão dos dados de consumo energético, sendo que tanto os dados de produção quanto os valores estabelecidos para a energia demandada por unidade produzida mostraram-se menos problemáticos. Algumas inconsistências, como dupla contagem e a desconsideração de alguns vetores energéticos, foram encontrados nos dados da Eurostat e da IEA. Os autores concluíram ainda que o uso de fontes de dados internacionais não garantem que dados de consumos energéticos de diferentes países são comparáveis entre si, enfatizando a importância da checagem da consistências dos dados antes de sua utilização.

2.1.2 Barreiras à implantação de medidas de eficiência energética

Apesar da consentida necessidade de aumentar os níveis de eficiência no consumo energético industrial, e dos conhecidos benefícios obtidos através deste aumento, mesmo tecnologias ou medidas mais energeticamente eficientes e comprovadamente custo-efetivas nem sempre são implementadas, indicando a existência de barreiras. As barreiras à implementação de tecnologias/medidas de eficiência energética podem ser classificadas em barreiras de mercado, barreiras organizacionais e barreiras comportamentais (ROHDIN, 2007; THOLLANDER e OTTOSSON, 2008).

As barreiras de mercado podem ser subdivididas em barreiras não relacionadas à falhas de mercado, existentes mesmo em um mercado em perfeito funcionamento, e barreiras relacionadas às falhas de mercado.

Entre as barreiras não relacionadas às falhas de mercado estão a heterogeneidade, custos ocultos, falta de acesso ao capital e riscos. A heterogeneidade está relacionada ao fato de que uma tecnologia pode ser considerada custo-efetiva de uma maneira geral, mas não necessariamente será custo-efetiva em todos os casos. Os custos ocultos referem-se aos custos associados ao investimento não incluídos nas análises financeiras, como o tipo de amortização utilizada (ROHDIN, 2007; THOLLANDER e OTTOSSON, 2008).

As barreiras consideradas relativas às falhas de mercado são incentivos divididos, relação principal-agente e informações imperfeitas. Os incentivos divididos ocorrem quando duas partes possuem diferentes motivações para suas ações. Podem ocorrer, por exemplo, em uma indústria onde o consumo energético não é dividido por departamentos, sendo assim, funcionários de um departamento específico não tem a motivação necessária para tomarem atitudes visando a redução no consumo de energia pelo possível não reconhecimento de suas ações. A barreira da relação principal-agente refere-se à falta de confiança entre duas pessoas em níveis diferentes dentro de uma organização. As informações imperfeitas estão relacionadas à falta de informações detalhadas sobre as performances energéticas de diferentes tecnologias e seus respectivos potenciais de economia (ROHDIN, 2007; THOLLANDER e OTTOSSON, 2008).

Entre as barreiras organizacionais e comportamentais podem ser citadas, entre outras, a falta de confiabilidade na informação recebida, a não prioridade de investimentos em eficiência energética nos investimentos da organização e a cultura e hierarquia organizacionais. (THOLLANDER e OTTOSSON, 2008).

Thollander e Ottosson (2008) investigaram a presença de barreiras à implementação de medidas de eficiência energética no setor sueco de papel e celulose do ponto de vista das pessoas envolvidas nesta indústria. Os autores enviaram questionários aos gerentes ou pessoas encarregadas das questões energéticas de 59 indústrias de papel e celulose do país. Os resultados obtidos indicaram que as maiores barreiras existentes no setor estavam relacionadas aos riscos de implementação de medidas de eficiência energética, como riscos de interrupções na produção, e custos relacionados à possíveis interrupções,

incômodos ou inconvenientes na produção, à inadequação da tecnologia na fábrica, à falta de tempo e outras prioridades e à falta de acesso ao capital.

A identificação das barreiras existentes à implantação de medidas de eficiência energética em setores e regiões específicas é um fator de extrema importância para a superação destas barreiras através da eficaz definição de estratégias de longo prazo em políticas energéticas (THOLLANDER e OTTOSSON, 2008).

2.1.3 Políticas públicas de eficiência energética industrial

Historicamente, os níveis de eficiência energética no setor industrial tem aumentado a uma taxa de aproximadamente 1% ao ano. Entretanto, diversos países demonstraram que é possível atingir taxas de 2% ao ano por longos períodos através do uso de políticas específicas (WORRELL et al., 2009). O sucesso do uso político para o aumento da eficiência energética industrial depende de como uma política ou programa específico consegue incentivar, direta ou indiretamente, a indústria a buscar e implementar as soluções disponíveis (TANAKA, 2011).

Ações governamentais de promoção à eficiência energética passaram a ter maior evidência após as crises do petróleo da década de 1970. Nos anos oitenta, com a redução dos preços dos combustíveis derivados de petróleo, estas ações se tornaram escassas, exceto em países onde havia um planejamento efetivo de médio e longo prazo. Com o aumento das preocupações ambientais a partir dos anos 1990 e a nova tendência de aumento nos preços dos insumos energéticos em quase todos os países no início do novo milênio, medidas governamentais de redução de perdas e melhorias de desempenho nos sistemas energéticos voltaram a ocupar posições de destaque (MME, 2007). Segundo IEA (2009c) o contexto atual das políticas de eficiência energética no mundo é dominado por três questões principais: a crise financeira e econômica mundial, segurança energética e preocupações com as mudanças climáticas.

Os governos utilizam duas formas de abordagem política: medidas aplicadas em fábricas ou setores específicos e medidas amplas focadas nas circunstâncias sociais e ambientais das atuações destas fábricas ou setores, juntamente com várias correntes de influência para incentivar a indústria a incrementar o seu nível de eficiência energética. Segundo Tanaka (2011), os tipos de política energética aplicadas podem ser organizados em 4 principais grupos: prescritivas, econômicas,

de suporte e investimento direto, ilustrados na figura 1 com seus respectivos contextos de aplicação.

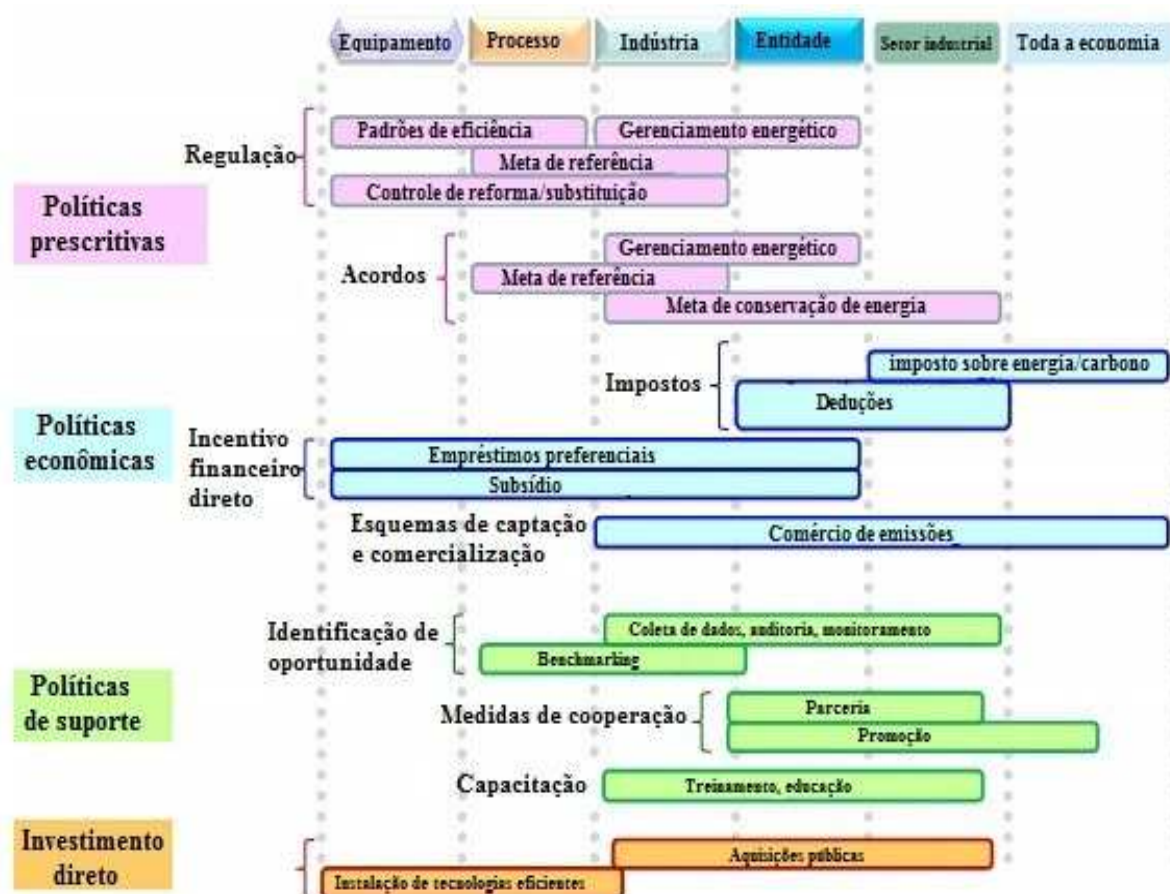


Figura 1. Tipos e contextos de aplicação de políticas energéticas para o setor industrial.

Fonte: adaptado de Tanaka (2011).

Políticas prescritivas são regulações, mandatos e acordos que, diretamente, obrigam ações específicas por parte de indústrias e/ou associações, ou comunicam as expectativas governamentais a estes atores. O foco destas políticas pode ser níveis de eficiência energética em equipamentos, processos ou indústrias, ou ainda a implementação de técnicas de gerenciamento em atividades energéticas (TANAKA, 2011).

Políticas econômicas são a aplicação, aumento ou redução de impostos, subsídios, empréstimos e diferenciação de preços para influenciar na custo-efetividade de ações técnicas. Esquemas de captura e comercialização de CO₂ também podem ser incluídos nesta categoria em função da estreita relação entre medidas de mitigação de emissões e consumo energético (TANAKA, 2011).

Políticas de suporte referem-se à viabilização de ferramentas para a identificação de oportunidades de eficiência energética (como coleta de dados,

auditorias energéticas e *benchmarking*), medidas de cooperação, capacitação, informações e assistência técnica que possam ajudar na criação de um ambiente propício à implementação de medidas de eficiência energética por parte da indústria (TANAKA, 2011).

Em função de sua grande relevância, diversos autores tem se dedicado ao desenvolvimento de metodologias de avaliação dos impactos da implementação de políticas de eficiência energética e suas efetividades (KHAN et al., 2006; MUNDACA e NEIJ, 2009; TANAKA, 2011; VREULS, 2005).

Tanaka (2011) realizou uma análise qualitativa das políticas de eficiência energética industrial aplicadas nos países integrantes da Agência Internacional de Energia, além do Brasil, China, Índia, México, Rússia e África do Sul. Segundo este estudo, no ano de 2010 as políticas de suporte eram as mais empregadas (40% em um total de 570 medidas analisadas), seguidas por políticas econômicas (35%) e pelas políticas prescritivas (24%), sendo a identificação de oportunidades de eficiência energética (coleta de dados e auditorias) a medida mais aplicada, seguida por subsídios, regulação da eficiência de equipamentos e acordos negociados. Uma das conclusões do autor foi que nenhuma política ou medida é adequada para todos os países, tipos de indústria e situações em função da heterogeneidade dos setores em termos de necessidades, desafios e barreiras às medidas de eficiência energética nas diferentes regiões e países.

Num estudo realizado por CNI e ELETROBRÁS (2009) analisando 63 programas de eficiência energética industrial na União Europeia e em outros 12 países, verificou-se que: 94% dos programas associam ganhos de eficiência com ganhos ambientais; 82% possuem algum tipo de incentivo financeiro ou tributário para ações de eficiência energética; 62% são programas voluntários; 62% promovem a substituição de equipamentos e alteração de processos industriais; e 54% disponibilizam informações técnicas. Verificou-se ainda que grande parte dos programas foram implementados por órgãos governamentais em cooperação com associações empresariais e que setores industriais energo-intensivos recebem apoio governamental no desenvolvimento de projetos de eficiência energética.

CNI e Eletrobrás (2009) identificaram uma ampla variedade de medidas de fomento à eficiência energética industrial. Entre as medidas de cunho econômico destacaram-se reduções tributárias vinculadas a projetos de eficiência energética, incentivos fiscais e creditícios para a aquisição de equipamentos mais eficientes e o

financiamento à pesquisa e desenvolvimento de equipamentos e processos industriais mais eficientes. Entre as medidas de suporte, foram destacadas a divulgação de informações, a capacitação de pessoal, o custeio de diagnósticos e estudos de otimização energética e o fomento à participação de ESCOs (*Energy Service Companies*), que são empresas especializadas em estudos de conservação de energia. As ações prescritivas destacadas foram a adoção de padrões mínimos de eficiência energética obrigatórios para alguns equipamentos, a imposição de metas de conservação para concessionárias de serviços públicos ou fornecedores de energia, acordos voluntários entre governo e associações empresariais e a adoção de normas otimizadas de gestão da energia na indústria.

A efetividade da aplicação de uma política de eficiência energética é específica para cada situação, sendo dependente de uma série de fatores como a qualidade no planejamento e execução da política, de seu âmbito de aplicação técnica, situação econômica, barreiras à sua implementação, estrutura do setor, metas a serem atingidas, etc. As influências desta grande variedade de fatores, somadas ao fato de que normalmente os governos implementam diferentes políticas simultaneamente, tornam a avaliação da eficácia de uma política de eficiência energética extremamente difícil (HARMELINK; HARMSSEN; NILSSON, 2007; HENRIKSSON e SÖDERHOLM, 2009; TANAKA, 2011).

2.1.3.1 Contextualização das políticas energéticas aplicadas em alguns países

2.1.3.1.1 Brasil

Segundo Souza (2009), a implementação de mecanismos para promoção da conservação de energia é abundante no Brasil, com destaque para o Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet), o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), o Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica (PEE) e o PROESCO, além da Lei de Eficiência Energética e do Plano Nacional Sobre Mudança do Clima (PNMC) (MME, 2011c; SOUZA, 2009).

O Conpet, instituído em 1991, teve por objetivo o desenvolvimento e integração das ações focadas na racionalização do uso do gás natural e dos derivados de petróleo, com a principal meta de obter um ganho de 25% na eficiência energética do uso destes combustíveis nos próximos 20 anos, sem afetar o nível de atividade (MME, 2007).

O Procel foi instituído em 1985 com o objetivo de combater o desperdício na produção e no uso da energia elétrica, sendo a primeira iniciativa sistematizada de promoção do uso eficiente de energia elétrica no Brasil. Em 1991 o Procel passou do status de programa setorial para um programa de governo, deixando de se restringir apenas ao setor elétrico. Após 1993 o Procel foi revitalizado, tendo desde então algumas estratégias como: a coordenação do marketing do combate ao desperdício; a promoção, junto aos fabricantes, de acordos para aumento da eficiência de equipamentos elétricos; a implementação de projetos de eficiência energética em cada segmento de consumo; a busca por recursos para viabilização de projetos de combate ao desperdício; e a recomendação de medidas nas áreas de legislação e normatização para o estabelecimento de padrões mínimos de eficiência energética (MME, 2007).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) foi implementado em 1985 com o objetivo de disponibilizar aos consumidores informações a respeito da eficiência energética de alguns dos principais eletrodomésticos nacionais, com mais de 40 equipamentos já etiquetados. O programa é de adesão voluntária, em primeira instância, convertendo-se em obrigatória de acordo com a maturidade de mercado em cada segmento (SOUZA, 2009).

O PEE, consolidado pela Lei nº 9.991 de 2000, obrigou as concessionárias de distribuição de energia elétrica a destinarem recursos (0,5% da receita líquida operacional) para ações de eficiência energética, tendo somado mais de 2 bilhões de reais em investimentos realizados ou em execução deste a sua implementação (MME, 2011c).

A Lei de Eficiência Energética, nº 10.295/2001, instaurou o procedimento para a adoção de níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, prevendo a evolução dos níveis por meio de programa de metas, específico para cada equipamento. Já foram regulamentados os índices mínimos para motores elétricos trifásicos, lâmpadas fluorescentes compactas, refrigeradores e congeladores, condicionadores de ar, fogões e fornos a gás, e aquecedores de água a gás (SOUZA, 2009).

O PROESCO foi instituído pelo BNDES em 2006 e destinado a financiar projetos de eficiência energética. O programa apoia a implementação de projetos que comprovadamente contribuam para a economia de energia, através do

financiamento de estudos e projetos, obras e instalações, máquinas e equipamentos, serviços técnicos especializados e sistemas de informação, monitoramento, controle e fiscalização (SOUZA, 2009).

O Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), de 2007, tem entre seus objetivos o fomento ao aumento de eficiência no desempenho dos setores da economia na busca constante do alcance das melhores práticas (CISMC, 2008).

Outra medida importante foi a do Conselho Nacional de Petróleo (CNP), que, após as crises do petróleo na década de 1970, adotou uma política de aumento de preço dos combustíveis derivados de petróleo. Foram impostos cortes de 10% e 5% no fornecimento de óleo combustível e diesel, respectivamente, à indústria e implementou-se um controle de suprimento através de cotas de combustíveis até 1983. Devido à impopularidade destas ações o governo federal lançou o programa CONSERVE em 1981, cujo objetivo era estimular a conservação e substituição do óleo combustível utilizado na indústria. Estas foram as primeiras ações significativas visando a conservação de energia no Brasil. Foram desenvolvidos protocolos que tiveram efeitos sobre a eficiência energética de setores como os de cimento, siderurgia e papel e celulose (MME, 2007).

Apesar do relativo sucesso dos programas anteriormente citados, o Brasil nunca teve uma política de eficiência energética de longo prazo específica para o setor industrial. Num estudo realizado pela CNI e Eletrobrás (2009) diagnosticou-se que, apesar de ser o maior consumidor energético do país, o setor industrial não é prioridade nos programas governamentais de eficiência energética. Neste estudo identificou-se um potencial técnico de 25,7% de economia no consumo energético do setor industrial brasileiro, sendo que, apesar das iniciativas governamentais focarem em ações de eficiência energética no consumo de eletricidade, 82% do potencial técnico de economia refere-se à processos térmicos.

De maneira geral, a prática da eficiência energética na indústria não vem ocorrendo na intensidade desejada, sendo necessária uma ação mais efetiva para a inserção da eficiência energética como um instrumento de competitividade (MME, 2011c). Por este motivo, a obtenção da sustentabilidade no mercado e na atividade empresarial da eficiência energética no Brasil, por meio da contínua evolução nos mecanismos de promoção das ações de eficiência energética, pode ser considerada como um grande desafio a ser superado para a obtenção de resultados mais expressivos (MME, 2007).

2.1.3.1.2 Canadá

O Canadá é referência no desenvolvimento e na análise de indicadores de eficiência energética. O governo canadense, através do Escritório de Eficiência Energética (OEE), trabalha para incrementar medidas de conservação de energia e de eficiência energética em todos os setores da economia, com oferta de subsídios, incentivos fiscais e outras ações como *workshops* para profissionais, estatísticas, análises, prêmios e a divulgação de informações gratuitas. O país é também referência no suporte aos programas de eficiência energética industrial que incentivam atividades de gerenciamento energético e adotam tecnologias e práticas mais eficientes para o uso final de energia (IEA, 2009b; 2009c).

Um programa de destaque no país é o Programa de Conservação de Energia para a Indústria Canadense (CIPEC), de 1975, patrocinado pela *Natural Resources Canada* (NRCan) e implementado em parceria com associações setoriais, para promover a ação voluntária efetiva e reduzir a intensidade energética na indústria. O programa envolve o desenvolvimento de indicadores quantitativos e qualitativos através da coleta e análise de dados referentes à questões energéticas e à práticas de gerenciamento, assim como a divulgação de informações e incentivos financeiros para projetos de eficiência e estudos de avaliação energética (IEA, 2009b).

Em uma série de programas desenvolvida pelo OEE para promover o uso eficiente da energia no país, chamada *ecoENERGY*, a maioria das medidas é de adesão voluntária e são complementadas por emendas às regulações de eficiência energética, que estabelecem um padrão mínimo de eficiência em uma série de produtos (IEA, 2009c).

Outra iniciativa importante foi o lançamento, em setembro de 2009, de quatro instrumentos e medidas para incrementar a eficiência energética no país, entre as quais um manual e instrumentos para auxiliar a indústria no monitoramento e gerenciamento de seu consumo energético (IEA, 2009b).

2.1.3.1.3 Estados Unidos da América

Assim como o Canadá, os EUA são também referência no suporte aos programas de eficiência energética industrial que visam incentivar a adoção de tecnologias e práticas mais eficientes no uso final de energia e atividades de gerenciamento energético (2009c). Algumas das ações de destaque no país são: a

Política Energética Nacional (NEP), o *Energy Policy Act* e os Programas de Tecnologias Industriais e Indústrias do Futuro, que estão descritos nesta seção.

Em maio de 2001 o compromisso dos EUA em aumentar os níveis de eficiência energética através de uma política de conservação de energia foi enfatizado na Política Energética Nacional (NEP). Esta política teve por objetivo reduzir a intensidade energética da economia em 20%, entre 2002 e 2012, através de uma série de medidas, como a difusão de informações, o estabelecimento de padronizações e o incentivo à pesquisa e desenvolvimento de produtos eficientes, além do Programa *Energy Star* (IEA, 2007c).

O programa *Energy Star* para a indústria visa incrementar os sistemas de gerenciamento energético corporativo, trabalhando com setores industriais específicos para a identificação de barreiras e a definição de estratégias para superá-las, além da criação de instrumentos de auxílio às indústrias, como o desenvolvimento de indicadores de eficiência energética (IEA, 2007c).

A *Energy Police Act*, de 2005, foi a primeira legislação abrangente em mais de uma década focada na melhoria dos níveis de eficiência energética através da adoção de novas normas de padronização e incentivos à medidas voluntárias (IEA, 2007c).

O Programa de Tecnologias Industriais desde 1992 tem por objetivo reduzir a intensidade energética industrial nos EUA, através de ações coordenadas de pesquisa, desenvolvimento e demonstração. Este programa colabora com a indústria na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência energética e a produtividade de processos industriais (IEA, 2007c).

O Indústrias do Futuro é um programa que objetiva a redução de longo prazo no consumo energético industrial, visando a redução anual de 250 milhões de toneladas equivalentes de petróleo em 2050, focado em 9 setores responsáveis pela maior parte do consumo energético industrial e que apresentam as maiores oportunidades de redução. Neste programa, cada indústria participante define seus objetivos para 2020, identifica suas necessidades mais críticas e consolida parcerias público-privadas visando a divisão dos custos e riscos nos projetos de pesquisa, desenvolvimento e demonstração de tecnologias. A ideia do programa é incentivar o processo de planejamento por parte da indústria que então demandará apoio para atividades de pesquisa e desenvolvimento, tentando assim garantir que as

tecnologias desenvolvidas tornem-se de uso comercial mais rapidamente (IEA, 2007c).

2.1.3.1.4 Finlândia

De maneira geral, a política de eficiência energética finlandesa compreende quatro métodos diretivos: legislação, regulamentações e orientações; mecanismos econômicos, como impostos e subsídios; acordos de eficiência energética com o setor industrial; e educação e comunicação (IEA, 2007b).

A política de eficiência energética é conduzida principalmente pelo Ministério do Emprego e da Economia (MEE) em conjunto com a Motiva Ltda., empresa estatal que age como a agência de eficiência energética do país. As orientações políticas neste campo são fornecidas pelo Plano de Ação para a Eficiência Energética (APEE), de 2000, e pela Estratégia Nacional para Energia e Clima (CNE), de 2008. As melhorias nos níveis de eficiência energética industrial são conquistadas principalmente através de acordos voluntários entre MEE e o setor (IEA, 2007b; 2009c).

