



## Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados

---

### Celulose e Papel



A **Série Documentos Técnicos** tem o objetivo de divulgar resultados de estudos e análises realizados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) com a participação de especialistas e instituições vinculadas aos temas a que se refere o trabalho.

Textos com indicação de autoria podem conter opiniões que não refletem necessariamente o ponto de vista do CGEE.



**cggee**

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos  
*Ciência, Tecnologia e Inovação*



**Eficiência Energética:**  
recomendações de  
ações de CT&I em  
segmentos da indústria  
selecionados

---

**Celulose e Papel**

## © Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) é uma associação civil sem fins lucrativos e de interesse público, qualificada como Organização Social pelo executivo brasileiro, sob a supervisão do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Constitui-se em instituição de referência para o suporte contínuo de processos de tomada de decisão sobre políticas e programas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I). A atuação do Centro está concentrada nas áreas de prospecção, avaliação estratégica, informação e difusão do conhecimento.

### PRESIDENTE

*Mariano Francisco Laplane*

### DIRETOR EXECUTIVO

*Marcio de Miranda Santos*

### DIRETORES

*Antonio Carlos Filgueira Galvão*

*Fernando Cosme Rizzo Assunção*

*Gerson Gomes*

EDIÇÃO E REVISÃO | *Maisa Cardoso*

DESIGN GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO | *Eduardo Oliveira e Diogo Moraes*

INFOGRÁFICOS | *Carla Dionata*

APOIO TÉCNICO AO PROJETO | *Flávia Pinto e Marina Brasil*

Catálogo na Fonte

C389e

Eficiência energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados – celulose e papel: série documentos técnicos, 20 - Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2013.

148 p.; il, 24 cm

ISBN 978-85-60755-59-2

1. Produção. 2. Biorrefinaria. 3. Indústria - Brasil. I. CGEE. II. Título.

CDU 581.134:676 (81)

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos  
SCS Qd 9, Torre C, 4º andar, Ed. Parque Cidade Corporate  
70308-200, Brasília, DF  
Telefone: (61) 3424.9600 – Fax.: (61) 3424-9659  
<http://www.cgee.org.br>

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 2º Contrato de Gestão CGEE – 3º Termo Aditivo/Ação: Temas Estratégicos para o Desenvolvimento do Brasil /Subação: Eficiência Energética: Desenvolvimento de Agendas Tecnológicas em Temas Selecionados - 51.51.3/MCTI/2011.

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que citada a fonte.

Sugestão de citação: CGEE, título, autoria, ano de publicação, CGEE: Brasília.

Tiragem impressa: 600 unidades. Impresso em 2013. Gráfica Qualytá.



# Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados

## Celulose e Papel

### SUPERVISÃO

Marcio de Miranda Santos

### CONSULTORES

Celso Foelkel

Sérgio Valdir Bajay

Alessandra Melo

Deusanilde de Jesus Silva

Egmar Rocha

Leonardo Cella

### EQUIPE TÉCNICA DO MCTI

Adriano Duarte

Jairo Coura

### EQUIPE TÉCNICA CGEE

Ceres Cavalcanti (coordenadora)

Antonio Oliveira

Kátia Regina de Alencar Beltrão

Liliane Rank

Marcus de Freitas Simões

Patricia Olivera



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos  
*Ciência, Tecnologia e Inovação*

Onde o futuro está presente



## COLABORADORES

---

Alberto Mori (MD Papéis)  
Alexandre Bassa (Fibria)  
Alexandre Hastenreiter Assumpção (Eletrobras)  
Aluizio Sales Junior (International Paper)  
André Carvalho Foster Vidal (BNDES)  
André Barros da Hora (BNDES)  
André Leonardo Leite (Andritz)  
Antenor Lopes de Jesus Filho (Ipea)  
Antonio Aprigio da Silva Curvelo (USP/CBTE)  
Carlos Augusto Santos (Kablin S.A)  
Cássio Marx Rabello da Costa (ABDI)  
Cesar Augusto de Vasconcellos Anfe (Lwarcel)  
Cesar Augusto dos Reis (Abraf)  
Cristiano Hugo Cagnin (CGEE)  
Danyella Oliveira Perissotto (Suzano)  
Djamil de Holanda Barbosa (Procel/Eletrobras)  
Érico de Castro Ebeling (Suzano)  
Fernando Castanheira Neto (SAE/Presidência da República)  
Fernando Pinto Dias Perrone (Procel/Eletrobras)  
Fernando Scucuglia (Metso)  
Flavio de Queiroz Costa (CNPq)  
Francisco Bosco Souza (ABTCP)  
Francides Gomes da Silva Júnior (USP)  
Hamilton Saulo Moreira Brandão (Cenibra)  
Henrique Macedo Baudel (America Biomass Technologies)  
Ismael Eleotério Pires (UFV)  
Jonas Feranando Barbiero (Voith)  
Jorge Luiz Colodette (UFV)  
José Dilcio Rocha (Embrapa)

José Antonio Saiz Garcia (Demuth)  
José Mauro de Almeida (UFRB)  
José Oscival dos Santos (Klablin)  
José Reinaldo Marquezini (Grupo Bignardi)  
Juliana Borges de Lima Falcão (Embaixada Britânica)  
Luiz Antonio Rossi (Unicamp/Feagri)  
Marco Aurélio Ribeiro Gonçalves Moreira (Eletrobras)  
Marcus Vinicius da Silva Alves (Serviço Florestal Brasileiro/MMA)  
Maria Cristina Area (Universidade Nacional de Misiones/Argentina)  
Maria Elisabete Torres de Andrade (Pöyry)  
Maria Sírca de Sousa (Unifei)  
Maria Teresa Borges Pimenta (CTBE)  
Maria Vitória Ferrari (UnB)  
Marília Sobral Albiero (Voith Paper)  
Mauro Donizeti Berni (Nipe/Unicamp)  
Mirna Ivonne Gaya Scandiffio (Nipe/Unicamp)  
Nei Rubens Lima (Eco Aguas)  
Nilson Boeta (VTT Brasil)  
Priscila Chuffa (Lwarcel)  
Roberto Ricardo de Araujo Góes (Eletrobras)  
Roberto Villarroel (Eldorado Brasil Celulose)  
Rodrigo Sarmento Garcia (CNI)  
Samira Sana de Souza (MCTI)  
Song Won Park (USP)  
Thais Negri Santi (ABTCP)  
Tólio Edeo Ribeiro (MDIC)  
Umberto Caldeira Cinque (Fibria)  
Vera Maria Sacon (VTT Brasil)  
Vinicius Lobosco (Suzano)

## PARCEIROS INSTITUCIONAIS

---

Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP)  
Embaixada Britânica  
Procel - Indústria

## APOIADORES

---

Claudio Chiari (ABTCP)  
Afonso Moraes de Moura (ABTCP)  
Viviane Nunes (ABTCP)

Ação realizada em apoio aos trabalhos da Comissão Técnica MCTI/ANEEL/CNPq, criada pela portaria conjunta MCT e ANEEL nº 230, de 16 de março de 2010.



# SUMÁRIO

---

APRESENTAÇÃO	7
RESUMO EXECUTIVO	9
1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	16
1.2 Metodologia	16
2. CONTEXTO NACIONAL	19
2.1 Inovações tecnológicas	22
2.2 Países e empresas líderes	23
2.3 Produção nacional, importações, exportações e consumo aparente de celulose e papel	24
2.4 Competitividade da indústria brasileira e inovação tecnológica	27
3. PANORAMA	29
3.1 Produção de pastas de celulose	30
3.2 Produção de papel	31
3.3 Centros de pesquisa e universidades que se destacam nessas áreas no Brasil e no exterior	33
3.4 Conclusões	39
4. CENÁRIO TECNOLÓGICO	41
4.1 A cadeia produtiva, os principais desafios e a importância da eficiência energética na indústria brasileira de celulose e papel	41
4.2 Redução de desperdícios de energia	42
4.3 Tecnologias e procedimentos eficientes de uso geral na indústria com grande potencial de aplicação no setor	44
4.4 Novas tecnologias, <i>softwares</i> e procedimentos eficientes já disponíveis no mercado para aplicação na indústria nacional de celulose e papel	46
4.5 Tecnologias ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento que apresentam perspectivas futuras alvissareiras de aplicação nesse segmento industrial	50
4.6 Biorrefinarias como inovação tecnológica	54



<b>5. BIORREFINARIAS – VISÃO DE FUTURO</b>	57
5.1 Biorrefinarias frente à realidade brasileira	58
5.2 Introduzindo o conceito de biorrefinarias em fábricas de celulose e papel	64
5.3 Biorrefinarias no setor de celulose e papel: uma realidade que não é tão recente como parece	70
5.4 As biorrefinarias integradas no setor de celulose e papel no Brasil	71
5.5 Fundamentos e cenários tecnológicos para a implantação de biorrefinarias integradas no setor de celulose e papel no Brasil	80
5.6 Processos tecnológicos vitais para as biorrefinarias no setor de celulose e papel	84
5.7 Plataformas para novos produtos em biorrefinarias integradas no setor de celulose e papel	86
5.8 Situações atuais e perspectivas futuras para as tecnologias sobre biorrefinarias no setor brasileiro de celulose e papel	92
<b>6. TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS</b>	99
6.1 Grupo Bioenergia	100
6.2 Grupo Produtos Não Energéticos	102
6.3 Grupo Processos e Produtos Tradicionais (Avanços Tecnológicos)	105
6.4 Grupo Biomassa Florestal e Madeira	107
<b>7. RECOMENDAÇÕES DE AÇÕES</b>	111
<b>ANEXOS</b>	133
Anexo III – Mapa Estratégico – Bioenergia	139
Anexo II – Mapa Estratégico – Produtos não Energéticos	137
Anexo I – Mapa Estratégico – Biomassa Florestal e Madeira	135
Anexo IV – Mapa Estratégico – Avanços Tecnológicos dos Processos e Produtos Tradicionais	143





# APRESENTAÇÃO

O estudo Tecnologias Eficientes em Segmentos da Indústria Seleccionados foi encomendado ao Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) pela Secretaria Executiva do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e tem como objetivo geral a identificação de subsídios técnicos para a política de eficiência energética. Em particular, visa contribuir para o aumento da competitividade da indústria nacional de setores seleccionados. O estudo teve como foco o setor de papel e celulose, em função do grande potencial que apresenta em termos de competitividade pela adoção de práticas que objetivam tornar mais eficientes processos intensivos em energia adotados pelas indústrias que dele fazem parte.

Este documento foi, portanto, elaborado com o propósito de identificar as oportunidades e os desafios desse setor na área de eficiência energética, tomando-se por base grupos de tecnologias identificados na fase inicial do estudo. São apresentadas, ao final desta publicação, recomendações para o aprimoramento da política de ciência, tecnologia e inovação no que se refere ao tema central do estudo.

Na sua parte introdutória, o documento apresenta um breve panorama do setor no Brasil, com destaque para o tema “biorrefinarias”, apontado pelos especialistas como portador de futuro para o setor de celulose e papel e por tratar-se de estruturas capazes de acomodar um conjunto de processos agregador de valor à produção nacional. Dimensões do setor de papel e celulose, tais como a participação dos principais atores na economia e a influência deles na sociedade, são também apresentadas.

Um panorama da ciência, tecnologia e inovação foi conduzido de forma a retratar a produção nacional de pasta de celulose e papel, levantar os centros de pesquisa e universidades que realizam estudos de interesse sobre o tema e mapear os grupos de pesquisa que tratam do tema biorrefinaria florestal no País.

A seção denominada “Biorrefinarias – Visão de Futuro” está integralmente dedicada ao estudo da tendência de construção de biorrefinarias no setor de papel e celulose. Busca dar aos leitores desta publicação o contexto nacional para sua aplicação, assim como apresenta os processos tecnológicos necessários para a sua implantação pela indústria brasileira.



O estudo destaca, ainda, as tendências tecnológicas relevantes para o setor, principalmente no que tange a eficiência energética e a competitividade dessa indústria, além de trazer um relato sobre softwares e processos associados.

A Direção do CGEE espera que este estudo, construído de forma participativa com o apoio de especialistas dos meios empresarial, acadêmico e governamental, seja útil para todos aqueles diretamente envolvidos ou interessados no tema eficiência energética no Brasil, diante dos imensos desafios a serem enfrentados pelo país no aumento e na preservação da sustentabilidade de processos industriais de grande envergadura.

**Marcio de Miranda Santos**  
Diretor executivo do CGEE



## RESUMO EXECUTIVO

O presente estudo responde a uma demanda do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e apresenta a consolidação de dois estudos realizados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Um trata do contexto do setor de celulose e papel, o outro expõe a visão de futuro para o setor e propõe ações que fomentem a ciência, tecnologia e inovação (CT&I) nessa área.

### Contexto nacional

O segmento brasileiro de celulose e papel possui a maior área de florestas certificadas entre os segmentos de base florestal do país. Segundo a Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa), em 2011, a área total certificada era de dois milhões de hectares.

As grandes empresas produtoras de celulose e papel do Hemisfério Norte estão à frente das empresas brasileiras nas pesquisas industriais e tecnológicas especializadas. Todavia, a indústria brasileira leva vantagem nas etapas iniciais da cadeia produtiva e na logística. No Brasil, o eucalipto, que compõe a base florestal das empresas brasileiras, pode ser cortado entre seis a sete anos, enquanto no norte da Europa os pinheiros não levam menos de 30 a 40 anos para estarem prontos. Mesmo com o eucalipto da Península Ibérica e do Chile, com uma maturação de 10 a 15 anos, não se obtêm as mesmas vantagens do Brasil.

O grande sucesso do aproveitamento do eucalipto como matéria-prima básica para a produção de celulose tem garantido ao país custos de produção entre os mais baixos do mundo. Essa vantagem de custos tem sido reforçada pela realização de investimentos na modernização do parque industrial, especialmente na fabricação de celulose de mercado. Além disso, as empresas realizaram investimentos em pesquisa aplicada voltada ao desenvolvimento florestal. Como resultado dessas pesquisas, as produtividades florestais do eucalipto e do pínus aumentaram 83% e 100%, respectivamente, entre 1980 e 2009. Segundo a Bracelpa, a produtividade do eucalipto no Brasil poderá chegar a atingir 70 m<sup>3</sup>/ha. ano no futuro.



O Brasil depende muito pouco da importação de celulose de mercado e é um grande exportador de pastas químicas produzidas a partir de fibras curtas e submetidas ao processo de branqueamento. Os principais mercados da celulose brasileira no exterior, em janeiro de 2011, foram a Europa, destino de 39% das exportações do setor, seguida pela China, com 31%, e América do Norte, com 14%.

## Panorama setorial

O estudo apresenta o potencial produtivo da indústria nacional, bem como a sua competitividade frente ao mercado internacional, visto que parte significativa da produção de celulose e papel é destinada à exportação.

As regiões Sul e Sudeste concentram a maior parte da produção de celulose e papel. Somente São Paulo é responsável por 27% da produção nacional de pasta de celulose e 43% da produção de papel.

O Brasil já conta com 28 grupos de estudos avançados sobre biorrefinarias e biomassa florestal estabelecidos em todo o território nacional. As pesquisas realizadas por esses grupos poderiam ser utilizadas como alavancador da introdução de novas tecnologias no setor. Também nas regiões Sul e Sudeste se encontra a maioria dos grupos de pesquisa na área. Entre os centros de pesquisa, destacam-se o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (Ipef), a Embrapa Florestas e a Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia (Cenargen), cujos trabalhos relacionados às atividades florestais são reconhecidos internacionalmente.

Em levantamento realizado sobre pesquisas nacionais relacionadas ao assunto biorrefinaria, o número de estudos tem crescido de forma expressiva. Em uma pesquisa bibliográfica para busca dos principais grupos de pesquisa envolvidos com o tema no Brasil, foram encontradas mais de duas centenas de artigos científicos de pesquisadores nacionais publicados nos últimos anos. Vale ressaltar a dimensão nacional do aporte de recursos ao estudo sobre biorrefinarias que empregam biomassa florestal.

Considerando os estudos levantados, a degradação térmica da madeira para obtenção de diversos produtos de alto valor agregado, apesar de não ser um tema atual, pode ser, potencialmente, o caminho mais próximo para se obter tais produtos, os quais, atualmente, são originados de



fontes não renováveis. Ainda, pode ser verificado que diversas tecnologias, hoje utilizadas nas refinarias de petróleo, poderão ser ajustadas para serem usadas na biorrefinaria florestal.

Embora os representantes das empresas nacionais do setor de celulose e papel declarem a intenção ou se manifestem estarem desenvolvendo trabalhos sobre o assunto, não foram encontradas publicações relevantes em revistas científicas e que tenham sido originadas a partir de grupos de pesquisa dessas empresas.

## Cenário tecnológico

As principais inovações tecnológicas apontadas são: busca de usos energéticos para os resíduos florestais; melhorias na qualidade da madeira; globulização do eucalipto; uso de biorrefinarias; super caldeiras e turbinas com contrapressão de 9 bar nas plantas de produção de celulose. Na fabricação de papel, foram indicados: controle estatístico de processo; avanços na instrumentação e controle da máquina de papel; recuperação de calor para aquecimento da água de processo e do ar da secagem do papel; assim como aproveitamento dos resíduos via plantas termoelétricas.

A busca de ganhos de eficiência energética pode propiciar reduções significativas de custos, com importantes reflexos na competitividade dessa indústria, além de contribuir para a obtenção de ganhos ambientais e a consequente melhoria da imagem como indústria verde. Já as biorrefinarias, além de propiciar a redução de custos com energia, ampliam o portfólio de produtos de maior valor agregado produzidos pelas plantas industriais. Outras tecnologias, como queima de resíduos orgânicos em leito fluidizado, sistemas avançados de controle de processo, geração de biogás por digestão anaeróbica, também são listadas como tecnologias disponíveis para serem utilizadas pela indústria de celulose e papel.

Há também uma série de tecnologias em fase de pesquisa que podem ser utilizadas pela indústria de celulose e papel. São estas: engenharia genética para melhoria das florestas e madeiras; polpação baseada em solventes alcoólicos, polpação com enzimas oriundas de fungos xilófagos de madeiras; polpação químico-mecânica sem enxofre; branqueamentos com enzimas ou processos biológicos; etc. Para a recuperação dos agentes químicos, estão sendo desenvolvidas tecnologias avançadas de recuperação direta dos produtos alcalinos e gaseificação do licor negro.



## Biorrefinarias – visão de futuro

A visão de futuro para o setor aponta para as biorrefinarias, pois a tecnologia encontra-se em estado avançado de maturidade, sendo plenamente factível sua adoção por parte da indústria nacional. O estudo apontou vários fatores positivos para a alavancagem de negócios vinculados às biorrefinarias, como, por exemplo, a geração de oportunidades para ampliação do portfólio de produtos industriais de maior valor agregado, bem como o desenvolvimento de propriedade intelectual e industrial para esses novos produtos ligados ao setor.

Já existe um grande interesse no Brasil pelo desenvolvimento de biorrefinarias no setor da agroindústria da cana-de-açúcar, visando à integração do etanol de segunda geração, com o quê se espera aumentar a oferta de etanol a partir da mesma base plantada de cana-de-açúcar.

No momento, as modernas fábricas brasileiras de celulose de mercado estão focadas em utilizar seu potencial termoeletrico, vendendo eletricidade excedente a terceiros. É possível que nesse ponto estejam as maiores motivações para ser dado o primeiro passo para se implantarem biorrefinarias integradas no setor. No entanto, levando em conta o estágio de desenvolvimento e de investimentos em pesquisa tecnológica dos setores sucroalcooleiro e de carvão vegetal, pode-se considerar que dificilmente o setor brasileiro de celulose e papel terá posição de liderança nesses direcionamentos tecnológicos para uso de rotas bioquímicas e termoquímicas para biorrefinarias.

Quanto às pesquisas e patentes com biorrefinarias no setor de celulose e papel, o Brasil está definitivamente distante do que vem sendo realizado nos principais centros de pesquisa mundiais. Sabendo disso, pode-se dizer que as pesquisas tecnológicas precisam ser estimuladas e ordenadas às rotas e plataformas tecnológicas com maiores possibilidades de implementação com sucesso pelo setor brasileiro de celulose e papel. Todavia, deve-se evitar replicar no Brasil as pesquisas que vêm sendo feitas no Hemisfério Norte. Além de apenas concluir o mesmo que se concluiu no exterior, elas podem estar desfocadas com as realidades e necessidades da indústria brasileira.

## Tendências tecnológicas

Por meio de pesquisa estruturada junto a especialistas da academia, do governo e da indústria, foi estabelecido um mapa de tendências de linhas temáticas que direcionaria o potencial foco das ações prioritárias de CT&I para o setor de celulose e papel. Como exemplo, podem ser citados: gás combustível/gás síntese, derivados de hemiceluloses, polímeros (biopolímeros), quantidade e qualidade dos resíduos florestais, etc.



Esse mapa lista as linhas priorizadas para cada um dos cinco grupos temáticos trabalhados: bio-energia; produtos não energéticos; avanços tecnológicos dos processos e produtos tradicionais; e biomassa florestal. Nessa etapa, também foram levantados os estágios de maturidade de PD&I em cada linha.

## Conclusões e recomendações

Com base nas tendências e informações coletadas no contexto e panorama do setor, foi construída uma lista de recomendações de ações de CT&I no fomento ao desenvolvimento da competitividade e eficiência do segmento de celulose e papel.

Recomendam-se tanto ações de fomento quanto de mecanismos para redução dos gargalos estruturais e o desenvolvimento de tecnologias.

Entre as recomendações para redução dos gargalos estruturais, destacam-se: incentivo ao desenvolvimento de unidades de cogeração com capacidade superior a 30 MW, criação de arranjos produtivos locais vinculados aos maciços florestais, concepção de incentivos tributários e financiamentos favoráveis para a aquisição de equipamentos com melhores níveis de eficiência.

No desenvolvimento de tecnologias, sobressaem-se as relacionadas aos temas: biorrefinaria, eficiência energética, gaseificação de biomassa úmida, separação de lignina, produção de álcoois, pirólise rápida e decomposição anaeróbica, entre outras.

O conjunto de recomendações apresentado visa subsidiar o governo para que possa utilizar a política de CT&I como um dos alavancadores ao desenvolvimento desse importante setor para a economia e a política energética do país.







# 1. Introdução

No Brasil, o estímulo ao crescimento do setor de celulose e papel (C&P) fortaleceu-se no ano de 1974 com o Programa Nacional de Celulose e Papel, que estabeleceu uma política de incentivos e subsídios voltada para o desenvolvimento dessa indústria. Os incentivos fiscais para reflorestamento (1966) e os financiamentos para investimentos em tecnologias para toda a cadeia produtiva também foram importantes para o setor. Tais medidas resultaram em melhoria das condições de competitividade das empresas nacionais no mercado externo, reduzindo a dependência externa de diversos produtos. Os principais resultados desse apoio foram: a modernização do parque industrial de celulose e papel, o aumento das atividades de P&D e o alcance do mercado externo (BERNI, BAJAY & GORLA, 2010).

Atualmente, o Brasil é o quarto maior produtor de celulose do mundo e o nono na produção de papel. No entanto, é curioso notar que a performance global do setor ainda não é proporcional ao fato de que o país tem condições edafoclimáticas muito favoráveis, terras disponíveis e tecnologia florestal avançada, o que sugere um potencial de destaque substantivamente maior. Essa indústria, no país, segundo o levantamento realizado por este estudo, conta atualmente com 222 empresas em atividade em 539 municípios, localizados em 18 estados. Destaca-se, nesse contexto, que a madeira usada por essa indústria é extraída exclusivamente de reflorestamentos destinados a esse setor, que cobriam, em 2011, uma área de 2,2 milhões de hectares, principalmente com eucalipto e pinus. Porém, sabe-se que o Brasil convive com um déficit substantivo de florestas plantadas, que varia conforme os segmentos industriais e regiões, em função das diversas barreiras e incertezas que afetam os investimentos florestais de longo prazo no país.

A expansão do mercado mundial de celulose e papel nos últimos 40 anos tem se mostrado estável e muito significativa. No Brasil, as taxas anuais médias de crescimento da produção de celulose e papel foram de 7,4% e 5,6%, respectivamente. A participação dessa indústria no Produto Interno Bruto (PIB) nacional e industrial no ano de 2012 foi de 0,8%, e de 3,8%, respectivamente, gerando cerca de 128 mil empregos diretos (77 mil na indústria e 51 mil nas atividades florestais).

O setor se mostra especialmente estratégico para o país pelos fatores já expostos, por seu lado ambiental forte e por ser um setor da indústria intensivo em energia. Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2011), em 2010, o segmento respondeu por 18% e 9,5%, respec-



tivamente, do consumo de energia e energia elétrica da indústria. Todavia, o histórico da matriz energética do setor comprova o empenho da indústria na redução do consumo de fontes fósseis e aumento do uso de fontes renováveis. Por exemplo, entre 1980 e 2010, a participação percentual de lenha e lixívia na matriz energética do setor aumentou de 29,61% para 60,67%. O consumo de óleo combustível, que representava 29,65% da matriz energética do setor em 1980, caiu para apenas 4,61% em 2010. Os dados indicam que a componente fabril do setor investe na transição para uma economia de baixo carbono.