Os acordos voluntários são as principais ferramentas de aplicação das políticas de eficiência energética finlandesas, sendo aplicados através de auditorias energéticas e reconhecidos pela sua valiosa flexibilidade e ampla participação da indústria (de 80% entre as indústrias energo-intensivas). A Finlândia foi pioneira nesta área com seu Programa de Auditoria Energética, criado em 1992, que fornece orientações, treinamentos em auditoria e autorização, além da realização de atividades de monitoramento e divulgação. Após assinarem o acordo, as indústrias se comprometem com a implementação de medidas de eficiência energética em suas instalações, recebendo subsídios do MEE (entre 40% e 50%) e supervisão da Motiva Ltda. (IEA, 2007b; 2009c).

2.1.3.1.5 Suécia

A Suécia tem uma longa tradição na implementação de medidas de eficiência energética altamente efetivas em vários setores de sua economia, principalmente através de impostos e campanhas de conscientização (IEA, 2009c).

A eficiência energética tem sido uma das prioridades da política energética sueca há bastante tempo. Seus métodos de aplicação são semelhantes aos das políticas energéticas finlandesas, ou seja, legislação, regulamentações e orientações, mecanismos econômicos, como impostos e subsídios, acordos de eficiência energética com o setor industrial e educação e comunicação (IEA, 2008a).

Um programa de destaque da política de eficiência energética no país é o Programa para a Eficiência Energética em Indústrias Energo-intensivas, de 1995. As indústrias participantes deste programa, que é de adesão voluntária, são isentas do imposto cobrado pelo consumo de eletricidade e devem implementar sistemas padronizados de gestão energética, realizar investimentos para um consumo eficiente de eletricidade (com um período máximo de 3 anos para o retorno do investimento) e aderir ao princípio dos custos para todo o ciclo de vida na compra de equipamentos. Desde a sua implementação, estima-se que foram impulsionados cerca de 110 milhões de euros em investimentos privados em eficiência energética, a um custo anual de 15 milhões de euros em isenções de impostos (IEA, 2008a; 2009c).

2.2 A indústria de papel e celulose

2.2.1 Processo produtivo

A indústria de papel e celulose tem por finalidade a conversão de material fibroso em celulose, que posteriormente é utilizada como insumo na fabricação de praticamente todos os tipos de papel (WORRELL et al., 2007). A matéria-prima utilizada para a produção de celulose é majoritariamente oriunda de fibras de madeira, mas outras espécies vegetais como algodão, milho, cânhamo, juta, cana de açúcar, bambu, entre outras, podem ser empregadas como fonte de fibras em locais onde o suprimento de madeira é escasso, ou ainda na produção de tipos específicos de papéis de alta qualidade (HOCKING, 2005).

A produção de celulose pode ser feita através de processos químicos ou mecânicos. Na produção de celulose química, a madeira é cozida com produtos químicos para a separação entre a lignina e as fibras que compõem a madeira. As primeiras indústrias de celulose química foram inauguradas no final do século XVIII nos Estados Unidos da América e na Europa e utilizavam o processo soda, definido pelo uso de hidróxido de sódio ou carbonato de sódio no processo de cozimento. O processo soda foi posteriormente substituído pelo processo sulfito, que era considerado um processo mais simples e resultava em uma celulose mais brilhosa. Já em 1879 foi inventado o processo sulfato, também denominado processo *Kraft*, sendo considerado um processo superior por produzir uma celulose mais forte e com maior rendimento (VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010). Atualmente, cerca de 97% da celulose química produzida no mundo é do tipo *Kraft* (FAO, 2011), entre as vantagens deste processo sobre o processo sulfito estão:

Todas as espécies lenhosas podem ser utilizadas como matéria-prima;

- A celulose produzida é muito mais forte;
- A recuperação energética e dos produtos químicos utilizados no processo dá-se de forma eficiente;
- A obtenção de subprodutos valiosos¹.

Uma indústria de celulose química é composta por uma linha de fibra e um sistema de recuperação química, este constituído por um ciclo de licor e um ciclo de cal, figura 2.

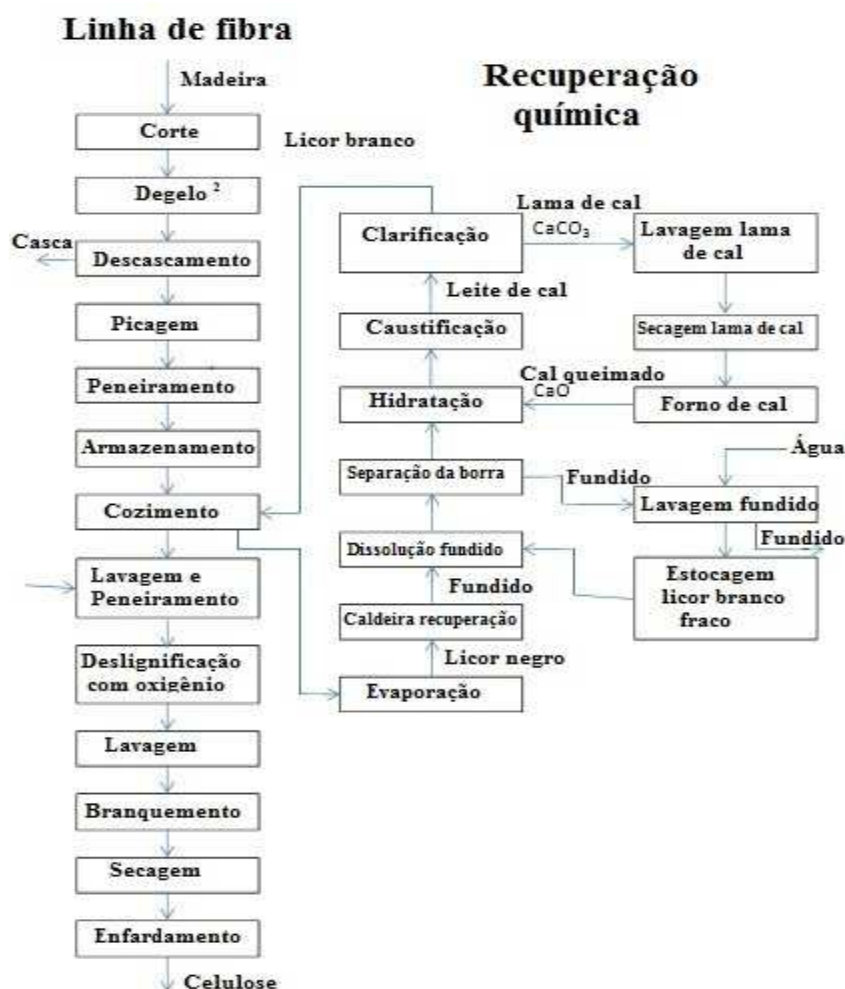


Figura 2. Fluxograma da produção de celulose química.

Fonte: adaptado de Vakkilainen e Kivistö (2010).

A recuperação química é necessária para manter a produção de celulose química economicamente viável. O licor negro, após ser obtido na etapa de cozimento e concentrado na etapa de evaporação, é queimado em uma caldeira de

¹ Como o *tall oil*, que é uma mistura composta principalmente de ácidos resínicos e ácidos graxos, e a terebintina, que é uma resina utilizada na produção de antissépticos, pesticidas, inseticidas, biocombustíveis, aditivos, entre outros (DEMIRBAS, 2011; YUMRUTAS et al., 2008).

² A operação de degelo é típica nos países Nórdicos (VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

recuperação para a produção de vapor de alta pressão, que pode ser utilizado para a produção de eletricidade em uma unidade de cogeração, e para realizar as reações de redução para a recuperação do sulfeto de sódio (Na_2S) e do carbonato de sódio (Na_2CO_3). Os produtos inorgânicos obtidos na caldeira de recuperação são utilizados para regenerar o hidróxido de sódio (NaOH) e o sulfeto de sódio necessários no processo produtivo. Normalmente, a eficiência energética de uma caldeira de recuperação é relativamente baixa (de aproximadamente 60%), mas esta eficiência pode ser elevada com a queima de licores com maior concentração de sólidos (CARDOSO et al., 2009; HOCKING, 2005).

Em uma indústria integrada, onde ocorre a produção tanto de celulose quanto de papel, a celulose produzida é bombeada para a unidade de produção de papel, eliminando-se a etapa da secagem. Em uma indústria não integrada, a celulose produzida é seca até um teor de sólidos de 90% para então ser compactada em fardos para o transporte. A máquina de secagem é constituída de duas seções principais, a parte úmida e a seção de secagem. Na parte úmida a celulose é secada mecanicamente até um teor de sólidos entre 45% e 55%, sendo posteriormente encaminhada para a seção de secagem, onde é necessária a aplicação de calor para atingir o teor de sólidos de 90%. Quanto maior for a eficiência no desaguamento ocorrido na parte úmida, menor será o consumo de calor na seção de secagem (VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

Nos processos mecânicos de fabricação de celulose, a separação das fibras da madeira é realizada por um desfibrador de pedra ou por discos rotativos de metal. Através destes processos, até 95% da madeira é convertida em celulose (no processo *Kraft* este rendimento é de 45-50%). Por esta razão a celulose mecânica é também denominada de pasta de alto rendimento. Em função do seu alto teor de lignina, a celulose mecânica sofre amarelamento com o tempo e é considerada de menor qualidade, sendo utilizada para a fabricação de papéis menos nobres, como o papel imprensa (JUDD e JEFFERSON, 2003; VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

Os principais tipos de celulose mecânica, denominados pelos seus respectivos processos de obtenção, são a pasta mecânica de desfibrador (GW), pasta mecânica de desfibrador sob pressão (PGW), pasta termomecânica (TMP) e a pasta químico termomecânica (CTMP) (VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

Na fabricação da pasta mecânica de desfibrador, a madeira é aquecida para o amolecimento da lignina e a liberação das fibras. No processo da pasta mecânica

de desfibrador sob pressão, o desfibramento ocorre sob uma pressão de até 3 bar, resultando numa pasta mais resistente e de maior qualidade (VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

Para a produção de pasta termomecânica, a madeira é primeiramente transformada em cavacos, que são encaminhados para o refinamento em discos rotativos. Os cavacos recebem um pré-tratamento com vapor para auxiliar na separação das fibras. A pasta químico termomecânica é obtida através do tratamento químico dos cavacos de madeira antes do refino, visando incrementar as propriedades ópticas e de resistência da pasta (HOCKING, 2005; VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

Outro tipo de celulose é a pasta semiquímica. Em seu processo de fabricação os cavacos de madeira são submetidos a um tratamento químico, mais intenso que na obtenção da pasta CTMP porém menos severo que na fabricação de celulose química, para então serem encaminhados para o refino mecânico. Este processo tem maior rendimento e menor consumo de químicos que a produção de celulose química, mas o alto teor de lignina e a cor escura da pasta impedem sua utilização em papéis mais nobres. Entre as diversas variações deste processo, a pasta mais comum é a pasta semiquímica neutra em sulfito (NSSC) (HOCKING, 2005; VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

As celuloses podem ser também classificadas quanto ao tamanho de suas fibras, em curtas ou longas. A celulose de fibra longa, obtida de espécies coníferas, tem comprimento entre 2 e 5 milímetros e é usada na fabricação de papéis mais resistentes, como os de embalagens, papel imprensa e nas partes internas do papel cartão. A celulose de fibra curta, obtida principalmente do eucalipto, tem comprimento entre 0,5 e 2 milímetros e é utilizada para a produção de papéis para fins sanitários e de imprimir e escrever (BRACELPA, 2011a).

Dependendo do tipo de papel a ser obtido, a fonte de fibras utilizada em sua fabricação pode ser celulose química, mecânica, semiquímica, papéis reciclados ou ainda uma mistura destas. A produção de papel envolve três etapas principais: a preparação da massa, a prensagem e a secagem térmica. Durante a preparação da massa, as fibras são misturadas com uma solução de minerais e água para formar uma teia de papel. Na etapa seguinte, o papel é pressionado entre rolos e um feltro, obtendo-se um teor de sólidos de 50% a 60%. Na etapa de secagem, a água em excesso é retirada por processos térmicos até o papel atingir um teor de umidade

entre 2 e 6% (JUDD e JEFFERSON, 2003). Uma configuração típica de uma máquina de papel pode ser visualizada na figura 3.

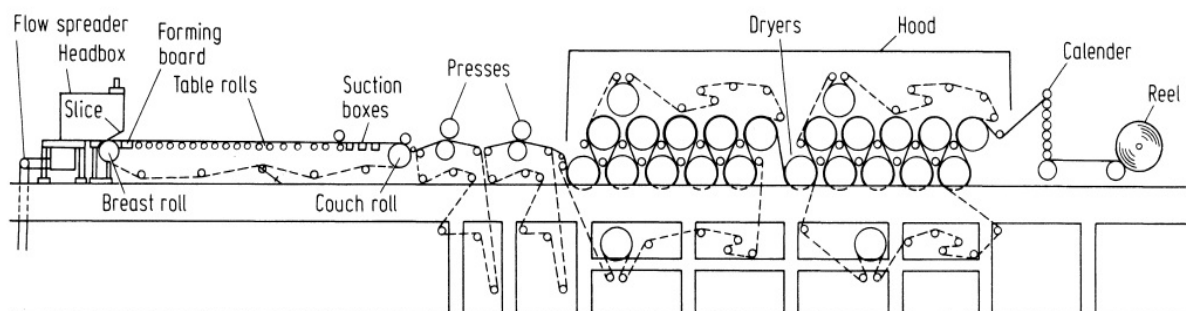


Figura 3. Configuração de uma máquina de papel.
Fonte: adaptado de Judd e Jefferson (2003).

Segundo FAO (2011), os tipos de papéis podem ser classificados em:

- Papel imprensa: refere-se à papéis não revestidos, não calibrados (ou apenas ligeiramente dimensionados), contendo no mínimo 60% (em termos de conteúdo de matéria fibrosa) de pasta mecânica, geralmente pesando entre 40 e 60 g.m⁻² e utilizado principalmente para a impressão de jornais.
- Papéis para imprimir e escrever: referem-se à papéis, exceto papel imprensa, para escrita, desenho, projetos, impressão, fins comerciais, etc., obtidos a partir de uma variedade de misturas de celulose e com diversos acabamentos. Estão inclusos nesta categoria os papéis utilizados em livros e revistas, pôsteres, papel de Bíblia, notas bancárias, etc.
- Papéis para fins sanitários: referem-se aos papéis feitos a partir de celulose química, as vezes misturada com pasta mecânica ou fibras recicladas. Nesta categoria estão inclusos os papéis absorventes, guardanapos, lenços faciais, papéis higiênicos, etc.
- Papéis para embalagens: papéis obtidos a partir de celulose química, ou de uma mistura entre celulose química e fibra de algodão, tratada para tornar o papel resistente à óleo, graxa e água. Estes papéis são utilizados principalmente para: embalagens de congelados, materiais úmidos ou gordurosos; para caixas de papelão; papel *Kraft*; entre outros.

- Outros tipos de papéis: estão inclusos papéis *Kraft* para encerar, impermeabilizar, asfaltar, laminar, resinar, etc.; papéis fabricados através de celulose sulfato que não estejam inclusos nas outras categorias, como corda e papel de juta, filtros de papel, papéis fotográficos, etc.; papel e papelão para construção: feltros e placas de papel utilizados na construção de edifícios e outras estruturas para isolamento, vedação, cobertura, etc.; papéis finos especiais (papéis produzidos para finalidades especiais, como papéis para cigarros, lenços para lentes, sacos de chá, etc.), frequentemente obtidos a partir de fibras não lenhosas, como cânhamo ou algodão.

2.2.2 Demanda energética

A indústria de celulose e papel é a quarta maior consumidora de energia do setor industrial no mundo, responsável por 6% da energia consumida pelo setor em 2005 (IEA, 2008b). No entanto, o consumo energético específico de uma indústria de papel e celulose é altamente influenciado por diversos fatores, como seu *mix* de produtos, os processos empregados, o tamanho da indústria e sua localização, as tecnologias utilizadas, o grau de aproveitamento de rejeitos (tanto matéria-prima quanto vapor de processo), a idade técnica da indústria, a qualidade da matéria prima, o preço dos insumos energéticos, o fator de utilização da capacidade instalada da indústria e seu grau de integração, as condições climáticas e o grau de atenção dos funcionários às questões de eficiência energética (APEC, 2000; FARLA; BLOK; SCHIPPER, 1997; IEA, 2007d; VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010; WORRELL et al., 2007).

Entre os diversos processos necessários para a transformação da madeira em papel, os que mais demandam energia são a obtenção da celulose e a secagem (IEA, 2007d; WORRELL et al., 2007). Estima-se que aproximadamente 90% do calor consumido em uma fábrica de papel e entre 25% e 30% da energia total consumida em uma fábrica de papel e celulose ocorre somente na etapa da secagem (IEA, 2008b; VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

No processo de produção da celulose tipo *Kraft*, calor é utilizado para o aquecimento de diferentes fluidos, para a evaporação de água e para acelerar ou controlar reações químicas. A eletricidade é consumida majoritariamente para bombeamento. Em geral, a demanda específica, tanto de eletricidade quanto de calor, para a produção de celulose química tem reduzido ao longo do tempo, porém

em algumas etapas do processo essa situação é inversa, principalmente no calor específico demandado na etapa de branqueamento (VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

O consumo energético específico para a produção de celulose mecânica depende, além dos fatores gerais citados acima, do grau de refino requerido para a pasta. Como a separação das fibras da madeira é realizada por um desfibrador de pedra ou por discos rotativos de metal, o consumo específico de eletricidade é consideravelmente maior que o demandado no processo *Kraft*. No entanto, devido a melhorias nos sistemas de recuperação, mais de 90% da eletricidade consumida na polpação mecânica pode ser recuperada na forma de calor, tornando baixa, ou até mesmo negativa, a demanda por esta forma de energia (IEA, 2008b; VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010).

Para a fabricação de papel, a demanda específica de energia também tem sido reduzida ao longo do tempo. As principais razões deste decréscimo são (VAKKILAINEN e KIVISTÖ, 2010):

- O fechamento dos sistemas de circulação da água consumida nas indústrias, permitindo o aumento da temperatura com menor consumo de vapor;
- O uso mais eficiente de vapor secundário;
- O aumento na taxa de utilização da capacidade instalada;
- Melhorias na seção de prensagem das máquinas de papel;
- O aumento no uso de enchimentos e revestimentos na fabricação de papéis para imprimir, reduzindo a necessidade de evaporação da água;
- O aumento no teor de sólidos secos em papéis finos e revestidos;
- O uso de gás natural na secagem por infravermelho de papéis revestidos.

As tecnologias mais promissoras para a redução do consumo energético do setor de celulose e papel no médio prazo estão relacionadas aos conceitos de gaseificação de licor negro, possibilitando a obtenção de níveis mais elevados na eficiência de utilização deste combustível através da aplicação do gás obtido em turbinas a gás para a geração de eletricidade, e biorefinarias, visando a produção de produtos químicos como o dimetil éter (DME), que pode ser utilizado como

combustível visando a substituição de óleo diesel. Outros avanços esperados referem-se às tecnologias de secagem e ao aumento na reciclagem de papéis (IEA, 2008b).

2.2.3 Evolução da produção de papel e celulose no mundo

A produção mundial de papel e celulose em 2010 foi de aproximadamente 394 e 186 milhões de toneladas, respectivamente. Entre 1979 e 2010 as produções de papel e celulose aumentaram a uma taxa anual de aproximadamente 2,8% e 1,2%, figura 4, (FAO, 2011).

Os maiores produtores mundiais de papel são China, EUA, Japão, Alemanha, Canadá, Finlândia, República da Coreia, Indonésia, Suécia e Brasil, enquanto os maiores produtores de celulose são EUA, China, Canadá, Brasil, Suécia, Finlândia, Japão, Rússia, Indonésia e Chile. Estes países juntos foram responsáveis por aproximadamente 81% e 73% da produção mundial de papel e celulose, respectivamente, em 2010 (FAO, 2011).

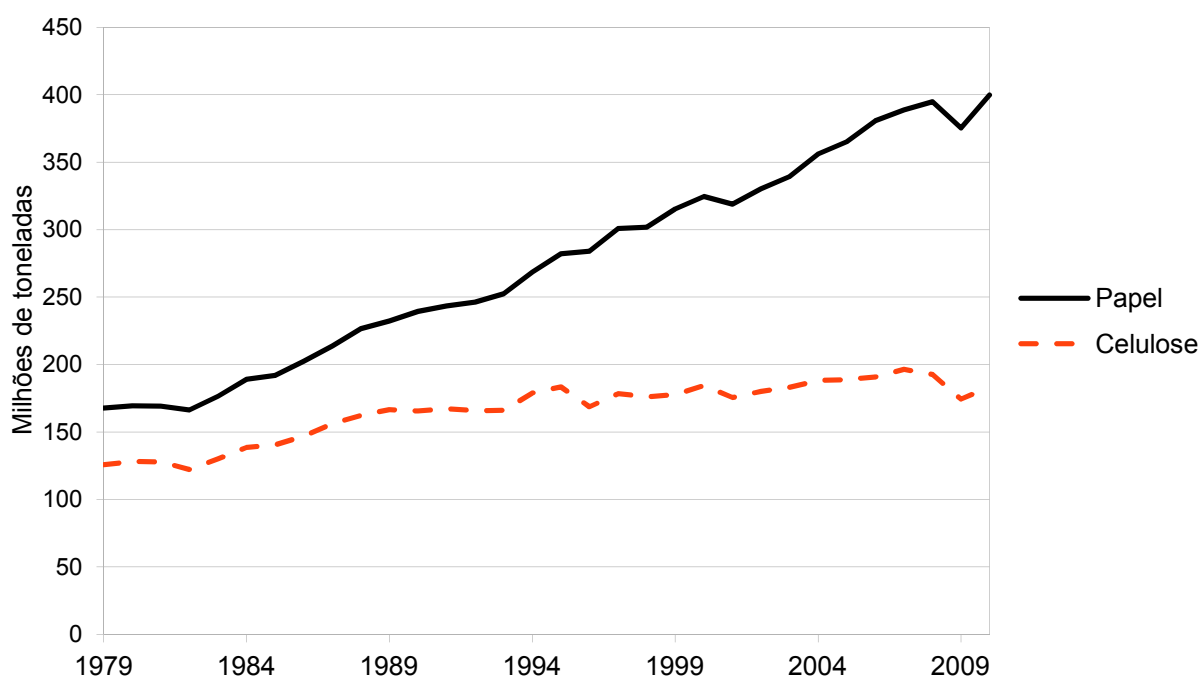


Figura 4. Evolução da produção mundial de papel e celulose entre 1979 e 2010.

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

2.2.4 O setor brasileiro de celulose e papel

2.2.4.1 Produção

O Brasil é o quarto maior produtor de celulose e o décimo maior produtor de papel do mundo (FAO, 2011). O setor tem um importante papel na economia do país, representando 0,3% e 1,8% do PIB nacional e da indústria, respectivamente,

em 2010 (MME, 2011a). Papel e celulose, inclusos em uma mesma categoria, corresponderam ao décimo principal produto de exportação, correspondendo à 3,4% dos produtos exportados (em valor) pelo país em 2010 (MDIC, 2010).

Entre 1979 e 2010, tanto a produção de celulose quanto a de papel aumentaram significativamente. Em 1979 foram produzidos aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de celulose e cerca de 3,0 milhões de toneladas de papel. Já em 2010 foram produzidos 14,1 milhões de toneladas de celulose e 9,8 milhões de toneladas de papel. Com exceção de um decréscimo na redução de celulose entre os anos de 1982 e 1986, a produção de papel e celulose cresceu em taxas semelhantes até o ano de 2002. A partir deste ano, indústrias de celulose química de grandes capacidades começaram a entrar em operação, como consequência a produção de celulose cresceu a uma taxa de 8,5% ao ano, entre 2002 e 2010. Já a produção de papel foi incrementada neste período a uma taxa significativamente menor, de aproximadamente de 3,1% ao ano, figura 5 (FAO, 2011).

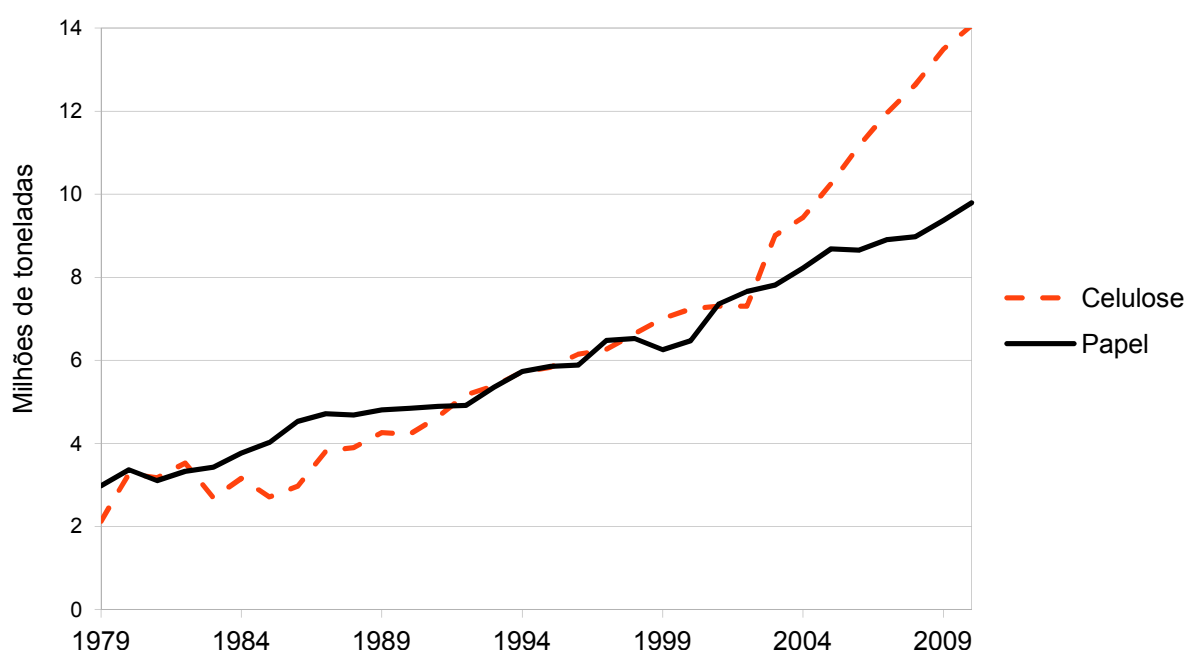


Figura 5. Evolução da produção brasileira de papel e celulose entre 1979 e 2010.

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

A celulose brasileira é majoritariamente produzida a partir de processos químicos. A participação da celulose mecânica no total da celulose produzida no país tem diminuído desde 1985. Como mostrado na figura 6, a celulose química representou 97% do total de celulose virgem produzida em 2010. Sua produção aumentou a uma taxa anual de 6,6% entre 1979 e 2010, quando a produção atingiu 13,6 milhões de toneladas, cerca de 10,9% da produção mundial. No mesmo

período, a celulose mecânica foi incrementada a uma taxa de 2,2% ao ano, atingindo aproximadamente 0,5 milhão de tonelada em 2010, cerca de 1,1% da produção mundial (FAO, 2011). A capacidade instalada está dividida entre 30 indústrias de celulose química e semiquímica (com uma capacidade média instalada de 484.000 toneladas por ano), 35 indústrias de celulose mecânica (com capacidade média de 17.500 toneladas por ano) e 3 indústrias de celulose dissolvida (BRACELPA, 2010).

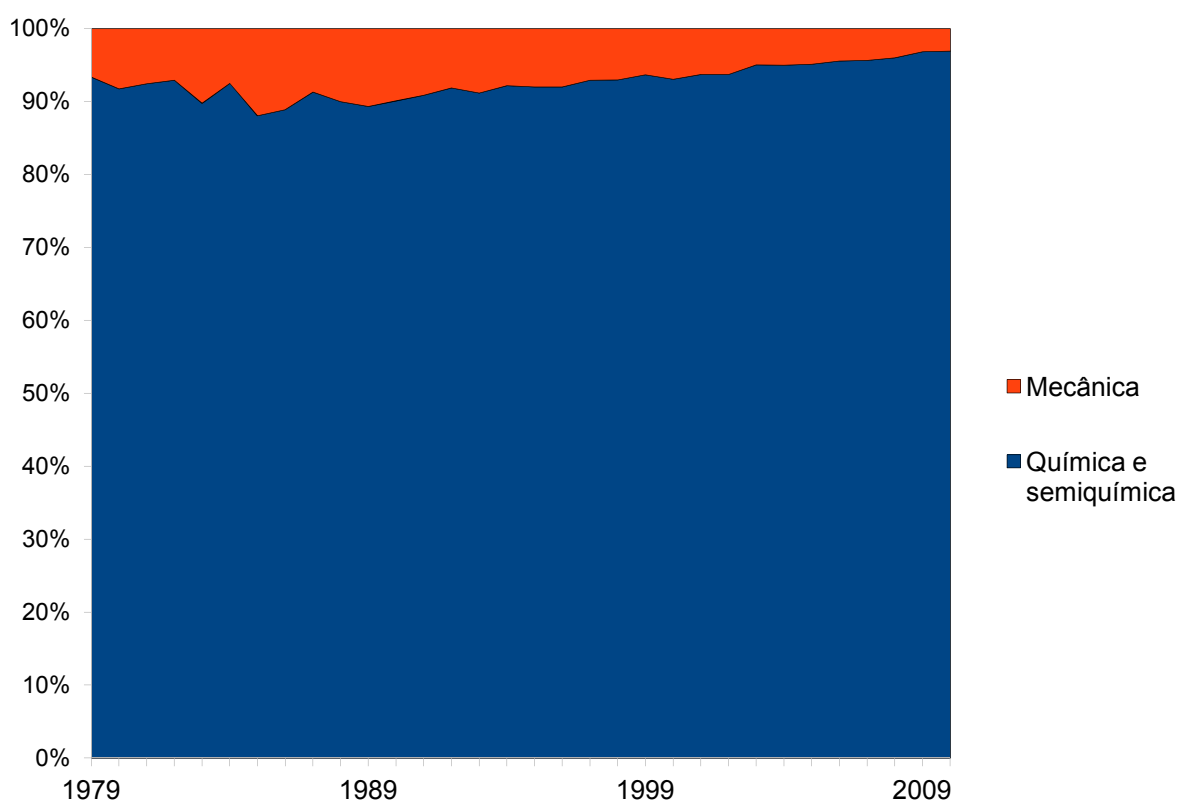


Figura 6. Evolução das participações dos diferentes tipos de celulose na produção brasileira.

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Entre 1979 e 2010 não ocorreram mudanças significativas no *mix* de produção de papéis. As maiores mudanças foram a redução da participação do papel imprensa, de 3,7% para 1,3%, enquanto as participações dos papéis para fins sanitários, imprimir e escrever e papéis para embalagem aumentaram de 6,8% para 9,3%, de 25,7% para 27,6% e de 47,5% para 56,2%, respectivamente, figura 7 (FAO, 2011). A capacidade total instalada no país é de aproximadamente 11,3 milhões de toneladas por ano, dividida em 179 fábricas com uma capacidade média instalada de 63.000 toneladas de papel por ano (BRACELPA, 2010). A utilização de fibras recicladas, ilustrada na figura 8 e definida como a razão entre a quantidade de

papel reciclado utilizado como matéria prima de celulose e a produção total de papel, também aumentou no período analisado, de 0,8 milhão de tonelada por ano em 1979 para 3,9 milhões de toneladas por ano em 2010. No entanto, suspeita-se que haja alguma inconsistência nos dados de utilização de fibras recuperadas, especialmente entre 1990 e 1998, quando a quantidade reportada mantém-se constante em 1,3 milhão de tonelada por ano, seguida por um repentino acréscimo para 2,4 milhões de toneladas em 1999.

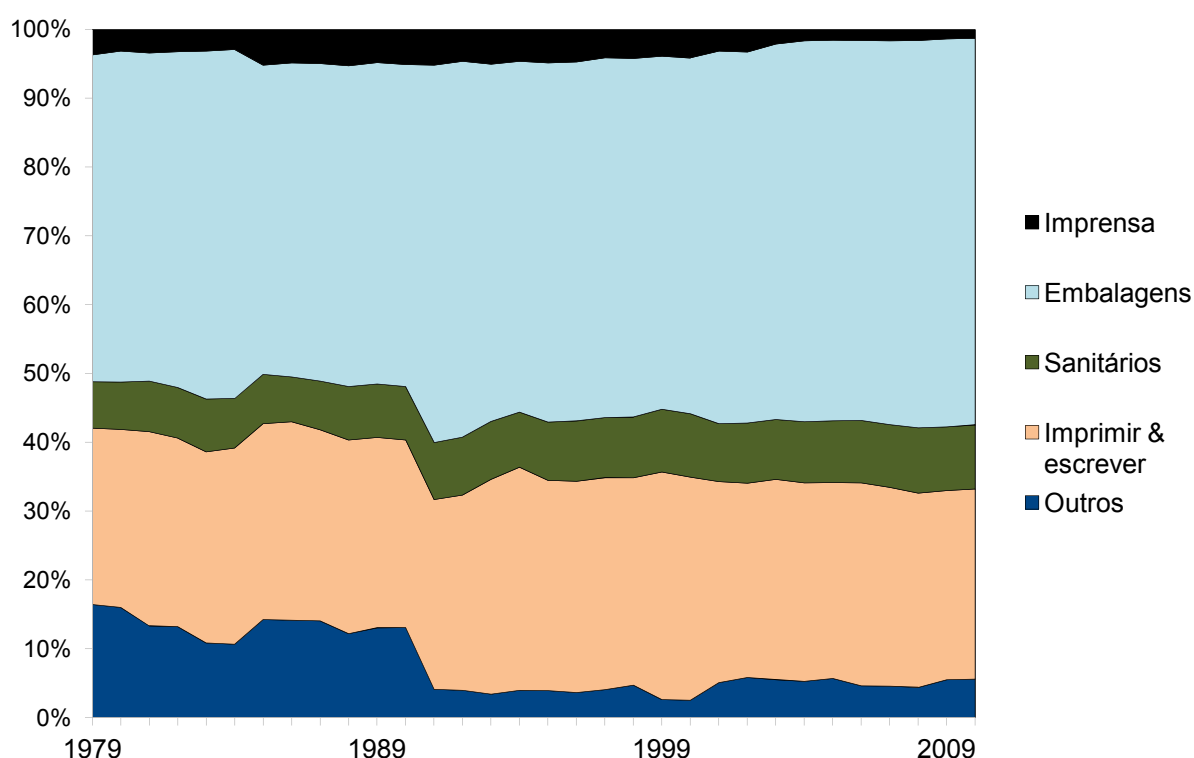


Figura 7. Evolução das participações dos diferentes tipos de papel na produção brasileira.

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

O eucalipto é a principal matéria-prima utilizada na produção de celulose no Brasil, correspondendo a 85,7% em 2010 (BRACELPA, 2011b). O setor brasileiro de papel e celulose tem aproximadamente 18.370 km² de florestas plantadas de eucalipto, 3.880 km² de florestas plantadas de pinus e 260 km² de outras espécies florestais. O país tem uma grande vantagem comparativa em termos de produção de madeira, sendo reportada uma produtividade de 44 m³ de madeira de eucalipto por hectare por ano e 38 m³ de madeira de pinus por hectare por ano (BRACELPA, 2010).

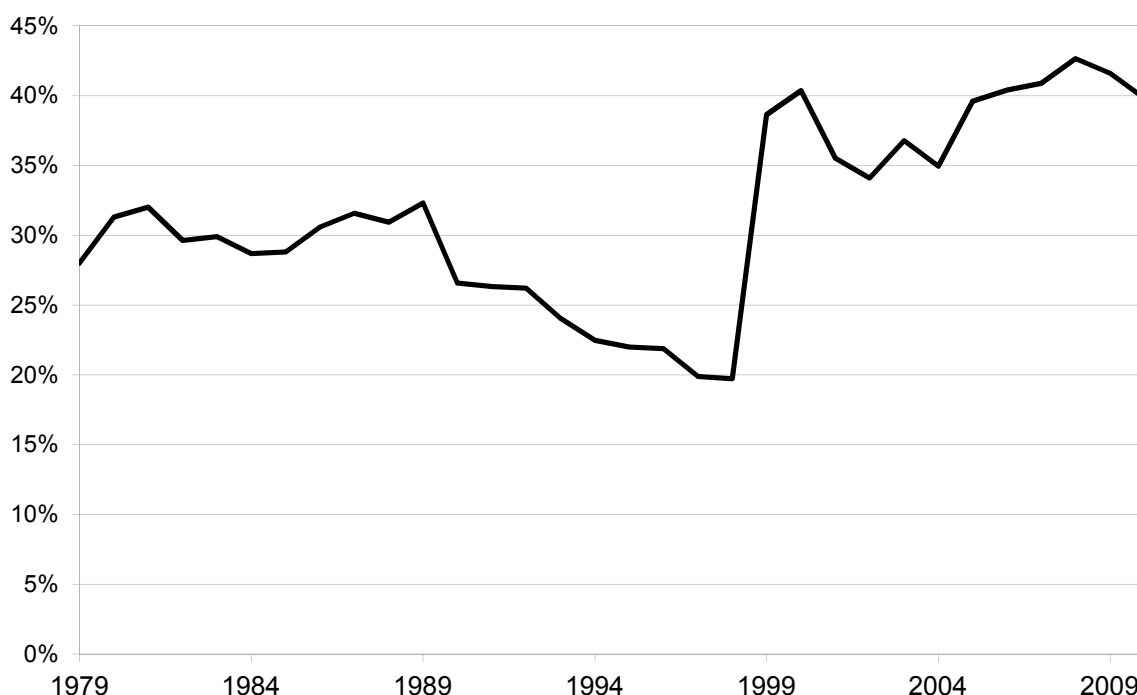


Figura 8. Taxa de utilização de fibras recuperadas no Brasil.

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

2.2.4.2 Consumo energético

O setor industrial representa aproximadamente 38% da energia final consumida no Brasil. A participação do setor de papel e celulose na energia final consumida pela indústria aumentou de 6,8% em 1979 para 11,8% em 2010. Ainda, a participação do setor na energia final consumida em todo o país aumentou de 2,4% para 4,5% no mesmo período (MME, 2011b). A figura 9 mostra a energia final consumida e as participações do setor industrial e do setor de papel e celulose entre 1979 e 2010, já a figura 10 mostra o consumo energético anual do setor de papel e celulose em termos de energia final consumida (eletricidade e combustíveis). Durante o período analisado, o consumo de eletricidade aumentou de 16,0 PJ em 1979 para 69,3 PJ em 2010, enquanto o consumo de combustíveis aumentou de 83,8 PJ em 1979 para 352,6 PJ em 2010. Uma importante característica do setor é o percentual de autoprodução de eletricidade, este cresceu de 40% em 1994 (14 PJ) para 51% em 2010 (35 PJ), chegando a 1,7 GW em capacidade instalada (MME, 2006, 2011a, 2011b).

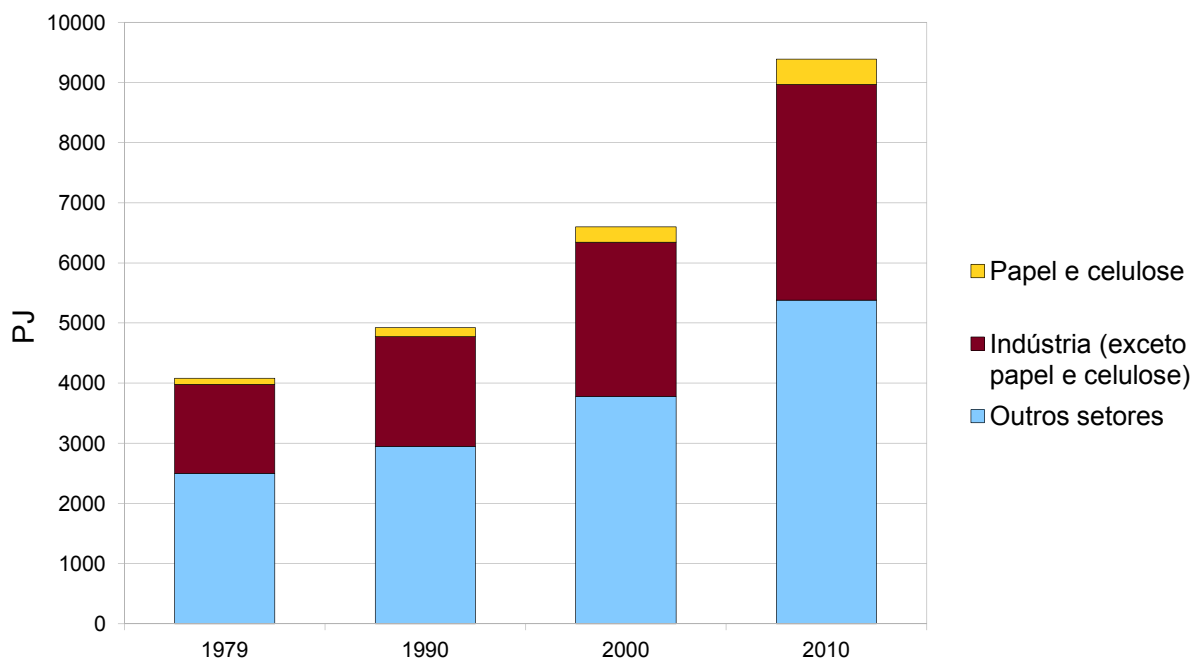


Figura 9. Evolução da energia final consumida no Brasil.
Fonte: elaborado a partir de MME (2011b).

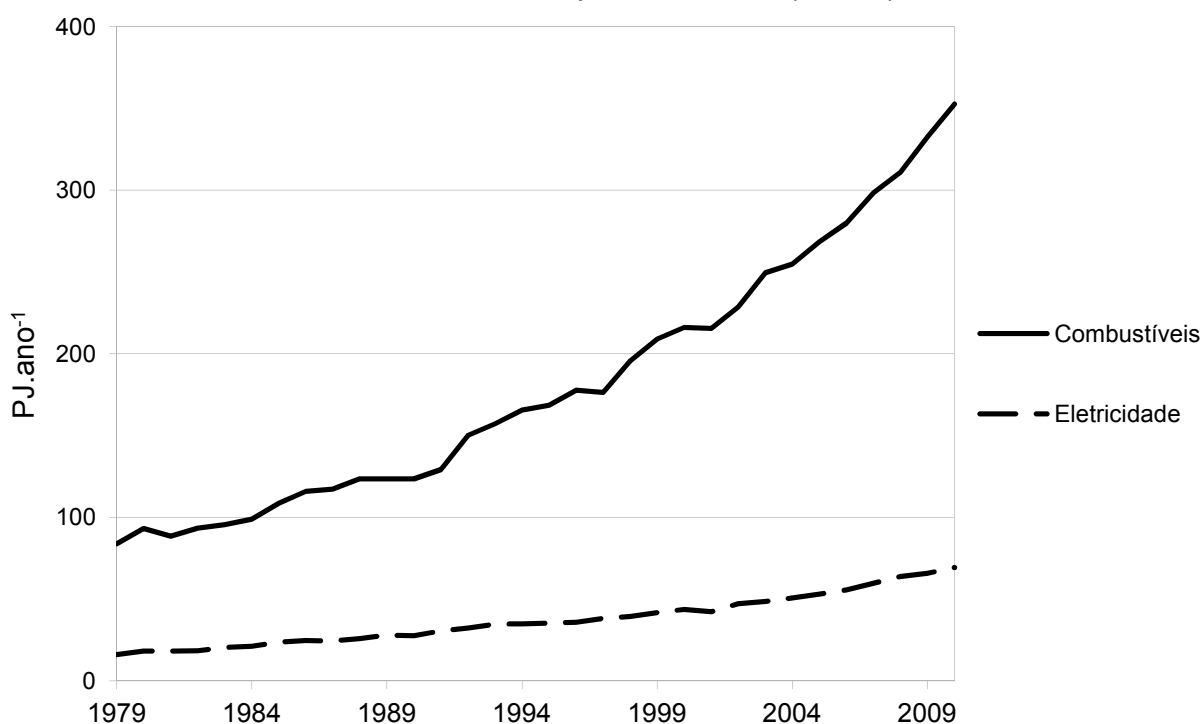


Figura 10. Evolução do consumo energético no setor de papel e celulose brasileiro.
Fonte: elaborado a partir de MME (2011b).

A figura 11 mostra a participação dos combustíveis fósseis e renováveis utilizados pelo setor desde 1979, de acordo com o Balanço Energético Nacional. Na categoria “combustíveis fósseis” estão inclusos gás natural, carvão vapor, óleo diesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo, coque de petróleo, querosene e

outras não especificadas. Na categoria “combustíveis renováveis” estão inclusos lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações.

Uma importante mudança na utilização dos combustíveis pelo setor aconteceu entre 1980 e 1985, quando, devido à disparada nos preços do petróleo após a crise de 1979, o governo brasileiro implementou, em cooperação com a Associação Brasileira de Celulose e Papel, uma medida objetivando a substituição do uso de combustíveis derivados de petróleo por fontes alternativas nacionais (MME, 2007; VELÁZQUEZ, 2000). Durante a execução deste programa, houve uma substituição significativa do consumo de óleo combustível por lenha e, mesmo após o término deste programa, a participação dos combustíveis renováveis manteve-se alta no setor.

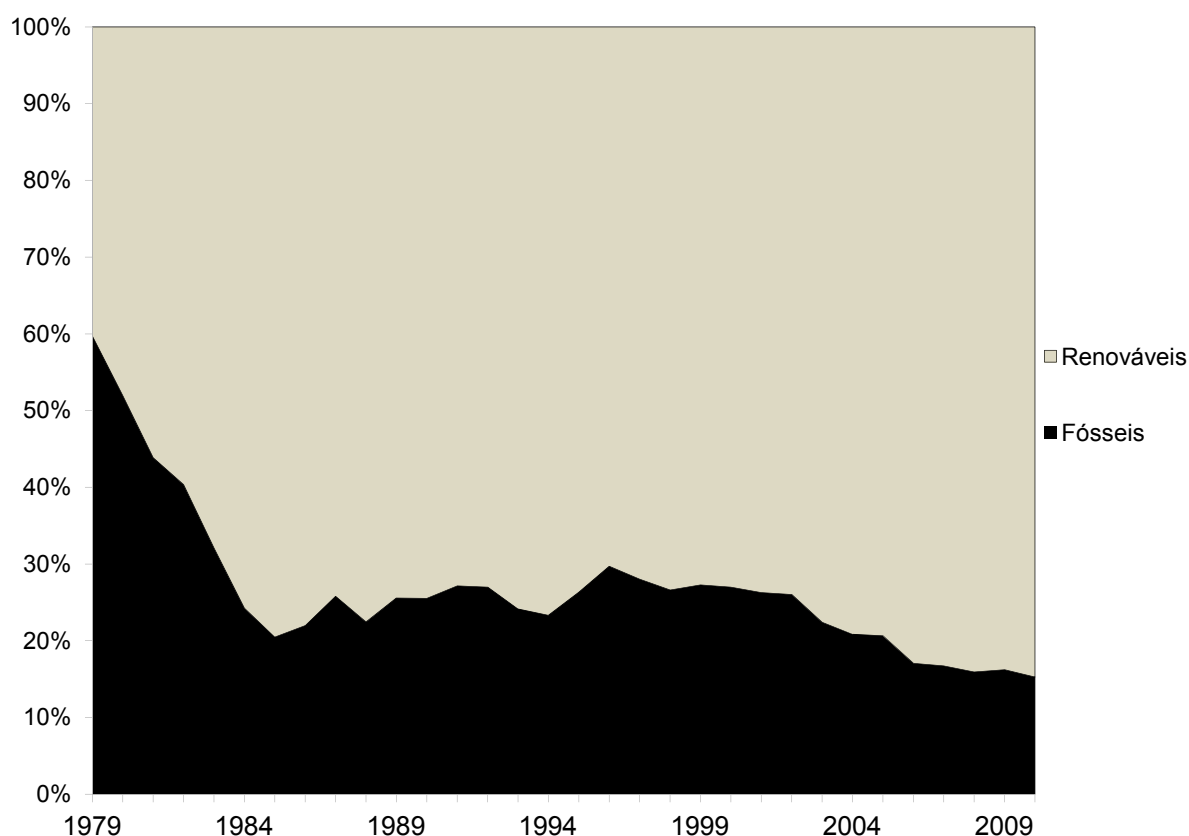


Figura 11. Evolução das participações dos combustíveis fósseis e renováveis no consumo de combustíveis do setor brasileiro de celulose e papel.