## 1.1 Objetivos

O objetivo do estudo é descrever uma proposta de ações de CT&I voltadas a fomentar o segmento de celulose e papel em sua competitividade e eficiência energética. Para isso, respeitou as seguintes etapas:

- Descrever o contexto e panorama atual do setor;
- Construir uma visão de futuro;
- Detalhar a visão de futuro;
- Descrever as tendências analisando suas potencialidades e seus desafios;
- Propor um conjunto de ações baseadas em dimensões de CT&I predefinidas.

## 1.2 Metodologia

O estudo se baseou principalmente em levantamento de informações e pesquisa de percepções com especialistas.

Para a primeira etapa, quando foram descritos o contexto e panorama do setor, foram realizados levantamentos na bibliografia existente de forma a contextualizar e construir um panorama. A proposta era identificar a importância econômica do setor, descrever os processos comuns, as inovações recentes e o que indicam algumas pesquisas tecnológicas.



A segunda etapa correspondeu à construção da visão de futuro, com base na revisão anterior e na percepção de especialistas. O resultado da primeira etapa foi apresentado numa reunião com representantes da indústria e pesquisadores do setor, de forma a validar as informações com os especialistas. A segunda parte da reunião envolveu um debate por grupo que identificou grandes desafios e oportunidades. A partir dessas informações, convergiu-se para uma visão de que o futuro do setor caminha para o conceito da biorrefinaria. Essa visão foi construída de forma estratégica a contemplar benefícios à sociedade, ao governo e à indústria. A decisão foi consolidada com um pequeno comitê gestor, composto por representantes do MCTI, da associação da indústria e especialistas pesquisadores de energia e do segmento de Celulose e Papel (C&P).

Na etapa seguinte, foi abordada a contextualização da biorrefinaria no setor de C&P. Foram levantados um panorama da pesquisa na temática e outras informações.

Na quarta etapa, foi realizada uma pesquisa de percepções sobre as tendências do setor no médio e no longo prazo, utilizando a visão de futuro como cenário setorial de 2020. A pesquisa realizada junto a diferentes especialistas do segmento teve o objetivo de gerar um mapa sobre temáticas relevantes para atingir essa visão de futuro.

A etapa final consistiu na construção de uma proposta com um conjunto de ações de CT&I que fomentem o desenvolvimento das temáticas consideradas mais relevantes na etapa anterior.





## 2. Contexto nacional

No mundo, as grandes empresas integradas produtoras de celulose e papel do Hemisfério Norte mostram-se extremamente competitivas nas operações industriais especializadas – a partir da fábrica, da celulose em diante, até a produção e comercialização de papéis. Elas estão, entretanto, em desvantagem nas etapas iniciais da cadeia produtiva, basicamente na fase de plantação de florestas homogêneas e na logística. O tempo de maturação de uma árvore, do seu plantio ao corte, determina um claro diferencial de custos. O eucalipto, por exemplo, que compõe a base florestal das empresas brasileiras, pode ser cortado em seis a sete anos, enquanto no norte da Europa os pinheiros não levam menos de 30 a 40 anos para estarem prontos. Mesmo com o eucalipto da Península Ibérica e do Chile, com uma maturação de 10 a 15 anos, não se obtêm as mesmas vantagens do Brasil (FONSECA, 2003).

As vantagens obtidas pelo Brasil nas atividades florestais não dependem apenas de condições naturais e do tempo de maturação do eucalipto, mas também do manejo florestal e da logística de transporte da matéria-prima até a planta industrial.

Em 2010, o consumo aparente brasileiro *per capita* de papel era de 48,6 kg por ano (baixo, quando comparado com: Estados Unidos – 240,2 kg/ano; França – 151,9 kg/ano; Chile – 79,2 kg/ano; e Argentina – 61,3 kg/ano; média mundial de 57 kg/hab.ano) (BRACELPA, 2011). Deve-se considerar nesse cenário que o Brasil é o quarto maior produtor de celulose do mundo.

A produção de pasta celulósica branqueada encontra no Brasil condições muito favoráveis (FONSECA, 2003). O grande sucesso do aproveitamento do eucalipto como matéria-prima básica para a produção de celulose tem garantido ao país custos de produção entre os mais baixos do mundo. Essa vantagem de custos tem sido reforçada pela realização de investimentos na modernização do parque industrial, especialmente na fabricação de celulose. Além disso, as empresas realizaram investimentos em pesquisa aplicada voltada ao desenvolvimento florestal. Como resultado dessas pesquisas, as produtividades florestais do eucalipto e do pínus (Tabela 1) aumentaram 83% e 100%, respectivamente, entre 1980 e 2009. Segundo a Bracelpa, a produtividade do eucalipto no Brasil poderá chegar a atingir 70 m<sup>3</sup>/ha. ano no futuro.



**Tabela 1 –** Produtividades do eucalipto e do pínus no Brasil, em m<sup>3</sup>/ha. ano, em 1980 e em 2009

	1980	2009	%crescimento
Eucalipto	24	44	83
Pínus	19	38	100

Fonte: Bracelpa

Vários fabricantes de celulose têm oferecido a pequenos e médios produtores rurais a oportunidade de plantar florestas em conjunto com suas outras atividades. Em 2011, a área fomentada pelo segmento era de 425 mil hectares, e o número de fomentados chegava a 27.651 propriedades.

O segmento brasileiro de celulose e papel possui a maior área de florestas certificadas entre os segmentos de base florestal do país. Segundo a Bracelpa, em 2011, a área total certificada era de dois milhões de hectares.

As plantas do segmento de celulose e papel, em geral, pertencem a grandes corporações mundiais que atuam na produção de celulose e papel. São altamente verticalizadas. No Brasil, não ocorre de forma diferente. Destaque-se, no caso brasileiro, a presença de algumas grandes empresas de capital nacional, algumas empresas estrangeiras de grande porte e um número elevado de instalações de médio porte, que reciclam papel usado (BERNI, BAJAY & GORLA, 2010).

Do ponto de vista da qualidade, por imposição do mercado externo face às exportações, todos os produtores integrados e fabricantes de celulose de mercado já possuem os certificados de garantia de qualidade ISO 9000 e ISO 14000.

Outro parâmetro imprescindível de aferição de qualidade na fase industrial é a instrumentação digital, com controles lógicos programáveis, que favorecem a automação dos controles das variáveis de processo.

Em nível mundial, tem ocorrido um processo de diferenciação dos produtos da indústria de celulose e papel em razão da resistência, por parte de alguns países, em adquirir produtos originários de produtores cujas plantas apresentem problemas ambientais, não utilizem florestas plantadas ou não empreguem, em maior grau, fibras recicladas em seu processo produtivo.



Logo, as especificações técnicas, tanto para os processos industriais quanto para o controle da exploração comercial das florestas, têm se tornado mais rigorosas, requerendo grandes investimentos e influenciando a competitividade.

Na União Europeia, não entra mais papel brasileiro que não esteja livre de cloro elementar. Desde meados da década de 1980, os produtores de celulose no Brasil vêm migrando para os processos isentos de cloro elementar [Elemental Chlorine Free (ECF)] ou para os sistemas totalmente isentos de compostos de cloro [Totally Chlorine Free (TCF)], substituindo o método tradicional em que compostos organoclorados eram lançados no ambiente (FONSECA, 2003).

Conforme será possível observar no presente estudo, 60% da produção nacional de pasta de celulose são destinados à exportação e 20% do papel produzido têm o mesmo destino. Levando-se em consideração o complexo industrial brasileiro, fortemente focado no mercado interno, o setor contribui positiva e significativamente com a balança comercial brasileira.

Nas últimas décadas, o país tem vislumbrado um crescimento contínuo na produção de pastas de celulose, sendo pouco dependente da importação de celulose de mercado e posicionando-se como líder na produção e exportação de pastas químicas produzidas a partir de fibras curtas e submetidas ao processo de branqueamento.

Os papéis para embalar, imprimir e escrever são os tipos mais produzidos e consumidos no Brasil, sendo que o país é um grande exportador desses tipos de papéis. No entanto, o país é altamente dependente da importação de papel imprensa. Nas exportações de papel, os principais mercados, em janeiro de 2011, foram a América Latina, com 57%, seguida da Europa, com 18%, e da América do Norte, com 8% (BRACELPA, 2011).

Alguns desafios apresentam-se ao setor, tais como:

- Manter a liderança mundial na produção e exportação de celulose branqueada de fibra curta;
- Aumentar a competitividade na produção de papel;
- Modernizar as fábricas que produzem papel a partir de aparas e melhorar a atual estrutura de suprimento desse insumo;
- Aumentar a produção de produtos de maior valor agregado;



- Incrementar sua imagem, no Brasil e no exterior, como uma indústria verde, que se preocupa em minimizar seus impactos ambientais negativos e consumir o máximo possível de fontes renováveis de energia ao longo de toda a sua cadeia produtiva;
- Reduzir o custo com energia, aproveitando o seu potencial de autoprodução de eletricidade por meio da cogeração;
- Aumentar a eficiência energética para propiciar reduções significativas de custos de produção (isso reflete na competitividade dessa indústria, além de contribuir para a obtenção de ganhos ambientais e a consequente melhoria da imagem de indústria verde);
- Remover gargalos na infraestrutura nacional, sobretudo, por meio de intervenções que gerem melhoras nos sistemas logísticos, contemplando um planejamento industrial e agrícola integrados;
- Adequar o processo de licenciamento ambiental à natureza renovável do setor e a critérios de sustentabilidade das atividades de plantio, permitindo a desburocratização sem prejuízo da integridade socioambiental;
- Ampliar (de maneira planejada e sincronizada com outros mercados demandantes) a base de florestas plantadas do setor para que proporcionem o incremento do potencial de produção subotimizado de celulose e papel do Brasil.

Esses desafios vêm sendo enfrentados por meio de ações tanto de cunho público - a exemplo de iniciativas como o presente estudo -, quanto por parte da indústria, com a adoção de iniciativas inovadoras por parte das empresas do setor.

Uma das inovações-alvo das políticas públicas e das empresas é a implantação de biorrefinarias integradas à indústria de celulose e papel. A adoção dessa tecnologia consiste na utilização de árvores e outros produtos reciclados oriundos de biomassa vegetal para produzir calor, energia elétrica, biocombustíveis e biomateriais em um mesmo local.

## 2.1 Inovações tecnológicas

As principais inovações tecnológicas apontadas pelo grupo de atividades florestais foram: busca de usos energéticos para os resíduos florestais via torrefação ou pirólise; melhorias na qualidade da madeira (até mesmo por engenharia genética), a fim de que ela produza maior rendimento





em celulose e requeira um menor consumo de energia no processo de produção da celulose; e globulização do eucalipto.

As inovações tecnológicas destacadas na fabricação de celulose foram: a biorrefinaria, as supercaldeiras, envolvendo pressões acima de 100 bar, e turbinas com contrapressão de 9 bar, que permitem um melhor aproveitamento do vapor.

Foram indicadas as seguintes inovações na fabricação de papel: (i) controle estatístico de processo; (ii) avanços na instrumentação e no controle da máquina de papel; (iii) recuperação de calor para aquecimento da água de processo e do ar da secagem do papel em empresas de pequeno e médio porte; (iv) utilização de caldeiras de leito fluidizado; e (v) gaseificação da madeira e sua utilização em sistemas de cogeração.

## 2.2 Países e empresas líderes

Os países líderes nas atividades e tecnologias das indústrias de base florestal são Finlândia, Suécia, Canadá e Estados Unidos.

Como líderes no desenvolvimento de biorrefinarias foram apontados os países escandinavos, os EUA e o Canadá. Já a liderança na construção de caldeiras de alta eficiência utilizadas em fábricas de celulose é dos japoneses.

A liderança tecnológica na fabricação de papel reside na Finlândia e na Alemanha, destacando-se a empresa finlandesa Metso e a alemã Voith como líderes na fabricação de máquinas de papel e equipamentos acessórios. De fato, segundo informações contidas na edição 2010/2011 do Guia de Compras da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) (2010b), essas duas empresas fabricam quase todos os principais equipamentos e acessórios envolvidos na cadeia produtiva não só do papel, como também da celulose.

Entre os fabricantes de papel no Brasil, destaca-se o avanço tecnológico representado pela máquina de papel no 9 da Klabin.



## 2.3 Produção nacional, importações, exportações e consumo aparente de celulose e papel

A Tabela 2 apresenta a produção de pastas de celulose obtidas pelos processos químico, semi-químico e mecânico (alto rendimento) e de papel no Brasil, de 1988 a 2012.

Como pode ser observado na Tabela 2, houve um crescimento contínuo na produção, tanto de pastas de celulose, quanto de papel, no período de 1988 a 2010, exceto nos anos de 1990 (celulose e papel), 1992 (papel) e 2001 (celulose) e na importância das pastas de celulose obtidas pelos processos químico e semi-químico sobre as pastas de alto rendimento, no padrão de produção estabelecido no país. Apesar de a produção de pastas de alto rendimento ter oscilado bastante nesse período, ela apresenta uma tendência clara de estagnação no longo prazo.

A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam produção, exportação, importação e consumo aparente de pastas de celulose e papel, respectivamente, em 2009, de acordo com as categorias adotadas pela Bracelpa.

Os dados da Tabela 3 indicam que o Brasil depende muito pouco da importação de celulose de mercado e que é um grande exportador de pastas químicas produzidas a partir de fibras curtas e submetidas ao processo de branqueamento. Os principais mercados da celulose brasileira no exterior, em janeiro de 2011, foram a Europa, destino de 39% das exportações do setor, seguida pela China, com 31%, e América do Norte, com 14% (BRACELPA, 2011). Os dados da Tabela 4 revelam que:

- Papel para embalagem e para imprimir e escrever são os tipos mais produzidos e consumidos no Brasil;
- O país é altamente dependente da importação de papel imprensa; e
- O país exporta quantidades significativas de papel para imprimir e escrever e papel de embalagem. Nas exportações de papel, os principais mercados, em janeiro de 2011, foram a América Latina, com 57%, seguida da Europa, com 18%, e da América do Norte, com 8%.



Tabela 2 – Evolução das produções de pastas de celulose e de papel no Brasil, em toneladas, de 1988 a 2012

Ano	Celulose química e semiquímica	Pasta de alto rendimento	Total de pastas de celulose	Papel
1988	3.792.868	397.688	4.190.556	4.683.952
1989	3.943.879	426.421	4.370.300	4.871.336
1990	3.914.688	436.455	4.351.143	4.715.791
1991	4.346.520	431.596	4.730.116	4.914.113
1992	4.870.567	431.777	5.302.344	4.900.838
1993	5.010.188	460.742	5.470.930	5.301.040
1994	5.376.271	452.599	5.828.870	5.653.597
1995	5.442.942	492.965	5.935.907	5.798.226
1996	5.736.178	465.257	6.201.435	6.175.993
1997	5.904.125	427.037	6.331.162	6.517.601
1998	6.231.393	455.513	6.686.906	6.589.301
1999	6.764.823	444.309	7.209.132	6.953.246
2000	6.961.470	501.769	7.463.266	7.200.132
2001	6.943.466	468.561	7.412.027	7.437.767
2002	7.525.697	495.398	8.021.095	7.773.913
2003	8.610.205	459.042	9.069.247	7.915.504
2004	9.150.012	470.131	9.620.143	8.452.411
2005	9.852.462	499.651	10.352.113	8.597.307
2006	10.682.533	497.440	11.179.973	8.724.631
2007	11.476.286	521.378	11.997.664	9.008.440
2008	12.188.944	507.602	12.696.546	9.409.450
2009	12.886.385	428.488	13.314.873	9.428.475
2010	13.633.000	431.000	14.064.000	9.792.000
2011	13.557.000	435.000	13.992.000	10.159.000
2012	13.454.000	523.000	13.977.000	10.260.000

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Bajay, Berni e Lima (2005); Bracelpa (2013).



Tabela 3 – Produção, exportação, importação e consumo aparente, em 10<sup>3</sup> toneladas, dos vários tipos de pastas de celulose no Brasil, em 2012. Não inclui celulose solúvel (dissolução) e aparas (reciclados)

Tipo de pasta de celulose	Produção	Exportação	Importação	Consumo aparente
Pasta De Alto Rendimento	523	0	0	523
Química E Semiquímica	13.454	8.513	411	5.352
Fibra Longa	1.609	11	410	2.008
Branqueada	99	0	401	2.954
Não Branqueada	1.510	11	9	390
Fibra Curta	11.845	8.502	1	3.344
Branqueada	11.455	8.502	1	2.954
Não Branqueada	390	0	0	390
TOTAL	13.977	8.513	411	5.875

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Bracelpa e Secex.

Tabela 4 – Produção, exportação, importação e consumo aparente, em 10<sup>3</sup> toneladas, dos vários tipos de papel no Brasil, em 2012

Tipo de pasta de celulose	Produção	Exportação	Importação	Consumo aparente
Imprensa	132	1	387	518
Imprimir e escrever	2.667	952	661	2.376
Embalagem	5.210	504	64	4.770
Fins sanitários	1.040	9	11	1.042
Papel cartão	787	230	44	601
Outros	424	179	229	474
Total	10.260	1.875	1.396	9.781

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Bracelpa e Secex.



## 2.4 Competitividade da indústria brasileira e inovação tecnológica

Conforme apresentado anteriormente, a competitividade da indústria nacional é inegável no que diz respeito à produtividade de nossas florestas e ao processo produtivo de nossas fábricas. O desafio é manter-se competitivo com a inclusão de novos processos tecnológicos e na agregação de valor ao que é produzido em território nacional.

O crescimento da produção nacional vem provando a capacidade de ampliar a oferta quando o mercado demanda, sem com isso ampliar a área de cultivo sobre territórios destinados à produção de alimentos. Essa peculiaridade torna o Brasil um player importante no mercado internacional.

Essa vantagem competitiva deve ser ampliada por meio de adoção de formas inovadoras de agregar valor à produção nacional, seja integrando novos modelos de negócio, seja aprimorando o que se produz.





### 3. Panorama

O panorama nacional busca apresentar informações de produção, seguida dos centros de pesquisa e considerações.

No que se refere aos dados de produção de celulose e papel, foram trabalhados com base em informações dos anos de 2009 e 2010. Os dados foram colhidos basicamente de uma única fonte, a Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa).

As informações mostram grande concentração de fabricantes de ambos os produtos na região Sudeste e que parte considerável dessa produção é destinada à exportação.

O levantamento dos centros de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) sobre o tema foi realizado por meio de busca de instituições citadas nas publicações relacionadas ao tema. O levantamento, que indica a capacidade de pesquisa e desenvolvimento instalada no país, mostra também clara concentração de centros e grupos de pesquisa nas regiões Sudeste e Sul, o que leva à conclusão de que tais aglomerados gravitam em torno das áreas de grande produção.

Foram levantados ainda os principais centros de geração e difusão de pesquisas para o setor espalhados pelo mundo, com participação expressiva de instituições instaladas no Canadá e nos Estados Unidos da América.



### 3.1 Produção de pastas de celulose

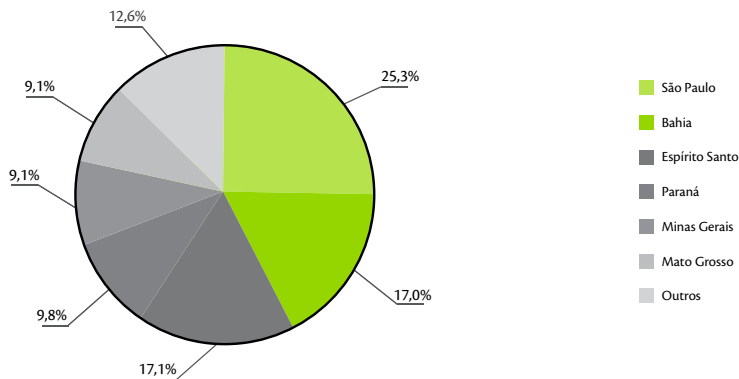


Figura 1 – Produtores de Pastas de Celulose - 2012

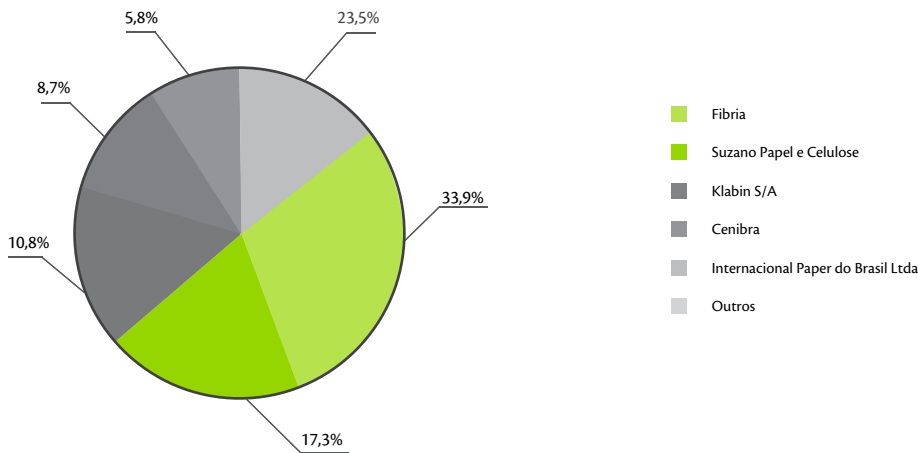


Figura 2 – Maiores Produtores de Celulose – 2012

Em 2012, os estados maiores produtores de pastas de celulose foram São Paulo (25,3% do total), Espírito Santo (17,1%), Bahia (17%) e Paraná (9,8%), como mostrado na Figura 1.





Naquele ano, as empresas responsáveis pela maior parte dessa produção foram Fibria (33,9% do total), Suzano Papel e Celulose (17,3%), Klabin SA (10,8%), Celulose Nipo-Brasileira SA (Cenibra) (8,7%) e International Paper do Brasil Ltda. (5,8%) (BRACELPA, 2013), como mostrado na Figura 2.

No que diz respeito ao destino da produção brasileira de pastas de celulose, 26,7% correspondem ao consumo interno dos produtores integrados. Do restante, 61,4% são exportados e apenas 11,9% são vendidos para produtores de papel no mercado interno (BRACELPA, 2013), como mostrado na Figura 3.

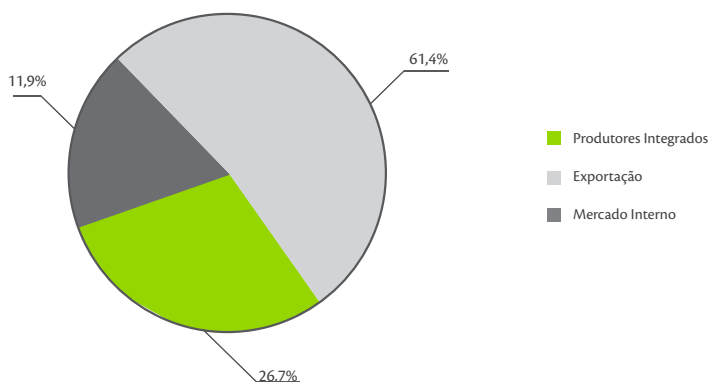


Figura 3 – Destino da Produção Nacional de Pasta de Celulose - 2012

### 3.2 Produção de papel

Segundo a Bracelpa, em 2012, os estados com maior produção de papel (Figura 4) foram São Paulo (41% do total), Paraná (20,8%), Santa Catarina (19,2%), Bahia (4,9%) e Minas Gerais (3,5%).

As empresas com maior produção de papel em 2012 (Figura 5) foram Klabin SA (17,2% do total), Suzano Papel e Celulose (12,8%), International Paper do Brasil Ltda. (10,2%), Grupo Orsa (3,2%) e Rigesa Celulose, Papel e Embalagens Ltda. (2,9%).