Fonte: elaborado a partir de MME (2011b).

A participação dos principais combustíveis utilizados na indústria de celulose e papel é mostrada na figura 12. A lixívia, ou licor negro, foi o principal combustível utilizado em 2010, representando 56% da energia obtida dos combustíveis, em 1979 este percentual era de 31%. Sua importância como o principal combustível utilizado pelo setor pode ser explicada pela majoritária quota da celulose química na

produção nacional e seu expressivo crescimento durante o período em análise. Lenha (18%), outras recuperações (10%), gás natural (8%) e óleo combustível (6%) também estão entre os principais combustíveis utilizados pelo setor em 2010. Apesar da expressiva substituição por lenha durante a primeira metade da década de 1980, a importância do óleo combustível para o setor também foi gradativamente reduzida durante a década de 1990, muito em função da crescente participação do gás natural, que foi introduzido na indústria no final da década de 1980.

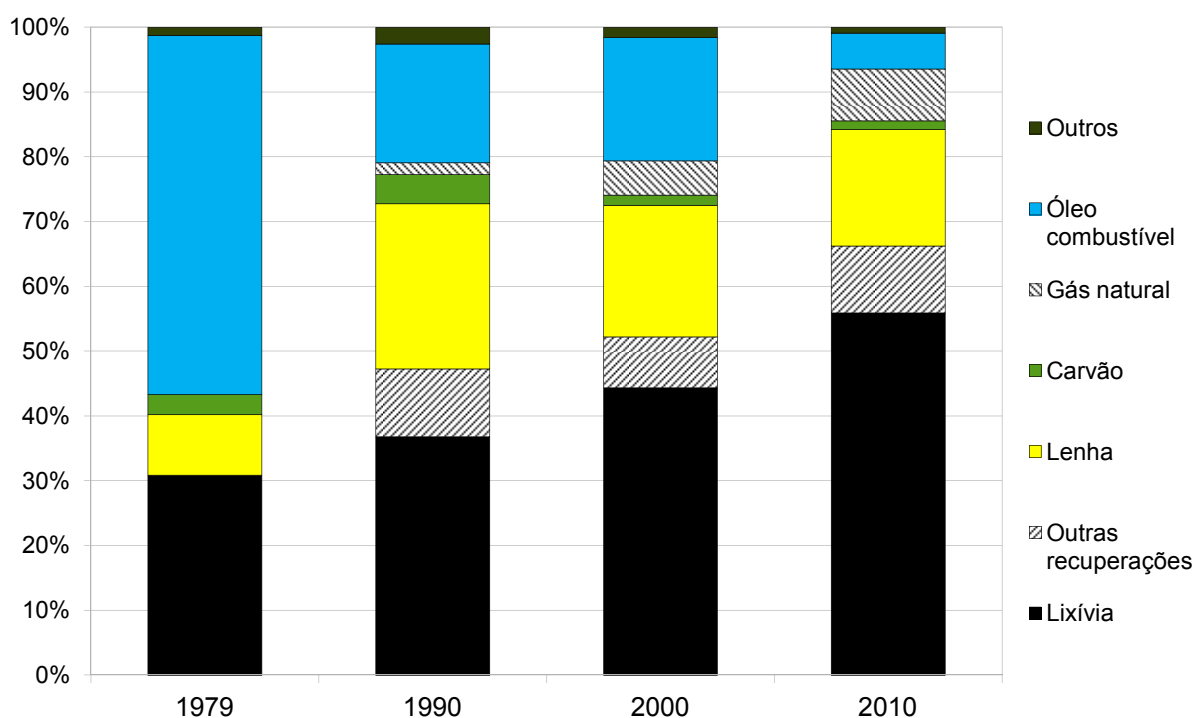


Figura 12. Evolução das participações dos diferentes combustíveis consumidos pelo setor brasileiro de celulose e papel.

Fonte: elaborado a partir de MME (2011b).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia para o cálculo dos índices de eficiência energética (IEE), assim como a análise de decomposição do histórico do consumo energético pelo setor de papel e celulose do Brasil e dos demais países envolvidos na comparação internacional (Canadá, Estados Unidos da América, Finlândia e Suécia), deu-se através da adaptação da metodologia apresentada por Farla, Blok e Schipper (1997). Para o cálculo das intensidades de emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) decorrente da queima de combustíveis e do consumo de eletricidade pelo setor de papel e celulose brasileiro baseou-se na metodologia apresentada por IPCC (2006).

As análises dos índices de eficiência energética e das intensidades de emissões de dióxido de carbono equivalente relacionadas ao setor brasileiro referem-se ao período de tempo compreendido entre 1979 e 2010. Por indisponibilidade de dados dos consumos energéticos dos demais países envolvidos na comparação internacional referentes ao ano de 2010, as análises de decomposição do consumo energético limitaram-se entre os anos de 1979 e 2009.

As metodologias utilizadas em cada uma das análises estão detalhadamente descritas a seguir.

3.1 Índice de eficiência energética

Segundo Farla, Blok e Schipper (1997), a energia total consumida por um dado setor da economia pode ser escrita conforme a equação 1:

$$\sum E = \sum P \cdot \frac{IPF}{\sum P} \cdot \frac{\sum E}{IPF} \quad 1$$

Onde $\sum E$ é a energia total consumida (GJ), $\sum P$ é a produção total (t) e IPF é o índice de produção física do setor (GJ). Esta equação significa que a energia total consumida por um dado setor é determinada pelo seu nível de atividade ($\sum P$), sua estrutura, ou *mix* de produtos, ($IPF \cdot \sum P^{-1}$) e sua eficiência energética ($\sum E \cdot IPF^{-1}$). Enquanto a produção total do setor dá-se pela simples adição dos bens produzidos pelo mesmo, o IPF é determinado pela equação 2:

$$IPF = \sum_{x=1}^n (P_x \cdot w_x)$$

2

Sendo que P_x é a quantidade produzida do produto x (t) e w_x é seu fator de ponderação (GJ.t^{-1}), ou seja, a quantidade de energia requerida para produzir o produto x , aplicando-se a melhor tecnologia disponível ou um valor de referência. Os valores específicos da quantidade requerida de energia para a produção dos diferentes tipos de papel e celulose estão listados na tabela 1.

Tabela 1. Quantidade específica de energia demandada para a produção de diferentes tipos de papel e celulose

Tipologia	Calor (GJ.t^{-1})	Eletricidade (GJ.t^{-1})
Celulose mecânica	-2,1	5,3
Celulose química	10,0	2,5
Outros tipos de celulose	-3,0	6,0
Fibras recuperadas	0,4	1,4
Papéis para fins sanitários	5,0	2,4
Papel imprensa	2,5	1,4
Papéis para imprimir e escrever	7,0	2,0
Papéis para embalagens	5,0	1,5
Outros papéis	6,0	1,8

Fonte: Farla, Blok e Schipper (1997).

Embora IEA (2007d) também tenha apresentado valores específicos para as quantidades requeridas de energia na produção de diferentes tipos de celulose e papel, podendo estes serem considerados valores mais atualizados, decidiu-se utilizar nestas análises os valores apresentados por Farla, Blok e Schipper (1997). Estes valores referem-se às quantidades de energia baseadas no emprego das melhores tecnologias disponíveis para o setor e estão citados na tabela 1. A razão para esta escolha é que no estudo apresentado por IEA (2007d) não há valores referentes à categoria “outros tipos de celulose”. Ainda, os valores apresentados são superiores aos apresentados por Farla, Blok e Schipper (1997) (exceto na eletricidade demandada para a produção de “papéis para embalagem” e “outros papéis” e tanto no calor quanto na eletricidade demandados na produção de “papéis para imprimir e escrever”). Daqui, os valores apresentados na tabela 1 serão tratados como valores referenciais, sendo que não necessariamente representam os

valores baseados nas melhores tecnologias/técnicas disponíveis para a indústria de papel e celulose.

Após a obtenção dos valores do IPF torna-se possível o cálculo do índice de eficiência energética (IEE), através da equação 3:

$$IEE = \frac{IPF}{\sum E} \quad 3$$

O IEE mostra a dimensão do potencial técnico de redução do consumo de energia no ano em análise, caso todo o setor empregasse produzisse cada tonelada dos diferentes tipos de papel e celulose consumindo as quantidades de energia especificadas na tabela 1, o que resultaria num IEE igual a 100%.

Para o setor de celulose e papel brasileiro, a análise do desenvolvimento da eficiência energética foi realizada separadamente para eletricidade, calor e energia primária. A eficiência de conversão do combustível em vapor de processo foi considerada como 80%, assim sendo, os valores específicos de calor demandados na produção dos diferentes tipos de celulose e papel foram divididos por este fator. O consumo de energia primária foi determinado pela soma da eletricidade consumida, dividida por um fator de eficiência de conversão de 40%, com os combustíveis consumidos. O uso do consumo de energia primária para as comparações internacionais é justificado pela tentativa de reduzir-se potenciais distorções que podem ocorrer na computação dos dados referentes à autoprodução de eletricidade (FARLA e BLOK, 2001).

3.2 Análise de decomposição

Farla, Blok e Schipper (1997) adotaram o método do consumo de energia aditivo e utilizaram a média paramétrica *Divisia* simples - método 2, que é descrito por Ang (1995). A escolha deste método foi justificada pela “obtenção de um pequeno termo residual e a facilidade de implementação”. Com o intuito de obter-se um termo residual menor, a análise foi realizada em uma base anual móvel, ou seja, as variações foram calculadas de ano para ano para serem posteriormente somadas e obter-se o resultado para todo o período em análise. A metodologia para a análise de decomposição é descrita a seguir:

$$\sum E = \Delta E_{pdn} + \Delta E_{str} + \Delta E_{int} + \Delta E_{rsd} \quad 4$$

Onde ΔE_{pdn} refere-se às mudanças no nível de atividade, ΔE_{str} às mudanças no *mix* de produtos (mudanças estruturais), ΔE_{int} à eficiência energética, sendo ΔE_{rsd}

o termo residual. Estes termos são obtidos através das equações 5, 6 e 7, descritas a seguir:

$$\Delta E_{pdn} = [I_0 + \alpha \cdot (I_T - I_0)] \cdot (Y_T - Y_0) \quad 5$$

$$\Delta E_{str} = \sum [I_{i,0} \cdot Y_0 + \beta_i \cdot (I_{i,T} \cdot Y_T - I_0 \cdot Y_0)] \cdot (S_{i,T} - S_{i,0}) \quad 6$$

$$\Delta E_{int} = \sum [Y_{i,0} + \tau_i \cdot (Y_{i,T} - Y_{i,0})] \cdot (I_{i,T} - I_{i,0}) \quad 7$$

Sendo Y produção do setor e Y_i a produção do produto i, I ($= E \cdot Y^{-1}$) a intensidade energética do setor, I_i ($= E_i \cdot Y_i^{-1}$) a intensidade energética do produto i e S_i ($= Y_i \cdot Y^{-1}$) a participação do produto i na produção total do setor. Os termos T e 0 referem-se aos anos analisados, em uma base anual móvel ($T=0+1$). Os parâmetros α , β_i e τ_i são calculados como demonstrado pelas equações 8, 9 e 10:

$$\alpha = \frac{I_0 \cdot (Y_T - Y_0) - E_0 \cdot \ln\left(\frac{Y_T}{Y_0}\right)}{(I_0 - I_T) \cdot (Y_T - Y_0) - (E_0 - E_T) \cdot \ln\left(\frac{Y_T}{Y_0}\right)} \quad 8$$

$$\beta_i = \frac{I_{i,0} \cdot Y_0 \cdot (S_{i,T} - S_{i,0}) - E_{i,0} \cdot \ln\left(\frac{S_{i,T}}{S_{i,0}}\right)}{(I_{i,0} \cdot Y_0 - I_{i,T} \cdot Y_T) \cdot (S_{i,T} - S_{i,0}) - (E_{i,0} - E_{i,T}) \cdot \ln\left(\frac{S_{i,T}}{S_{i,0}}\right)} \quad 9$$

$$\tau_i = \frac{Y_{i,0} \cdot (I_{i,T} - I_{i,0}) - E_{i,0} \cdot \ln\left(\frac{I_{i,T}}{I_{i,0}}\right)}{(Y_{i,0} - Y_{i,T}) \cdot (I_{i,T} - I_{i,0}) - (E_{i,0} - E_{i,T}) \cdot \ln\left(\frac{I_{i,T}}{I_{i,0}}\right)} \quad 10$$

3.3 Intensidade de emissões de dióxido de carbono equivalente

As emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) decorrentes do consumo energético do setor de celulose e papel brasileiro referem-se as emissões diretas, relacionadas à queima de combustíveis, e indiretas, relacionadas ao consumo de eletricidade. As estimativas das emissões dos gases de efeito estufa (GEE's) considerados seguiram a mesma lógica e foram realizadas aplicando-se a metodologia do nível (*tier*, em inglês) 1 do capítulo 2, destinado a combustão em fontes estacionárias, apresentada em IPCC (2006).

As emissões anuais de CO_2e foram estimadas conforme a equação 11:

$$EM_{CO_2e} = EM_{CO_2e,diretas} + EM_{CO_2e,indiretas} \quad 11$$

Onde EM_{CO_2e} refere-se as emissões totais de dióxido de carbono equivalente pelo setor brasileiro de papel e celulose em um determinado ano ($kgCO_2e.ano^{-1}$), $EM_{CO_2e,diretas}$ são as emissões de CO_2e decorrentes da queima de combustíveis pelo setor ($kgCO_2e.ano^{-1}$) e $EM_{CO_2e,indiretas}$ são as emissões indiretas de CO_2e oriundas da eletricidade consumida pelo setor ($kgCO_2e.ano^{-1}$), no mesmo ano de referência. Sendo as emissões indiretas de CO_2e estimadas pela equação 12, descrita a seguir:

$$EM_{CO_2e,indiretas} = em_{co_2,el} \cdot El \quad 12$$

Sendo que El representa a quantidade de eletricidade consumida pelo setor de celulose e papel em um determinado ano ($TJ.ano^{-1}$) e $em_{CO_2,el}$ representa as emissões de dióxido de carbono equivalente por quantidade de eletricidade produzida pelas centrais elétricas de serviço público³ neste mesmo ano ($kgCO_2e.TJ^{-1}$), estimada conforme a equação 13:

$$em_{CO_2,el} = \frac{EM_{CO_2e,CESP}}{E_{el}} \quad 13$$

Onde $em_{CO_2,el}$ são as emissões de dióxido de carbono equivalente por quantidade de eletricidade produzida em um determinado ano ($kgCO_2e.TJ^{-1}$), $EM_{CO_2e,CESP}$ representa a quantidade de CO_2e emitida pelas centrais elétricas de serviço público ($kgCO_2e.ano^{-1}$) e E_{el} é a quantidade de eletricidade produzida por estas centrais elétricas neste mesmo ano ($TJ.ano^{-1}$).

As estimativas das emissões diretas, provenientes da queima de combustíveis no setor de papel e celulose, e indiretas, provenientes da queima de combustíveis nas centrais elétricas de serviço público, de dióxido de carbono equivalente foram realizadas com base na equação 14⁴:

$$EM_{CO_2e} = EM_{CO_2} + EM_{CH_4} \cdot PAG_{CH_4} + EM_{N_2O} \cdot PAG_{N_2O} \quad 14$$

Sendo EM_{CO_2} , EM_{CH_4} e EM_{N_2O} as emissões anuais de dióxido de carbono ($kgCO_2.ano^{-1}$), de metano ($kgCH_4.ano^{-1}$) e de óxido nitroso ($kgN_2O.ano^{-1}$),

³ Embora o setor de papel e celulose no Brasil possua um elevado índice de autoprodução de eletricidade, de 51% em 2010 (MME, 2011a), na estimativa das emissões indiretas de GEE's decorrentes do consumo de eletricidade pelo setor considerou-se que toda a eletricidade consumida pelo setor foi oriunda das centrais elétricas de serviço público, em função da indisponibilidade de dados referentes a autoprodução de eletricidade em todo o período analisado.

⁴ As emissões de CO_2 decorrentes da queima dos combustíveis lenha, bagaço de cana, licor negro e outros resíduos, em função de sua renovabilidade, não foram contabilizadas nas emissões totais de CO_2e . Porém, as emissões de CH_4 e N_2O oriundas da queima destes mesmos combustíveis integram as emissões totais de CO_2e .

respectivamente, e PAG_{CH_4} e PAG_{N_2O} os potenciais de aquecimento global do metano e do óxido nítrico, respectivamente, descritos na tabela 2.

Tabela 2. Potenciais de aquecimento global para o CH_4 e o N_2O

Gás	PAG
CH_4	21
N_2O	310

Fonte: Adaptado de Bernstein et al. (2007).

As quantidades de GEE's emitidas, tanto pelas centrais elétricas de serviço público quanto pelo setor de papel e celulose, foram estimadas conforme a equação 15, mostrada a seguir:

$$EM_{g,i} = C_i \cdot FE_{g,i} \quad 15$$

Onde $EM_{g,i}$ representa as emissões anuais de um determinado gás de efeito estufa g pela queima de cada combustível i ($kg \text{ GEE} \cdot \text{ano}^{-1}$), C_i a quantidade anual de combustível i consumida ($TJ \cdot \text{ano}^{-1}$) e $FE_{g,i}$ o fator de emissão padrão do GEE g por tipo de combustível i ($kg \text{ GEE} \cdot TJ^{-1}$), apresentados na tabela 3, incluso o fator de oxidação do carbono, assumido como igual a 1.

Tabela 3. Fatores de emissão para combustão estacionária em indústrias

Combustível	Fatores de emissão ($kg \cdot TJ^{-1}$)		
	CO_2	CH_4	N_2O
Petróleo bruto ⁵	73.300	3	0,6
Óleo diesel	74.100	3	0,6
Óleo combustível	77.400	3	0,6
GLP	63.100	1	0,1
Gás natural	56.100	1	0,1
Carvão	94.600	3	1,5 ⁶
Coque de petróleo	97.500	3	0,6
Lenha e resíduos	112.000	30	4,0
Licor negro	95.300	3	2,0
Outros tipos de biomassa sólida	100.000	30	4,0

Fonte: Adaptado de IPCC (2006).

O cálculo das emissões totais por tipo de gás deu-se pela equação 16:

⁵ Para a categoria de combustível "outras não especificadas" utilizou-se os fatores de emissão relacionados a queima de petróleo bruto.

⁶ IPCC (2006) prevê a utilização de um fator de emissão de N_2O decorrente da queima de carvão em centrais elétricas igual a 3. Para os demais combustíveis não há diferenças nos fatores de emissão.

$$EM_g = \sum_{\text{combustíveis}} EM_{g,i}$$

16

Sendo que EM_g representa as emissões anuais totais do gás g (kg GEE.ano⁻¹), que é o somatório das emissões do gás g decorrente da queima de cada combustível i .

Esta metodologia prevê a utilização da quantidade de combustível consumida baseada em seu respectivo poder calorífico inferior (PCI). Como o Balanço Energético Nacional expressa o consumo dos combustíveis baseado no poder calorífico superior (PCS), fez-se necessária a conversão destes valores com base em IEA (2010). Assim sendo, as quantidades de combustíveis consumidos apresentadas no Balanço Energético Nacional foram divididas pelos fatores apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Fatores de conversão da quantidade de combustível baseada em seu PCS para a quantidade baseada em seu PCI

Combustível	Relação PCI/PCS
Combustíveis fósseis líquidos	95%
Combustíveis fósseis sólidos	95%
Biomassa	95%
Gás natural e Gás Liquefeito de Petróleo	90%

Fonte: Adaptado de IEA (2010).

Após a obtenção das estimativas das emissões anuais geradas direta ou indiretamente pelo consumo energético no setor de papel e celulose, faz-se possível o cálculo da intensidade de emissão de CO₂e como apresentado por IEA (2007d) e demonstrado pela equação 17:

$$IE_{CO_2e} = \frac{EM_{CO_2e}}{PF}$$

17

Onde PF representa a soma entre a quantidade anual de celulose exportada (t.ano⁻¹) e a quantidade anual de papel produzida (t.ano⁻¹) e IE_{CO_2e} representa o índice de emissão de dióxido de carbono equivalente emitido por tonelada de celulose exportada e tonelada de papel produzida (tCO₂e.t⁻¹).

3.4 Aquisição dos dados

3.4.1 Produção de papel e celulose

Os dados de produção das diferentes categorias de celulose e papel no Brasil e nos países escolhidos para a comparação internacional foram obtidos junto à base de dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação

(FAO, 2011). As quantidades de celulose produzidas são fornecidas em tonelada seca ao ar (*air-dry tonne*, em inglês), que é a unidade padrão utilizada na comercialização de celulose e possui um teor de umidade de 10%.

Algumas potenciais inconsistências nos dados foram encontradas, como por exemplo a constante quantidade de fibras recuperadas entre os anos de 1990 e 1998 no setor brasileiro, relatada anteriormente. A Associação Brasileira de Celulose e Papel publica anualmente relatórios estatísticos (BRACELPA, 2009, 2010, 2011b) com informações referentes ao setor, entre eles os dados de produção de celulose e papel, mas estas informações estão disponíveis somente a partir de 1989 (os dados de fibras recuperadas estão disponíveis somente a partir de 1999). Comparando-se os dados disponibilizados pela FAO e pela BRACELPA algumas diferenças pontuais foram encontradas, sendo a maior diferença na produção de papel para embalagens nos anos de 1999 e 2000, quando os dados da BRACELPA são aproximadamente 11% superiores aos apresentados pela FAO, nos outros anos não houve diferenças significativas. Nos dados referentes à produção de celulose, os dados da BRACELPA para o ano de 2002 são superiores aos apresentados pela FAO em aproximadamente 10% e 8%, referentes às produções de celulose química e mecânica, respectivamente. Nos dados de fibras recuperadas, as maiores diferenças encontradas foram entre os anos de 2001 e 2004, sendo os dados fornecidos pela BRACELPA superiores aos apresentados pela FAO entre 5% e 17% neste período⁷.

3.4.2 Consumo energético

Os dados de consumo energético do setor brasileiro de celulose e papel foram obtidos das séries completas do Balanço Energético Nacional. Já os dados referentes ao consumo energético dos outros países envolvidos na comparação internacional (Canadá, Finlândia, Suécia e EUA) foram obtidos junto ao Grupo Internacional de Estudos Energéticos (IES) do Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) para o período entre 1979 e 1991 e junto à Agência Internacional de Energia (IEA), para o período entre 1992 e 2009 (FARLA, 2011; IEA, 1995, 1996, 1998, 2000, 2002, 2005, 2007a, 2009a, 2011a).