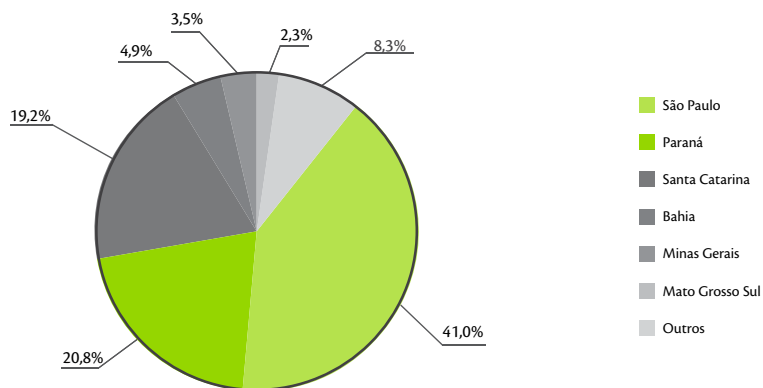


Figura 4 – Maiores Produtores de Papel - Estados - 2012

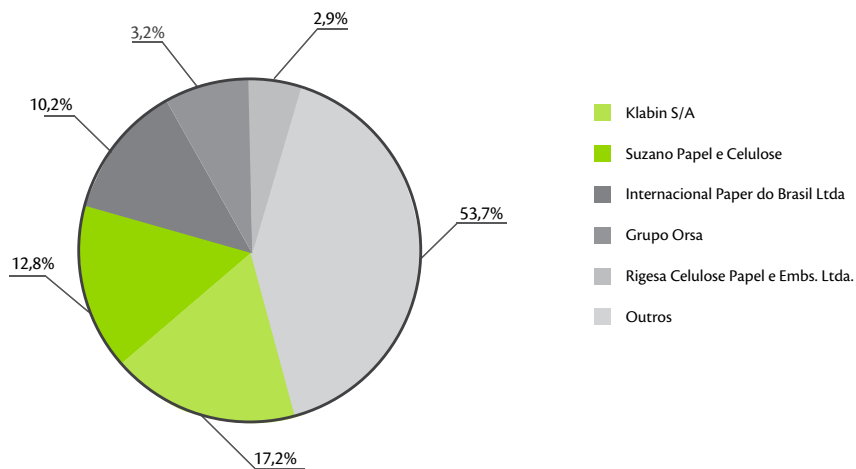


Figura 5 – Maiores Produtores de Papel - Empresas - 2012

Da produção total de papel em 2012 (Figura 6), 53,9% corresponderam a vendas para o mercado interno, 27,9% foram consumo próprio, sobretudo de papéis de embalagem, e 18,2% foram exportados (BRACELPA, 2013).

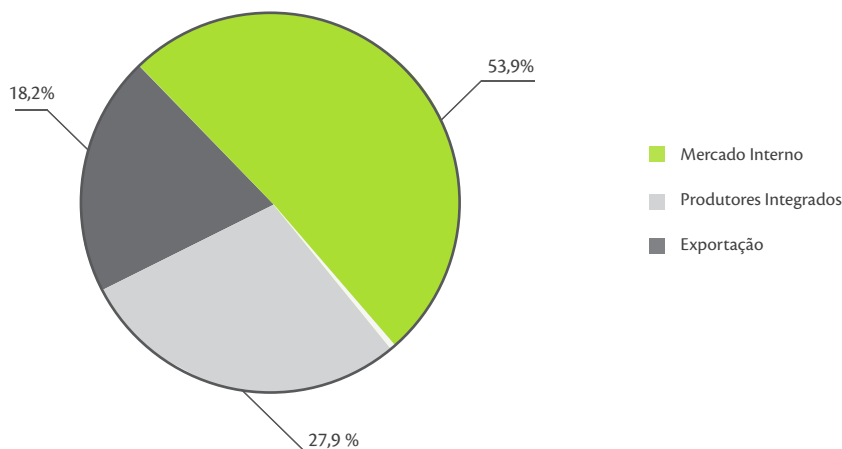


Figura 6 – Destino da Produção Nacional de Papel - 2012

### 3.3 Centros de pesquisa e universidades que se destacam nessas áreas no Brasil e no exterior

Como centros de pesquisa que se destacam em atividades florestais podem ser citados o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (Ipef), a Embrapa Florestas e a Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia (Cenargen), no Brasil. Existem ainda centros de pesquisa importantes, nessa área, no estado da Carolina do Norte/EUA, na África do Sul e na Austrália.

Outros importantes centros de P&D são: Innventia, cuja sede fica em Estocolmo, na Suécia, e as universidades de Grenoble (Centro Técnico e de Pesquisa em Papel de Celulose – CTP), na França, e de Toronto, no Canadá.

O centro de P&D Innventia destaca-se no desenvolvimento de processo de fabricação de celulose e papel, junto com o Centro de Pesquisas Técnicas da Finlândia (VTT) e o FPInnovations, um centro de pesquisas cooperativas no Canadá. Em território nacional, foi destacada a importância da Escola Theobaldo de Nigris, pertencente ao Senai, e a Universidade Federal de Viçosa.



### 1.3.1 Localização dos grupos de estudo sobre biorrefinaria florestal

Dada a importância recente focada na integração de novos negócios às plantas já existentes, bem como na concepção de novas plantas dotadas de maior elasticidade de negócios, vale ressaltar a dimensão nacional do aporte de recursos ao estudo sobre biorrefinarias que empregam biomassa florestal.

Essa terminologia recente relacionada à obtenção de produtos de alto valor agregado a partir de biomassa lignocelulósica tem sido tema central de diversos estudos em universidades e instituições de pesquisas brasileiras associadas a algumas poucas empresas do setor florestal nos segmentos de celulose e de energia.

De acordo com levantamento realizado sobre pesquisas relacionadas ao assunto biorrefinaria, o número de estudos tem crescido de forma expressiva. Em uma pesquisa bibliográfica para busca dos principais grupos de pesquisa envolvidos com esse tema no Brasil, foram encontradas mais de duas centenas de artigos científicos de pesquisadores nacionais publicados nos últimos anos reportando o assunto, sendo que as universidades federais situadas no Sudeste do Brasil vêm sendo as principais responsáveis pelos estudos, seguidas de outras universidades e centros de pesquisas, estando associados ou não a instituições internacionais.

Entre as instituições consideradas mais estruturadas para esse tipo de pesquisas e inovações, podem ser citadas as universidades públicas federais e estaduais brasileiras, tais como apresentadas na Tabela 5.



Tabela 5 – Lista de Instituições Nacionais

	Universidade	Instituto/Departamento
Sudeste	USP - Universidade de São Paulo	Instituto de Química
		Instituto de Eletrotécnica e Energia - IEE
		Departamento de Microbiologia/Instituto de Ciências Biomédicas
		Biologia Industrial
		Departamentos de Engenharia de Telecomunicações e Controle
		Engenharia Mecânica
		Engenharia Química
		Departamento de Administração
	USP - Universidade de São Paulo em Lorena	Departamento de Botânica/Instituto de Biociência
	USP - Universidade de São Paulo em São Carlos	Escola de Engenharia e Departamento de Biotecnologia
	UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas	Departamento de Engenharia Química
		Escola de Engenharia Química
		Instituto de Química
		Faculdade de Engenharia Mecânica
	UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro	Departamento de Tecnologia de Processos Bioquímicos
		Departamento de Engenharia Bioquímica
		Departamento de Engenharia Química
		Departamento de Química Inorgânica
		Departamento de Bioquímica
	UFF - Universidade Federal Fluminense	
	UFV – Universidade Federal de Viçosa	Departamento de Química
		Departamento de Engenharia Florestal
		Departamento de Bioquímica
	UFLA - Universidade Federal de Lavras	
	UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá	Departamento de Engenharia Mecânica
	UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro	
	UNESP- Universidade Estadual Paulista em Guaratinguetá	Departamento de Energia
		Departamento de Física, Química e Biologia



	Universidade	Instituto/Departamento
Sul	UFPR - Universidade Federal do Paraná	Departamento de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia
		Departamento de Engenharia Florestal
		Departamento de Química
		Engenharia Industrial da Madeira
	UEL - Universidade Estadual de Londrina	
	UEM - Universidade Estadual de Maringá	Departamento de Química
	FURG - Universidade Federal do Rio Grande	
		Departamento de Tecnologia dos Alimentos
	UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul	Departamento de Engenharia Química
		Instituto de Química
		Departamento de Química Inorgânica
	UFSM - Universidade Federal de Santa Maria	
	UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina	Engenharia de Energia
	UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
Nordeste	UNIVILLE - Universidade da Região de Joinville	
	UFPEl – Universidade Federal de Pelotas	Curso de Engenharia Industrial Madeireira
	UFC - Universidade Federal do Ceará	
	UFCG - Universidade Federal de Campina Grande	
	UFPE - Universidade Federal de Pernambuco	Departamento de Engenharia Química
Norte		Departamento de Antibióticos
	UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido	
	UFRB - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia	
	UFAM - Universidade Federal do Amazonas	
	UFPA – Universidade Federal do Pará	Faculdade de Engenharia Mecânica

Por outro lado, outros institutos e centros de P&D podem ser referenciados por disporem de grupos relevantes de pesquisadores que contribuem com publicações de artigos científicos sobre o tema:

- INT – Instituto Nacional de Tecnologia/RJ;
- Cenpes – Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello / Petrobrás – Rio de Janeiro e Sergipe;
- Embrapas (Fortaleza, Campina Grande, Brasília e São Carlos);
- Centro de Tecnologia Estratégicas do Nordeste/PE;
- Instituto de Tecnologia de Aracaju/SE;
- Fundação Oswaldo Cruz/SP;



- CTBE – Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol/ SP;
- CTC – Centro de Tecnologia Canavieira/SP;
- Associação Brasileira de Tecnologia de Luz Sincrotron/SP;
- Grupamento de Infraestrutura e Apoio de São José dos Campos/SP;
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo/SP;
- Senai-Mário Amato/SP;
- Novozymes Latin American/PR;
- Fermentec/SP;

Considerando as instituições internacionais, puderam ser destacados diversos grupos de pesquisa alocados nos países/instituições apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Lista de Instituições de Pesquisa Internacionais

País	Instituição
Canadá	Forestry Products Biotechnology and Bioenergy, University of British Columbia
	Centre for Biocomposites and Biomaterials Processing, Faculty of Forestry, University of Toronto
	Departments de Chemistry, Chemical Engineering and Civil, Queen's University
	FPIInnovations
	LignolInnovation
Estados Unidos da América	State University of New York, em Syracuse
	National Renewable Energy Laboratory, United States Department of Agriculture
	North Carolina State University
	University of Minnesota
	University of Maine
	Pacific Northwest National Laboratory
	Iowa State University
	University of Georgia
	Georgia Tech Institute
	Purdue University
Suécia	Uppsala University
	Royal Institute of Technology
	Innventia AB
	Chalmers University of Technology



País	Instituição
Finlândia	Lappeenranta University of Technology
	Aalto University
	Abo Akademi University
	VTT Technical Research Centre of Finland
Portugal	Universidade de Coimbra
	Universidade do Minho
	Universidade de Aveiro
China	South China University of Technology
França	International School of Paper, Print Media and Biomaterials
Espanha	Universidad de Córdoba
	Universidad de Coruña

Em pesquisas nacionais, o tema biorrefinaria está relacionado principalmente à produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos lignocelulósicos agroindustriais, especialmente o bagaço de cana-de-açúcar, embora outros resíduos como fibra de coco, casca de arroz, palha de cana, cavacos de madeira, do processamento do caju, lodo do tratamento de efluentes, bagaço de mandioca, sabugo de milho, grama, fibra de sisal, microalgas, licor negro Kraft, sejam também considerados em biorrefinaria.

Dessas pesquisas, as etapas de pré-tratamento do bagaço de cana para posterior hidrólise enzimática e fermentação têm sido estudadas para obtenção de etanol celulósico. Outra linha de pesquisa é o isolamento de nanocristais de celulose a partir de fibras vegetais para serem utilizados como reforço em matrizes poliméricas. Ainda, a degradação térmica da madeira para obtenção de produtos de alto valor agregado como, por exemplo, o furfural, o hidrometilfurfural, o dimetil éter, a acetona, o metanol, entre outros hidrocarbonetos, é reportada.

Considerando a importância da obtenção de alguns produtos de fontes renováveis em substituição aos mesmos originados de fontes não renováveis, alguns processos químicos relevantes são adotados para sintetizar moléculas de cadeias maiores a partir de moléculas de baixo peso molecular – *Gas-to-liquids* (GTL).

A utilização do metano ou do gás de síntese ( $H_2$  e CO) para obtenção de “petróleo sintético” a partir da reação catalítica de Fischer-Tropsch pode ser citado como exemplo de uma tecnologia antiga, mas de grande relevância para o tema biorrefinaria atual. Além da Síntese de Fischer-Tropsch, outras tecnologias térmicas, químicas e bioquímicas relevantes para o tema em questão podem ser





citadas: pirólise rápida ou convencional, craqueamento térmico ou catalítico, hidrocraqueamento, sacarificação e fermentação simultâneos (SSF), hidrólise e fermentação em separado (SHF).

Considerando os estudos levantados, é importante ressaltar que a degradação térmica da madeira para obtenção de diversos produtos de alto valor agregado, apesar de não ser um tema atual, pode ser, potencialmente, o caminho mais próximo para se obter tais produtos, os quais atualmente são originados de fontes não renováveis. Ainda, pode ser verificado que diversas tecnologias, hoje utilizadas nas refinarias de petróleo, poderão ser ajustadas para serem usadas na biorrefinaria florestal.

Embora os representantes das empresas nacionais do setor de celulose e papel declarem a intenção de desenvolverem trabalhos sobre o assunto, não foram encontrados trabalhos relevantes publicados em revistas científicas e que tenham sido originados a partir de grupos de pesquisa dessas empresas.

Por outro lado, universidades, empresas produtivas e instituições internacionais, especialmente dos Estados Unidos, Canadá, Finlândia e Suécia, têm desenvolvido estudos sobre a obtenção de produtos de alto valor agregado a partir de biomassa, especialmente da madeira, e a partir de subprodutos da indústria de celulose. Para o Brasil, a biorrefinaria a partir de fábrica de celulose pode ser um processo a ser adotado em médio prazo.

Entretanto, pôde ser diagnosticado em entrevistas setoriais que os pesquisadores desse tipo de industrialização no Brasil estão atentamente acompanhado as tendências mundiais de estudos sobre o tema nesse setor.

### 3.4 Conclusões

Conforme visto, historicamente, a produção nacional é mais relevante no estado de São Paulo, embora atualmente a produção de celulose tenha se deslocado para outros estados em função da necessidade de amplas áreas de terras de custo mais barato para aquisição. É também naquele estado onde se concentra o maior número de instituições que pesquisam a temática, tanto no que se refere a tecnologias maduras quanto para tecnologias em estágio de baixa maturidade.



Destaque-se o destino da produção nacional de pasta de celulose, em que se percebe a ênfase dada à exportação. Essa ênfase não é refletida na agregação de valor ao produto exportado, e sim na quantidade e nas especificações demandadas pelo mercado internacional.

Vale ressaltar ainda que parte considerável desse produto é destinada a produtores integrados num volume que se aproxima da terça parte da produção. O aproveitamento desse contingente de produtores integrados poderia resultar num excelente movimento para agregação de valor aos produtos, bem como para a introdução de novas modalidades de negócios por meio da instalação de biorrefinarias.

Conforme apresentado, especificamente nessa temática, o Brasil conta com 28 grupos de estudos já estabelecidos em todo o território nacional. As pesquisas realizadas por esses grupos poderiam ser utilizadas como alavancador da introdução de novas tecnologias no setor.



## 4. Cenário tecnológico

Para caracterizar o cenário tecnológico, buscou-se, inicialmente, analisar a cadeia produtiva e os desafios enfrentados pelo setor no que tange a eficiência energética. Buscou-se delinear as principais tecnologias e procedimentos que dão ênfase à eficiência energética como um todo e o potencial de aplicação destes no setor de celulose e papel. Tentou-se, ainda, desvendar as novas tecnologias, os *softwares* e procedimentos focados na eficiência energética que, apesar de disponíveis no mercado, ainda encontram pouca aplicação no contexto nacional.

Além das tecnologias consagradas e daquelas disponíveis ao mercado, tratou-se de levantar as tecnologias que ainda se encontram em fase de pesquisa e desenvolvimento e que, entretanto, apresentam melhores perspectivas de aplicação no segmento industrial aqui estudado.

Por fim, procurou-se analisar o quanto as biorrefinarias poderiam ser tratadas como portadores de inovação tecnológica e agregadoras de valor ao setor.

### 4.1 A cadeia produtiva, os principais desafios e a importância da eficiência energética na indústria brasileira de celulose e papel

A cadeia produtiva da indústria de celulose e papel é composta por uma base florestal, por produtores de celulose e por fabricantes de papel. No Brasil, a base florestal é constituída por florestas plantadas, de propriedade dos produtores de celulose ou de seus fornecedores de madeira. Há no país: (i) fábricas que só produzem celulose, a chamada celulose de mercado, vendida no mercado nacional ou exportada; (ii) fábricas que produzem tanto celulose quanto papel, as chamadas fábricas integradas; e (iii) fábricas que só produzem papel a partir de celulose virgem adquirida no mercado e/ou papel reciclado (aparas).

As fábricas que produzem celulose de mercado no Brasil são de grande porte e estão bem atualizadas tecnologicamente e em termos de práticas de gestão. As plantas integradas são de médio ou grande porte, com várias plantas modernas e eficientes, mas há unidades defasadas tecnologicamente. Já as fábricas que só produzem papel são de pequeno ou médio porte e, frequentemente, utilizam maquinário antigo com elevado consumo de energia.



Os principais desafios da indústria de celulose e papel no Brasil são: manter a liderança mundial na produção e exportação de celulose branqueada de fibra curta; aumentar a competitividade na produção de papel; modernizar as fábricas que produzem papel a partir de aparas e melhorar a atual estrutura de suprimento desse insumo; aumentar a produção de produtos de maior valor agregado; incrementar sua imagem, no Brasil e no exterior, como uma indústria verde que se preocupa em minimizar seus impactos ambientais negativos e consumir o máximo possível de fontes renováveis de energia ao longo de toda a sua cadeia produtiva; e expandir a área de florestas plantadas do setor para fomentar o potencial subotimizado da produção de celulose e papel do Brasil para atender a demanda maior gerada no cenário de biorrefinaria.

O custo da energia, sobretudo da energia elétrica, nessa indústria é elevado, assim como também é alto o seu potencial de autoprodução de eletricidade por meio da cogeração, tecnologia utilizada atualmente, no Brasil, bem aquém de suas possibilidades. Logo, a busca de ganhos de eficiência energética pode propiciar reduções significativas de custos, com importantes reflexos na competitividade dessa indústria, além de contribuir para a obtenção de ganhos ambientais e a consequente melhoria da imagem de indústria verde.

A seguir, são apresentadas e discutidas ações e tecnologias que podem propiciar ganhos de eficiência energética hoje e no futuro. Parte-se de medidas relativamente simples de redução de desperdícios de energia. São apresentadas, na sequência, algumas tecnologias e procedimentos eficientes de uso geral na indústria com grande potencial de aplicação nesse ramo industrial. Em seguida, são elencadas novas tecnologias, *softwares* e procedimentos eficientes para esse segmento industrial, já disponíveis no mercado. Finalmente, tecnologias ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento que apresentam boas perspectivas futuras de aplicação no setor são objeto de discussão.

## 4.2 Redução de desperdícios de energia

Potência motriz é o principal uso final da energia elétrica em fábricas de celulose e papel, e a existência de motores elétricos superdimensionados e motores antigos, de baixa eficiência, é a principal causa de desperdício desse energético nessas fábricas. Logo, a troca desses motores por outros de elevada eficiência e capacidade adequada pode reduzir bastante o desperdício (BAJAY, 1997; BERNI & BAJAY, 2010; KRAMER *et al.*, 2010).



Vapor d'água é o principal fluido térmico utilizado em fábricas de celulose e papel nos seguintes usos finais: aquecimento de processos, secagem e produção de potência mecânica em turbinas a vapor. Nas fábricas mais antigas e/ou onde não há manutenção apropriada, há perdas substanciais de vapor através de vazamentos, sobretudo nos purgadores utilizados na rede de distribuição. Monitoramento e manutenção adequada dos purgadores podem minimizar seu bloqueio e diminuir substancialmente as perdas a um custo bastante reduzido (BERNI & BAJAY, 2004; KRAMER *et al.*, 2010).

Outro componente do sistema de utilidades de uma fábrica de celulose e papel que costuma apresentar vazamentos é a rede de distribuição de ar comprimido. Nesse caso também, um bom monitoramento e uma boa manutenção podem sanar o problema a baixo custo. Há várias outras medidas de baixo e médio custo que permitem aperfeiçoar, do ponto de vista de consumo energético, sistemas de ar comprimido, incluindo a recuperação de calor dos compressores (KRAMER *et al.*, 2010).

Em fábricas de celulose e papel mais antigas, frequentemente, a taxa de recuperação de condensado é baixa. Incrementar essa taxa aumenta a eficiência total do sistema de vapor das fábricas, além de propiciar economias no consumo e no tratamento da água de reposição das caldeiras (BERNI & BAJAY, 2004; FOELKEL, 2010; KRAMER *et al.*, 2010).

Adotar uma espessura ótima dos isolamentos térmicos de tanques e linhas de vapor e água quente como aquele que minimiza o custo de investimento, incluindo a instalação, mais custo de manutenção e mais o custo do calor perdido através dos isolamentos pode diminuir as faturas de compra de combustível ou aumentar a disponibilidade de vapor para a geração de potência, com períodos de retorno atrativos para os empresários do setor de celulose e papel (IPT, 1985; KRAMER *et al.*, 2010).

Outra maneira de diminuir perdas, nesse caso, perdas de carga no escoamento de fluidos, é adotando o diâmetro ótimo para tubulações de redes de líquidos e gases (KRAMER *et al.*, 2010). O diâmetro ótimo é aquele que minimiza o custo de investimento, incluindo a instalação, mais o custo de recalque do fluido.



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

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

Mateos-Espejel *et al.* (2010) otimizaram, de forma integrada, os fluxos de calor e de água em uma fábrica canadense de celulose que emprega o processo Kraft. Eles conseguiram reduções de 26% no consumo de vapor e 33% no consumo de água da fábrica e a instalação de 44,4 MW de capacidade de cogeração, utilizando de forma interativa, em um modelo de simulação, várias técnicas analíticas e tecnologias que usualmente são empregadas de forma isolada na avaliação e no projeto de instalações industriais complexas, com usos intensos de energia térmica e de água, tais como:

- Análise de Pinch Point visando à recuperação interna de calor;
- Análise de Pinch Point visando à reutilização de água;
- Análise exergetica para eliminar operações onde há destruição de exergia por misturas não isotérmicas de fluxos;
- Aproveitamento de calor residual através de bombas de calor operando segundo um ciclo de absorção e posicionadas no processo com o auxílio de uma análise de Pinch Point (BAKHTIARI *et al.*, 2010);
- Recuperação de condensado; e
- Instalação ou ampliação de unidades de cogeração para aproveitar o vapor disponibilizado com as medidas de economia de energia adotadas.

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

Economias substanciais de energia térmica podem ser alcançadas por meio da busca de melhorias na eficiência de caldeiras, que são as maiores consumidoras de combustíveis nas fábricas de celulose e papel, por otimização da relação ar/combustível, monitoramento e controle contínuo para grandes caldeiras (CNI, 2010), limpeza das superfícies de troca de calor, tratamento adequa-



do da água da caldeira, reparos em isolamentos térmicos danificados, recuperação de calor da descarga de fundo e pré-aquecimento da água de alimentação e do ar de combustão, com o calor residual dos gases de combustão (BERNI & BAJAY, 2004; FOELKEL, 2010; KRAMER *et al.*, 2010).

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

Outra possibilidade bastante difundida nos países escandinavos é a queima desses resíduos em geradores de vapor de leito fluidizado (CLAYTON, 1995; FOELKEL, 2010; CNI, 2010). Essa categoria de gerador de vapor propicia a queima de vários tipos de combustíveis diferentes de maneira mais eficiente e com menores níveis de emissão de poluentes em comparação com as caldeiras convencionais.

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

Diversos segmentos industriais, sobretudo na indústria de alimentos e bebidas e na indústria química, utilizam evaporadores de múltiplo efeito em seus processos de fabricação. Esses evaporadores também são empregados na concentração do licor negro em fábricas de celulose que utilizam o processo Kraft. A recompressão térmica ou mecânica da água evaporada e sua utilização como vapor de processo nos corpos subsequentes dos evaporadores, assim como a adição de novos corpos até se atingir seis ou sete podem propiciar ganhos significativos de eficiência energética (IPT, 1990; BAJAY *et al.*, 1995).



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

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

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

O barateamento dos controladores eletrônicos de velocidade de motores elétricos tem aumentado o seu uso na indústria como um todo e, particularmente, na indústria de celulose e papel, sobretudo no controle de motores de grande porte, acionando partes da máquina de papel e bombas, ventiladores e compressores que operam com frequência com potências bem abaixo da nominal (BAJAY, 1997; BAJAY *et al.*, 1995; BERNI & BAJAY, 2004; BERNI & BAJAY, 2010; KRAMER *et al.*, 2010). A Asea Brown Boveri e a Siemens comercializam esses variadores no Brasil.

#### **4.4 Novas tecnologias, *softwares* e procedimentos eficientes já disponíveis no mercado para aplicação na indústria nacional de celulose e papel**

Nesta seção, são apresentadas novas tecnologias, *softwares* e procedimentos eficientes específicos para a indústria de celulose e papel disponíveis no mercado. A apresentação segue as etapas da cadeia produtiva dessa indústria.

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





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

A queima de resíduos florestais nas caldeiras de biomassa aumenta a autoprodução de energia elétrica. Essa prática é comum nos países escandinavos, sobretudo na Finlândia, mas não no Brasil (BERNI, BAJAY & ATHAYDE, 1996).