A utilização destas duas bases de dados deu-se pela indisponibilidade dos dados de consumo energético do setor de celulose e papel nos países considerados

⁷ Optou-se pela utilização dos dados obtidos em BRACELPA (2011b) e BRACELPA (2009) nos anos em que as maiores diferenças foram encontradas, ou seja, referentes às produções de celulose química e mecânica de 2002, as produções de papéis para embalagens de 1999 e 2000, e as quantidades de fibras recuperadas entre 2001 e 2004.

para todo o período de tempo em análise. Sendo que os dados obtidos junto a IEA estão disponibilizados de forma contínua, com exceção do consumo energético nos EUA, somente a partir do ano de 1987, optou-se pela utilização dos dados obtidos junto ao IES para o período em que estes foram disponibilizados (até 1991), utilizando-se os dados da IEA para o restante do período em análise (entre os anos de 1992 e 2009)⁸.

Os dados referentes aos consumos energético disponibilizados pelas bases de dados internacionais incluem também o consumo energético da indústria gráfica na mesma categoria da indústria de papel e celulose. Por isso, reduziu-se em 5% os valores disponibilizados por estas bases de dados, que representaria o percentual médio da quantidade de energia consumida pelas indústrias gráficas (IEA, 2007d). Os dados de consumo energético divulgados no Balanço Energético Nacional referem-se somente às indústrias de celulose e papel.

3.4.3 Preço dos insumos energéticos

As evoluções dos preços dos insumos energéticos no Brasil foram retiradas do Balanço Energético Nacional (MME, 2011b). Os dados disponibilizados por MME (2011b) compreendem o período 1973-2010, referem-se aos preços correntes aplicados e estão em dólares americanos por barril equivalente de petróleo, sendo os valores monetários convertidos a preços nominais (ano base 2009) através dos índices gerais de preços aos consumidores dos Estados Unidos da América (CPI-U) divulgados por BLS (2011). Para a conversão da base dos valores de barril equivalente de petróleo para GJ, multiplicou-se pelo fator de 5,95, conforme indicado por MME (2011a). A análise das evoluções dos preços é referente ao período 1979-2010. Os preços indicados para a lenha estão somente disponíveis a partir de 1984 e indicam os preços de lenha nativa.

⁸ Os dados do IES referentes ao consumo energético do setor canadense de celulose e papel estão disponíveis até o ano de 1987, assim sendo, utilizou-se os dados da IEA para o restante do período. Em razão da suspeita de inconsistência nos dados disponibilizados pela IEA referentes ao consumo energético na Finlândia e nos EUA entre os anos de 1992 e 1999 foram desconsiderados (FARLA, 2011; IEA, 1995, 1996, 1998, 2000, 2002, 2005, 2007a, 2009a, 2011a).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira parte desta seção mostra o desenvolvimento das emissões de dióxido de carbono equivalente por tonelada de celulose exportada e papel produzido no Brasil. Na sequência são apresentadas as evoluções dos índices de eficiência energética do setor brasileiro de celulose e papel, referentes aos consumos de eletricidade, combustíveis e energia primária, identificando os potenciais de conservação de energia caso toda a indústria produzisse empregando somente os valores específicos de energia demandada descritos na tabela 1.

Na terceira parte são apresentadas as análises de decomposição realizadas para as avaliações das influências das mudanças no nível de atividade, na estrutura e na eficiência energética do setor no desenvolvimento de seus consumos de eletricidade, combustíveis e energia primária.

A quarta e última parte desta seção traz as comparações internacionais das análises de decomposição e dos índices de eficiência energética referentes ao consumo de energia primária dos setores de papel e celulose no Brasil, Canadá, EUA, Finlândia e Suécia.

4.1 Intensidade das emissões de dióxido de carbono equivalente

O setor nacional de papel e celulose apresentou significativa redução nas emissões de dióxido de carbono equivalente por tonelada de celulose exportada e papel produzido desde o ano de 1979, como demonstrado na figura 13. Por este gráfico é possível notar o grande impacto do programa implementado pelo governo brasileiro, em cooperação com a Associação Brasileira de Celulose e Papel, que objetivou a substituição do uso de combustíveis derivados de petróleo pelo setor e teve duração entre os anos de 1979 e 1985. Neste período, o IE_{CO_2e} foi reduzido de 1,24 para 0,46 tCO_2e por tonelada de celulose exportada e papel produzido, decorrente principalmente das mudanças na matriz energética do setor. Em 1979 os derivados de petróleo representavam aproximadamente 60% dos combustíveis utilizados pelo setor, a participação destes foi reduzida para aproximadamente 20% em 1985.

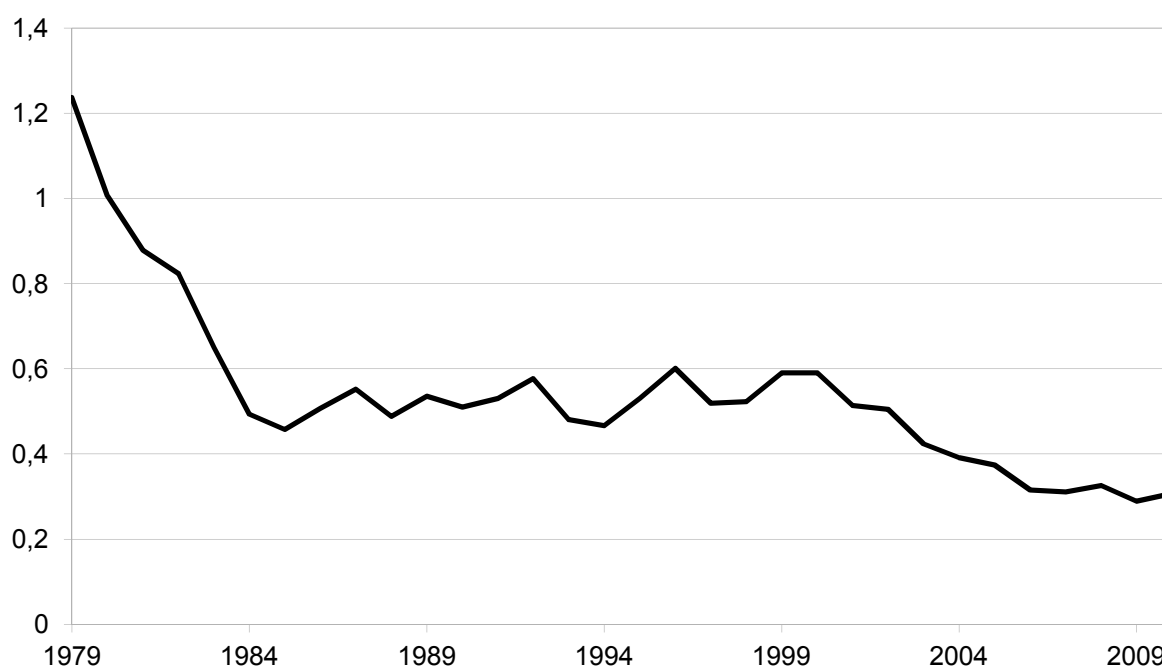


Figura 13. Evolução do índice de emissão de dióxido de carbono equivalente por tonelada de celulose exportada e papel produzido

Após o encerramento deste programa, o IE_{CO_2e} apresentou uma relativa estagnação até o ano 2000. A partir de então, o IE_{CO_2e} voltou a apresentar um padrão de redução significativo, atingindo valores de 0,29 e 0,31 tCO₂e por tonelada de celulose exportada e papel produzido nos anos de 2009 e 2010, respectivamente. Além de melhorias nos níveis de eficiência energética do setor, esta redução é justificada pelas alterações na matriz dos combustíveis utilizados pelo setor. Neste período, a participação de fontes renováveis no consumo de combustível do setor aumentou de 73% para 85%. Ainda, neste mesmo período a participação do gás natural cresceu de 5% para 8% enquanto a participação do óleo combustível foi reduzida de cerca de 19% para aproximadamente 6% (MME, 2011b).

IEA (2007c) apresentou valores do IE_{CO_2e} do setor de celulose e papel de 13 países, incluindo os países analisados nesta dissertação, no período entre 1990 e 2003. Embora neste estudo não estejam consideradas as emissões indiretas decorrentes do consumo de eletricidade, ocasionando valores menores para o IE_{CO_2e} e impedindo uma comparação mais profunda, o IE_{CO_2e} apontado para o Brasil reduziu aproximadamente 18% neste período, ante 17% de redução na análise elaborada para esta dissertação. Este estudo apontou o Brasil como tendo o sétimo menor IE_{CO_2e} , entre os 13 analisados, sendo Suécia, Noruega, Finlândia e Canadá, os países com as menores intensidades de emissão de CO₂e no setor de celulose e papel, respectivamente.

4.2 Índices de eficiência energética

A figura 14 mostra as evoluções, entre 1979 e 2010, dos índices de eficiência energética (IEE's) do setor de celulose e papel brasileiro referentes aos consumos de combustíveis, eletricidade e energia primária. O gráfico demonstra que o uso de eletricidade no setor dá-se, historicamente, de forma mais eficiente que o de combustíveis. No entanto, como argumentado por Farla, Blok e Schipper (1997), esta diferença pode estar superestimada pela possível utilização direta de combustíveis para alimentar equipamentos nas fábricas de papel e celulose no passado.

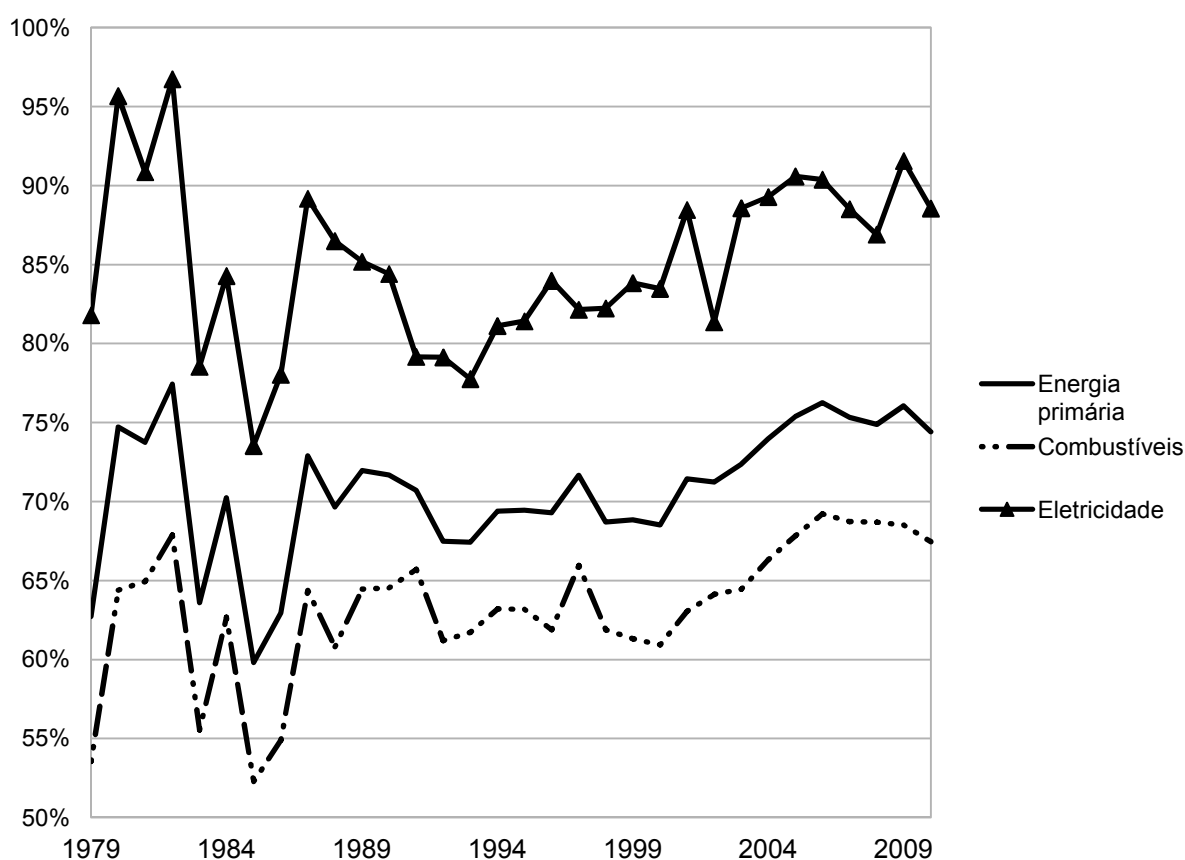


Figura 14. Evoluções dos índices de eficiência energética no setor de celulose e papel brasileiro entre 1979 e 2010.

Conforme ilustrado pela figura 14, os três índices de eficiência energética elaborados apresentaram bruscas variações no período compreendido entre 1979 e 1987. Entre 1987 e 1993 houve uma significativa redução na eficiência do consumo de eletricidade pelo setor, com uma depreciação de 89% para 78% do IEE no período. Entre 1993 e 2005 o IEE referente ao consumo de eletricidade do setor mostrou uma sólida recuperação, com exceção de reduções pontuais entre 1996 e 1997 e entre 2001 e 2002, retornando ao valor obtido em 1987. Ao fim do período

em análise, o nível de eficiência no consumo elétrico teve moderada redução entre 2005 e 2008, para 87%, subindo para 92% em 2009 e retornando a 89% em 2010. O nível de eficiência no consumo de combustíveis manteve-se relativamente estável entre 1987 (64%) e 2000 (61%), variando entre 61% e 66% no período. Na década de 2000, o IEE referente ao consumo de combustíveis elevou-se até 69%, no ano de 2006, sofrendo posteriormente uma leve depreciação até 2010, quando foi de 68%.

A figura 15 ilustra as evoluções das taxas de utilização da capacidade instalada para a produção de papel e celulose. Apesar de Grant (citado por FARLA; BLOK; SCHIPPER, 1997, p. 749) indicar que a variação na taxa de utilização da capacidade instalada no setor de papel e celulose é inversamente proporcional à variação no consumo específico de combustível, indicando que uma redução de 10% na primeira resulta em um acréscimo de 5% na segunda, tendo Farla, Blok e Schipper (1997) corroborado esta relação em seu estudo, isto não ocorreu com o setor brasileiro de celulose e papel⁹. Nos períodos em que ocorreram as variações mais significativas no fator de utilização da capacidade instalada da indústria de papel e celulose (FU), apenas no período 1993-1994 o aumento da utilização da capacidade instalada da indústria e o aumento no índice de eficiência energética do consumo de energia primária foram simultâneos. Neste período os fatores de utilização das capacidades produtivas de celulose e papel aumentaram aproximadamente 5% e 6%, respectivamente, enquanto o IEE da energia primária consumida aumentou 3%. De 1991 para 1992 o fator de utilização da produção de celulose reduziu 6%, enquanto a variação no IEE foi uma redução de aproximadamente 5% (o FU da produção de papel manteve-se relativamente estável). Já entre 2004 e 2005 o IEE do setor aumentou aproximadamente 2%, enquanto os fatores de utilização das produções de celulose e papel reduziram 7% e 1%, respectivamente.

⁹ As taxas de utilização da capacidade instalada na indústria brasileira de papel e celulose foram obtidas a partir de BRACELPA (2011b), sendo os dados disponíveis somente a partir de 1991. As taxas indicadas são uma média ponderada, baseada na participação de cada produto na produção total (de celulose ou papel), das razões entre a produção e a capacidade instalada divulgada para cada produto ano a ano.

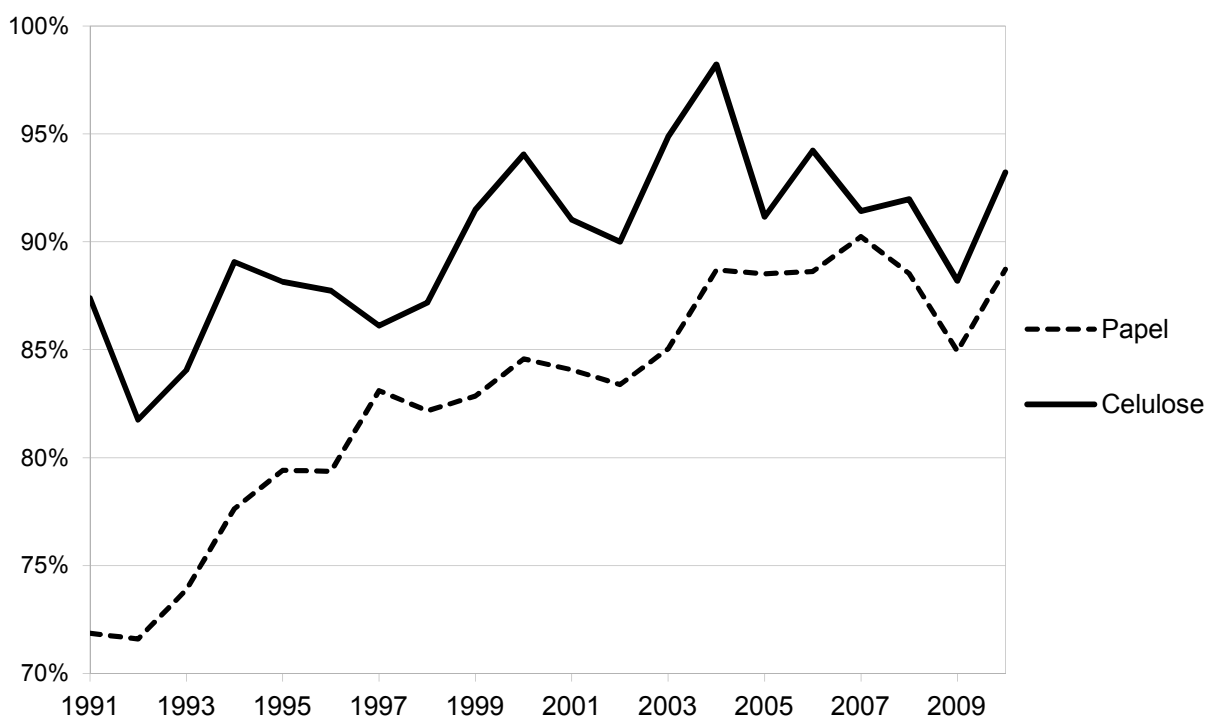


Figura 15. Evoluções das taxas de utilização da capacidade instalada para a produção de papel e celulose entre 1991 e 2010.

Fonte: Adaptado de BRACELPA (2011b).

A figura 16 apresenta as variações nos preços da eletricidade, gás natural, carvão vapor, óleo combustível e lenha ocorridas entre 1979 e 2010.

Os preços referentes aos aplicados no Brasil no ano de 1994 mostraram uma elevação atípica nos cinco insumos analisados, sendo assim, não serão levados em consideração na discussão dos dados. Como ilustrado pela figura 15, o preço da eletricidade, o mais elevado entre os insumos analisados, apresenta um importante aumento entre 1980 e 1981, de 810 para 1043 US\$(2009).GJ⁻¹, seguido por uma significativa queda até 533 US\$(2009).GJ⁻¹ em 1985. Entre 1985 e 1990 o preço da eletricidade industrial apresenta novo período de elevação, seguido por uma queda aguda de 1990 a 1991 e por uma moderada elevação, desconsiderando-se o pico de 1994, até atingir 836 US\$(2009).GJ⁻¹ em 1996. Entre 1996 e 2002 há uma significativa redução de preços seguida por um expressivo aumento até 2010, quando o preço médio da eletricidade para a indústria foi de 1594 US\$(2009).GJ⁻¹.

O preço do gás natural teve forte aumento entre 1979 e 1981, seguido por um período de sólida redução até 1991, período em que o uso deste combustível era insignificante no setor de papel e celulose. Entre 1992 e 2002 o preço deste combustível apresentou relativa estabilidade, seguida por uma forte alta até 2008,

passando de 161 para 428 US\$(2009).GJ⁻¹, reduzindo para 396 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2009 e aumentando novamente para 434 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2010.

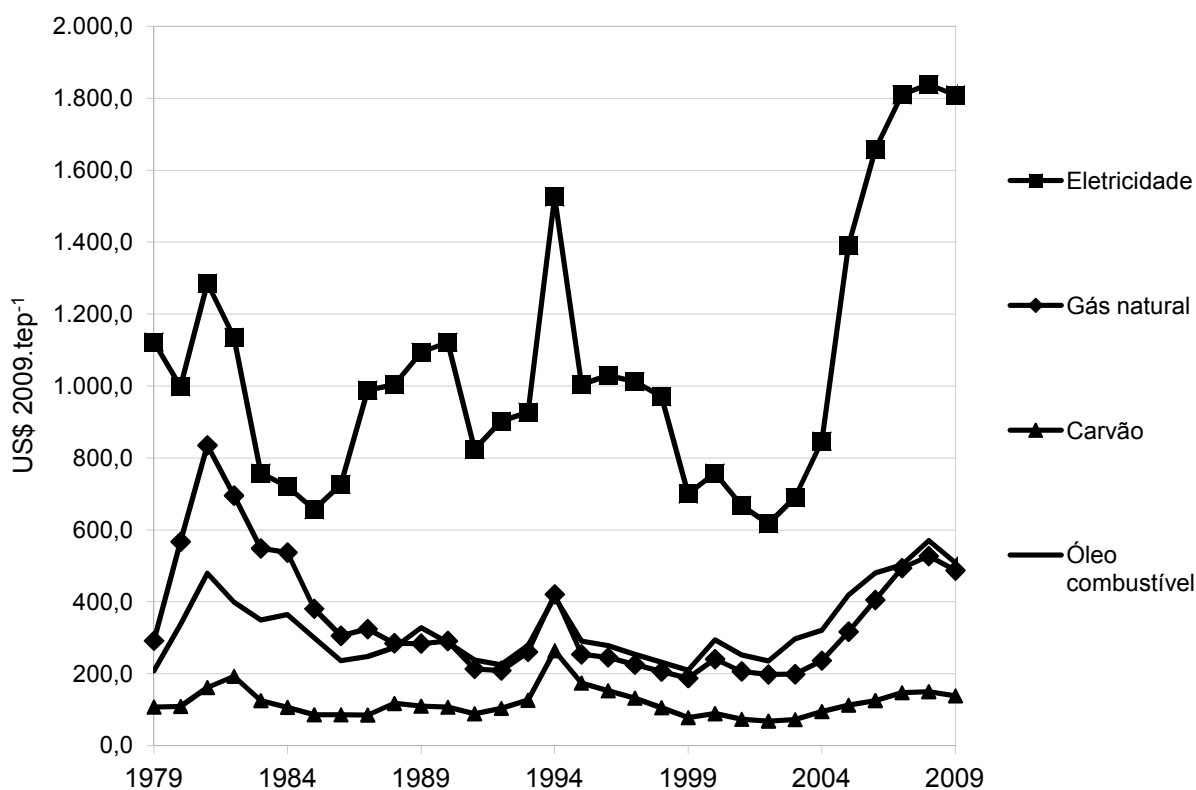


Figura 16. Evoluções dos preços nos insumos energéticos no Brasil entre 1979 e 2010.

Fonte: Adaptado de MME (2011b).

O óleo combustível sofreu forte aumento de preço entre 1979 e 1981, subindo de 169 para 389 US\$(2009).GJ⁻¹, apresentando variações abruptas até 2002. O preço nominal do óleo combustível sofreu expressivo aumento entre 2002 e 2008, de 191 para 463 US\$(2009).GJ⁻¹, caindo para 413 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2009 e subindo para 477 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2010.

O preço médio do carvão mineral, que era de 87 US\$(2009).GJ⁻¹ em 1979, subiu para 157 US\$(2009).GJ⁻¹ em 1982 e reduziu novamente para 70 US\$(2009).GJ⁻¹ em 1985. Entre 1986 e 1993 o preço deste combustível oscilou entre 70 e 103 US\$(2009).GJ⁻¹, elevando-se para 142 US\$(2009).GJ⁻¹ em 1995 para posteriormente reduzir até seu menor nível no período analisado, de 56 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2002. Apresentando a mesma tendência visualizada para os preços da eletricidade, gás natural e óleo combustível, o preço médio do carvão subiu para 122 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2008, porém reduziu fortemente para 62 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2010.

Entre 1984 e 1993 o custo médio da lenha oscilou entre 64 US\$(2009).GJ⁻¹, em 1984, e 103 US\$(2009).GJ⁻¹, em 1987 e 1989, retornando a 63 US\$(2009).GJ⁻¹ ao fim deste período. O preço deste insumo aumentou para 127 US\$(2009).GJ⁻¹ em 1996, caindo para 47 US\$(2009).GJ⁻¹ em 2002, voltando a apresentar uma tendência de aumento até 2010, quando foi de 63 US\$(2009).GJ⁻¹.

Embora algumas características do setor, como a elevada participação de celulose química na produção total, que resulta numa alta produção e consumo de licor negro, e a elevada taxa de autoprodução de eletricidade, de 51% em 2010 (MME, 2011a), diminuam a profundidade da avaliação dos impactos que as mudanças nos preços dos insumos energéticos tem sobre os níveis de eficiência energética, estes impactos podem ser ilustrados por dois diferentes períodos. Entre 1981 e 1985, o preço médio da eletricidade produzida reduziu aproximadamente 49%, o do óleo combustível cerca de 38% e o do carvão cerca de 47%. Neste período os índices de eficiência energética referentes aos consumos de eletricidade e combustíveis na indústria de celulose e papel reduziram aproximadamente 19% e 18%, respectivamente. Já entre 2002 e 2008, todos os insumos energéticos avaliados apresentaram aumentos de preço, de 142% para o óleo combustível, 166% para o gás natural, 198% para a eletricidade industrial, 118% para o carvão e 38% para a lenha, sendo que ambos os índices de eficiência energética na indústria, referentes ao consumo de eletricidade e combustíveis, evoluíram aproximadamente 7% neste período.

A acentuada instabilidade nos índices de eficiência energética entre 1979 e 1987, visualizada na figura 14, pode ser explicada por uma possível assincronia entre os dados de produção de papel e celulose e os dados de consumo energético. Por exemplo, entre 1979 e 1980 as produções de celulose e papel aumentaram 51% e 13%, respectivamente, enquanto que os consumos de combustíveis e eletricidades aumentaram 11% e 14%, respectivamente. Entre os anos de 1982 e 1983 esta assincronia entre os dados é compensada. Neste período a produção de celulose relatada reduz 22%, enquanto a quantidade de papel produzida e os consumos de eletricidade e combustíveis pelo setor aumentaram, respectivamente, 3%, 11% e 2% (FAO, 2011; MME, 2011b). APEC (2000) também encontraram variações agudas de curto prazo nos índices de intensidade energética dos setores de papel e celulose do Chile e das Filipinas, indicando que estas variações estão, provavelmente, relacionadas à inconsistências, ou assincronias, nos dados.

Visando reduzir os efeitos desta possível assincronia entre os dados de produção e consumo energético do setor, elaborou-se a evolução dos índices de eficiência energética referentes as médias de três anos (IEE_3), figura 16¹⁰.

Conforme demonstrado pela figura 17, o índice trienal de eficiência energética referente ao consumo de eletricidade indica duas fases de agudo crescimento, entre 1979 e 1982 e entre 1986 e 1989, ambas seguidas por agudas reduções, entre 1982 e 1985 e entre 1989 e 1993. Entre os anos de 1993 e 2007 há uma evolução gradativa deste índice, para valores próximos a 90%, mantendo-se relativamente estável até 2010. De acordo com o índice trienal de eficiência energética, o setor brasileiro de celulose e papel apresentou um potencial de aproximadamente 7,3 PJ de economia redução no consumo de eletricidade em 2010, referente a um índice de aproximadamente 89%.

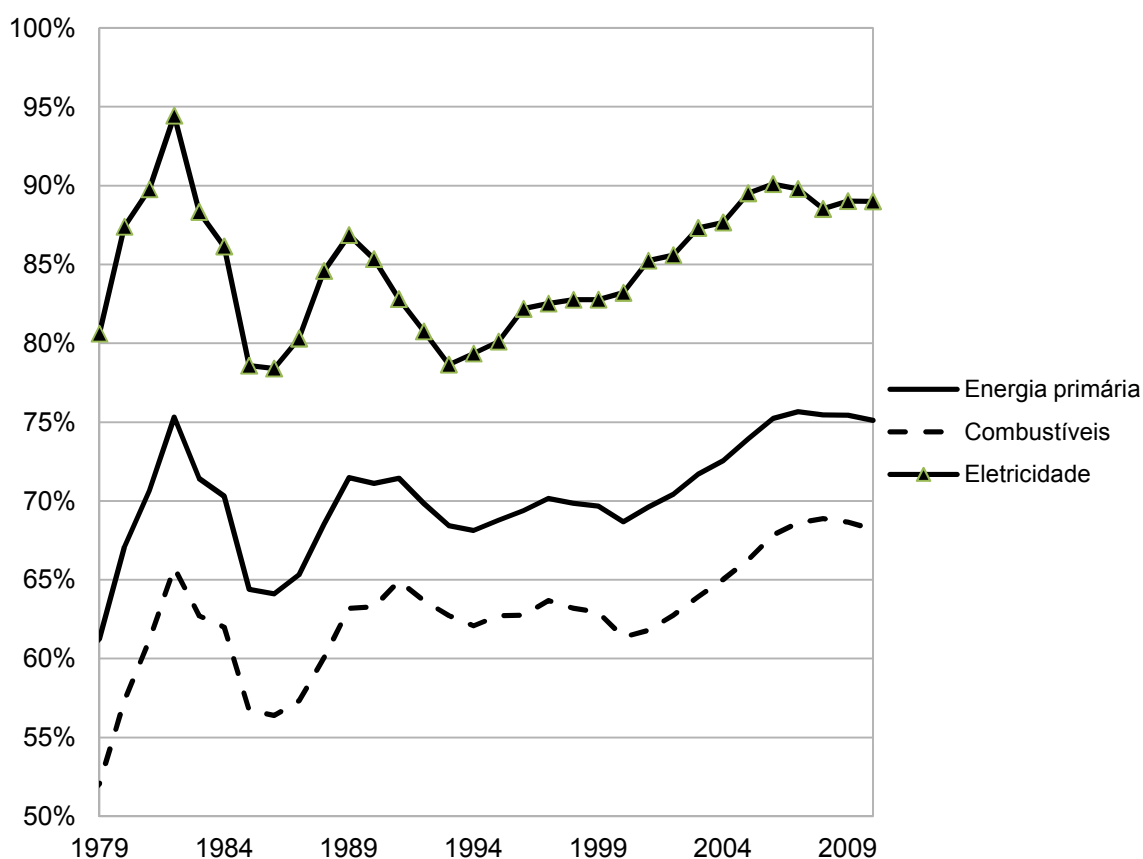


Figura 17. Evoluções dos índices trienais de eficiência energética IEE_3 no setor de celulose e papel brasileiro entre 1979 e 2010.

O IEE_3 referente ao consumo de combustíveis pelo setor apresentou o mesmo comportamento que o índice de eficiência do consumo de eletricidade para o

¹⁰ Por exemplo, na estimativa dos índices trienais de eficiência energética referentes ao ano de 2010, tanto os dados de produção de celulose e papel quanto os dados de consumo energético utilizados referem-se aos valores médios entre os anos de 2008, 2009 e 2010.

período compreendido entre 1979 e 1989. Entre 1989 e 2002 este índice manteve relativa estabilidade, variando entre 65% (1991) e 61% (2000), apresentando significativa evolução entre 2002 e 2007 e relativa estabilidade entre 2007 e 2010, em torno de 69%. O índice de 68% referente ao triênio 2008, 2009 e 2010 indica um potencial de 105,5 PJ de economia de combustíveis para o setor.

Em razão do consumo de combustíveis ter uma parcela significativamente superior ao consumo de eletricidade na matriz energética do setor, o índice trienal de eficiência energética referente ao consumo de energia primária apresenta um padrão de comportamento similar ao do índice referente ao consumo de combustíveis. O índice trienal de 2010 aponta a existência de um potencial de aproximadamente 123,7 PJ de economia na energia primária consumida pela indústria de papel e celulose no Brasil.

4.3 Análises de decomposição

As figuras 18, 19 e 20 apresentam as análises de decomposição das mudanças no consumo de eletricidade, combustíveis e energia primária no setor de papel e celulose no Brasil entre 1979 e 2009¹¹.

Como mostrado na figura 18, no período 1999-2004 houve o maior incremento no nível de eficiência energética do consumo de eletricidade, cerca de 7%, o que representou uma economia de 3,0 PJ. Nos períodos 1979-1984, 1984-1989, 1994-1999 e 2004-2009 também ocorreram aumentos nos níveis de eficiência energética, embora de menor magnitude, significando economias de 0,3 (2%), 0,5 (2%), 1,2 (4%) e 1,6 PJ (3%). No entanto, houve um aumento no consumo de eletricidade de aproximadamente 1,2 PJ (4%) relacionado ao decréscimo da eficiência no consumo elétrico do setor no período 1989-1994.

O efeito das mudanças estruturais no consumo elétrico foi significativamente menor. Os períodos de maior influência foram 1994-1999 e 2004-2009. No primeiro, as alterações no *mix* de produtos do setor foram responsáveis por um decréscimo de 1,1 PJ (3%), enquanto no segundo estas alterações foram responsáveis por um acréscimo de 1,3 PJ (3%) no consumo de eletricidade.

¹¹ O percentual da mudança na quantidade de energia consumida durante um dado período é resultado da soma dos valores percentuais representados pelas barras mostradas nas figuras 17, 18 e 19, referentes a este mesmo período.

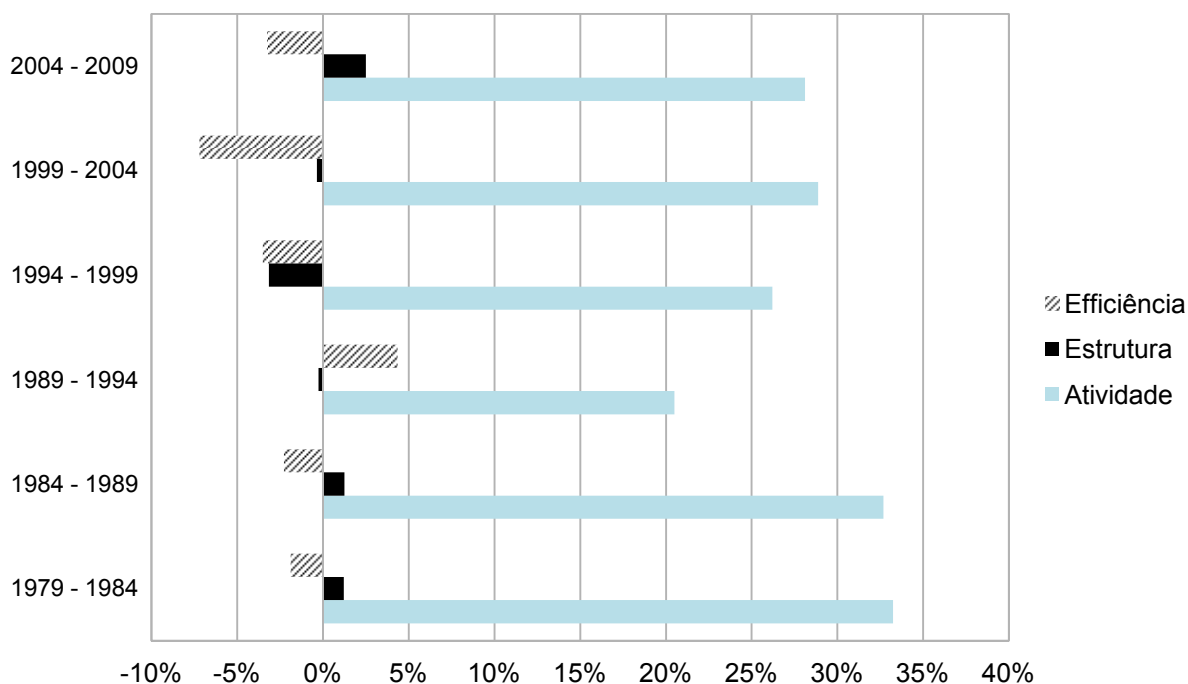


Figura 18. Influências do nível de atividade, estrutura e eficiência energética no desenvolvimento do consumo de eletricidade do setor brasileiro de celulose e papel.

Os ganhos de eficiência energética no consumo de combustíveis mostraram-se significativamente superiores, figura 19. Foram encontradas economias de aproximadamente 13,8 PJ (17%), 5,6 PJ (6%), 18,2 PJ (9%) e 8,4 PJ (3%) para os períodos 1979-1984, 1984-1989, 1999-2004 e 2004-2009, respectivamente. No entanto, a figura 19 mostra que nos períodos 1989-1994 e 1994-1999 a produção do setor deu-se de forma mais ineficiente. Esta ineficiência foi responsável por um aumento de 2,4 PJ (2%) e 6,0 PJ (4%), respectivamente, no consumo de combustíveis para a geração de calor.

As mudanças estruturais no setor também tiveram maior influência no aumento do consumo de combustíveis, sendo a mais significativa no período 1989-1994, de aproximadamente 13,5 PJ (11%). Neste período, as principais mudanças no *mix* de produtos foram o aumento da participação de celulose química, de 84,6% para 89,4%, com consequente redução das participações de celulose mecânica, de 10,1% para 7,9%, no total da celulose produzida pelo setor. O aumento da participação dos papéis para imprimir e escrever e para embalagens, de 27,7% para 32,4% e de 46,7% para 51,0%, respectivamente, com redução da participação dos papéis classificados na categoria “outros papéis”, de 13,1% para 4,0%, na produção total de papéis. Outra mudança significativa neste período foi a redução da taxa de utilização de fibras recicladas, de 32,3% em 1989 para 22,5% em 1994 (BRACELPA,

2009, 2011b; FAO, 2011). As mudanças no *mix* de produtos do setor também influenciaram aumentos, embora de menor magnitude, no consumo de combustíveis nos períodos 1979-1984, 1999-2004 e 2004-2009, que foram, respectivamente, de 3,0 PJ (4%), 4,3 PJ (2%) e 15,2 PJ (6%). No entanto, as alterações estruturais foram responsáveis pela economia de 7,6 PJ (5%) no consumo de combustíveis pelo setor no período 1994-1999, influenciado principalmente pelo aumento da taxa de utilização de fibras recicladas, que subiu de 22,5% para 35,8% (BRACELPA, 2009, 2011b; FAO, 2011).

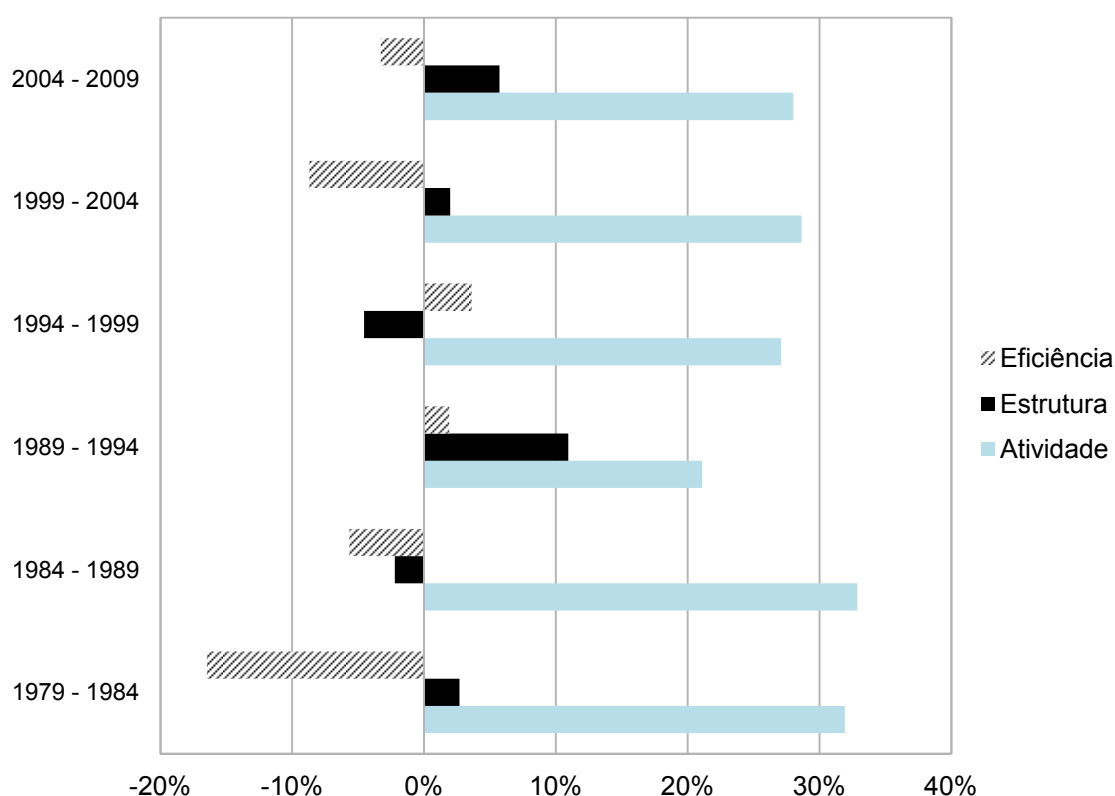


Figura 19. Influências do nível de atividade, estrutura e eficiência energética no desenvolvimento do consumo de combustíveis do setor brasileiro de celulose e papel.

Conforme mostrado nas figuras 18 e 19, o acréscimo no consumo de energia (tanto de combustíveis quanto de eletricidade) durante o período analisado ocorreu principalmente pelo incremento substancial da produção (nível de atividade) de celulose e papel no país.

Entre 1979 e 2009 os aumentos nos consumos de combustíveis, eletricidade e energia primária foram, respectivamente, de 297% (de 83,8 para 332,4 PJ), 302% (de 16,1 para 64,7 PJ) e 299% (de 124,0 para 494,1 PJ). Estes aumentos significativos foram causados principalmente pelo aumento da produção de celulose (503%) e papel (215%) no mesmo período (FAO, 2011). Como mostra a figura 20,

melhoras no nível de eficiência energética foram responsáveis por uma economia de 39% (referente ao consumo energético de 1979), o que corresponde a 48,9 PJ de energia primária não consumida. Durante o período analisado, o fator eficiência energética foi responsável pelo não consumo de cerca de 37,6 PJ (45%) em combustíveis. O mesmo fator foi responsável pela economia de aproximadamente 5,5 PJ (34%) de eletricidade.

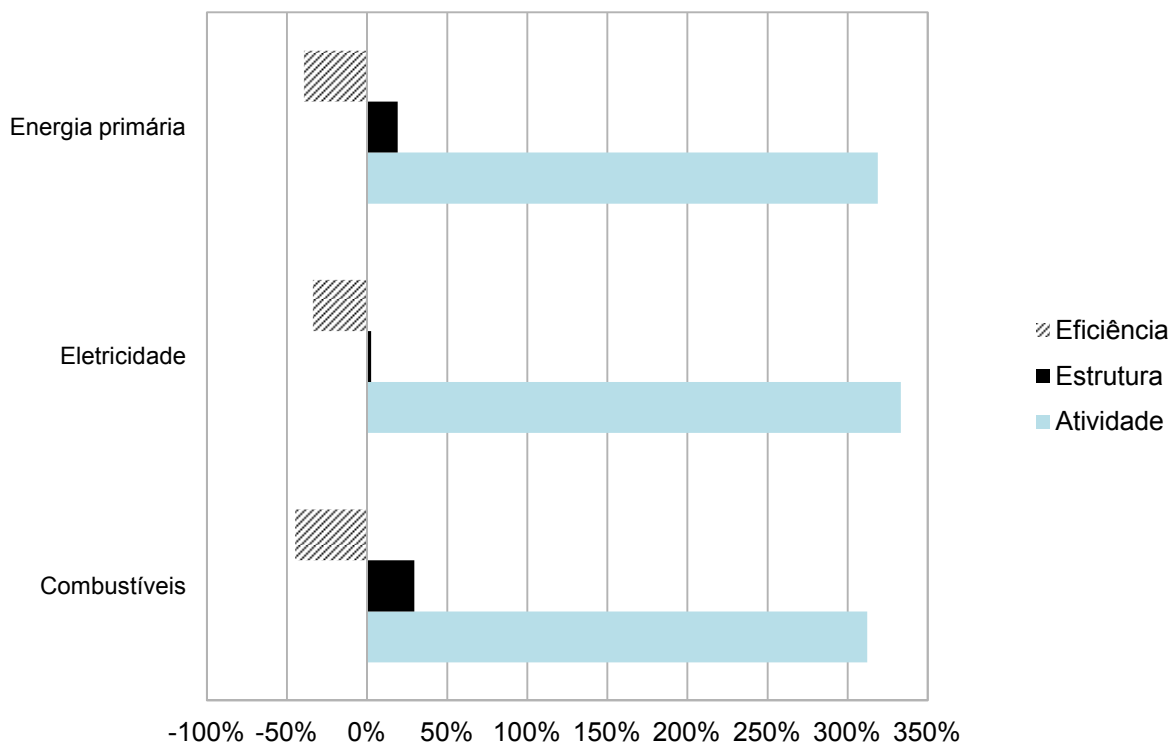


Figura 20. Influências do nível de atividade, estrutura e eficiência energética no desenvolvimento do consumo de energia primária do setor brasileiro de celulose e papel entre 1979 e 2009.

No mesmo período, as mudanças estruturais do setor foram responsáveis por um acréscimo de 24,8 PJ (30%) e 23,7 PJ (19%) no consumo de combustíveis e energia primária, respectivamente. No entanto, a influência destas mudanças no consumo de eletricidade foi significativamente menor, ocasionando uma redução de apenas 0,4 PJ (3%) no consumo elétrico entre 1979 e 2009.

Durante o período em análise, as principais mudanças estruturais na produção de celulose foram o aumento da participação da produção de celulose química, subindo de cerca de 85,7% da produção total de celulose em 1979 para aproximadamente 93,9% em 2009, e as consequentes reduções das participações da celulose mecânica, de 6,1% em 1979 para 3,1% em 2009, e dos outros tipos de celulose produzidos, de 8,1% em 1979 para 3,1% em 2009. Na produção de papéis, as principais alterações foram o aumento da participação dos papéis para

embalagens, de 47,5% para 56,4% da produção total de papéis entre 1979 e 2009, e a redução dos papéis inclusos na categoria “outros papéis”, de 16,4% para 5,5% no mesmo período. Outra importante mudança no setor foi o aumento da taxa de utilização de fibras recicladas, de 28,0% em 1979 para 41,6% em 2009 (FAO, 2011).

4.4 Comparação internacional

4.4.1 Índices de eficiência energética

A figura 21 expõe os desenvolvimentos dos índices trienais de eficiência energética (IEE₃) referentes aos níveis de consumo de energia primária pela indústria de celulose e papel dos cinco países envolvidos na comparação internacional (Brasil, Canadá, EUA, Finlândia e Suécia) entre os anos de 1979 e 2009. O gráfico mostra que no ano de 1979 as indústrias mais eficientes, entre os países envolvidos nesta comparação, eram a finlandesa (com um IEE₃ de 80%), a sueca (71%), a canadense (66%), a brasileira (61%) e, por último, a estadunidense (57%). Já em 2009, as indústrias sueca e finlandesa apresentaram os maiores índices (89%), seguidas pelas indústrias brasileira (75%), estadunidense (73%) e canadense (62%), sendo esta última a única a apresentar redução em seu IEE₃.