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

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

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

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

Na etapa de recuperação dos reagentes químicos, tecnologias que constituem o estado da arte, como recuperadores de calor residual otimizados para o forno de cal e o sistema compacto da Tampella que, simultaneamente, queima o licor negro e recupera, por meio de reações químicas, os reagentes em questão (IPT, 1990), podem reduzir o consumo energético dessa etapa do processo produtivo em mais de 30% (WORLD ENERGY COUNCIL, 1995).



A diminuição do teor de umidade da lama de cal proporciona economias de energia no forno de cal (BAJAY *et al.*, 1995).

Aumentos na produção e na eficiência das caldeiras de recuperação podem ser atingidos com aumento da concentração de sólidos no licor negro até um teor em torno de 80%, antes de sua queima nessas caldeiras (IEA, 2008; FOELKEL, 2010; KRAMER *et al.*, 2010).

Uma prática bastante adotada na Finlândia é a queima do licor negro em caldeiras de leito fluidizado, possibilitando reduções nas emissões de poluentes, principalmente do dióxido de enxofre, e maior estabilidade do processo de combustão (BARBELI & BAJAY, 2002). Além disso, a utilização de caldeiras de recuperação de leito fluidizado permite a elevação do relativamente baixo rendimento térmico de muitas caldeiras de recuperação convencionais para valores próximos a 85% (BAJAY *et al.*, 1995).

Segundo Clayton (1995), a otimização da distribuição da intensidade do refino e do consumo energético específico entre os diversos estágios do processo termomecânico de fabricação de pastas de alto rendimento (PARs) pode propiciar economias significativas de energia elétrica.

Economias de energia térmica na polpação termomecânica podem ser obtidas pelo uso mais intenso de recuperadores de calor (BAJAY, 1997; FRANCIS *et al.*, 2002; KRAMER *et al.*, 2010).

A polpação com antraquinona, com sulfito alcalino de antraquinona (ASAQ) e com sulfito neutro de antraquinona (NSAQ), e melhores combinações entre polpação mecânica e polpação química podem reduzir o consumo específico de energia nesse estágio do processo produtivo (WORLD ENERGY COUNCIL, 1995).

O aumento da consistência inicial da mistura fibra/água, de cerca de 1% para 8% a 15%, reduz a necessidade de movimentação de água e o consumo específico de energia elétrica na fabricação de papel (CLAYTON, 1995; MARTIN *et al.*, 2000; IEA, 2006).

O emprego de novas técnicas de secagem mecânica, utilizando prensas de sapatas, pode propiciar economias substanciais de vapor nos múltiplos cilindros que compõem a parte de secagem térmica da máquina de papel (BAJAY, 1997). As prensas de sapatas (*shoe presses*), também conhecidas como *long-nip-presses* e *extended-nip-presses*, constituem hoje a tecnologia estado da arte



na secagem mecânica de papel (IEA, 2006; FOELKEL, 2010; CNI, 2010). Kramer *et al.* (2010) estimam que elas proporcionam economias de vapor entre 2% e 15% na secagem térmica do papel.

A operação de secagem térmica é a principal consumidora de vapor na fabricação de papel. É importante, portanto, buscar melhorias na recuperação de calor do ar de exaustão ou do condensado na seção de secagem da máquina de papel (IEA, 2008; ROMANO, 2008; FOELKEL, 2010; KRAMER *et al.*, 2010).

Uma dessas melhorias envolve a instalação de capotas fechadas nas máquinas de papel a fim de aumentar a eficiência da recuperação de calor do ar de exaustão e diminuir o consumo de eletricidade dos ventiladores de exaustão (BERNI & BAJAY, 2010; MARTIN *et al.*, 2000; FOELKEL, 2010; KRAMER *et al.*, 2010).

Melhorias substanciais podem ser alcançadas pela otimização de parâmetros operacionais, utilizados na secagem térmica convencional com cilindros ociosos aquecidos por vapor e maximização da recuperação do calor residual desse processo. Laurijssen *et al.* (2010) relatam um ganho de 32%, obtido com:

- Aumento da temperatura do ar de exaustão e, conseqüentemente, da temperatura de ponto de orvalho, o que reduz o uso de calor na evaporação da água;
- Aumento na consistência dos aditivos agregados à folha de papel entre as seções de pré-secagem e secagem final, permitindo, com isso, uma diminuição na quantidade de água a ser evaporada;
- Utilização de dois recuperadores de calor, um para pré-aquecer o ar de secagem e outro para pré-aquecer a água do processo.

Ganhos de eficiência energética também podem ser obtidos pela utilização de uma nova tecnologia de secagem que emprega uma cinta de condensação, o que dá origem à sua denominação *condebelt*, abreviação do termo em inglês *condensing belt* (MARTIN *et al.*, 2000; IEA, 2006; FOELKEL, 2010; KRAMER *et al.*, 2010). Nessa tecnologia, desenvolvida pela empresa finlandesa Valmet desde 1975, a folha de papel é seca em uma câmara de secagem por meio de seu contato com uma cinta metálica contínua aquecida por vapor ou gás. A água evaporada atravessa telas de arame e condensa em uma banda de aço resfriada no outro lado da câmara. O condensado é retirado por pressão e sucção. As principais vantagens desse processo são a elevada taxa de secagem (em torno de 200 kg H<sub>2</sub>O/hm<sup>2</sup>), que propicia menores consumos energéticos específicos (2,6 – 3,6 MJ/kg H<sub>2</sub>O), e a possibilidade de substituir toda a seção de secagem da máquina de papel. Estimam-se



economias de vapor entre 10% e 20%, enquanto que o consumo de eletricidade deve permanecer o mesmo do processo convencional. Laurijssen *et al.* (2010) relatam que, por enquanto, só existem três instalações comerciais utilizando essa tecnologia: uma na Finlândia, inaugurada em 1996, e duas na Coreia do Sul, inauguradas em 1999 e 2003.

#### **4.5 Tecnologias ainda em fase de pesquisa e desenvolvimento que apresentam perspectivas futuras alvissareiras de aplicação nesse segmento industrial**

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

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

Ganhos significativos na produção de energia elétrica e na eficiência de sua geração em fábricas que produzem celulose segundo o processo Kraft podem ser obtidos por meio da gaseificação do licor negro e de resíduos da biomassa, antes de sua queima em unidades de cogeração operando segundo o ciclo combinado, eventualmente, com injeção de vapor nas turbinas a gás (BERNI & BAJAY, 1997; MARTIN *et al.*, 2000; BERNI & BAJAY, 2010; CNI, 2010). Segundo a Agência Internacional de Energia, a gaseificação do licor negro e sua utilização na geração de energia elétrica em uma planta de cogeração de ciclo combinado podem produzir economias de energia da ordem de 15% em plantas piloto e unidades de demonstração até 2015 (IEA, 2006).

Recentemente, o Institute of Paper Science and Technology da Georgia Tech, em parceria com o U.S. Department of Energy, desenvolveu um processo de caustificação direta junto com a gaseificação do licor negro em um reator de leito fluidizado recirculante (DoE, 2010). O processo de caustificação ocorre durante a gaseificação adicionando-se trititanato de sódio ao licor. A caustificação direta completa elimina o ciclo de cal tradicional, reduzindo o uso de combustíveis fósseis e os custos de produção. O titanato é recuperado por meio de uma reação de hidrólise



e misturado com o licor a ser processado. O gás de síntese produzido pode ser convertido em energia elétrica em uma planta de ciclo combinado ou, então, ser convertido em um combustível líquido.

Segundo Martin *et al.* (2000), a formação a seco da folha de papel (CNI, 2010) deve se difundir bastante no futuro, com um médio potencial de conservação de energia. Variantes dessa técnica utilizam etanol ou dióxido de carbono super crítico, que requerem menos energia para sua remoção do que a água (IEA, 2006).

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

A secagem térmica por impulsos melhora a secagem mecânica por meio da aplicação de temperaturas elevadas nas sapatas da prensa, reduzindo, dessa forma, a evaporação da água na seção de secagem térmica da máquina de papel e, por conseguinte, o consumo específico de vapor (MARTIN *et al.*, 2000; IEA, 2006; FOELKEL, 2010). Nesse equipamento, o papel é prensado entre um cilindro giratório muito quente e uma sapata côncava fixa. A pressão é cerca de dez vezes superior à das prensas de sapatas atuais. O teor de sólidos da folha de papel na saída da prensa varia entre 55% e 78%, a taxa de secagem é muito elevada – 500 a 8.000 kgH<sub>2</sub>O/h.m<sup>2</sup> – e o consumo energético específico é baixo: 0,55 – 1,4 MJ/kgH<sub>2</sub>O. Apesar de um histórico de 25 anos de P&D, apoio governamental e envolvimento de um fabricante de máquinas de papel (a Beloit), Laurijsen *et al.* (2010) afirmam que essa tecnologia ainda não está provada no mercado. A patente do processo pertence à empresa finlandesa Valmet (MARTIN *et al.*, 2000).

O conceito de biorrefinaria vem sendo discutido desde a década de 1970, mas somente nos últimos anos é que estudos mais aprofundados passaram a ser desenvolvidos, sobretudo na União Europeia, com financiamentos substanciais.

Conforme ilustrado na Figura 7, basicamente, uma biorrefinaria consiste na utilização de biomassa em geral, assim como produtos derivados dela, como, por exemplo, aparas de papel, para produzir, em um mesmo local, calor, energia elétrica, biocombustíveis, como o etanol, e biomateriais, como o papel. As emissões de CO<sub>2</sub> associadas à produção desses múltiplos produtos são compensadas pela absorção desse gás durante a fase de crescimento da fonte de biomassa utilizada.

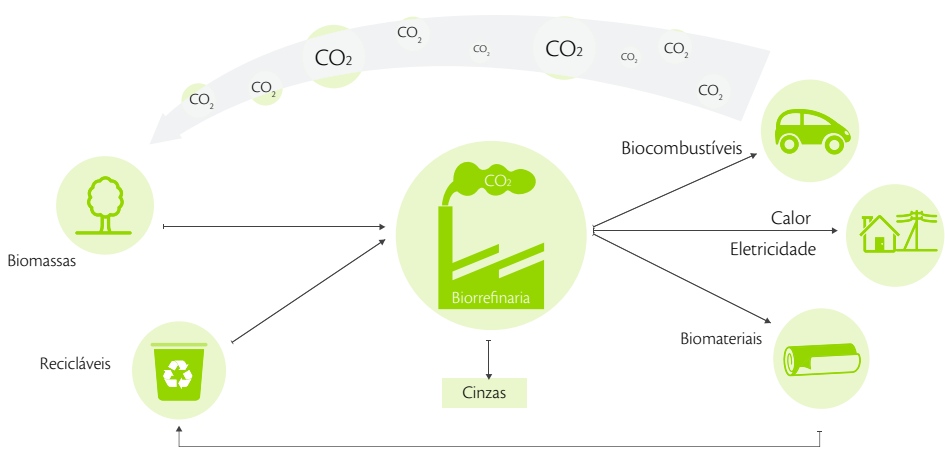


Figura 7 – Ilustração dos princípios associados a uma biorrefinaria

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

Como diversos tipos de produtos podem ser obtidos de diferentes tipos de matérias-primas oriundas da biomassa, o projeto de uma determinada biorrefinaria depende das matérias-primas mais econômicas disponíveis e dos produtos que uma pesquisa de mercado indicar como sendo os mais lucrativos de serem produzidos por essa biorrefinaria.

Biorrefinarias podem ser construídas em etapas, a partir, por exemplo, de fábricas de celulose e papel ou usinas de açúcar e álcool já existentes, ou, então, elas podem ser concebidas, desde o início, como empreendimentos multiprodutos, utilizando, eventualmente, múltiplas matérias-primas oriundas da biomassa. No primeiro caso, os processos das fábricas originais devem ser adaptados às novas atividades, de forma a se aperfeiçoar a eficiência do sistema como um todo. Biorrefinarias têm sido concebidas recentemente para consumir simultaneamente matérias-primas de base florestal e matérias-primas oriundas de outros tipos de plantas.



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

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

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

Nos EUA, já está sendo comercializado um reator contínuo que utiliza a hidrólise ácida para converter matéria-prima composta por celulose em açúcares fermentáveis (pentose, hexose, ou glucose). O reator tem dois estágios. A função do segundo é recuperar calor residual e ácidos para reutilização no primeiro estágio (DoE, 2010). Esses açúcares, por seu turno, podem ser convertidos em etanol ou outros produtos químicos orgânicos de interesse comercial.



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

Nanotecnologias apresentam boas perspectivas, no médio e no longo prazo, de aplicações revolucionárias na indústria de celulose e papel, envolvendo, por exemplo, novos usos para o papel, novos produtos de papel e produtos inteligentes produzidos a partir de fibras. Pesquisas nessas direções já estão em curso em diversos países, como Finlândia, Canadá e Estados Unidos da América (REITZER, 2007).

## 4.6 Biorrefinarias como inovação tecnológica

Ganhos de eficiência energética têm sido obtidos em algumas fábricas como resultado indireto de ações almejando melhorias da produtividade industrial e minimização de impactos ambientais negativos.

Muitas medidas de eficiência energética requerem apenas redução de desperdícios de energia ou adoção de tecnologias e procedimentos eficientes de uso geral na indústria, enquanto que outras medidas demandam investimentos em novas tecnologias, *softwares* e procedimentos eficientes específicos para esse ramo industrial. Algumas destas últimas medidas são processos que constituem o estado da arte e estão disponíveis no mercado, enquanto outras ainda estão no estágio de pesquisa e desenvolvimento.

A maior parte do progresso técnico nesse ramo industrial, particularmente no que diz respeito à eficiência energética, tem ocorrido de forma gradual, com pequenos avanços e poucos saltos qualitativos, como, por exemplo, o processo Kraft de fabricação de celulose. Uma boa oportunidade para outro salto qualitativo é a transformação da fábrica de celulose e papel tradicional em uma biorrefinaria de base florestal.





No programa sueco de pesquisas intitulado Ecocyclic Pulp Mill – KAM, estudou-se a localização, em um mesmo sítio, de uma fábrica de celulose e de uma destilaria de etanol (THE SWEDISH ENERGY AGENCY, 2008). A fábrica de celulose utilizava um processo Kraft que era o estado da arte e produzia excedentes consideráveis de combustíveis na forma de cascas de árvores e lignina. Uma das principais áreas de pesquisa era como utilizar da forma mais eficiente e econômica esse excedente. No caso de referência (a fábrica de referência), todo o combustível excedente era usado para produzir vapor empregado na geração de eletricidade. Uma das alternativas analisadas foi a utilização desses excedentes na produção de etanol a partir da celulose. Um estudo similar aplicado às condições brasileiras, envolvendo a produção de etanol de primeira geração por meio da rota tradicional de fermentação, etanol de segunda geração a partir de bagaço da cana-de-açúcar, palha da cana e resíduos da fábrica de celulose e geração de eletricidade excedente a partir dos resíduos disponíveis em ambos os tipos de instalações industriais, poderia ser mais compensador para o Brasil do que para a Suécia.





## 5. Biorrefinarias – visão de futuro

Biorrefinarias podem ser entendidas como unidades industriais de processamento e conversão de biomassas com a finalidade de obter bens vendáveis de maior valor agregado.

Como principais produtos de uma biorrefinaria citam-se:

- Biocombustíveis sólidos, líquidos e/ou gasosos (metano, hidrogênio, etanol, gás combustível resultante da gaseificação, bio-óleo, carvão vegetal, etc.);
- Eletricidade e vapor gerados em termoelétricas com cogeração à base de biomassa;
- Produtos químicos que são considerados insumos para a indústria química (lignina, xilose, dimetil-éter, furfural, gás de síntese, metanol, etc.).

As biorrefinarias podem ser integradas aos processos de produção de celulose e papel, pois tanto os resíduos gerados no processo industrial quanto diversos produtos intermediários do processo de fabricação de celulose podem ser integrados e aproveitados pelas biorrefinarias.

São consideradas interessantes oportunidades para as diversas indústrias de base florestal, agregando mais valor a esses negócios, além de darem grande ênfase a estudos tecnológicos em nível internacional.

As principais linhas para as biorrefinarias e que estão sendo consideradas com potencial de sucesso são:

- Separação da lignina como combustível ou como matéria-prima para a indústria química;
- Produção de álcoois a partir dos carboidratos da biomassa florestal;
- Gaseificação da biomassa para produção de gás de síntese ou gás combustível;
- Pirólise rápida da biomassa para produção de bio-óleo;
- Produção de combustíveis sólidos ou material pré-modificado para aumento do poder calorífico;
- Manufatura de produtos químicos como: biopolímeros, furfural, xilitol, dimetil-éter, etc.;
- Produção de nanocristais de celulose.



## 5.1 Biorrefinarias frente à realidade brasileira

Existem centenas de arranjos potenciais para as biorrefinarias, desde um simples digestor de esterco de suínos para produção de biogás até sofisticadas instalações industriais integradas aos processos tradicionais de produção de celulose, manufaturando fibras de celulose para papel, bioenergia, gás de síntese, dimetil-éter, hidrogênio, gás combustível ou derivados de lignina.

O conceito e a prática industrial com biorrefinarias não são novos, mas a atenção sobre todo o potencial que eles representam passou a ser acelerada a partir do início desse século. Isso porque as biorrefinarias passaram a ser enxergadas como uma das maneiras que a sociedade humana tem para diminuir sua dependência do petróleo fóssil, que supostamente está em rota de exaustão. Em função disso, os preços elevados desse produto fóssil oportunizam a busca de alternativas tecnológicas para a produção de energéticos, plásticos e polímeros a partir de matérias-primas renováveis.

A grande força alavancadora para esse crescimento, que pode até mesmo ser considerada uma “biomania”, tem sido a busca de bioenergéticos. Já que as biomassas estocam grandes quantidades de energia na forma de carbono orgânico, elas têm sido vistas como a principal forma de se obter energia no futuro. Além disso, as biomassas apresentam vantagens inquestionáveis em relação aos combustíveis fósseis, tais como: renovabilidade, flexibilidade, economicidade, balanço de carbono, imagem, credibilidade e interesse político em inúmeros países.

As oportunidades de produção e consumo de combustíveis, espumas, filmes e plásticos verdes já não são mais sonhos, mas sim realidades que ganharão cada vez mais espaço nos mercados, em geral, ávidos por produtos alternativos ecologicamente mais corretos.

Tendo em vista as inúmeras alternativas tecnológicas para os arranjos conhecidos como biorrefinarias, é provável que muitas das atuais proposições tecnológicas não vinguem, enquanto algumas outras certamente crescerão e poderão ocupar posições de destaque no mundo dos negócios em poucas décadas. Atualmente, especula-se, estuda-se, fala-se e imagina-se muito sobre arranjos tecnológicos para biorrefinarias.

Essas proposições têm avaliado diferentes tipos de biomassas vegetais, tais como resíduos agrícolas (palhas de cereais, casca de arroz, entre outros), culturas de ciclo curto e alta produtividade fotossintética (capim-elefante, florestas plantadas, etc.), cana-de-açúcar e seu principal resíduo



(bagaço), resíduos orgânicos municipais e industriais, resíduos florestais e madeireiros (casca das árvores, serragem, entre outros).

Enfim, qualquer biomassa que possa ser disponibilizada de forma segura e regular em grandes quantidades já se habilita como candidata para ser uma matéria-prima importante para alimentar uma biorrefinaria.

Por biomassa entende-se qualquer tipo de material biológico de constituição orgânica, podendo variar desde colônias de microrganismos até enormes árvores. Apesar de todos os seres vivos serem considerados como formados por biomassa, o foco para os negócios com base na biomassa está direcionado para a biomassa vegetal, aquela que pode ser obtida pela fotossíntese.

A fotossíntese é uma reação de enorme simplicidade realizada pelos organismos vegetais clorofilados. Através dos cloroplastos, as plantas consomem a energia solar e a convertem em compostos orgânicos de carbono ricos em energia, conforme equação simples mostrada na Figura 8.

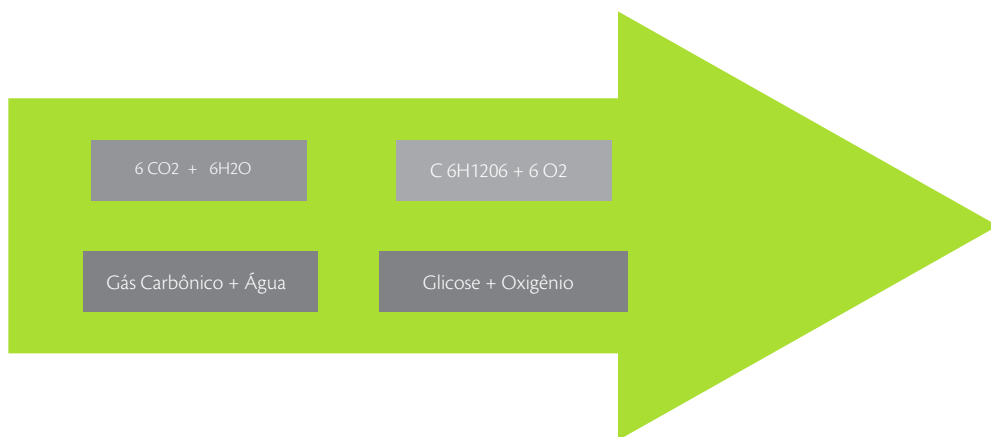


Figura 8 – Representação – Equação da Fotossíntese

A fotossíntese é inquestionavelmente a fonte de biomassa e uma reação que, se fosse dominada pela inteligência humana, poderia representar a geração de alimentos e de combustíveis para abastecer a humanidade e todas as suas complexas interações biológicas.



Acredita-se que, atualmente, o homem aproveita uma fração muito pequena de toda a biomassa formada pelas plantas do planeta: supõe-se que não supere 4% do total produzido. Existe, portanto, enorme potencial não apenas para se consumir parte dessa biomassa já pronta, mas também para se produzir mais biomassa em fazendas especializadas e desenhadas para converter o poluente e indesejado gás carbônico atmosférico em material orgânico. Esse material orgânico produzido pode ser, então, a fonte de abastecimento das biorrefinarias.

Apesar de existirem muitos sonhos, também existe muita determinação empresarial, política e científico-tecnológica para se buscarem novos caminhos mais verdes para o desenvolvimento humano. Toda essa turbulência tecnológica atual existe exatamente para a busca de modelos competitivos e mais sustentáveis que possam cumprir esses papéis e finalidades.

As rotas tecnológicas e científicas têm sido distintas entre os diferentes países, até mesmo pelos diferentes tipos e disponibilidades dessas biomassas. Em países europeus, a atenção tem sido concentrada em resíduos orgânicos de distintas naturezas: florestais, agrícolas, industriais e domésticos, da criação de animais (estercos) e da demolição de estruturas (madeira). Já em países em desenvolvimento e que dispõem de amplas áreas agriculturáveis, o foco têm sido as culturas agrícolas e florestais para produção de biomassa na forma de palhas, grãos, materiais lignocelulósicos (madeira e casca de árvores), caldo e bagaço de cana-de-açúcar.

O Brasil tem se mostrado participativo, atento e determinado em desenvolver biorrefinarias. Afinal, há no país dois dos exemplos mais admirados pelo restante do mundo, que são a cultura da cana-de-açúcar e as plantações de eucalipto. Ambos são excepcionais fontes de biomassas que conseguem alavancar indústrias poderosas e em pleno crescimento, que são as indústrias do açúcar e do álcool e a indústria de base florestal (celulose de mercado, papel, siderurgia à base de carvão vegetal, painéis de madeira, moveleira, etc.).

O país conta hoje com uma área plantada com cultivos agrícolas que corresponde a aproximadamente 80 milhões de hectares, porém dispõe de cerca de 180 milhões de hectares de pastagens, em muitos casos de baixo nível de utilização, as quais podem ser convertidas em plantações para produção de biomassa. As plantações de florestas de eucalipto, pinus, acácia-negra, seringueira, teca, paricá e guanandi atingem pouco mais de sete milhões de hectares, enquanto as áreas plantadas com cana-de-açúcar atingem aproximadamente oito milhões.



Portanto, fica claro que esses exemplos atuais de geração de biomassa podem ser vetores para abastecer novos modelos de biorrefinarias, pois têm amplo potencial de crescimento como áreas plantadas e como novos e interessantes negócios empresariais. Existem inúmeros fatores positivos para alavancagem desses negócios:

- Potencial de produção de grandes estoques de biomassa de forma renovável e sustentável;
- Enorme diversidade de fontes potenciais de biomassas;
- Excepcionais oportunidades para a agricultura e para o setor de base florestal que se apoia em plantações florestais;
- Revitalização de comunidades agrícolas;
- Revitalização de processos industriais obsoletos e de baixa eficiência energética;
- Grandes oportunidades de ecoeficiência para os setores industriais geradores de resíduos orgânicos e poluentes aéreos;
- Aumento das remoções dos gases de efeito estufa e consequente estoque de carbono, redução de poluentes hídricos (carga orgânica) e resíduos sólidos (lixo orgânico industrial e doméstico);
- Maior efetividade na utilização dos recursos naturais;
- Redução da dependência em recursos naturais não renováveis;
- Oportunidades para ampliação do portfólio de produtos industriais de maior valor agregado;
- Desenvolvimento de propriedade intelectual e industrial;
- Utilização desses novos desenvolvimentos para atendimento das necessidades futuras da sociedade.

As biorrefinarias podem ser unidades industriais autônomas e especialmente projetadas para essa finalidade (conceito descentralizado) ou podem ser integradas a indústrias já existentes (conceito centralizado). Exatamente por isso, matérias-primas, produtos obtidos e processos industriais serão variados e diversos.

Cada biorrefinaria deve ser projetada de forma a buscar o necessário equilíbrio entre as variáveis tecnológicas, econômicas, ambientais e sociais. O conceito é análogo ao aplicado nas refinarias de petróleo, que produzem múltiplos produtos a partir da matéria-prima petróleo. Entretanto, as refinarias de petróleo são modelos bem mais simples se comparados aos modelos que estão sendo desenvolvidos para as biorrefinarias movidas a biomassas. Isso em função da diversidade de biomassas, processos industriais e produtos que podem ser produzidos para diversos mercados.



Acredita-se, por isso mesmo, que novos modelos industriais estarão sendo desenvolvidos e implementados em conformidade com cada situação regional. Alguns terão seu berço em indústrias existentes, como é o caso da indústria de celulose e papel; outros modelos serão absolutamente novos e inusitados.

Há, por isso, muita expectativa sobre as biorrefinarias, pois elas estão sendo vistas como a mais promissora estrada para a criação de novos modelos industriais e empresariais. Na maioria dos casos, esses modelos já serão desenhados para maiores ecoeficiência e sustentabilidade. Todavia, para assegurar a vantagem, a sustentabilidade deve ser uma diretriz para essa tendência.

Qualquer que seja a biorrefinaria, sua meta é fracionar a biomassa em alguns produtos por meio de rotas tecnológicas em muitos casos já conhecidas e comprovadas. É o caso da gaseificação e da pirólise rápida de materiais lignocelulósicos, que permitem obter tanto gases quanto líquidos passíveis de serem convertidos em produtos químicos e/ou biocombustíveis.

Entretanto, existem rotas tecnológicas completamente desconhecidas e que precisam ser aperfeiçoadas para viabilização dos processos, tanto em termos de economia quanto de qualidade e eficiência de conversão. É o caso da produção de etanol de segunda geração a partir de resíduos lignocelulósicos ricos em lignina e em carboidratos de cinco carbonos em sua unidade monomérica (por exemplo: xilanas constituídas de unidades de xilose). Também é o caso da extração e derivação de compostos de lignina para usos em fibras de carbono e adesivos.

Dentre todas as alternativas tecnológicas, as mais simples e de imediata aplicação são as que podem converter a biomassa em biocombustíveis sólidos para combustão direta. Apesar de simples e conhecidas há milhares de anos, essas alternativas agregam pouco valor à biomassa.

Entretanto, existem diversas empresas que estão focando a biomassa barata como fonte de combustíveis sólidos pela compactação e venda dela como briquetes, pellets e até mesmo como lenha. Esse modelo está distante de ser considerado inovador e de alta tecnologia.

Por outro lado, a simples adição de um processo de torrefação da biomassa pode produzir um biogás combustível e um material sólido de maior poder calorífico que pode ser convertido em briquetes mais valiosos para atender mercados mais exigentes. Ou seja, agrega-se alguma tecnologia e algum valor adicional aos produtos gerados. Por outro lado, existem modelos muito mais





complexos que envolvem o fracionamento termoquímico ou enzimático da biomassa e depois a conversão dos produtos intermediários em álcoois, furfural, dimetil-éter e biodiesel.

Talvez seja por toda essa complexidade de alternativas diversificadas que o processo de instalações de unidades industriais esteja ocorrendo de forma menos intensa do que as pesquisas que vêm sendo realizadas no mundo todo. O empresariado, com certeza, está avaliando e tentando identificar alternativas tecnológicas que possam ser vencedoras, aquelas com chance de sucessos no longo prazo.

Deve-se recordar que qualquer processo industrial necessita pagar seus investimentos e resultar em dividendos para os acionistas. É por isso mesmo que muitos investidores estão ainda cautelosos para investir grandes somas de dinheiro em processos inéditos, mas que possam se obsoletar em relação a outros desenvolvimentos mais eficientes.

Em função disso, talvez o modelo mais promissor no momento seja o surgimento de biorrefinarias em fábricas existentes de alguns setores grandes usuários de biomassa, como os setores de celulose e papel, alimentício, produtos energéticos, químico e outros. Com isso, as biorrefinarias vão nascendo e se aperfeiçoando de forma associada a negócios existentes e bem-sucedidos que ajudarão a sustentar esse desenvolvimento sem representar grandes riscos aos investidores.

A tendência tem sido a instalação de pequenas unidades experimentais para se produzir um novo produto a partir de um excedente industrial. Esse novo produto pode ser algo para venda direta ao consumidor (etanol, metanol, etc.) ou um produto intermediário para alimentar outro tipo de indústria (nanocelulose, terebintina, lignina, gás de síntese, etc.). Como alguns desses processos tecnológicos são conhecidos e já fazem parte das tecnologias industriais comprovadas, o risco é minimizado e a atratividade é maior para os investidores.

Algumas indústrias, como a indústria de celulose e papel e indústria química, são usuárias de inúmeras (ou de quase todas) operações unitárias da engenharia química. Isso significa que a introdução de alguma nova área industrial para converter biomassa não representaria uma alteração substancial nas rotinas operacionais.

Com isso, suas fábricas podem ser modernizadas pela introdução de novos conceitos para maior agregação de valor a partir dos processos em operação. Em geral, as empresas industriais são bastante proativas para investirem na conversão de resíduos industriais em novos produtos. Ou seja,



em vez de investirem em estações de tratamento de resíduos (que não agregam valor algum, só custos), as empresas podem usar esses resíduos para novos processos de manufatura, que geram novas receitas e resultados para elas. É o caso, por exemplo, da gaseificação de resíduos vegetais para produção de gás combustível ou de gás de síntese.

O gás combustível pode ser utilizado como bioenergia, substituindo o óleo combustível fóssil em alguma unidade industrial. No caso das fábricas de celulose Kraft, essa energia renovável tem especial interesse na alimentação dos fornos de cal.

## 5.2 Introduzindo o conceito de biorrefinarias em fábricas de celulose e papel

Fábricas de celulose são excelentes plataformas para se instalarem biorrefinarias integradas de múltiplos produtos. As oportunidades são inúmeras e os arranjos industriais possíveis são amplos e diversificados.

Uma biorrefinaria de celulose é uma unidade industrial complexa, como já o é uma fábrica de celulose, que tem como metas obter a máxima utilização da biomassa lignocelulósica ingressante como matéria-prima para a produção simultânea de fibras celulósicas, produtos químicos, energia e energéticos.

Para ser viável, uma biorrefinaria integrada no setor de celulose e papel precisa:

- Ser um negócio economicamente viável;
- Ter aumento de receitas e de resultados em relação ao modelo convencional de produção unicamente de celulose e/ou papel;
- Ter produção tecnologicamente eficiente e com custos competitivos aos preços de venda dos produtos nela manufaturados;
- Melhorar a agregação de valor para os novos produtos e para toda a unidade industrial integrada;
- Ter processamentos industriais ambientalmente corretos;
- Ter como base o uso de biomassas (resíduos de materiais do processo ou das florestas) que não estejam sendo utilizados para a produção das fibras de celulose e/ou de papel;



- Ter aumento no portfólio de produtos, sendo que os novos produtos devem ser atrativos, como é o caso dos biocombustíveis e dos derivados de lignina;
- Ter mercados atrativos para os diversos produtos fabricados na unidade industrial;
- Ter ampla integração em seus processos para máxima ecoeficiência, mínimos desperdícios e mínimo impacto com poluentes;
- Ter processos novos que não inviabilizem ou prejudiquem os processos e produtos tradicionais do setor (celulose e papel);
- Melhorar a eficiência de reciclagem dos resíduos industriais e florestais;
- Ser carbono neutro ou gerar carbono orgânico renovável e reciclável;
- Ter alinhamento com as novas tendências mundiais do setor em termos de diversificações (com produção de energia, produtos químicos e biocombustíveis);
- Permitir vantagens associadas ao crescimento da escala de produção das fábricas de celulose, que hoje já atinge cerca de 1,5 milhão de toneladas por ano em uma única unidade industrial.

Uma das características típicas do setor de celulose e papel é seu tradicionalismo em relação às suas tecnologias, produtos e processos. O setor é muito enraizado no conceito da utilização de tecnologias comprovadas e tem aversão ao risco para investir em rotas tecnológicas ousadas e inéditas. Isso é até certo ponto compreensível, pois os investimentos em novas fábricas de celulose atingem somas altíssimas (uma nova fábrica de celulose no estado da arte tecnológico pode custar um investimento entre 1,5 e 2,5 bilhões de dólares americanos).

Em razão disso, o empresário não quer correr o risco de errar e precisa de um projeto que vença rapidamente a curva de aprendizado e se torne rentável no menor espaço de tempo possível. Caso contrário, os impactos nas finanças do negócio podem ser altíssimos.

Por outro lado, tem existido uma nova postura em relação aos negócios do setor. As modernas e eficientes fábricas de celulose Kraft branqueada para venda no mercado dispõem de excedentes energéticos (eletricidade e vapor), o que as tem levado ao desenvolvimento de novos arranjos industriais conhecidos como ilhas químicas. Essas ilhas são estabelecidas em parcerias com a indústria química para utilização do excedente energético para a produção de gases industriais (oxigênio, gás carbônico, nitrogênio, ozônio, dióxido de enxofre, cloro) ou de produtos químicos diversos (soda cáustica, hipoclorito de sódio, sulfato de alumínio, dióxido de cloro, clorato de sódio, carbonato de cálcio, cal queimada, sulfato de sódio, etc.).



Em adição a isso, diversas unidades de fabricação de celulose de mercado disponibilizam seus excedentes de eletricidade para o sistema elétrico nacional, vendendo indiretamente essa sobra de energia para a sociedade.

Tanto a indústria química quanto a rede integrada de geração e abastecimento público de eletricidade estão sendo alavancadoras de mudanças nas linhas de negócios das modernas fábricas de celulose Kraft para venda ao mercado. Com isso, o antigo conceito de foco em um único produto (celulose de mercado) está gradualmente migrando para a integração em multiprodutos.

Importante salientar que as parcerias são vitais para que o conceito de biorrefinarias integradas se converta em sucesso. Nada melhor do que a integração com a indústria química e com a indústria de geração de energia para que as biorrefinarias cresçam e se multipliquem, em número e em complexidade. Com isso, as ilhas químicas de hoje poderão se converter em arquipélagos ou arranjos produtivos diversificados, tendo a fábrica de celulose como a empresa-âncora.

Uma coisa é certa: as fábricas de celulose de mercado no Brasil são grandes produtoras de biomassa florestal. Elas podem e devem agregar mais valor aos produtos derivados dessa biomassa. Vender biomassa como combustível sólido na forma de *pellets* ou briquetes é um modelo de muito baixa agregação de valor, mesmo que possa parecer um negócio atrativo em função da demanda desses produtos, especialmente na Europa.

A biorrefinaria integrada só interessará ao setor de celulose e papel brasileiro se o resultado global dessa integração for significativamente melhor do que o que se obtém apenas com a fábrica de celulose e/ou papel. Isso porque muitos empresários do setor enxergam esses novos negócios como ainda desconhecidos e com possibilidades de afetar negativamente a qualidade dos processos e produtos e também o resultado financeiro da fábrica de celulose de mercado.

Além disso, a produção de celulose é um dos melhores negócios para a biomassa florestal. Para uma mesma quantidade de madeira, a conversão dessa biomassa em fibras celulósicas rende atualmente muito mais do que se essa biomassa fosse utilizada para produção de etanol combustível.

Entretanto, as tecnologias em desenvolvimento devem permitir que o setor mantenha sua produção de celulose, mas também desenvolva outros produtos que serão discutidos adiante.



A produção de papel em fábricas não integradas (pela compra de celulose ou reciclagem do papel) oferece muito menos oportunidades para a implantação de biorrefinarias. Isso porque suas disponibilidades de biomassa são reduzidas.

Portanto, as biorrefinarias mostram-se mais atraentes para fábricas de celulose de mercado e para fábricas integradas de papel (que produzem a sua própria necessidade de celulose para fabricar papel na mesma unidade industrial).

Diversas fábricas de celulose já trabalham com o conceito de biorrefinarias integradas. Fábricas de celulose obtida pelo processo sulfito já nascem dentro desse conceito. É o caso das fábricas que se autoproclamam como sendo biorrefinarias, como Borregaard, Domsjö, Lenzing, Tembec, entre outras.

Outras fábricas, que produzem celulose para dissolução a partir da madeira valendo-se do processo pré-hidrólise Kraft, têm condições imediatas de se converterem em biorrefinarias integradas pelas facilidades que esse processo oferece para que isso aconteça. É o caso, por exemplo, da empresa Bahia Specialty Cellulose, que possui disponível em seu processo um líquido da hidrólise ácida da madeira que é muito rico em açúcares hemicelulósicos degradados e passíveis de fermentações enzimáticas.

Algumas fábricas Kraft já atuam com integração de produtos, fabricando outros produtos como terebintina, metanol, *tall oil* e bioenergia (eletricidade por cogeração, hidrogênio, etc.) para venda ao mercado externo ou mesmo para consumo próprio. É o caso da Klabin (Brasil), Arauco planta Nueva Aldea (Chile), entre outras.

Com isso, ao invés de trocar de negócios, as empresas estarão alargando seu negócio atual, reinventando seus processos e produtos, uma postura sábia e que mantém o foco no negócio principal da empresa, ao mesmo tempo em que vai gradualmente migrando para o conceito mais amplo das biorrefinarias integradas.

Fábricas de celulose constituem-se em excelentes alternativas para se converterem em biorrefinarias integradas porque:



- São grandes usuárias de biomassa;
- Têm tradição secular no uso e aproveitamento da biomassa florestal;
- Não são empresas sazonais – a biomassa florestal está disponível o ano todo para seus processos, desde que a expansão das áreas de florestas plantadas seja compatível com o aumento da produção do setor;
- São desenvolvidas com a filosofia de garantia de suprimento de madeira, ou seja, a biomassa não falta aos processos;
- Contam com infraestrutura florestal e de logística para produção, colheita, armazenamento e transporte da biomassa florestal;
- Possuem florestas manejadas com sustentabilidade e ambientalmente certificadas por sistemas de credibilidade;
- Possuem biomassas residuais (lodos orgânicos, restos de casca das toras, serragem de madeira, poluentes orgânicos, etc.) que podem ser utilizadas pelas biorrefinarias;
- São grandes consumidoras de bioenergia. O licor preto Kraft representa mais de 65% da matriz energética do setor de celulose e papel no Brasil, sendo que somente 15% dos energéticos têm origem fóssil nesse setor (7% sendo óleo combustível, 7% gás natural e 1% carvão mineral);
- São empresas tecnologicamente complexas, acostumadas a trabalhar com processos industriais variados, como: digestão, destilação, cristalização, secagem, evaporação, combustão, precipitação, decantação, filtração, centrifugação, separação de fases, eletrólise, etc.;
- A legislação e os processos de licenciamento são conhecidos e operacionais. Esse não seria o caso para biorrefinarias descentralizadas, com negócios completamente novos aos órgãos de licenciamento ambiental;
- Há interesse empresarial para otimização do consumo energético, redução de impactos ambientais, fechamento de circuitos, prática de ecoeficiência e produção mais limpa;
- Já trabalham em parceria com a indústria química e com o sistema de geração e distribuição de energia elétrica;
- Têm forte interesse na imagem verde do setor (bioenergia, balanço de carbono, florestas sustentáveis);
- Têm disponibilidade de resíduos sólidos (hoje visto como um problema) que podem se converter em matéria-prima no novo cenário de biorrefinaria;
- O preço real da celulose e do papel tem mantido tendência de queda e há estagnação no uso de diversos produtos fabricados pelo setor, como, por exemplo: papel-jornal, papel de imprensa, papel de escrita;
- Os preços da energia e dos energéticos têm sido crescentes e a disponibilidade de novos e crescentes mercados é vista como muito atrativa pelo setor;



- Há grande interesse em países como os da Europa e da América do Norte para que os combustíveis derivados da biomassa venham a substituir paulatinamente os combustíveis fósseis.

De maneira geral, uma fábrica de celulose Kraft branqueada de eucalipto tem a seguinte demanda ou geração de materiais de biomassa por tonelada de celulose seca ao ar produzida para comercialização:

- 1,8 a 1,9 tonelada absolutamente seca de madeira de processo na forma de cavacos aceitos;
- 1,2 a 1,45 tonelada de sólidos secos de licor preto Kraft;
- 0,10 a 0,15 tonelada seca de casca das toras das árvores;
- 0,05 tonelada de resíduos de madeira originados na classificação dos cavacos;
- 0,008 a 0,020 tonelada de material orgânico dissolvido nos efluentes e expresso como Demanda Química de Oxigênio (DQO);
- 0,060 tonelada seca de resíduos sólidos orgânicos gerados nos processos industriais;
- 0,05 a 0,15 tonelada seca de resíduos florestais (toras finas, galhos grossos, desperdícios de madeira, etc.);
- 0,015 tonelada de metanol.

Há muita biomassa envolvida no processo, seja na forma de matérias-primas, seja como combustíveis, ou então como resíduos industriais. Levando em conta a escala de produção das fábricas Kraft modernas, que hoje produzem entre 800 mil a 1,5 milhão de toneladas de celulose por ano, pode-se facilmente calcular as quantidades de biomassa que estão envolvidas nesse tipo de industrialização.

A visão de futuro para essas fábricas é que elas, em breve, não mais estarão produzindo apenas fibras celulósicas para venda aos seus clientes como celulose de mercado (*market pulp*), mas também produtos químicos e biocombustíveis, todos derivados da biomassa ingressante, demandada ou desperdiçada pela fábrica de celulose. As matérias-primas existem e muitas das tecnologias para isso já estão em uso, aprovadas e testadas. Outras dependem de novos avanços, plantas piloto, protótipos.

A maioria delas ainda não dispõe de estudos claros de viabilidade econômica e de resultados aos investidores. Por isso, acredita-se que essa integração para biorrefinarias acontecerá por etapas. Inicialmente, as fábricas incorporarão tecnologias que beneficiem seus processos atuais para depois criarem parcerias para desenvolvimento de novos produtos e mercados.



Definitivamente, as forças motrizes para esse processo todo ser acelerado não estão apenas com o setor de celulose e papel, mas principalmente com a indústria química e com o setor energético. Caso as parcerias sejam estimuladas, as burocracias reduzidas e as barreiras eliminadas, o processo caminhará mais rapidamente.

### 5.3 Biorrefinarias no setor de celulose e papel: uma realidade que não é tão recente como parece

As biorrefinarias já estão consagradas para as fábricas de celulose com base no processo sulfito, sejam as que produzem celulose para fabricação de papel ou de celulose para dissolução para a manufatura de derivados de celulose, tais como fios têxteis, filmes de celulose, solventes, explosivos, espessantes de cosméticos e de alimentos.

A principal razão para o surgimento de biorrefinarias nesse tipo de processo foi a dificuldade para se recuperar o licor pós-cozimento. Em vez de lidar com um sério problema de poluição ambiental, que seria o descarte desse licor residual, as fábricas de celulose sulfito ácido, em especial as de base cálcio, tiveram que buscar alternativas para seus resíduos de processo.

Com isso, surgiram fábricas com múltiplos produtos, abrangendo variada gama de produtos químicos, fermentos, gases, etc. Os exemplos mais divulgados são as renomadas biorrefinarias das empresas Borregaard (Noruega), Domsjö (Suécia), Lenzing (Áustria), Tembec (Canadá) e Buckeye (USA). Nas fábricas dessas empresas (ou em arranjos industriais em parcerias empresariais), são produzidos lignosulfonatos, ácidos orgânicos, gases combustíveis, açúcares, furfural, xilitol, xilose, etanol, sulfato de sódio, carbonato de cálcio, entre outros. Inclusive, com os avanços tecnológicos que as biorrefinarias estão tendo nos dias atuais, essas empresas estão aperfeiçoando suas já complexas e amplas plantas industriais, incluindo novas instalações para outros produtos, como dimetil-éter e gás de síntese. O aperfeiçoamento energético dessas empresas tem possibilitado a venda de energia elétrica e vapor excedentes às demandas dos seus processos.

No caso de fábricas de celulose Kraft, o momento é de muita movimentação para venda de bioenergia ou de biocombustíveis na forma de biomassa adensada. Há inúmeros casos de fábricas Kraft que aproveitam o *tall oil* ou sabão de espuma para uso energético ou para separação de





sabões, ácidos graxos, metanol e terebintina. Como exemplos de fábricas que usam esse processo, podem-se citar a Mead Westvaco (USA) e a Klabin (Brasil).

As maiores atenções estão concentradas na gaseificação do licor preto e de resíduos lenhosos, na produção de dimetil-éter e de biodiesel a partir do *tall oil* e do bio-óleo. Em relação a isso, há um grande investimento em pesquisa e desenvolvimento sendo realizado por meio do Solander Research Science Park, em Pitea, Suécia, com a finalidade de oportunizar novos produtos para as fábricas Kraft do país, com venda de produtos químicos e energéticos verdes, além de vapor e energia elétrica em sobra aos processos.

Enfim, há muita ebulição na pesquisa tecnológica para alternativas aos processos Kraft, pré-hidrólise Kraft e sulfito.

## 5.4 As biorrefinarias integradas no setor de celulose e papel no Brasil

O setor de celulose e papel é um dos segmentos industriais mais importantes em países como Brasil, Chile, China, Estados Unidos, Canadá, Finlândia, Suécia e Japão. O papel é um bem industrial que, além das finalidades culturais, está associado à embalagem de produtos, utilizações higiênicas e sanitárias.

Apesar de o consumo de papel ser global, a produção de celulose se concentra em alguns países-chaves, sendo que o Brasil é o quarto maior produtor mundial desse produto. O país é líder e admirado pela produção de celulose de mercado a partir da madeira do eucalipto.

O crescimento dessa indústria no Brasil tem sido notável. Nos últimos 40 anos, o ritmo de crescimento anual da produção de celulose tem sido próximo a 7,5% ao ano, enquanto a produção de papel tem crescido em média 5,8% ao ano.

O Brasil é grande exportador de celulose de mercado e detém em seu parque fabril algumas das unidades mais modernas do mundo, na última geração tecnológica para esse tipo de industrialização. Praticamente toda a produção de celulose no Brasil se apoia no uso da madeira de florestas plantadas de eucalipto e de pinus.



O eucalipto é utilizado para a produção de celulose Kraft branqueada usada na fabricação de papéis brancos e também para a produção de celulose para dissolução (polpa solúvel) utilizada para derivados de celulose (acetato, viscose, nitrocelulose, etc.). Já o pinus é principalmente utilizado para produção de celulose não branqueada e pastas mecânicas utilizadas para fabricação de papéis de embalagem, papelões e papel de imprensa.

O Brasil tem excepcional potencial para produção de biomassa florestal a partir dessas florestas plantadas de altos ritmos de crescimento. O clima é adequado, há diversas espécies exóticas que se adaptaram bem às condições locais, o desenvolvimento tecnológico florestal foi intenso e existem ainda extensas áreas disponíveis para plantações de florestas, sem que isso possa interferir na produção de alimentos ou de outros usos para a terra. O país tem também potencial comprovado para expansão de outros tipos de biomassa, como capim-elefante, bambu, cana-de-açúcar, etc.

O setor de celulose e papel tem mostrado grande disposição empresarial para expansão de sua base produtiva, havendo ainda interesse das entidades públicas e privadas para estimular esse crescimento.

O setor é altamente competitivo, tem condições de conquistar e manter mercados internacionais atrativos e opera com base em adequados níveis de sustentabilidade. Os técnicos do setor têm domínio do processo e as fábricas operam com excelentes níveis de eficiência e continuidade operacional.

Por outro lado, essa situação é bastante distinta do que se encontra nas fábricas de papel e de celulose no Hemisfério Norte. A maioria delas amarga, há pelo menos uma década, estagnação e retração na produção de celulose em função dos altos custos de produção. Enquanto em países como Brasil, Chile, Uruguai, Indonésia e China o setor de celulose e papel enxerga futuro promissor, outros países estão tentando reinventar o negócio celulósico-papeleiro para reconquistar competitividade nessa indústria.

Exatamente por essa razão é que as pesquisas com biorrefinarias integradas ao setor de celulose e papel estão concentradas em instituições de pesquisa, em universidades e em empresas industriais de países como Estados Unidos, Canadá, Finlândia, Suécia, França, etc. Esses países e os seus segmentos industriais associados à produção de celulose e papel estão encarando a expansão e modernização do negócio atual pela introdução das biorrefinarias integradas em seus arranjos produtivos.