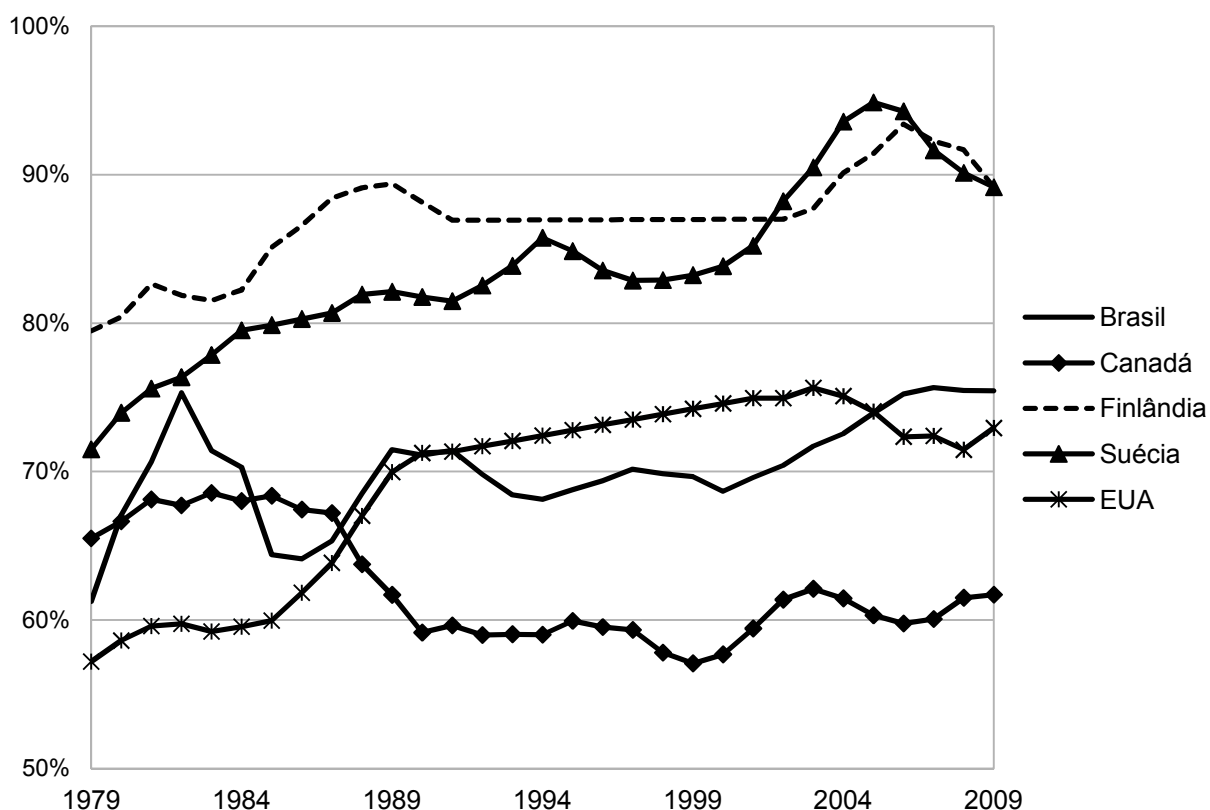


Figura 21. Comparação internacional índices trienais de eficiência energética no setor de celulose e papel entre 1979 e 2009.

Mesmo apresentando um elevado IEE₃ no início do período, a eficiência energética na produção de papel e celulose do setor finlandês teve um suave aumento entre 1979 e 1984, subindo para 82%, seguido por um aumento mais significativo entre 1984 e 1989, atingindo o patamar de 89%, e por uma leve depreciação entre 1989 e 1991, para 87%. Entre 2002 e 2006 o setor apresentou um novo período de significativo aumento em seu nível de eficiência energética, atingindo um IEE₃ de 93% em 2006, seguido por uma leve depreciação entre 2006 e 2009 quando o IEE₃ foi de 89%.

O setor sueco apresentou uma sólida evolução em seu nível de eficiência energética entre os anos de 1979 e 1994, período em que seu IEE₃ elevou-se de 71% para 86%. Entre 1994 e 1997 houve uma pequena redução no índice de eficiência energética do setor, tendo o IEE₃ reduzido para 83%, seguida por um período de significativa evolução até 2005, quando o IEE₃ atingiu 95%, e novamente por uma leve depreciação entre 2005 e 2009, atingindo 89%.

O IEE₃ da indústria estadunidense o apresentou evolução entre 1979 e 1990, quando chegou a 71%. Esta evolução deu-se de forma moderada até 1985, quando o IEE₃ atingiu 60%, e de forma mais expressiva entre 1985 e 1990. Entre 2002 e 2009 o nível de eficiência energética do setor sofreu uma leve redução, de 75% para 73%.

O índice trienal de eficiência energética da produção de celulose e papel no Canadá manteve-se relativamente estável, variando entre 66% e 69%, entre os anos de 1979 e 1987. Entre 1987 e 2000 o IEE₃ do setor depreciou-se, sendo de forma mais significativa no período 1987-1990, de 67% para 59%, e de forma moderada no período 1990-1999, de 59% para 57%. Entre 1999 e 2003, o IEE₃ da indústria canadense apresentou uma evolução, chegando ao patamar de 62%, mantendo-se relativamente estável até 2009, quando foi de 62%.

Considerando-se os valores dos índices trienais referentes aos anos de 1979 e 2009, a indústria estadunidense de papel e celulose apresentou uma evolução anual de aproximadamente 0,79% em seu nível de eficiência energética. Nas indústrias sueca, brasileira e finlandesa estas evoluções foram de aproximadamente 0,71%, 0,67% e 0,37% ao ano, respectivamente. Já a indústria canadense apresentou uma depreciação anual de aproximadamente 0,19% em seu nível de eficiência energética. Considerando que, de uma maneira geral, os níveis de eficiência energética industrial tem evoluído a taxas superiores a 1% ao ano

(ADEME, 2007; WORRELL et al., 2009), a evolução ocorrida nos setores de papel e celulose dos países estudados foi insatisfatória.

Os índices trienais de eficiência energética indicam um potencial de 1229,0 PJ de economia total de energia primária nos setores de papel e celulose dos países estudados em 2009. Em termos absolutos, o maior potencial de redução está nos Estados Unidos da América (742,7 PJ), seguido pelos potenciais canadense (290,5 PJ), brasileiro (115,7 PJ), finlandês (40,8 PJ), e sueco (39,3 PJ).

4.4.2 Análises de decomposição

As decomposições das variações nos consumos de energia primária dos setores de celulose e papel nos cinco países envolvidos na comparação internacional (Brasil, Canadá, EUA, Finlândia e Suécia) entre os anos de 1979 e 2009 estão expostas na figura 22. Durante este período, os consumos de energia primária aumentaram 299% (de 124,0 PJ para 494,1 PJ), 40% (de 216,3 PJ para 303,7 PJ), 19% (de 294,5 PJ para 350,0 PJ) e 5% (de 628,9 para 661,5 PJ) nos setores do Brasil, Finlândia, Suécia e Canadá, respectivamente. Somente nos EUA o consumo de energia primária diminuiu entre 1979 e 2009, em aproximadamente 2% (de 2542,4 PJ para 2489,3 PJ).

De acordo com o gráfico, o único país onde a produção do setor mostrou-se mais ineficiente no período em análise foi o Canadá. O aumento na ineficiência do setor canadense foi responsável pelo consumo adicional de 61,0 PJ, o equivalente a 10% da energia primária consumida em 1979. Nos setores dos EUA, Brasil, Suécia e Finlândia, as melhoras nos níveis de eficiência energética foram responsáveis pela economia de 623,8 PJ, 48,9 PJ, 49,1 PJ e 26,2 PJ, respectivamente, equivalentes à 25%, 39%, 17% e 12% dos seus respectivos consumos de energia primária em 1979.

As análises mostram que mudanças estruturais nos setores brasileiro e finlandês ocasionaram um aumento no consumo de energia de 23,7 PJ (19%) e 11,0 PJ (5%), respectivamente. Enquanto que nos EUA, Canadá e Suécia, estas mudanças geraram economias de 373,4 PJ (15%), 24,4 PJ (4%) e 21,0 PJ (7%), respectivamente.

As principais mudanças no *mix* de produtos do setor finlandês entre 1979 e 2009 foram a redução da participação da produção de papel imprensa, de 26,4% para 2,0%, e o aumento da participação dos papéis para imprimir e escrever, de 32,7% para 62,7%, na produção total de papéis no país (FAO, 2011).

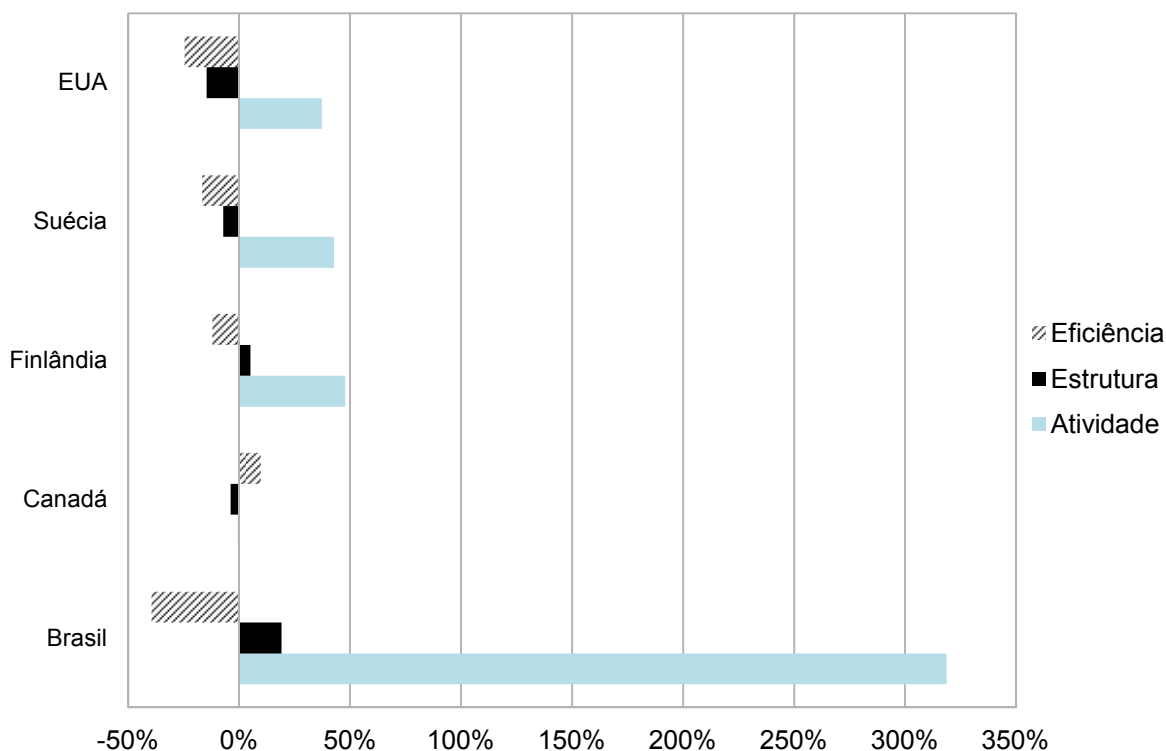


Figura 22. Comparação internacional das influências dos níveis de atividade, estrutura e eficiência energética nos consumos de energia primária entre 1979 e 2009.

Nos Estados Unidos da América, a principal mudança estrutural no período em análise foi o aumento da taxa de utilização de fibras recicladas, de 24,5% em 1979 para 63,5% em 2009 (FAO, 2011).

No setor sueco, a participação da produção dos papéis para imprimir e escrever na produção total de papel aumentou de 15,3% para 26,7%, enquanto os papéis inclusos na categoria “outros papéis” tiveram sua participação reduzida de 6,3% para 1,1%, da produção total de papéis no país. Mas as mudanças estruturais mais impactantes foram a redução da produção de celulose química, de 76,0% para 69,9%, com consequente aumento da participação da produção de celulose mecânica, de 21,8% para 28,5%, na produção total de celulose, e o aumento da taxa de utilização de fibras recicladas, de 7,8% para 17,3% no período analisado (FAO, 2011).

No Canadá, as principais mudanças estruturais da produção de celulose entre 1979 e 2009 foram a redução da participação da celulose química, de 60,0% para 52,1%, e o aumento da participação da celulose mecânica, de 37,9% para 46,9%. Outra mudança importante no setor foi o significativo aumento da taxa de utilização de fibras recicladas, de 6,2% em 1979 para 29,3% em 2009. As principais alterações na estrutura da produção de papéis foram a redução da quota do papel

imprensa, de 64,6% para 34,1% e o aumento da quota dos papéis para imprimir e escrever, de 11,3% para 34,5% (FAO, 2011).

A influência das mudanças do nível de atividade na variação do consumo de energia primária foi significativamente maior no Brasil, onde os aumentos de 503% na produção de celulose e de 215% na produção de papel foram responsáveis por um aumento de 395,2 PJ (319%) no consumo de energia primária do setor. O nível de atividade também foi responsável pelo aumento no consumo de energia primária dos setores nos EUA, de 945,3 PJ (37% da energia consumida em 1979), na Suécia, de 125,7 PJ (43%) e na Finlândia, de 103,3 PJ (48%). Nestes países, a produção de celulose aumentou, respectivamente, 7,3% (de 45,9 para 49,3 Mt), 28,5% (de 9,1 para 11,7 Mt) e 23,9% (de 7,1 para 8,7 Mt), enquanto a produção de papel aumentou 24,3% (de 57,4 para 71,4 Mt), 65,2% (de 6,5 para 10,8 Mt) e 84,8% (de 5,7 para 10,6 Mt). No Canadá, a redução de 11,7% (de 19,6 para 17,3 Mt) e 4,9% (de 13,5 para 12,8 Mt) na produção de celulose e papel, respectivamente, teve como consequência uma economia de cerca de 4,5 PJ entre 1979 e 2009, o equivalente a 1% do consumo de energia primária pelo setor canadense em 1979.

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas neste estudo foram:

- A intensidade das emissões de dióxido de carbono equivalente pela indústria brasileira de celulose e papel reduziu significativamente, de 1,24 para 0,31 tCO₂e por tonelada de celulose exportada e papel produzido, entre 1979 e 2010. Redução justificada pelo aumento da participação dos combustíveis renováveis e do gás natural na matriz energética do setor, com detrimento da participação do uso de óleo combustível;
- Em termos absolutos, as emissões de CO₂e referentes ao consumo energético do setor aumentaram de 4,4 milhões de toneladas em 1979 para 5,5 milhões de toneladas em 2010;
- Os índices de eficiência energética do setor brasileiro mostraram-se sensíveis às variações de preços dos insumos energéticos, embora algumas características específicas da indústria tenham limitado a profundidade desta análise;
- Não foram identificadas correlações entre as variações na taxa de utilização da capacidade instalada da indústria e as variações nos índices de eficiência energética;
- Baseado nos índices trienais de eficiência energética, identificou-se um potencial 7,3 PJ e 105,5 PJ de economia anual nos consumos de eletricidade e combustíveis, respectivamente;
- Os consumos de energia elétrica e de combustíveis pela indústria brasileira aumentaram, respectivamente, 302% e 297% entre 1979 e 2010, influenciados principalmente pelo grande aumento na produção do setor, de 503% na produção de celulose e 215% na produção de papel no mesmo período;
- Melhorias na eficiência energética foram responsáveis por uma economia de aproximadamente 37,6 PJ em combustíveis e 5,5 PJ em eletricidade no setor brasileiro, entre 1979 e 2009;

- As mudanças estruturais ocorridas no setor neste mesmo período foram responsáveis por um aumento de 24,8 PJ no consumo de combustíveis, porém, sua influência no consumo de eletricidade não foi significativa, ocasionando um aumento de apenas 0,4 PJ;
- Entre os setores de papel e celulose dos países envolvidos na comparação internacional, as indústrias sueca e finlandesa mostraram-se as mais eficientes em 2009, com um índice trienal de eficiência no consumo de energia primária de aproximadamente 89%. A indústria brasileira mostrou-se a terceira mais eficiente, com um IEE₃ de 75%, seguida pela estadunidense, com 73% e pela canadense, com 62%;
- Os potenciais de economia no consumo de energia primária destes setores equivalem a uma redução de 1229,0 PJ, sendo os setores estadunidense, com 742,7 PJ, e canadense com 290,5 PJ, os com maior potencial de redução;
- As melhorias nos níveis de eficiência energética foram responsáveis por uma economia de 623,8 PJ nos EUA, 49,1 PJ na Suécia e 26,2 PJ na Finlândia. A indústria canadense foi a única entre as analisadas que apresentou redução nos níveis de eficiência energética entre 1979 e 2009, esta maior ineficiência resultou num aumento de 61,0 PJ no consumo de energia primária do setor;
- As taxas de incremento dos níveis de eficiência energética dos países estudados foram de 0,79% ao ano nos EUA, 0,71% a.a. na Suécia, 0,67% a.a. no Brasil e 0,37% a.a. na Finlândia. Já a indústria canadense apresentou uma depreciação de 0,19% ao ano;
- Em razão do grande potencial de conservação de energia no setor brasileiro de celulose e papel, principalmente referente ao consumo de combustíveis, sugere-se o desenvolvimento de uma política de eficiência energética industrial de longo prazo com foco nos maiores potenciais de conservação em indústrias energo-intensivas. A custo-efetividade de programas de adesão voluntária implementados no setor industrial de países como Suécia e Finlândia indica esta modalidade como uma medida atraente para a realidade brasileira.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, Y. V. **Estudo comparativo da eficiência energética da indústria da cerâmica de revestimento via úmida no Brasil e na Espanha**. 2001. 135 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ADEME. **Evaluation and Monitoring of Energy Efficiency in the New EU Member Countries and the EU-25**. Paris, 2007.
- ANG, B. W. **Decomposition methodology in industrial demand analysis**. Energy, v. 20, n. 1, p. 1081-1095, 1995.
- ANG, B.; ZHANG, F. **A survey of index decomposition analysis in energy and environmental studies**. Energy, v. 25, p. 1149-1176, 2000.
- APEC. **Energy Efficiency Indicators: A study of energy efficiency indicators for industry in APEC economies**. Tokyo, 2000.
- BAJAY, S. V.; GORLA, F. D.; BORDONI, O. F. J. G. **Os segmentos industriais energo-intensivos de maiores potenciais técnicos de conservação de energia no Brasil**. Revista Brasileira de Energia, v. 15, n. 1, p. 89-107, 2009.
- BERNSTEIN, L., ROY, J., DELHOTAL, K. C., HARNISCH, J., MATSUHASHI, R., PRICE, L., TANAKA, K., WORRELL, E., YAMBA, F., FENGGI, Z. 2007: Industry. In **Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Reino Unido e Nova Iorque, 2007.
- BLS - U.S. BUREAU OF LABOR STATISTICS. Disponível em: <<ftp://ftp.bls.gov/pub/special.requests/cpi/cpi.txt>>. Acesso em: 18 dez. 2011.
- BRACELPA. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/index.php>>. Acesso em: 21 dez. 2011.
- BRACELPA. **Relatório Estatístico 2008/2009**. 2009. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2008.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2011.
- BRACELPA. **Relatório Estatístico 2009/2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2009.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2011.
- BRACELPA. **Relatório Estatístico 2010/2011**. 2011. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2010.pdf>>. Acesso em: 22 dez. 2011.
- CARDOSO, M.; OLIVEIRA, K. D.; COSTA, G. A. A.; PASSOS, M. L. **Chemical process simulation for minimizing energy consumption in pulp mills**. Applied Energy, v. 86, n. 1, p. 45-51, jan 2009.

CISMC - COMITÊ INTERMINISTERIAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima - Versão para consulta pública**. Brasília, 2008. Disponível em:

<http://www.mma.gov.br/estruturas/169/_arquivos/169_29092008073244.pdf>.

Acesso em: 04 jan. 2012.

CNI; ELETROBRÁS. **Eficiência energética na indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional**. Brasília, 2009. Disponível em:

<<http://www.cni.org.br/portal/data/files/FF808081234E24EA0123627A07156F8E/Eficiencia.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2012.

DEMIRBAS, A. **Methylation of wood fatty and resin acids for production of biodiesel**. Fuel, v. 90, n. 6, p. 2273-2279, 2011.

EUROPEAN COMMISSION. **Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products and amending Council Directive 92/42/EEC and Directives 96/57/EC and 2000/55/EC**. Official Journal of the European Union. 2005. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0029:0029:EN:PDF>>.

Acesso em: 05 dez. 2011.

EUROPEAN COMMISSION. **Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency**. Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies. 2009. Disponível em: <http://eippcb.jrc.es/reference/BREF/ENE_Adopted_02-2009.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2011.

FAO. **FAOStat Forestry**. 2011. Base de Dados em Produção, importação e exportação de produtos florestais. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/626/default.aspx#ancor>>. Acesso em: 05 set. 2011.

FARLA, J. **Energy consumption of pulp and paper sectors**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <guilherme.fracaro@yahoo.com> em 19 out. 2011.

FARLA, J.; BLOK, K. **The quality of energy intensity indicators for international comparison in the iron and steel industry**. Energy Policy, v. 29, n. 7, p. 523–543, 2001.

FARLA, J.; BLOK, K.; SCHIPPER, L. **Energy efficiency developments in the pulp and paper industry: A cross-country comparison using physical production data**. Energy Policy, v. 25, n. 7, p. 745–758, 1997.

FRANCIS, D. W.; TOWERS, M. T.; BROWNE, T. C. **Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry – An Energy Benchmarking Perspective**. Energy. National Resources Canada. 2002. Disponível em: <<http://oee.nrcan.gc.ca/publications/industrial/pulp-paper-industry/261>>. Acesso em: 21 set. 2011.

HARMELINK, M.; HARMSSEN, R.; NILSSON, L. **From theory based policy evaluation to SMART Policy Design: Lessons learned from 20 ex-post evaluations of energy efficiency instruments**. European Council for an Energy Efficiency Economy (ECEEE)—Summer study. **Anais...** La Colle sur Loup, França. 2007

HENRIKSSON, E.; SÖDERHOLM, P. **The cost-effectiveness of voluntary energy efficiency programs**. Energy for Sustainable Development, v. 13, n. 4, p. 235–243, 2009.

HOCKING, M. B. Production of pulp and paper. **Handbook of Chemical Technology and Pollution Control**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2005. p. 453-504.

IEA. **CO₂ Emissions from Fuel Combustion**. IEA Statistics. Paris, 2010.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 1995.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 1996.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 1998.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 2000.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 2002.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 2005.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 2007a.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 2009a.

_____. **Electricity Information**. IEA Statistics. Paris, 2011a.

_____. **Energy Balances of non-OECD countries**. IEA Statistics. Paris, 2011b.

_____. **Energy Policies of IEA Countries - Canada 2009 Review**. Paris, 2009b.
Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/canada2009.pdf>>.
Acesso em: 21 dez. 2011.

_____. **Energy Policies of IEA Countries - Finland 2007 Review**. Paris, 2007b.
Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/finland2007.pdf>>.
Acesso em: 22 dez. 2011.

_____. **Energy Policies of IEA Countries - Sweden 2008 Review**. Paris, 2008a.
Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/sweden2008.pdf>>.
Acesso em: 22 dez. 2011.

_____. **Energy Policies of IEA Countries - The United States 2007 Review**. Paris, 2007c.
Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/us2007.pdf>>.
Acesso em: 21 dez. 2011.

_____. **Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios & Strategies to 2050**. Paris, 2008b.
Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/etp2008.pdf>>.
Acesso em: 7 out. 2011.

_____. **Implementing Energy Efficiency Policies - Are IEA member countries on track?**. Paris, 2009c.
Disponível em: <<http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/implementingee2009.pdf>>.
Acesso em: 20 dez. 2011.

_____. **Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions**. Paris, 2007d.
Disponível em: <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2007/tracking_emissions.pdf>.
Acesso em: 16 set. 2011.

_____. **Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency - Key Insights from IEA Indicator Analysis**. Paris, 2008c. Disponível em: <http://www.iea.org/papers/2008/indicators_2008.pdf>. Acesso em: 23 set. 2011.

IPCC. **Climate change: the IPCC response strategies**. 1990. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_first_assessmet_1990_wg3.shtml>. Acesso em: 16 nov. 2011.

IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. **Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds.). IGES, Hayama, Japan, 2006.**

JUDD, S.; JEFFERSON, B. (EDS.). The pulp and paper industry. **Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use**. Amsterdam: Elsevier Science, 2003. p. 102-131.