Existe uma série de razões para essa mudança estratégica nos países do Hemisfério Norte:

- Perda de competitividade da indústria na fabricação de celulose devido aos altos custos de madeira, energia e recursos humanos;
- Redução da capacidade de investimentos para modernização das fábricas e para a instalação de novas e mais ecoeficientes unidades de produção;
- Crise dos combustíveis fósseis em países altamente dependentes do petróleo, o que estimula os modelos a buscar alternativas energéticas, entre as quais os derivados de biomassa;
- Potencial de crescimento para os biocombustíveis, estimado em taxas variadas entre 10% e 20% ao ano, conforme as metas de cada país;
- Oportunidades verdes para produção de bioplásticos, polímeros, filmes e hidrocarbonetos a partir da biomassa;
- Incentivo das políticas públicas para mudança das plataformas de negócios;
- Incentivo empresarial para a criação de novas estratégias de negócios, saindo de um único produto (celulose de mercado ou um tipo de papel) para um amplo e diversificado portfólio de produtos obtidos da biomassa florestal;
- Redução gradativa do consumo *per capita* dos produtos celulósico-papeleiros em países desenvolvidos devido ao impacto da eletrônica, e-comércio, e-livros, etc.

No Brasil, a situação é bastante diferente. Apesar da carência de capital para alavancar crescimento mais rápido do setor, o país é invejado por algumas características altamente competitivas, como:

- Altas produtividades florestais (acima de 40 m<sup>3</sup>/ha. ano para as plantações de eucalipto);
- Madeira com preços competitivos e compatíveis com a atual demanda (nas atuais conjunturas, essa vantagem possivelmente não ocorrerá com o crescimento da demanda por madeira num cenário de biorrefinaria);
- Grandes disponibilidades de biomassa florestal no cenário atual que mudará com a biorrefinaria, conforme comentado;
- Fábricas modernas e eficientes;
- Patrimônio verde e sustentabilidade comprovada pelas certificações ambientais e florestais.

Independentemente das novas tecnologias e dos novos modelos de negócios desenvolvidos para o Hemisfério Norte com a integração de biorrefinarias no setor de celulose e papel, o Brasil continuará muito competitivo nesse segmento. Isso porque as vantagens competitivas de grande capacidade de produção de biomassa e baixo custo da madeira persistirão. Ou seja, pratica-



mente tudo o que for criado como tecnologias vantajosas para conversão da biomassa também poderá ter competitividade no Brasil, já que as fontes de biomassa continuarão a agregar uma plataforma competitiva a esses novos negócios.

O segmento brasileiro de celulose e papel vem acompanhando com interesse o desenvolvimento das tecnologias para a implantação das biorrefinarias nesse setor. Apesar de não se notar um esforço significativo de pesquisas e inovações nesse ramo, as empresas brasileiras desse segmento têm monitorado eficientemente os desenvolvimentos. Elas enxergam potenciais, mas o nível de urgência não é o mesmo que o exigido nos países do Hemisfério Norte. As empresas brasileiras acreditam que os novos negócios devem ser efetivos em custos, ambientalmente saudáveis e com forte ênfase na economia verde de baixo carbono. Também esperam que a biorrefinaria integrada não venha causar danos à eficiência do negócio cerne das empresas, que é a produção de celulose Kraft branqueada fabricada para suprir as exigências dos clientes europeus, asiáticos, norte-americanos e latino-americanos.

As fábricas de celulose de mercado orientadas para a exportação são bastante eficientes energeticamente, com baixos consumos de vapor e de energia elétrica, a ponto de sobra rem excedentes desses produtos para comercialização externa.

Atualmente, uma fábrica de celulose pode disponibilizar ao setor elétrico entre 250 e 500 kWh/tonelada de celulose, isso sem considerar as sobras de vapor (entre 1 e 3 GJ/tonelada de celulose). Esse vapor, muitas vezes, precisa ser condensado em turbinas de condensação ou vendido a empresas próximas nos arranjos industriais estabelecidos regionalmente.

Tendo em vista as altas eficiências energéticas dessas instalações, o novo ciclo de expansão do setor tem se baseado no modelo clássico, que é a produção de celulose de mercado e a oferta de energia elétrica e calor a terceiros. Não há, no momento, um movimento mais forte para investir em biorrefinarias integradas no Brasil, contrariamente ao que ocorre na Europa e América do Norte.

Os baixos custos de produção da celulose, as margens de contribuição folgadas e o sucesso ambiental nas florestas plantadas e nas novas unidades fabris não estão acenando que se deva mudar o modelo atual, até agora vencedor. Também não tem existido disposição política em nível de governo ou de setor empresarial para estimular a implantação de biorrefinarias integradas no setor.



Até o momento, as fábricas de celulose têm sido consideradas fontes imensas de biomassa de altíssima qualidade. Entretanto, ainda não são claros os caminhos que esse setor trilhará em relação aos excedentes de biomassa que geram. Como a economia de baixo carbono fóssil já é praticada pelo setor, não existem pressões para mudanças rápidas. Daí resulta essa postura mais de contemplação do que de ação pelo setor de celulose e papel no Brasil, frente às biorrefinarias.

Em relação aos projetos de expansão do setor, o foco tem sido a economia de escala e a construção de megafábricas Kraft de celulose de mercado, com supercaldeiras para geração de energia por cogeração, tendo como biocombustível o licor preto do próprio processo. Não existem projetos para serem implantados baseados na extração de hemiceluloses ou de lignina para obtenção de derivados químicos ou biocombustíveis para venda ao mercado.

Entretanto, na rota termoquímica, existem indicações de que as coisas podem acontecer mais rapidamente, seja pela gaseificação do licor preto ou pela pirólise rápida de resíduos florestais. Com isso, o setor poderia obter mais bioenergia para tornar ainda mais verde sua matriz energética, conseguindo reduções nos consumos de óleo combustível, gás natural e carvão mineral. Caldeiras de biomassa podem também ser construídas com tecnologias ecoeficientes, como de leito fluidizado por cogeração. Com isso, aumentar-se-ia a produção de energia para venda a terceiros.

Dessa forma, a caldeira de biomassa pode funcionar como uma eliminadora de resíduos da fábrica e florestas (casca, lodos orgânicos, restos de madeira, resíduos florestais, até mesmo restos de papel). A energia elétrica e o calor, quando excedentes, podem ser vendidos para parceiros nos arranjos industriais regionais ou a eletricidade ao sistema elétrico nacional.

O setor de celulose e papel tem se mostrado bastante comprometido com a sustentabilidade das suas operações industriais. Levando em conta que as biorrefinarias objetivam a produção de biomateriais com renovabilidade, desempenho, ecoeficiência, reciclabilidade e efetividade, certamente, o setor de celulose e papel não deixará escapar oportunidades que possam melhorar sua performance ambiental e sua imagem frente à economia verde. Tudo vai depender dos impactos sobre os negócios atuais e das lideranças e estratégias de cada um dos principais grupos empresariais brasileiros.

Curiosamente, o fator tecnológico das biorrefinarias não tem preocupado tanto o setor brasileiro de celulose e papel. O setor está acostumado a comprar as sofisticadas tecnologias de pro-



dução de grandes fornecedores internacionais (Andritz, Voith, Metso, GLV, etc.). Com isso, tem vocação de pagador de *royalties* embutidos nos equipamentos que compra (digestores, caldeiras, plantas químicas).

A postura do setor tem sido a de entender muito bem as tecnologias para poder comprar com qualidade o que precisa. Isso permite um melhor diálogo na aquisição das suas unidades produtivas e na melhor tomada de decisão nos desenhos de suas plantas industriais. Talvez, em virtude dessa cultura, o setor tenha decidido monitorar e acompanhar as novas tecnologias associadas às biorrefinarias, em vez de desenvolver suas próprias tecnologias, protótipos, produtos, etc.

É bem provável que a maior preocupação das empresas brasileiras não seja quais serão os novos negócios no setor, mas como essas novas plataformas de negócios por meio das biorrefinarias poderão interferir ou atrapalhar os negócios atuais. Quanto maiores forem os riscos para qualidade, desempenho, rendimentos e custos dos produtos atuais, menores serão as motivações para adoção dessas novas rotas tecnológicas. É o caso da extração de hemiceluloses dos cavacos de madeira antes de se produzir celulose com eles. A possibilidade de se produzir etanol não é tão motivadora como a preocupação com a queda de qualidade da celulose de mercado.

Por outro lado, as rotas tecnológicas que impliquem ganhos de produtividade ou capacidade nas fábricas atuais, essas, sim, são atrativas. É o caso da extração de lignina e mesmo de hemiceluloses do licor preto Kraft, com promissores ganhos de capacidade no sistema de recuperação do licor e dos seus constituintes minerais.

Fica bem claro que as rotas tecnológicas devem ser atrativas em termos dos fatores-chave de competitividade do setor que são entendidos como: custos de produção, eficiência operacional, qualidade do produto, margens unitárias de contribuição, escala de produção, investimentos seguros e tecnologias comprovadas.

O desconhecimento de como as novas tecnologias podem impactar esses fatores-chaves faz com que exista uma série de perguntas a serem respondidas pelas pesquisas:

- Que novos produtos poderão ser obtidos nas biorrefinarias integradas do setor de celulose e papel os quais oferecerão margens sustentáveis e terão competitividade no longo prazo?
- Que alternativas tecnológicas terão as maiores chances de sucesso para a produção desses produtos mais promissores?



- Quais são hoje as formas mais eficientes em termos de rotas tecnológicas e seus custos de produção? Como estarão esses processos e custos em cerca de 5 a 10 anos frente à maturação dessas novas tecnologias?
- Como melhor utilizar a estrutura existente de uma fábrica de celulose Kraft para implantar o conceito de biorrefinarias?
- E no caso de uma fábrica de celulose solúvel operando pelo processo pré-hidrólise Kraft?
- Quais são as vantagens e desvantagens, os riscos e as oportunidades para as sete seguintes alternativas?
  - i. Produção e venda de energia elétrica e vapor (biorrefinaria de celulose com venda de eletricidade e vapor a terceiros);
  - ii. Produção de celulose/papel e venda de biomassa compactada a partir de resíduos florestais e industriais (pellets e briquetes de biomassa);
  - iii. Produção de celulose/papel e venda ao mercado de biocombustíveis produzidos pela biorrefinaria;
  - iv. Produção e utilização pela fábrica de celulose de novos biocombustíveis produzidos pela biorrefinaria integrada em substituição a combustíveis fósseis atualmente em uso;
  - v. Produção e venda de produtos químicos derivados das hemiceluloses;
  - vi. Idem para os derivados de lignina;
  - vii. Idem para os produtos derivados dos resíduos lignocelulósicos florestais.
- Quais são as rotas tecnológicas mais promissoras? Seriam as rotas enzimáticas (fermentação de açúcares extraídos da madeira) ou as rotas termoquímicas (gaseificação, pirólise rápida, etc.)?
- Seria possível implantar o conceito de biorrefinaria integrada em novas fábricas ou em fábricas existentes e ao mesmo tempo: aumentar a capacidade produtiva da fábrica, reduzir os custos de produção e aumentar os resultados unitários e globais do complexo industrial?
- Seria possível desenvolver um modelo de biorrefinaria que fosse adaptado às realidades brasileiras de produção de celulose Kraft branqueada de eucalipto?
- Idem para a fabricação de celulose pré-hidrólise Kraft branqueada utilizada para derivados de celulose?
- Quais são os resultados em termos de lucratividade de uma fábrica existente quando integrada a uma biorrefinaria e comparativamente ao modelo clássico sem essa integração (só produzindo celulose de mercado e vendendo excedentes de bioenergia)?
- Onde estão as sinergias e onde estão localizados os conflitos na competitividade das fábricas atuando com o modelo vigente e com o modelo de biorrefinaria integrada?



- Quais são os potenciais impactos das biorrefinarias na disponibilidade, custo e qualidade da biomassa florestal?
- Quais são as demandas adicionais de investimentos e como eles poderão ser obtidos, a que custos e com que potencial de alavancagem nos resultados empresariais?
- Que alianças são necessárias para que as biorrefinarias integradas possam se converter em realidade no caso brasileiro?
- Quais são os papéis das políticas públicas em relação aos itens-chaves para a adoção do conceito de biorrefinarias integradas no setor brasileiro de celulose e papel? Em relação aos custos do capital de investimentos? Em relação à legislação e aos licenciamentos? Em relação às mudanças climáticas? Em relação à sustentabilidade?

Alguns quesitos vitais são esperados em relação a esse novo desenho industrial:

- As biorrefinarias integradas deverão consumir mais biomassa que as fábricas tradicionais de celulose e papel. Entretanto, elas não devem competir por terra frente às áreas necessárias para plantio de alimentos;
- As biorrefinarias integradas ao setor de celulose e papel poderão utilizar outros tipos de biomassa, como restos de cultivos agrícolas e bagaço de cana;
- As biorrefinarias não devem buscar biomassa a qualquer preço, pois isso poderá afetar o balanço ecológico e a saúde dos ecossistemas, além de reduzir as chances de resultados econômicos para os negócios pelo aumento de preço da biomassa;
- As unidades de biorrefinaria podem ser integradas às fábricas de celulose e/ou papel, mas podem se comportar relativamente independentes, conforme a tecnologia que venham a utilizar. Elas poderão, em alguns casos, apenas se valer da infraestrutura da fábrica de celulose/papel, como estações de tratamento de água e de efluentes, geração de energia, oficinas de manutenções e almoxarifados. É o caso, por exemplo, da produção de biodiesel por meio da síntese de Fischer-Tropsch, usando o gás de síntese obtido pela gaseificação de resíduos florestais e de restos de madeira do processo de fabricação de celulose.

As fábricas de celulose e papel são operadas por pessoas que atribuem forte ênfase ao processo industrial. Por essa exagerada atração e comprometimento com o processo fabril, esse tipo de indústria é também denominado de indústria de processo. Quanto menores forem os distúrbios no processo de fabricação, mais felizes ficarão os técnicos e operadores e melhores serão os resultados.

Essa cultura é, até certo ponto, compreensível, pois as fábricas são muito sensíveis às perdas de produção por interrupções no processo. Em geral, essas fábricas operam com uma a no máximo





três linhas de produção. Qualquer parada em uma linha significa perda de produto, redução de produtividade, aumento de custos e menores resultados.

O Brasil possui hoje algumas das fábricas mais modernas e de maior capacidade por linha de produção. Com isso, a cultura da indústria de processo é praticada com intensidade, pois o processo funcionando bem traz bons resultados e muitos benefícios associados. Por isso, acredita-se que as fábricas de celulose e papel que mantiverem arranjos de biorrefinarias que não interfiram no processo de fabricação de celulose terão mais chances de sucesso.

Desde que existam resíduos de biomassa florestal e que possam ser usados em uma biorrefinaria, se essa for implantada para não interferir na fabricação de celulose, sua chance de ser adotada pelo setor será maior. Esse tipo de modelo pode favorecer o surgimento de arranjos produtivos com diversos parceiros industriais, de diversas áreas da indústria, por exemplo: química, celulose e papel, geração de energia, indústria automobilística, cosmética e alimentícia.

Curiosamente, apesar da indústria brasileira de celulose e papel ter em seu escopo uma ampla utilização de processos típicos da engenharia química, ela não tem cultura de fabricar produtos químicos. Ela é muito mais uma indústria de base florestal do que uma fábrica de produtos químicos. Praticamente todas as empresas brasileiras de celulose e papel terceirizaram a produção de insumos químicos: soda cáustica, dióxido de cloro, dióxido de enxofre, gás carbônico, oxigênio, nitrogênio, etc. Por outro lado, a vocação para produção de energia elétrica e vapor é forte no setor, sendo que as áreas de geração de energia e de recuperação do licor são das mais bem qualificadas e estruturadas no setor.

Conhecendo essas particularidades, fica mais fácil entender quais são as possíveis rotas vitoriosas para as biorrefinarias integradas no setor brasileiro de celulose e papel. Provavelmente, as rotas baseadas em plataformas termoquímicas terão vantagens em relação às plataformas bioquímicas e enzimáticas.

Complementarmente, a produção de etanol a partir de materiais lignocelulósicos tem sido meta prioritária do setor sucroalcooleiro (com base no bagaço de cana-de-açúcar). Por essa razão, acredita-se que o setor de celulose e papel deverá se manter como expectador de luxo, observando e colaborando para a produção de etanol de segunda geração, mas dificilmente tomando a liderança para esse desenvolvimento.



A indústria de celulose e papel localiza suas florestas plantadas em áreas rurais, com íntima aproximação com agricultores de cultivos anuais e com criadores de animais (zootecnia). Por isso mesmo, são esperadas sinergias entre a área agrícola e a área de base florestal. Conforme ocorra o desenvolvimento de biorrefinarias para o setor de celulose e papel, é bem provável que outras cadeias produtivas sejam privilegiadas e recebam interferências, sejam positivas ou negativas.

## **5.5 Fundamentos e cenários tecnológicos para a implantação de biorrefinarias integradas no setor de celulose e papel no Brasil**

A madeira das árvores é um complexo e heterogêneo material fotossintetizado que apresenta, em sua composição, diversos compostos poliméricos complexos como celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e um conteúdo de sais minerais (cinzas). Enquanto a celulose e as hemiceluloses são carboidratos poliméricos formados por união quase linear de monômeros de açúcares simples com cinco ou seis átomos de carbono, a lignina é um composto polimérico de estrutura bastante complexa e formada pela união não muito organizada de unidades de fenilpropano.

Os extrativos compõem-se de ampla variedade de compostos químicos que podem ser extraídos da madeira por solubilização em água quente, em soluções ácidas ou alcalinas e por solventes orgânicos neutros (álcool, tolueno, acetona, diclorometano). Os principais extrativos são resinas, ceras, gomas, amido, polifenóis e taninos. As cinzas são constituintes formados por óxidos dos nutrientes minerais absorvidos pelas plantas e vitais para seus processos metabólicos. Os principais elementos minerais presentes nas árvores são: cálcio, potássio, nitrogênio, fósforo, magnésio, manganês e ferro.

Conforme o tipo de vegetal e as condições oferecidas a ele para seu crescimento, teremos variações na composição química da madeira e dos outros componentes vegetais (casca, folhas, ramos e raízes).

Todo esse grupo variado de componentes químicos se organiza nas células vegetais, adquirindo formas e quantidades diferenciadas conforme o arranjo estrutural desenvolvido pela planta. As árvores são constituídas por células que realizam diferentes funções, sendo as mais comuns as fibras, as células de parênquima e os elementos de vaso (esses últimos para as angiospermas dicotiledôneas).



As fibras são células longas e afiladas, com parede celular espessa e resistente para suportar impactos, dobramentos, esticamentos e contrações. Elas são o objetivo principal da produção de celulose para fabricar papel. Na verdade, o papel nada mais é do que um reagrupamento das células da madeira (ou de outro vegetal fibroso) na forma de uma folha.

Todos os processos de produção de celulose objetivam a individualização das fibras e dos outros constituintes anatômicos da madeira e de outras matérias-primas fibrosas (bambu, bagaço de cana, etc.). A celulose, polpa celulósica ou mesmo massa fibrosa nada mais é do que um produto cujas fibras, células de parênquima e elementos de vaso estão completamente individualizados e podem ser trabalhados para compor arranjos tais como papel, papelão, cartão, polpa moldada, fraldas de papel, entre outros.

Além da utilização física das fibras de celulose, existe ainda um tipo de industrialização que deseja usar o composto químico celulose. Para isso, a celulose deve ser extraída na forma mais pura possível da madeira. É o que acontece na indústria de polpa solúvel ou celulose para dissolução.

Nesse tipo de processamento, o objetivo é a máxima purificação da polpa celulósica para que sua composição química apresente o máximo teor de celulose e a mínima contaminação com hemiceluloses, extrativos e cinzas minerais.

Tanto as produções de celulose Kraft para fabricar papel quanto de celulose para dissolução e fabricação de derivados de celulose são importantes processos industriais no Brasil. De acordo com dados estatísticos da Bracelpa, o Brasil produziu, em 2010, quase 14,2 milhões de toneladas de celulose, sendo que, desse total, 11,5 milhões foram de fibra curta Kraft branqueada (eucalipto) e 1,5 milhão de fibra longa não branqueada (pínus). Adicionalmente, o Brasil ainda produz cerca de 465 mil toneladas de celulose para dissolução pelo processo pré-hidrólise Kraft com eucalipto para produção de derivados de celulose.

O processo predominante no Brasil para produção de celulose é o químico Kraft, usando tanto madeiras de fibra curta (eucalipto) quanto de fibra longa (pínus). O processo Kraft colabora para cerca de 94% da produção brasileira de celulose. O segundo processo mais utilizado é o pré-hidrólise Kraft, pela Bahia Specialty Cellulose (com 3% da produção brasileira), e depois os processos para produção de pastas de alto rendimento (com 3% da produção).



Existiu até recentemente apenas uma fábrica de celulose de pinus valendo-se do processo sulfito para produção de celulose branqueada tipo especialidades (cerca de 30.000 toneladas anuais), utilizada para produção de papéis sanitários, fraldas de celulose e papel química solúvel (usada para fabricação de viscosa e nitrocelulose). Essa fábrica estava integrada a outra unidade industrial de processamento da lixívia do cozimento sulfito para obtenção de lignosulfonatos. Esse arranjo foi até recentemente um dos típicos casos de biorrefinaria integrada no Brasil, mesmo sendo as produções separadas entre duas empresas (Cambará S.A. e LignoTech do Brasil). Infelizmente, as duas empresas tiveram que encerrar atividades em função de escala de produção da fábrica de celulose e de suas alternativas de mercado para esse tipo de celulose.

Definitivamente, a grande aposta para a introdução de biorrefinarias integradas no Brasil deve ser colocada no processo Kraft e, mais especificamente, nas fábricas de celulose de mercado que utilizam o eucalipto como matéria-prima. Como o processo Kraft é também o processo dominante em nível global, todo o desenvolvimento tecnológico das biorrefinarias está ocorrendo para adaptá-lo a isso.

As biorrefinarias podem se integrar a processos de produção de celulose usando quaisquer tipos de fibras (eucaliptos, bambu, bagaço, pinus, entre outros). Existe muito pouca produção de celulose a partir de outras espécies fibrosas no Brasil além do eucalipto e do pinus. Existe uma fábrica de celulose de bambu localizada em Pernambuco (Celulose e Papel de Pernambuco – Cepasa) que produz celulose Kraft para papéis de embalagem. Mesmo em fábricas de celulose de bambu, é possível se integrar uma biorrefinaria. O bambu utilizado no Brasil é rico em amido (10% a 20% do seu peso seco), que pode ser extraído e usado para produção de etanol combustível.

A principal matéria-prima utilizada pela indústria brasileira de celulose e papel é a madeira de eucalipto. Ela é utilizada para produção de celulose Kraft branqueada para fabricar papel branco (empresas produtoras como Fibria, Suzano, International Paper do Brasil, Cenibra, Jari, Lwarcel, etc.) e para produção de celulose para dissolução (Bahia Specialty Cellulose). A madeira de pinus é usada para fabricação de polpa celulósica de fibras longas para uso em papéis de embalagens (empresas Klabin, Cocelpa, Trombini, Iguaçu, etc.) e papel de imprensa (Norske-Skog Pisa).

As madeiras de eucalipto e pinus não se diferenciam apenas no comprimento de seus elementos fibrosos, mas também na composição química. As madeiras de pinus são mais ricas em lignina e extrativos, e as de eucalipto são mais ricas em hemiceluloses e em holocelulose. Em função dessas matérias-primas e dos processos industriais de conversão empregados, os desenhos e as



adaptações de biorrefinarias serão variados para fábricas existentes. Já para fábricas novas, a integração pode ser criada no desenho das novas plantas.

É aqui que se destaca a importância do conhecimento tecnológico para os técnicos do setor, para que possam decidir sobre as melhores opções de desenhos industriais com mínimas chances de erros e riscos nesses investimentos.

Atualmente, algumas empresas brasileiras já produzem alguns subprodutos na fabricação de celulose. Dentre eles podem ser citados:

- *Tall oil* ou sabão de espuma: obtido pela separação de uma nata de ácidos graxos saponificados presente no licor preto Kraft no processamento de madeira de coníferas (pínus, araucária, etc.);
- Lignosulfonatos: obtidos pela purificação, ativação e separação de compostos de lignina do licor residual do processo sulfito ácido;
- Ácido acético: obtido no processo de evaporação do licor sulfito e pré-hidrólise Kraft;
- Terebintina: obtida pela destilação de condensados da evaporação do licor preto Kraft;
- Metanol: obtido dos gases não condensáveis emitidos pela evaporação do licor preto Kraft;
- Sulfato de sódio: obtido na produção do dióxido de cloro, poderoso agente branqueador da celulose;
- Metano (biogás): obtido na compostagem de resíduos sólidos orgânicos;
- Hidrogênio: obtido como subproduto de processos eletrolíticos;
- Eletricidade: obtida como excedente no processo de queima do licor preto e cogeração de energia e também em caldeiras de força movidas a biomassa;
- Vapor: obtido como excedente no processo de queima do licor preto e cogeração de energia e também em caldeiras de força movidas a biomassa.

Entretanto, essa é apenas uma fração do muito mais que se pode obter da biomassa florestal destinada a fábricas de celulose e papel.

Dois cenários principais podem ser desenhados para as biorrefinarias integradas e cada um deles pode ter desdobramentos diversos:

**Cenário 01:** Utilização de tecnologias associadas ao próprio processo de produção de celulose para com elas extrair, individualizar, converter e fabricar novos produtos para comercialização.



*Exemplo 1:* Extração da lignina dissolvida no licor preto Kraft para uso como biocombustível ou como material para a indústria química;

*Exemplo 2:* Extração de pré-hidrolisado ácido rico em hemiceluloses dissolvidas a partir dos cavacos de madeira para posterior fermentação e produção de álcoois.

**Cenário 02:** Utilização de tecnologias independentes do processo industrial de produção de celulose, utilizando, porém, as sobras de materiais lignocelulósicos do processo.

*Exemplo 1:* Gaseificação ou pirólise rápida de resíduos florestais lenhosos para produção de gás combustível, gás de síntese ou bio-óleo;

*Exemplo 2:* Combustão direta de biomassas residuais (casca, lodo da estação de tratamento de efluentes, cavacos inadequados de madeira, etc.) para geração de eletricidade e vapor para venda a terceiros.

Em cada um desses cenários, existem inúmeras alternativas em estudo e outras já viabilizadas e até mesmo em estado operacional. Com base na avaliação local, nas disponibilidades de insumos e na demanda de mercados próximos, podem ser criados arranjos produtivos específicos e que possam agregar resultados, receitas, sustentabilidade e ecoeficiência.

Essas alternativas tecnológicas precisam ser avaliadas quanto às necessidades de capital, custos operacionais, efetividade tecnológica e demanda de mercado. Por isso, não se deve sair motivado a programar algo sem antes se fazer uma avaliação bem criteriosa em termos econômicos, tecnológicos, ambientais e sociais. Entre as sustentabilidades almejadas está a própria sustentabilidade do negócio no longo prazo.

## 5.6 Processos tecnológicos vitais para as biorrefinarias no setor de celulose e papel

Os principais processos tecnológicos envolvidos em uma biorrefinaria integrada à produção de celulose e papel são os seguintes:

- **Processos físico-químicos:** englobam variada conjugação de técnicas para extração de constituintes da biomassa, tais como:
  - Prensagem para remoção de extrativos;



- Solubilização e extração de constituintes por hidrólise ácida, hidrólise alcalina, solubilização por solventes orgânicos, etc.;
- Destilação de condensados ou extratos para individualização de componentes com base em ponto de ebulição;
- Separação de materiais com base em diferenças de pontos de solidificação, cristalização, etc.;
- Separação de materiais por filtrações em todas as suas possibilidades, inclusive membranas;
- Precipitação de constituintes e separação por decantação, flotação ou filtração;
- Purificação de componentes químicos;
- Reações químicas para modificação ou ativação e posterior separação (oxidação, oxigenação, eterificação, esterificação, isomerização, derivatização, etc.);
- Reações de síntese química (por exemplo: síntese de Fischer-Tropsch).
- **Processos fermentativos ou enzimáticos:** caracterizam a rota bioquímica, com a utilização de enzimas pré-fabricadas ou de leveduras especializadas para decomposição biológica de materiais mais complexos (por exemplo: açúcares, amido, etc.), convertendo-os nos produtos desejados. Dentre esses processos, podem ser citados:
  - Sacarificação da biomassa;
  - Fermentação alcoólica de açúcares para produção de etanol de primeira ou segunda geração;
  - Fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos para produção de biogás.
- **Processos de combustão e cogeração de vapor e eletricidade:** queima direta da biomassa em caldeiras de combustão associadas a turbogeradores para produção simultânea de eletricidade e calor (vapor).
- **Processos termoquímicos:** englobam o uso da decomposição da biomassa por aquecimento controlado para obtenção de diversos produtos que podem ser utilizados como combustíveis ou participar de outras rotas tecnológicas como insumos químicos. Exemplos: bio-óleo, alcatrão, ácido pirolenhoso, gás combustível, gás de síntese, etc. Dentre os processos termoquímicos, os mais relevantes são:
  - Gaseificação da biomassa (resíduos de madeira, licor preto Kraft, etc.);
  - Pirólise rápida da madeira (produção de bio-óleo que pode ser utilizado como biocombustível ou para produção de biodiesel);
  - Carbonização da biomassa (para produção de carvão vegetal, alcatrão e ácido pirolenhoso);



- Torrefação da madeira (para produção de gás combustível e madeira torrada para briquetização ou peletização).
- **Processos de conversão do gás de síntese (*syngas*):** objetivam a utilização do gás obtido na gaseificação da biomassa para produção de hidrocarbonetos, dimetil-éter, metanol, hidrogênio e até mesmo biodiesel.
- **Processos híbridos:** englobam alguns dos processos anteriores de forma sequencial ou conjuntamente aplicados. Exemplo: extração de hemiceluloses da biomassa, seguida por purificação para eliminação de contaminantes indesejáveis e posterior fermentação dos açúcares para produção de etanol.

## 5.7 Plataformas para novos produtos em biorrefinarias integradas no setor de celulose e papel

Existem inúmeras possibilidades de plataformas tecnológicas para geração de novos produtos a partir da biomassa florestal, sejam elas classificadas com base na matéria-prima, nos processos de conversão, nas áreas da biorrefinaria onde ocorram ou nos produtos obtidos.

Uma biorrefinaria integrada no setor de celulose e papel pode operar utilizando:

- Resíduos florestais e madeireiros (casca, serragem de madeira, cavacos desclassificados de madeira, etc.);
- Material extraído ao longo do processo de produção de celulose (extração dos cavacos de madeira, do licor preto, etc.);
- Material residual do tratamento da poluição da fábrica (lodos do tratamento de efluentes, resíduos orgânicos disponibilizados no processo, etc.);
- Outros tipos de biomassas externas, integradas à biomassa florestal (resíduos ou lixo orgânico domiciliar, resíduos de jardinagem, etc.).

De forma geral, os processos tecnológicos em estudo ou propostos para as biorrefinarias são híbridos entre diferentes rotas tecnológicas, englobando etapas de fracionamento, extração, separação, purificação, fermentação, destilação ou síntese química. Muitas dessas rotas já estão muito estudadas em bancadas laboratoriais, mas faltam ainda exemplos de sucesso na escala industrial. Outras já estão perfeitamente comprovadas e existem, inclusive, instalações piloto ou mesmo em escala industrial operando em diversos locais do mundo.





Para cada produto possível de ser obtido podem existir diferentes rotas tecnológicas. O etanol, por exemplo, pode ser obtido por via enzimática a partir da fermentação de carboidratos fracionados da biomassa ou pode ser sintetizado tendo como matéria-prima o gás de síntese. Enfim, as alternativas são inúmeras e muitas vezes inimagináveis no presente momento.

Em quase todos os casos, o processo inicia-se por uma desconstrução da biomassa por alguma técnica agressiva e drástica aplicada sobre o material. Pode ser um cozimento Kraft para polpação dos cavacos de madeira, ou uma hidrólise ácida drástica para degradação de carboidratos ou mesmo um intenso aquecimento para degradar termicamente a biomassa.

A seguir, sobre os fragmentos de constituintes degradados da biomassa é que se aplicam novos processos para dar continuidade à produção do que se deseja. Em geral, os objetivos ou são biocombustíveis ou produtos químicos para ingressar como insumo em algum tipo de industrialização.

Tomando como base a matéria-prima da floresta, que é a árvore e sua biomassa, existem inúmeros produtos que podem ser obtidos dela pelas biorrefinarias. Atualmente, muitos desses produtos estão sendo separados e comercializados por terceiros, e não pela indústria de celulose e papel. São os casos dos taninos, óleos essenciais, resinas, ceras e ácidos graxos, etc.

As seguintes alternativas de produtos podem fazer parte do elenco de produtos de uma biorrefinaria de base florestal:

- **Produtos extraídos da casca das árvores:** taninos, resinas, látex, suberina, cortiça, aromatizantes, polifenóis, ceras, ácidos graxos, açúcares, etc.
- **Produtos extraídos das folhas das árvores:** óleos essenciais, óleo de pinho, produtos aromatizantes, ceras, etc.
- **Produtos extraídos do lenho ou madeira do tronco das árvores:** celulose e papel, painéis de madeira, móveis, etc.
- **Produtos associados ao processo de produção de celulose e papel:** terebintina, metanol, ácidos orgânicos, ácidos graxos, sabões, lignosulfonatos, eletricidade, vapor, etc.
- **Novos produtos da biorrefinaria integrada:** biocombustíveis e produtos químicos, inclusive os nanocristais de celulose (ou nanocelulose).



Os biocombustíveis podem ser líquidos inflamáveis (etanol, butanol, bio-óleo, metanol, dimetil-éter, por exemplo), biomassa sólida transformada (péletes ou briquetes de carvão, lignina, etc.) e combustíveis gasosos (gás combustível, hidrogênio, metano).

Os produtos químicos não energéticos podem ser para aplicação imediata (ácido acético, terebintina) ou para servir de insumos para a indústria química (lignina, gás de síntese, xilose, dimetil-éter, glucose, furfural, nanocelulose, hidrocarbonetos).

Diversas biorrefinarias integradas em fábricas do setor de celulose e papel Kraft já estão operando (com distintos arranjos e propósitos) em países como Estados Unidos, Suécia, Canadá, Finlândia. Isso está acontecendo tanto em escala piloto quanto em plantas dedicadas e já disponibilizadas pelos fabricantes de equipamentos e de venda de tecnologias. Por outro lado, as biorrefinarias não são exclusividade do setor de celulose e papel.

Existem muitos casos de unidades operando a partir de outros tipos de biomassa, em complementaridade às indústrias químicas, alimentícias ou agroindústria. Até mesmo prefeituras de algumas grandes cidades estão adquirindo biorreatores para tratar seus esgotos e lixos urbanos, obtendo, com isso, biogás, gás de síntese e bio-óleo. Enfim, as oportunidades são inúmeras para o setor de celulose e papel e para todos os que estiverem relacionados à geração ou oferta de biomassa.

Existe muita pesquisa sendo realizada no mundo sobre biorrefinarias – é o tema do momento nas academias relacionadas aos setores geradores de biomassa. Isso conduz a inúmeras repetições pela absoluta falta de coordenação dos grupos de pesquisa, todos querendo estudar as mesmas coisas ao mesmo tempo. O pior problema é que muitas pesquisas consomem recursos para provar o que todos já conhecem, coisas já estudadas no passado, antes da coqueluche tecnológica que se tornaram as biorrefinarias.

Entretanto, existem barreiras tecnológicas sérias a serem vencidas pelos pesquisadores, entre elas, as que se seguem:

- Melhorias na qualidade fermentativa de enzimas e leveduras para açúcares de cinco átomos de carbono ou pentoses (xilose, arabinose);
- Melhorias nos desempenhos e rendimentos dos processos de gaseificação e pirólise rápida da biomassa;



- Melhorias na separação e purificação dos produtos fragmentados da biomassa por quaisquer das técnicas empregadas;
- Melhorias na remoção de contaminantes deletérios aos processos (inibidores de fermentação, inativadores de reações de síntese);
- Melhorias nas reações e nos rendimentos das sínteses orgânicas a partir do syngas;
- Conversão catalítica do gás de síntese para produção de combustíveis líquidos (etanol, metanol, dimetil-éter, biodiesel);
- Melhorias nas técnicas de separação por membranas;
- Melhorias nas técnicas de modificação de superfícies;
- Desenvolvimento de novos produtos de alto valor agregado a partir da lignina sulfatada Kraft (em especial, para a produção de fibras de carbono de alta pureza, fenóis, resinas adesivas);
- Prototipação e instalação de plantas piloto de demonstração para diversas tecnologias desenvolvidas nas bancadas acadêmicas;
- Desenvolvimento de mecanismos e desenhos industriais para integração de forma balanceada da fábrica de celulose Kraft convencional com as instalações novas da biorrefinaria integrada;
- Adequações tecnológicas dos processos atuais de produção de celulose Kraft para impedir a perda de qualidade dos seus produtos tradicionais e dos rendimentos e custos operacionais.

Existe muita preocupação dos produtores de celulose com relação ao que possa acontecer com a fábrica de celulose. Um exemplo a mais, complementando outros já citados: a remoção parcial da lignina e/ou de hemiceluloses do licor preto Kraft vai diminuir seu poder calorífico inferior, que já é baixo (pode baixar dos atuais 13 – 14 GJ/tonelada seca para 10 a 12).

A seguir, estão relacionadas as principais alternativas tecnológicas para geração de novos produtos e processos em uma biorrefinaria integrada do setor de celulose e papel:

- **Alternativas tecnológicas e novos produtos a partir da casca das árvores:**
  - Compostagem e geração de biogás;
  - Extração de taninos, resinas, polifenóis, ceras, graxas e cortiça;
  - Produção de etanol de primeira e segunda geração;
  - Gaseificação, pirólise, torrefação e carbonização, com produção diversificada de gases, líquidos e sólidos;
  - Obtenção de suberina para a indústria química.



- **Alternativas tecnológicas para resíduos orgânicos por meio da decomposição anaeróbica:**
  - Compostagem e produção de biogás para uso interno como tal ou enriquecido para venda a terceiros;
  - Produção de hidrogênio a partir do biogás.
- **Alternativas tecnológicas para as hemiceluloses extraídas da madeira ou biomassa:**
  - Hidrólise ácida para degradação das hemiceluloses seguida de purificação, separação do furfural e fermentação enzimática da xilose para produção de etanol;
  - Fracionamento por peso molecular das moléculas de oligômeros de xilanas para retorno daquelas com maiores cadeias à polpa celulósica que esteja sendo produzida pelo processo Kraft a fim de não prejudicar sua qualidade (resistências e rendimentos);
  - Produção de furfural pela continuação da reação de hidrólise ácida das pentoses;
  - Separação da xilose (pentose monomérica) para comercialização;
  - Produção de xilitol, ácido láctico, ácido acético e ácido urônico.
- **Alternativas tecnológicas para extração da lignina do licor preto Kraft:**
  - Precipitação, lavagem e purificação da lignina removida do licor preto Kraft;
  - Ultrafiltração do licor preto Kraft para extração da lignina conforme seu peso molecular e tamanho das moléculas;
  - Produção de biocombustível de lignina com poder calorífico bem mais alto que o da madeira (entre 24 e 27 GJ/tonelada seca). Esse biocombustível pode ser vendido a terceiros ou ter adequação para ser queimado como fonte de energia no forno de cal da fábrica de celulose Kraft (há muito interesse nisso, mas há o problema do enxofre residual, que pode ocasionar emissões de odor);
  - Purificação da lignina extraída para produção de resinas fenólicas, fibras de carbono, carvão ativo, dispersantes e emulsões asfálticas.
- **Alternativas tecnológicas para gaseificação do licor preto:**
  - Substituição parcial ou total da caldeira de recuperação Kraft por utilização de processo de gaseificação do licor preto, gerando gás combustível para forno de cal ou gás de síntese para reações complementares para produção de biocombustíveis ou produtos químicos. Esse processo não inviabiliza a recuperação dos compostos inorgânicos presentes no licor preto.
  - Conversão do gás de síntese em produtos tais como: metanol, dimetil-éter, hidrogênio, metano, hidrocarbonetos, biodiesel e etanol.



- **Alternativas tecnológicas para gaseificação de biomassa florestal residual:**
  - Produção de gás combustível ou de gás de síntese (preferencial) para ser usado em processos de síntese de diferentes tipos de biocombustíveis ou de produtos químicos.
- **Alternativas tecnológicas para pirólise rápida da biomassa florestal residual:**
  - Produção de bio-óleo, alcatrão, ácido pirolenhoso, piche de madeira, biodiesel e briquetes combustíveis dos resíduos sólidos da pirólise;
  - Purificação do bio-óleo para produção de óleos leves, fenóis, furfural, aldeídos, ácido acético, cetonas e ésteres;
  - Utilização do bio-óleo como combustível para a própria fábrica de celulose.
- **Alternativas tecnológicas para combustão de biomassa sólida em caldeiras de força para geração de eletricidade e calor (vapor):**
  - Cogeração com biomassa residual da fábrica de celulose para produção de excedente de bioenergia para venda a terceiros;
  - Utilização de novos modelos de supercaldeiras, superevaporadores, processos de maior rendimento na geração e transmissão da eletricidade e vapor.
- **Alternativas tecnológicas para produção de etanol de segunda geração (ou etanol celulósico ou etanol lignocelulósico):**
  - Sacarificação da biomassa e fermentação enzimática de açúcares simples;
  - Hidrólise ácida e/ou processos de polpação com solventes orgânicos para separar carboidratos e lignina dos materiais lignocelulósicos, facilitando, assim, as rotas de conversão bioquímicas;
  - Purificação da biomassa para facilitar as rotas bioquímicas;
  - Desenvolvimento de catalisadores para acelerar reações lentas e de baixos rendimentos;
  - Desenvolvimento de enzimas e leveduras mais produtivas e eficientes;
  - Desenvolvimento de parcerias com setor sucroalcooleiro para aceleração desse desenvolvimento tecnológico.
- **Alternativas tecnológicas para produção de nanocristais de celulose ou nanocelulose:**
  - Separação das regiões cristalinas da celulose por meio de processos de destruição seletiva das regiões amorfas da celulose, hemiceluloses e lignina;
  - Processos de classificação dos nanocristais e de modificação de suas superfícies para alteração de propriedades;



- Produção de insumos para a indústria química, para a produção de espumas, espessantes, filmes barreira, superabsorventes, compósitos, cosméticos e meios filtrantes.
- **Alternativas tecnológicas para adequações nas fábricas de celulose Kraft em função das novas demandas operacionais das biorrefinarias:**
  - Conjugação adequada dos balanços energéticos e de materiais de forma a haver produção contínua e estabilizada tanto na fábrica de celulose Kraft quanto nas unidades da biorrefinaria;
  - Desenvolvimento e integração de processos que permitam fechamento de circuitos de água, redução de poluentes sólidos, líquidos e gasosos e maiores eficiências energética e operacional;
  - Adequação das escalas de produção crescentes na fabricação de celulose Kraft com escalas não tão significativas para os novos produtos das biorrefinarias;
  - Recuperação da qualidade da polpa de celulose, que não pode ser afetada pela extração de materiais para as biorrefinarias;
  - Adequações nas caldeiras de recuperação em função do menor poder calorífico e menores quantidades de licor preto Kraft (resultantes da extração de lignina e/ou hemiceluloses ou da gaseificação);
  - Recuperação de rendimentos na conversão da madeira em celulose;
  - Desenvolvimento de sinergias entre a fábrica de celulose e as unidades da biorrefinaria. Por exemplo: a remoção de parte das hemiceluloses dos cavacos facilita a polpação e a branqueabilidade da polpa Kraft ou pré-hidrólise Kraft.

## 5.8 Situações atuais e perspectivas futuras para as tecnologias sobre biorrefinarias no setor brasileiro de celulose e papel

O Brasil tem mostrado interesse mais forte pelo desenvolvimento de biorrefinarias no setor da agroindústria da cana-de-açúcar, visando à integração do etanol de segunda geração. Com isso, espera-se aumentar a oferta de etanol a partir da mesma base plantada de cana-de-açúcar.

O País também tem investido no aperfeiçoamento tecnológico do processo de carbonização da madeira para produção de carvão vegetal para fins siderúrgicos. O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal a partir de florestas plantadas, e esse tipo de atividade deve crescer substancialmente com o aumento da produção nacional de ferro-gusa e aço e com as restrições legais ao uso de madeira de matas nativas.



Com isso, as florestas plantadas de eucalipto, que já atingem mais de 1,2 milhão de hectares para produzir madeira para carvão vegetal, podem atingir uma extensão de cerca de 3 milhões de hectares para essa finalidade. Com tecnologias mais avançadas de carbonização e pirólise, é possível a obtenção de bio-óleo em quantidades suficientes para alavancar novos negócios derivados desse ramo de atividade agroindustrial.

Levando em conta o estágio de desenvolvimento e de investimentos em pesquisa tecnológica dos setores sucroalcooleiro e de carvão vegetal, pode-se considerar que dificilmente o setor brasileiro de celulose e papel terá posição de liderança nesses direcionamentos tecnológicos para uso de rotas bioquímicas e termoquímicas para biorrefinarias.

Acredita-se que esse setor deverá continuar acompanhando e monitorando com interesse e atenção esses desenvolvimentos, mas sem se preocupar com grandes investimentos em pesquisa tecnológica para a produção de etanol celulósico ou para obter derivados da pirólise e gaseificação da biomassa.

O Brasil apresenta enormes vantagens competitivas para produção de biomassa florestal. Entretanto, essa vocação está mais em produzir biomassa florestal do que em convertê-la em novos produtos de alto valor agregado. Exemplo disso têm sido as iniciativas de aumentar e acelerar a produção de biomassa florestal pelos plantios de florestas adensadas.

Entretanto, essa forma de atuar só visando aumentar a produção de biomassa para venda tem ainda muito de cultura extrativista, com baixa agregação de valor e de inovações tecnológicas. Infelizmente, é algo típico da cultura brasileira: a exportação de riquezas naturais em vez de bens industrializados de alto valor agregado.

A própria indústria brasileira de celulose e papel optou por uma forma intermediária e exporta principalmente a celulose de mercado, que é um produto intermediário, e não se preocupa em agregar mais valor com exportação de papéis especiais, papel impresso na forma de livros e revistas. Seu foco tem sido a exportação de grandes volumes de celulose de mercado, onde se concentram suas forças competitivas.

Essa indústria consegue produzir quantidades e qualidades de celulose com custos imbatíveis, além de mostrar adequados níveis de sustentabilidade. Por essas razões todas, o setor brasileiro



de produção de celulose e papel tem sido mais contemplativo do que inovativo no que diz respeito às biorrefinarias integradas.

Tem sido aceito dentro da indústria brasileira de celulose e papel que o desenvolvimento tecnológico em biorrefinarias para o setor deverá ser liderado pelo Hemisfério Norte, cujos principais problemas estruturais estão forçando isso em função de que os países lá localizados apresentam:

- Incapacidade de produção de etanol de cana-de-açúcar;
- Impossibilidade de produção de biomassa florestal nos ritmos de crescimento que se obtêm no Hemisfério Sul;
- Altíssimos preços da madeira e de outras biomassas;
- Alta dependência de combustíveis fósseis;
- Altíssimos custos energéticos;
- Baixa competitividade na produção de celulose;
- Necessidade de encontrar outros modelos de negócios para o setor de celulose e papel.

Por outro lado, no Brasil, situam-se as fábricas de celulose Kraft branqueada consideradas as mais modernas e eficientes do planeta. Outras mais estão sendo construídas em ritmo acelerado. A produção de celulose de mercado deve aumentar em praticamente 10 milhões de toneladas em cerca de uma década.

Essa indústria é rentável, gera resultados e recursos para reinvestimentos e favorece o crescimento da capacidade instalada. Portanto, trata-se de um negócio de sucesso no Brasil. Por isso mesmo, as dificuldades e as restrições que no momento os países do Hemisfério Norte estão sofrendo (e motivando pesquisas e inovações tecnológicas) devem ser encaradas como aberturas de novas e adicionais oportunidades para o setor brasileiro de celulose e papel.

No caso de a estrutura e o modelo dos negócios serem eventualmente alterados nesse setor em nível global, devem ser encontradas maneiras de tornar o negócio no Brasil ainda mais competitivo do que já é no presente momento. Portanto, esse setor no Brasil não pode, em hipótese alguma, se colocar em posição de alienação ou de falta de interesse em relação aos avanços tecnológicos que estão e estarão ocorrendo nas tecnologias setoriais globais sob a ótica das biorrefinarias integradas.