KARBUZ, S. **Achieving accurate international comparisons of manufacturing energy use data**. Energy policy, v. 26, n. 12, p. 973–979, 1998.

KAYGUSUZ, K. **Energy for sustainable development: A case of developing countries**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 2, p. 1116–1126, 2012.

KHAN, J.; HARMELINK, M.; HARMSSEN, R.; IRREK, W.; LABANCA, N. **Guidelines for the monitoring, evaluation and design of energy efficiency policies - How policy theory can guide monitoring & evaluation efforts and support the design of SMART policies**. Lund University. 2006.

MARTÍNEZ, C. I. P. **Energy use and energy efficiency development in the German and Colombian textile industries**. Energy for Sustainable Development, v. 14, n. 2, p. 94-103, jun 2010.

MDIC - MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. **Balança Comercial Brasileira: Dados Consolidados**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.mdic.gov.br/arquivos/dwnl_1275505327.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2011.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2006 - Sumário Executivo**. Brasília, 2006. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Sum_Executivo_BEN_2006.pdf>. Acesso em: 18 set. 2011.

_____. **Balanco Energético Nacional 2011**. Brasília, 2011a. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2011.

_____. **Balanco Energético Nacional - Séries Completas**. Brasília, 2011b. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>>. Acesso em: 22 dez. 2011.

_____. **Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e diretrizes básicas**. Brasília, 2011c. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2011/Plano_Nacional_de_Eficiency_Energética_-_PNEf_-_final.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2012.

_____. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/publicacoes/pne_2030/11_Eficiencia_Energetica.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2012.

MUNDACA, L.; NEIJ, L. **A multi-criteria evaluation framework for tradable white certificate schemes**. *Energy Policy*, v. 37, n. 11, p. 4557–4573, 2009.

NAGESHA, N. **Role of energy efficiency in sustainable development of small-scale industry clusters: an empirical study**. *Energy for Sustainable Development*, v. 12, n. 3, p. 34-39, set 2008.

PATTERSON, M. **What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues**. *Energy Policy*, v. 24, n. 5, p. 377-390, maio 1996.

PHYLIPSEN, D. **Energy Efficiency Comparisons Among Countries**. In: MEYERS, R. A. (Ed.). **Encyclopedia of Physical Science and Technology**. 3. ed. New York: Academy Press, 2003. p. 433-440.

PHYLIPSEN, G.; BLOK, K; WORRELL, E. **International comparisons of energy efficiency-Methodologies for the manufacturing industry**. *Energy Policy*, v. 25, n. 97, p. 715-725, 1997.

RAMÍREZ, C.; PATEL, M.; BLOK, K. **From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry**. *Energy*, v. 31, n. 12, p. 1984–2004, 2006.

RAMÍREZ, C.; PATEL, M.; BLOK, K. **How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption in the meat industry of four European countries**. *Energy*, v. 31, n. 12, p. 2047–2063, 2006.

REDDY, B. S.; RAY, B. K. **Energy for Sustainable Development Decomposition of energy consumption and energy intensity in Indian manufacturing industries**. *Energy for Sustainable Development*, v. 14, n. 1, p. 35-47, 2010.

ROHDIN, P.; THOLLANDER, P.; SOLDING, P. **Barriers to and drivers for energy efficiency in the Swedish foundry industry**. *Energy Policy*, v. 35, n. 1, p. 672–677, 2007.

SIITONEN, S. **Implications of energy efficiency improvement for CO₂ emissions in energy-intensive industry**. 2010. 51 f. Tese (Doctorate in Science in Technology) - Department of Energy Technology, Aalto University, Helsinque.

SOUZA, H. M. D.; LEONELLI, P. A.; PIRES, C. A. P.; JÚNIOR, V. B. S.; PEREIRA, R. W. L. **Reflexões sobre os principais programas em eficiência energética existentes no Brasil**. *Revista Brasileira de Energia*, v. 15, n. 1, p. 7-26, 2009.

SZABÓ, L.; SORIA, A.; FORSSTRÖM, J.; KERÄNEN, J. T.; HYTÖNEN, E. **A world model of the pulp and paper industry: Demand, energy consumption and emission scenarios to 2030**. *Environmental Science & Policy*, v. 12, n. 3, p. 257-269, maio 2009.

TANAKA, K. **Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy**. *Energy Policy*, v. 36, n. 8, p. 2887-2902, ago 2008.

TANAKA, K. **Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector**. *Energy Policy*, v. 39, n. 10, p. 6532-6550, 2011.

THOLLANDER, P.; OTTOSSON, M. **An energy efficient Swedish pulp and paper industry – exploring barriers to and driving forces for cost-effective energy efficiency investments**. *Energy Efficiency*, v. 1, n. 1, p. 21-34, 10 jan 2008.

VAKKILAINEN, E.; KIVISTÖ, A. **Energy consumption trends and energy consumption in modern mills in forest industry. Production.** Lappeenranta, 2010.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: contribuição à matriz energética do Brasil.** 2000. 205 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

VREULS, H. **Evaluating energy efficiency policy measures & DSM programmes - Volume I: evaluation guidebook. Implementing Agreement on Demand-Side Management Technologies and Programmes.** Sittard, 2005. Disponível em: <<http://dsm.iea.org>>. Acesso em: 23 dez. 2011.

WORRELL, E.; BERNSTEIN, L.; ROY, J.; PRICE, L.; HARNISCH, J. **Industrial energy efficiency and climate change mitigation.** Energy efficiency, p. 109-123, 2009.

WORRELL, E.; PRICE, L.; MARTIN, N.; FARLA, J.; SCHAEFFER, R. **Energy intensity in the iron and steel industry: a comparison of physical and economic indicators.** Energy Policy, v. 25, n. 97, p. 727-744, 1997.

WORRELL, E.; PRICE, L.; NEELIS, M.; GALITSKY, C.; NAN, Z. **World best practice energy intensity values for selected industrial sectors.** Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 2007.

WU, L.; CHEN, B.; BOR, Y.; WU, Y. **Structure model of energy efficiency indicators and applications.** Energy policy, v. 35, p. 3768-3777, 2007.

YUMRUTAŞ, R.; ALMA, M. H.; ÖZCAN, H.; KAŞKA, Ö. **Investigation of purified sulfate turpentine on engine performance and exhaust emission.** Fuel, v. 87, n. 2, p. 252-259, fev 2008.

7 ANEXOS

Tabela 5. Produção brasileira de papel entre 1979 e 2010, em 10³ toneladas

	Imprensa	Imprimir & escrever	Fins sanitários	Embalagens	Outros
1979	109	764	201	1415	490
1980	105	870	232	1616	538
1981	105	876	228	1479	414
1982	107	913	245	1624	440
1983	106	952	263	1733	372
1984	109	1075	271	1911	402
1985	208	1146	288	1807	573
1986	218	1306	294	2066	641
1987	232	1310	334	2174	662
1988	247	1319	365	2183	571
1989	230	1329	373	2246	628
1990	246	1321	376	2267	634
1991	253	1348	406	2680	201
1992	226	1394	414	2683	196
1993	268	1670	452	2779	183
1994	263	1858	458	2923	228
1995	282	1791	496	3057	230
1996	277	1807	517	3070	214
1997	265	1996	565	3386	263
1998	273	1966	576	3401	308
1999	242	2070	571	3209	163
2000	266	2100	597	3347	163
2001	230	2150	619	3981	374
2002	248	2164	671	4132	446
2003	163	2272	681	4263	432
2004	133	2369	732	4552	435
2005	133	2474	778	4803	494
2006	135	2552	787	4780	401
2007	144	2575	812	4968	408
2008	141	2534	850	5056	396
2009	127	2575	868	5285	516
2010	124	2704	915	5500	549

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 6. Produção brasileira de celulose entre 1979 e 2010, em 10³ toneladas

	Química	Semi-química	Mecânica	Dissolvida	Outras fibras	Fibras recicladas
1979	1879	100	141	38	150	834
1980	2901	99	270	80	134	1052
1981	2824	104	240	70	122	993
1982	3181	96	250	63	129	986
1983	2319	94	275	40	168	1024
1984	2816	104	237	60	164	1081
1985	2273	114	324	60	142	1158
1986	2507	125	329	62	131	1384
1987	3359	124	332	75	111	1488
1988	3399	109	390	83	156	1449
1989	3763	43	455	78	162	1553
1990	3755	45	418	89	146	1287
1991	4180	39	425	70	125	1287
1992	4699	51	421	70	127	1287
1993	4870	37	475	59	119	1287
1994	5240	37	448	70	106	1287
1995	5331	37	466	69	75	1287
1996	5627	31	492	142	75	1287
1997	5795	27	443	156	77	1287
1998	6147	27	466	134	80	1287
1999	6521	44	444	104	102	2416
2000	6689	46	502	101	104	2612
2001	6814	27	460	135	89	2612
2002	6814	27	460	135	89	2612
2003	8506	51	449	143	98	2873
2004	8917	47	473	143	92	2873
2005	9711	43	500	109	98	3438
2006	10650	26	497	102	70	3497
2007	11418	29	521	115	30	3642
2008	12100	32	508	210	57	3828
2009	13036	30	428	367	58	3898
2010	13594	37	433	367	57	3898

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 7. Produção canadense de papel entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Imprensa	Imprimir & escrever	Fins sanitários	Embalagens	Outros
1979	8709	1525	315	2708	229
1980	8625	1511	324	2680	250
1981	8946	1431	344	2848	266
1982	8117	1480	375	2436	0
1983	8486	1726	385	2756	0
1984	9014	1943	400	2865	0
1985	8991	2141	406	2910	0
1986	9289	2399	431	3140	0
1987	9660	2660	449	3275	0
1988	9970	2913	455	3301	0
1989	9678	3190	462	3225	0
1990	9069	3599	467	3331	0
1991	8977	3564	515	3503	0
1992	8931	3567	530	3557	0
1993	9165	4194	542	3656	0
1994	9321	4444	584	3999	0
1995	9226	4882	617	3988	0
1996	9015	4689	605	4105	150
1997	9205	4966	617	4181	150
1998	8581	5155	624	4365	150
1999	9204	5680	664	4582	150
2000	9221	6351	652	4585	150
2001	8373	6137	685	4489	150
2002	8455	6331	713	4173	401
2003	8487	6456	717	3957	347
2004	8180	7020	747	4089	426
2005	7770	6706	741	3852	429
2006	7122	6114	755	3783	415
2007	6640	5947	754	3685	341
2008	5993	5266	748	3414	368
2009	4378	4429	721	2934	361

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 8. Produção canadense de celulose entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Química	Semi-química	Mecânica	Dissolvida	Outras fibras	Fibras recicladas
1979	11411	323	7414	368	40	832
1980	11789	333	7510	313	40	854
1981	11351	322	7631	274	40	870
1982	9703	252	6832	220	40	832
1983	10906	305	7793	217	40	902
1984	11099	331	8800	221	40	997
1985	11199	259	8542	222	40	1033
1986	11899	322	9069	222	40	1077
1987	12606	353	9603	242	40	1096
1988	12628	335	10069	266	40	1234
1989	12477	580	10504	273	40	1654
1990	11612	650	10537	221	40	1310
1991	11962	630	10630	219	40	1478
1992	11866	511	10212	241	40	1478
1993	11848	434	10589	0	40	2116
1994	13279	373	11000	27	40	2511
1995	13496	356	11550	27	40	2694
1996	13003	381	10979	241	40	2694
1997	13075	404	11355	241	40	2694
1998	12640	482	10481	241	40	1478
1999	13368	551	11222	241	40	1478
2000	13553	562	12340	241	40	1478
2001	12979	505	11385	241	40	1478
2002	13381	520	11621	241	40	1478
2003	13436	559	11968	241	40	2700
2004	13451	592	12139	241	40	2700
2005	12762	538	12010	130	40	2700
2006	11601	477	11363	130	40	2851
2007	11300	493	10588	130	40	2851
2008	10224	488	9653	130	40	3200
2009	8532	459	8106	130	40	3752

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 9. Produção estadunidense de celulose entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Imprensa	Imprimir & escrever	Fins sanitários	Embalagens	Outros
1979	3685	13592	4101	31699	4333
1980	4238	13829	3969	31308	3495
1981	4753	13958	4098	31573	3285
1982	4574	13898	4026	29498	2903
1983	4687	15405	4342	32018	2352
1984	5029	16348	4464	33902	2623
1985	4923	16468	4482	32519	2567
1986	5108	17628	4624	34331	2753
1987	5300	18596	4808	36047	2781
1988	5427	19588	4968	36056	3548
1989	5523	19319	5113	36427	3132
1990	6001	20092	5264	36870	3738
1991	6206	19872	5143	37929	3574
1992	6424	20281	5247	39265	3943
1993	6419	21511	5450	39874	3996
1994	6334	23323	5530	41472	4286
1995	6351	23042	5632	46622	3879
1996	6303	22553	5681	47440	2069
1997	6544	24331	5831	49674	2131
1998	6577	22651	5974	49146	2103
1999	6513	23221	6212	48347	4377
2000	6668	22992	6270	46286	4037
2001	5771	20915	6371	44181	4011
2002	5248	20918	6465	45320	3928
2003	5148	20283	6436	44982	3863
2004	5097	21410	6451	46938	2188
2005	4892	21051	6721	46745	4288
2006	4740	21089	6806	47394	4288
2007	4464	21488	6666	47221	4077
2008	4194	19836	6562	45479	4108
2009	2992	16253	6601	41634	3875

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 10. Produção estadunidense de celulose entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Química	Semi-química	Mecânica	Dissolvida	Outras fibras	Fibras recicladas
1979	35702	4226	4030	1360	604	14080
1980	36989	3661	4169	1368	750	16303
1981	37563	3572	4826	1239	670	16057
1982	35814	3356	4625	991	500	15422
1983	38425	3494	4597	1144	303	16874
1984	40586	3720	4998	1094	303	18424
1985	39539	3682	4772	1068	303	18188
1986	42007	3749	5030	1141	270	20029
1987	43832	3852	5184	1190	310	21316
1988	44946	3953	5391	1240	300	23177
1989	45505	3958	5469	1293	353	24953
1990	46444	3828	5772	1173	353	26395
1991	48129	3714	5810	1243	240	28199
1992	48407	3721	5898	1255	187	30479
1993	47830	3640	5586	1277	170	32454
1994	54512	4099	5884	1293	237	31000
1995	50467	3609	5593	1197	240	29454
1996	49351	3497	5369	1095	251	31039
1997	50292	3668	5401	1004	239	32862
1998	49622	3607	5291	1004	247	41103
1999	48612	3643	5109	998	245	41103
2000	48198	3588	5146	898	245	43370
2001	45080	3199	4501	900	245	41212
2002	45199	3224	4245	900	245	41597
2003	45183	2995	4119	900	245	43034
2004	46224	3203	4145	900	245	44077
2005	46285	3462	4172	900	245	45058
2006	45728	3140	3961	900	245	46602
2007	46979	3516	4241	900	245	47761
2008	44630	3340	4029	900	245	46836
2009	41324	3093	3729	900	245	45318

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 11. Produção finlandesa de papel entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Imprensa	Imprimir & escrever	Fins sanitários	Embalagens	Outros
1979	1513	1877	136	1873	339
1980	1569	2027	137	1891	295
1981	1703	2093	151	1907	281
1982	1501	2171	153	1800	270
1983	1613	2382	156	1918	319
1984	1878	2970	161	2009	300
1985	1811	3166	161	1973	336
1986	1646	3366	156	2043	338
1987	1628	3689	162	2177	355
1988	1400	4373	165	2343	371
1989	1321	4594	163	2310	366
1990	1430	4682	164	2324	368
1991	1305	4705	159	2252	357
1992	1257	4979	167	2373	376
1993	1425	5502	176	2492	395
1994	1446	6096	193	2740	434
1995	1425	6315	184	2605	413
1996	1327	5837	188	2667	423
1997	1470	7121	204	2895	459
1998	1483	7760	171	2869	420
1999	1490	7902	185	2970	400
2000	1394	8416	174	3125	400
2001	1296	7659	146	3060	341
2002	1008	8084	148	3203	346
2003	946	8318	147	3303	344
2004	723	9465	184	3346	318
2005	520	8296	155	3157	263
2006	585	9208	200	3857	340
2007	548	9220	207	4006	353
2008	501	8334	168	3775	348
2009	210	6646	143	3307	296

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 12. Produção finlandesa de celulose entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Química	Semi-química	Mecânica	Dissolvida	Outras fibras	Fibras recicladas
1979	4310	303	2238	199	0	216
1980	4397	291	2349	209	0	244
1981	4349	308	2485	202	0	270
1982	3887	309	2326	192	0	280
1983	4195	301	2483	184	0	288
1984	4568	301	2958	204	0	310
1985	4580	326	2931	140	0	342
1986	4601	335	2891	102	0	363
1987	4917	360	3062	128	0	297
1988	5198	405	3239	152	0	384
1989	5378	373	3203	164	0	378
1990	5038	434	3293	121	0	433
1991	4824	433	3156	92	0	446
1992	4913	458	3170	92	0	440
1993	5465	472	3401	92	0	456
1994	5844	487	3631	92	0	472
1995	5782	509	3797	92	0	495
1996	5736	468	3489	92	0	563
1997	6620	529	3940	92	0	607
1998	6718	500	4137	92	0	633
1999	6977	500	4102	90	0	696
2000	7100	500	4319	90	0	685
2001	6547	500	4121	0	0	698
2002	7142	500	4087	0	0	703
2003	7350	500	4098	0	0	688
2004	7783	500	4331	0	0	740
2005	6773	500	3861	0	0	599
2006	7946	500	4669	0	0	734
2007	7699	500	4657	0	0	737
2008	7159	463	4002	0	0	724
2009	5518	333	2881	0	0	544

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 13. Produção sueca de papel entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Imprensa	Imprimir & escrever	Fins sanitários	Embalagens	Outros
1979	1484	999	264	3382	412
1980	1534	998	230	3042	378
1981	1605	996	235	2971	324
1982	1323	992	240	3033	331
1983	1349	1121	260	3348	271
1984	1507	1334	270	3477	282
1985	1594	1364	264	3519	260
1986	1789	1425	277	3614	259
1987	1975	1507	277	3792	261
1988	2064	1660	289	3907	241
1989	2165	1690	285	3981	242
1990	2273	1655	283	3974	234
1991	2063	1793	291	3986	216
1992	2124	1805	296	3949	204
1993	2325	1884	298	4067	207
1994	2415	2061	295	4495	18
1995	2346	2047	293	4456	17
1996	2283	2170	297	4246	22
1997	2411	2459	292	4447	147
1998	2478	2545	299	4429	128
1999	2508	2617	294	4527	125
2000	2542	2833	312	4968	127
2001	2463	2791	305	4857	118
2002	2423	2807	297	5083	114
2003	2548	2817	296	5278	123
2004	2649	3033	311	5465	131
2005	2572	3119	317	5608	159
2006	2541	3413	317	5660	135
2007	2547	2985	319	5540	120
2008	2560	3264	330	5388	121
2009	2198	2884	338	5267	117

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 14. Produção sueca de celulose entre 1979 e 2009, em 10³ toneladas

	Química	Semi-química	Mecânica	Dissolvida	Outras fibras	Fibras recicladas
1979	6558	348	1981	196	0	509
1980	6289	328	1960	122	0	575
1981	6267	265	1901	97	0	590
1982	5614	233	1762	97	0	615
1983	6369	234	1965	100	0	636
1984	6748	248	2197	100	0	719
1985	6518	263	2298	44	0	763
1986	6614	268	2498	213	0	797
1987	6948	277	2747	225	0	800
1988	7111	292	2904	248	0	865
1989	7053	285	3000	300	0	890
1990	6677	289	2953	296	0	909
1991	6768	292	2709	319	0	877
1992	6789	276	2525	319	0	900
1993	6967	264	2722	319	0	920
1994	7060	250	2858	319	0	1408
1995	7075	251	2861	319	0	1428
1996	6852	242	2753	319	0	1502
1997	7272	266	2959	319	0	1652
1998	7287	236	3026	0	0	1379
1999	7407	257	3029	0	0	1384
2000	7979	262	3304	0	358	1468
2001	7682	257	3089	0	358	1444
2002	8052	281	3021	0	358	1468
2003	8236	279	3223	0	0	1490
2004	8417	292	3397	0	0	1500
2005	8216	288	3455	149	0	1568
2006	8466	285	3489	174	0	1529
2007	8464	266	3672	186	0	1598
2008	8237	263	3570	156	0	2022
2009	7873	279	3322	194	0	1864

Fonte: elaborado a partir de FAO (2011).

Tabela 15. Consumo energético dos setores de papel e celulose dos países envolvidos na comparação internacional

	Combustíveis (PJ)					Eletricidade (PJ)				
	Brasil	Canadá	EUA	Finlândia	Suécia	Brasil	Canadá	EUA	Finlândia	Suécia
1979	83,8	382,7	2146,5	139,6	172	16,1	95,3	158,3	30,7	49,0
1980	93,2	404,3	2090,4	131,5	160,7	18,3	98,9	170,4	32,6	46,8
1981	88,5	329,3	2138,5	129,6	152,8	18,2	101,2	178,4	34,8	47,3
1982	93,4	383,2	2029,3	123,5	136,8	18,4	96,0	172,4	37,6	44,6
1983	95,6	371,8	2215,7	116,4	141,4	20,5	106,8	177,4	41,5	49,6
1984	98,9	386,6	2284,8	123,2	144,2	21,3	129,2	183,4	46,6	54,9
1985	108,8	390,6	2216,7	122,5	146,8	23,8	137,0	180,4	46,6	56,4
1986	116,0	383,3	2204,2	121,8	147,1	24,7	152,1	183,6	47,2	56,9
1987	117,3	347,5	2228,8	128,5	147,6	24,5	156,6	190,4	46,8	61,9
1988	123,6	325,5	2162,1	141,0	148,6	26,0	180,2	189,8	52,5	66,0
1989	123,6	320,4	2086,6	145,3	146	28,1	165,5	183,7	53,4	68,7
1990	123,6	310,4	2244,4	141,3	140,2	27,7	167,1	198,1	55,6	68,5
1991	129,2	312,1	2275,8	142,5	145,9	30,5	172,2	201,4	54,2	65,7
1992	150,1	310,2			132,4	32,3	169,8			64,8
1993	157,3	333,3			140,4	34,7	175,4			66,0
1994	165,6	421,6			143,2	35,0	182,2			66,8
1995	168,5	432,0			157,5	35,3	191,3			67,2
1996	177,7	424,4			157,1	35,8	188,1			66,8
1997	176,3	428,4			161,5	38,2	194,1			68,8
1998	195,5	428,0			157,9	39,3	191,3			72,0
1999	209,0	426,0			160,7	41,9	204,4			74,0
2000	216,1	482,9	1817,3	181,0	157,5	43,7	210,8	455,8	86,3	80,7
2001	215,5	449,5	1591,0	179,0	146	42,4	199,3	457,0	83,1	79,5
2002	228,6	484,9	1552,4	186,1	143,6	47,2	200,5	422,0	85,5	77,6
2003	249,6	485,6	1616,8	169,8	143,6	48,5	204,8	431,6	85,9	77,2
2004	254,8	486,8	1750,9	185,7	140,8	50,8	215,2	437,1	89,9	78,8
2005	268,5	529,8	1748,9	168,6	144	53,2	211,2	420,8	80,7	79,2
2006	279,9	484,1	1941,8	167,1	159,1	55,7	196,5	417,6	91,5	82,7
2007	298,5	429,6	1864,2	203,2	161,5	59,7	181,8	422,4	90,7	84,7
2008	311,1	457,4	1781,1	194,1	153,1	64,0	155,1	416,8	80,7	83,9
2009	332,4	452,2	1579,4	151,5	159,1	64,7	127,3	363,9	60,9	76,4
2010	352,5					69,3				

Fonte: elaborado a partir de FARLA (2011) e IEA (1995, 1996, 1998, 2000, 2002, 2005, 2007a, 2009a, 2011a).