Frente ao grande sucesso dessa indústria no Brasil no presente e à filosofia tradicional de “não se mexer em times que estão ganhando”, existe uma série de barreiras empresariais e tecnológicas para as biorrefinarias, tais como:

- Essa indústria tem aversão ao risco, sendo que a crise financeira mundial desses anos recentes tem favorecido as decisões de curto prazo e prejudicado as estratégias de longo prazo;
- O crescimento do uso da biomassa pode tornar o preço proibitivo até mesmo para a fabricação de celulose de mercado, podendo se atingir situações de dificuldades de abastecimento;
- Os novos produtos da biorrefinaria podem passar a competir com a produção de celulose por terra, matérias-primas, espaço físico, logística e mercados;
- Muitas das tecnologias para as biorrefinarias não estão ainda industrialmente comprovadas ou otimizadas;
- Existe uma diferença muito grande entre as escalas de produção de uma fábrica de celulose de mercado e das unidades integradas de biorrefinarias que fabricam produtos cujos mercados ainda precisam ser desenvolvidos ou conquistados;
- Existem muitas inquietudes e incertezas em nível tecnológico e mercadológico para diversas das alternativas das biorrefinarias;
- A identificação de parcerias não florestais para composição da estrutura dos negócios com biorrefinarias tem sido lenta ou inexistente, sendo poucas as chances de algumas ocorrerem no curto prazo, caso não sejam alavancadas por incentivos externos;
- Não existe no país uma clara política industrial e tecnológica estimulando mudanças na atual plataforma tecnológica do setor de celulose e papel;
- Não há no setor de fabricação e comercialização de celulose de mercado uma cultura de diversificação de produtos e orientação a mercados. A cultura empresarial nesse setor é mais do tipo direcionamento para a produção (*production-driven*) do que para o mercado (*market-oriented*). Nas fábricas de celulose de mercado isso é muito mais pronunciado do que nas fábricas integradas de papel;
- Os investimentos em biorrefinarias seriam enormes e adicionais aos projetados para o crescimento do setor;
- Acredita-se que os biocombustíveis só crescerão em consumo e valor de venda em situações de preços elevados do petróleo. Nas situações de queda de preços, as biorrefinarias seriam deficitárias em resultados;
- Acredita-se que deve haver algo mais simples e barato para produzir energia do que pela desconstrução e reconstrução da biomassa lignocelulósica;
- Não há claras evidências de que vá existir biomassa suficiente para produção de biocom-



bustíveis nas quantidades desejadas. Esse tipo de industrialização deveria ser suportado apenas pelas sobras de biomassa industrial e doméstica;

- A produção em larga escala de biomassa florestal para suprir as biorrefinarias passará a encontrar restrições legais e oposição por parte de entidades ambientalistas. Isso pode, inclusive, ser prejudicial às atuais plantações de florestas para suprimento das fábricas de celulose e papel.

Apesar dessas barreiras, existem algumas oportunidades interessantes que vêm sendo consideradas pelo setor:

- As biorrefinarias oferecem oportunidades para aumentar as margens e os resultados nos negócios do setor;
- As biorrefinarias aumentam a dimensão do negócio, ampliando fronteiras e favorecendo parcerias na rede de negócios;
- As biorrefinarias podem permitir melhor ecoeficiência e utilização dos insumos com redução dos desperdícios de biomassa e de energia;
- Existe muita ação governamental de incentivo às empresas para a prática da economia verde de baixo carbono, o que pode ser uma oportunidade para novas transformações na indústria como um todo. Isso pode ajudar a que as parcerias sejam estabelecidas com outros setores da economia, os quais conhecem o potencial de geração de biomassa renovável do setor de celulose e papel.

No momento, as modernas fábricas brasileiras de celulose de mercado estão mais preocupadas em utilizar seu potencial termoelétrico, vendendo eletricidade excedente a terceiros. É possível que, nesse ponto, estejam as maiores motivações para ser dado o primeiro passo para se implantarem biorrefinarias integradas no setor.

Para alavancagem de outros produtos, o setor vai precisar de motivação ou estímulo externo, um dos quais o estabelecimento de parcerias com outras empresas e setores. Caso a indústria química, a automobilística ou mesmo a energética tiverem necessidades de ampliar seus produtos com itens obtidos de matérias-primas renováveis, isso poderia vir a ser uma força motriz para novos negócios pelo setor de celulose e papel.

A realidade dos fatos presentes é que a indústria brasileira de celulose de mercado não está focando as biorrefinarias como o Hemisfério Norte, ou seja, como prioridade empresarial. Ela não quer arriscar o sucesso que tem tido no negócio atual.



Existe muita preocupação com o efeito da retirada das hemiceluloses ou da lignina sobre os processos vigentes, seja na eficiência operacional, custos, produtividade e qualidade dos processos e produtos.

Apesar disso, existem algumas rotas interessantes para o setor, sem que isso possa causar riscos frente às inquietudes atuais. São elas:

- Gaseificação da biomassa para geração de combustível verde e renovável para alimentar o forno de cal, eliminando a dependência de óleo combustível de origem fóssil;
- Gaseificação de parte do licor preto Kraft para aumentar a capacidade da fábrica sem que seja preciso investir em nova caldeira de recuperação;
- Extração de parte da lignina do licor preto para permitir aumento de capacidade na área de recuperação do licor. Essa lignina poderia ser usada como combustível no forno de cal, desde que não traga inconvenientes de aumento da poluição aérea pelo enxofre que tem, ou na qualidade da cal queimada (pela presença de sódio);
- Extração do metanol do licor preto e dos gases não condensáveis concentrados. Esse bio-combustível também pode ter uso interno, até mesmo no forno de cal;
- Extração de terebintina e de *tall oil* nas fábricas de celulose Kraft de coníferas (fibras longas a partir de madeiras resinosas);
- Produção de biogás pela digestão anaeróbica de resíduos orgânicos.

Todas as rotas tecnológicas que não impactem ou que alavanquem ou removam gargalos no processo de produção de celulose são vistas com interesse pelo setor. O aumento da eficiência operacional, inclusive energética, também é bem-vindo. Isso pode levar a maiores excedentes de eletricidade para venda a terceiros. Essa é a primeira opção empresarial na rota das biorrefinarias. As demais surgirão passo a passo, talvez seguindo os degraus tecnológicos citados acima.

Já se mencionou que o Brasil também produz celulose para dissolução em uma das maiores fábricas desse setor em nível global (Bahia Specialty Cellulose). São cerca de 465 mil toneladas anuais em uma única fábrica operando pelo processo pré-hidrólise Kraft.

Nessa fábrica, há muitas oportunidades para a implantação do conceito de biorrefinaria integrada – talvez estejam aí as oportunidades para transformações com o pré-hidrolisado do processo industrial. Trata-se, principalmente, de encontrar parcerias adequadas na indústria química ou energética para potencializar a produção de furfural, xilose, etanol, ácido acético, xilitol, etc.



A adoção do conceito de biorrefinaria de forma mais ampla pode oportunizar a fabricação de outros produtos como ácido acético, álcoois e outros derivados de lignina. Entretanto, é preciso haver mercados e custos competitivos para que essas oportunidades se materializem.

Frente a essa avaliação setorial, pode-se entender que existem algumas oportunidades para a implementação gradual do conceito de biorrefinarias integradas no Brasil. Deve-se, porém, em função das particularidades da indústria brasileira, desenvolver-se um conceito adequado a ela e que necessariamente não é o conceito que se está tentando criar nos Estados Unidos, no Canadá, na Suécia e na Finlândia. É muito possível que alguns desses conceitos possam ser viabilizados para as fábricas brasileiras, mas nem todos. Eles precisarão de adaptações às realidades de nossas matérias-primas e das redes de negócios locais.

Quanto às pesquisas e patentes com biorrefinarias no setor de celulose e papel, o Brasil está definitivamente distante do que vem sendo realizado nos principais centros de pesquisa mundiais. Atualmente, no Brasil, o foco está nas biorrefinarias integradas ao setor sucroalcooleiro para aumentar a produção de bioetanol. A maior parte das pesquisas em biorrefinarias que vêm sendo realizadas em universidades públicas e centros de pesquisa tecnológica no Brasil está focada nesse segmento industrial.

Entretanto, temos diversos centros de pesquisa estudando o uso energético da biomassa pelas rotas termoquímicas. Esses centros têm, inclusive, mostrado sua competência em congressos e revistas internacionais com publicações sobre o uso de biomassas brasileiras para produção de biocombustíveis e produtos químicos.

Pode-se dizer que as pesquisas tecnológicas precisam ser estimuladas e ordenadas às rotas e plataformas tecnológicas com maiores possibilidades de implementação com sucesso pelo setor brasileiro de celulose e papel. Deve-se evitar a orientação a pesquisas como está ocorrendo hoje, tentando replicar no Brasil as pesquisas que vêm sendo feitas no Hemisfério Norte. Além de apenas concluir o mesmo que se concluiu no exterior, elas podem estar desfocadas das realidades e necessidades da indústria brasileira.



## 6. Tendências tecnológicas

As duas seções anteriores, juntamente com os debates gerados pelo estudo, formaram a base para a construção desta nova etapa. A definição das tendências tecnológicas utilizou metodologia qualitativa com base em pesquisa de opinião colhida junto aos especialistas na temática celulose e papel. O processo foi elaborado em cinco etapas, conforme segue:

- Divisão dos grupos e construção do questionário;
- Levantamento dos especialistas;
- Aplicação da pesquisa;
- Extração e análise;
- Construção do mapa.

O primeiro passo foi a definição dos quatro grupos temáticos:

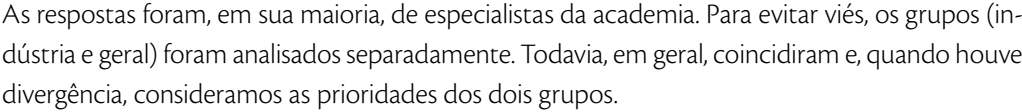
- (i) Grupo Bioenergia;
- (ii) Grupo Produtos Não Energéticos;
- (iii) Grupo Processos e Produtos Tradicionais (Avanços Tecnológicos); e
- (iv) Grupo Biomassa Florestal e Madeira.

A construção do questionário obedeceu a essa divisão e o mesmo foi submetido a um conjunto de aproximadamente mil especialistas (entre governo, empresas e academia) previamente selecionados. Houve resposta de aproximadamente 50% desse universo que foi submetida a um novo filtro, tendo em vista a autodeclaração de conhecimento do respondente sobre o assunto. O objetivo da pesquisa foi levantar opiniões sobre os seguintes pontos:

- Identificar os produtos e tecnologias relevantes;
- Priorizar as tecnologias identificadas;
- Definir o estágio de maturidade de PD&I para cada temática<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Para essa identificação, utilizou-se a escala de maturidade tecnológica baseada nos conceitos do Manual de Oslo ([http://www.finep.gov.br/dcom/brasil\\_inovador/arquivos/manual\\_de\\_oslo/](http://www.finep.gov.br/dcom/brasil_inovador/arquivos/manual_de_oslo/)): (1) Pesquisa básica; (2) Pesquisa aplicada; (3) Desenvolvimento experimental; (4) Aplicação prática seletiva; (5) Utilização generalizada.



O resultado foi uma plataforma de temáticas priorizadas com potenciais desdobramentos em ações de CT&I para fomentarem o desenvolvimento do setor e a eficiência energética.

## 6.1 Grupo Bioenergía

Para a construção do mapa (Figura 9), nesse grupo de produtos energéticos, foram definidos os produtos prioritários que esse setor industrial poderia produzir em 2020, além dos produtos clássicos (celulose e papel). Para cada produto, foram relacionadas as tecnologias prioritárias que o setor deverá desenvolver e adotar nesse horizonte temporal.

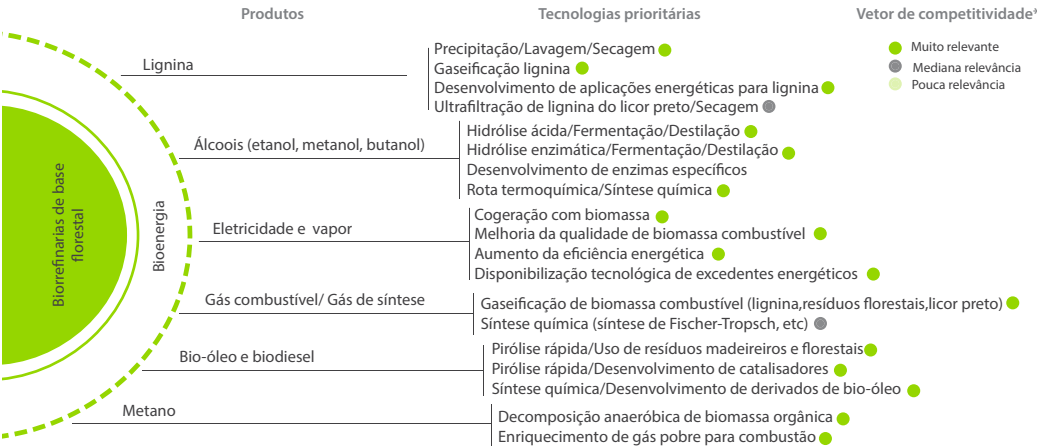


Figura 9 – Mapa tecnológico para grupo Bioenergía (Bioproductos energéticos)

\* Define o nível de prioridade conforme a competitividade.

A exceção da produção comercial para venda de excedentes de eletricidade e vapor pela cogeração em caldeiras de biomassa, que se encontra em utilização generalizada e com amplo domínio tecnológico no setor, todas as demais tecnologias identificadas como relevantes foram classificadas pelos especialistas como em fase de pesquisa científica, pesquisa aplicada e em desenvolvimento.



experimental. Já em 2020, todas deverão estar em estágios mais avançados, frente aos esforços inovativos e de P&D, sendo entendido que praticamente todas as temáticas já estarão em fases como desenvolvimento experimental e aplicação prática seletiva ou mesmo em uso generalizado.

A produção de biocombustíveis pelo setor de celulose e papel é algo que está amadurecendo muito rapidamente. O setor se vale de uma matriz energética, em sua maior parte, de origem verde e renovável e tem como meta tornar-se independente dos combustíveis fósseis. Portanto, entende-se que as tecnologias voltadas para a separação e o uso da lignina, bem como a produção de gases combustíveis pela gaseificação da biomassa úmida disponível na forma de resíduos madeireiros e florestais, deverão ter rápido desenvolvimento e aceitação.

A extração e o uso interno da lignina como biocombustível alimentando o forno de cal (como combustível sólido ou como material gaseificado) são fatores de atratividade e competitividade importantes para as fábricas de celulose Kraft. Isso porque essa opção tecnológica permite o aumento de produção em celulose das fábricas, quase sempre, com fortes gargalos operacionais em seu sistema de recuperação do licor preto.

Dessa forma, as alternativas que possam resultar em aumento de competitividade da fábrica de celulose têm peso importante na aceitação e no rápido desenvolvimento tecnológico. Alternativa que também se enquadra bem nesses quesitos é a gaseificação da biomassa úmida, podendo ser licor preto, resíduos de madeira da fábrica, resíduos florestais ou lodos orgânicos de tratamentos de efluentes. Em todos os casos, a atratividade é grande, pois, além de representarem potenciais aumentos de produção de celulose ou de bioenergia, podem reduzir as quantidades de resíduos que atualmente são tratados como poluentes pelas empresas do setor.

Já as produções de álcoois, bio-óleo e biodiesel têm sido encaradas pelo setor de celulose e papel como relativamente estratégicas, mas existe no Brasil um grande esforço de P&D acadêmico e empresarial relacionado a esses produtos em função da indústria sucroalcooleira e do setor de produção de aço à base de carvão vegetal, como demonstrou a pesquisa com os especialistas consultados. Esses dois setores têm interesse imediato para o desenvolvimento do etanol de segunda geração e do bio-óleo/biodiesel, respectivamente.

Por isso mesmo, as parcerias entre o setor de celulose e papel e esses outros dois setores de nossa economia tornam-se de relevante importância. Desde que as produções desses biocombustíveis sejam atingidas por meio dos avanços tecnológicos, os três setores industriais se beneficiarão



pelo aumento da base de seus negócios. As parcerias em pesquisa tecnológica podem e devem ser estimuladas, já que, além desses três importantes setores da economia brasileira, também o setor energético tem interesse nesses desenvolvimentos, podendo atuar como catalisador para estimular essas parcerias intersetoriais.

Outro fator estimulador ao desenvolvimento da área bioenergética nas empresas do setor de celulose e papel é sua excepcional base florestal. As florestas brasileiras plantadas são líderes globais em produtividade. Além disso, as técnicas mecanizadas de colheita acabam gerando quantidades significativas de resíduos florestais, que somados aos resíduos orgânicos gerados nas fábricas (casca, cavacos desclassificados de madeira, lodos orgânicos) oferecem uma importante quantidade de insumos para processos de produção de bioenergia, desde as formas mais simples (compactação e adensamento da biomassa como briquetes e péletes) até a produção de biocombustíveis líquidos e gasosos. Para isso, as tecnologias de gaseificação da biomassa, pirólise rápida ou de produção de álcoois são vitais para esse desenvolvimento, capaz de agregar mais competitividade e eficiência energética ao setor. Dessa forma, o entendimento dos especialistas consultados é absolutamente justificado.

O setor de celulose e papel também é grande gerador de resíduos sólidos orgânicos, os quais são perdidos principalmente como resíduos sólidos e nos efluentes líquidos.

A decomposição anaeróbica da biomassa é vista pelos especialistas como tecnologia simples e em avançado estágio de utilização comercial em nível internacional, podendo ser de enorme valia ao setor nesse horizonte até 2020. Além de oferecer o metano combustível para uso nas próprias fábricas, a degradação de resíduos orgânicos de forma controlada para geração e queima do gás metano tem a vantagem de permitir comercialização de créditos de carbono conforme acordos internacionais relativos ao mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).

## 6.2 Grupo Produtos Não Energéticos

Para a construção do mapa (Figura 10), nesse grupo de produtos não energéticos (e alguns produtos híbridos, como o dimetil-éter), foram definidos os produtos prioritários que esse setor industrial poderia produzir em 2020, além dos seus produtos clássicos (celulose e papel).





Para cada produto, foram relacionadas as tecnologias prioritárias que o setor deverá desenvolver e adotar nesse horizonte temporal. Em uma etapa seguinte desse mapa tecnológico, procurou-se colocar a situação atual das tecnologias entendidas como prioritárias e o estágio em que elas deverão estar em 2020.

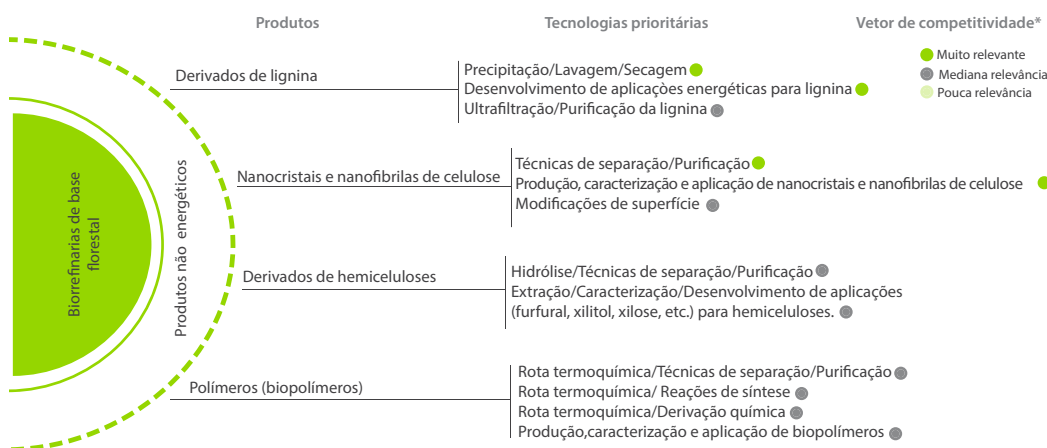


Figura 10 – Mapa tecnológico para grupo Produtos Não Energéticos

\* Define o nível de prioridade conforme a competitividade.

A possibilidade de manufaturar diversos produtos não energéticos nas biorrefinarias integradas às fábricas de celulose Kraft é entendida como muito potencial pelos especialistas do setor. Diversos produtos são entendidos como de alta viabilidade tecnológica e comercial e já existe um esforço significativo de pesquisas no país em relação a eles.

Há muito otimismo em relação aos derivados não energéticos da lignina, que são vistos como produtos nobres e capazes de agregar valor e competitividade ao setor de celulose e papel. A disponibilidade de lignina é enorme no setor. Atualmente, haveria disponibilidade de recuperar parte das cerca de oito milhões de toneladas de lignina que são queimadas pelas caldeiras de recuperação, sendo que essa quantidade poderá atingir quase 15 milhões de toneladas em 2020, frente ao crescimento em capacidade da indústria brasileira de celulose Kraft.

Considerando que a extração de lignina do licor preto e a sua utilização energética já está, inclusive, em estágios tecnológicos mais avançados no Hemisfério Norte, fica, nesse caso de produtos não energéticos, a responsabilidade de desenvolver tecnologias para purificar a lignina de seus



contaminantes como enxofre e sódio e torná-la quimicamente mais uniforme em qualidade. Com isso, poder-se-ão atingir as especificações para a produção de derivados valiosos como as fibras de carbono ou derivados de lignina para a indústria química.

Também existem muitas expectativas positivas em relação ao que normalmente se denomina de nanocelulose (nanocristais e nanofibrilas de celulose). Esses produtos estão atualmente em fase de pesquisas acadêmicas de bancada e de pesquisas aplicadas, mas existem inúmeras possibilidades de rápido desenvolvimento tecnológico para eles. Há muito esforço em pesquisas em nível global, esperando-se que, no horizonte de 2020, esses produtos possam estar em aplicação comercial e, até mesmo, disponibilizados por diversas biorrefinarias. A principal razão para esse otimismo dos especialistas é que as nanoceluloses não são específicas ao setor de celulose e papel. Elas podem ser obtidas de outras matérias-primas vegetais ricas em celulose, inclusive de resíduos agrícolas como casca de coco, fibras vegetais, etc.

Apesar do setor de celulose e papel no Brasil ainda não ter demonstrado maior entusiasmo para a produção conjunta de polímeros em suas prováveis biorrefinarias, também para esses produtos os especialistas mostram-se otimistas para o desenvolvimento das tecnologias prioritárias no Brasil. Mais uma vez, isso é reflexo da influência de outros setores industriais que desenvolvem a química verde a partir de biomassa, como é o caso da indústria química e da indústria sucroalcooleira. Nada mais natural para um país que já detém tecnologia para a produção de plástico verde biodegradável. Nesse caso, a rota termoquímica tem-se mostrado como a preferência dos especialistas.

Em função dessas expectativas otimistas e positivas, há fortes indícios de que a produção de biopolímeros, nanoceluloses e derivados de lignina possam estar com suas tecnologias prioritárias relativamente dominadas no país, caso haja um esforço estimulador para isso. As chances são grandes de haver, em 2020, algumas unidades industriais em estágio de produção experimental e mesmo de comercialização de alguns desses produtos.

Por outro lado, as consultas ao setor de celulose e papel demonstraram certo nível de desconforto por parte dos especialistas da indústria em relação aos derivados de hemiceluloses. Tanto o furfural quanto a xilose e o xilitol já têm rotas tecnológicas dominadas e conhecidas, porém utilizando outros tipos de biomassas como matérias-primas. Também a produção de álcoois por rotas bioquímicas a partir de pentoses não se tem mostrado como a melhor das alternativas tecnológicas para esse tipo de produto. No caso do furfural, xilose e xilitol, as tecnologias estão



disponíveis, porém os mercados já são competitivos e não está havendo um maior interesse em adaptar essas tecnologias para as biorrefinarias de celulose. No caso dos álcoois, a maior desconfiança é em relação ao processo de extração das hemiceluloses dos cavacos de madeira, em etapa prévia à polpação Kraft. Essa remoção pode afetar rendimentos em produção de celulose e ainda prejudicar a qualidade das fibras. Também a produção de etanol de pentoses não é tão eficiente quanto aquela que se obtém de hexoses.

Entretanto, os derivados de hemiceluloses podem se tornar interessantes alternativas para as fábricas de celulose para dissolução (ou polpas solúveis), em que é vital a remoção das hemiceluloses das fibras, pois elas se constituem em contaminantes aos usuários desse tipo de polpa.

### 6.3 Grupo Processos e Produtos Tradicionais (Avanços Tecnológicos)

A adoção do conceito de biorrefinarias integradas à fabricação de celulose e papel deverá acelerar mudanças estruturais seja no negócio como tal, seja nas tecnologias utilizadas por esse setor industrial. Além dessas mudanças causadas pelas biorrefinarias, as necessidades de níveis mais adequados de ecoeficiência e sustentabilidade deverão introduzir algumas outras alterações tecnológicas fortes no setor, em especial quanto à reciclagem do papel e na geração e utilização de itens energéticos. Em função das consultas feitas a inúmeros especialistas relacionados a esse setor, foram elencadas algumas tecnologias prioritárias necessárias para acompanhar essas mudanças estruturais e tecnológicas. A lista dessas tecnologias e o seu mapa tecnológico são mostrados na Figura 11, respectivamente.

As atuais fábricas de celulose Kraft demandarão alterações tecnológicas que podem ser substanciais em função do tipo de biorrefinaria que vierem a adotar. Isso porque a produção de outros itens a partir da mesma base de biomassa florestal poderá demandar adequações para melhorar ou manter a qualidade, produtividade, eficiência energética e operacional dessas fábricas. As principais alterações dizem respeito aos processos de recuperação do licor preto e à própria polpação Kraft. A provável remoção de lignina e/ou de hemiceluloses do processo para alimentar como matérias-primas a produção de outros itens na biorrefinaria precisará ser compensada por modificações tecnológicas urgentes, o que é demonstrado pela rapidez com que os especialistas consultados enxergam que elas devam acontecer. Dentre as mais urgentes estão aquelas relacionadas às alterações tecnológicas na evaporação do licor preto e na combustão de um licor preto mais pobre em poder calorífico e mais rico em cinzas, com inegáveis potenciais de afetar o



desempenho das caldeiras de recuperação. Frente a isso, não é descartada pelos especialistas até mesmo a substituição da caldeira de recuperação por tecnologias que promovam a gaseificação de todo o licor preto de uma fábrica Kraft: algo inimaginável poucos anos atrás.

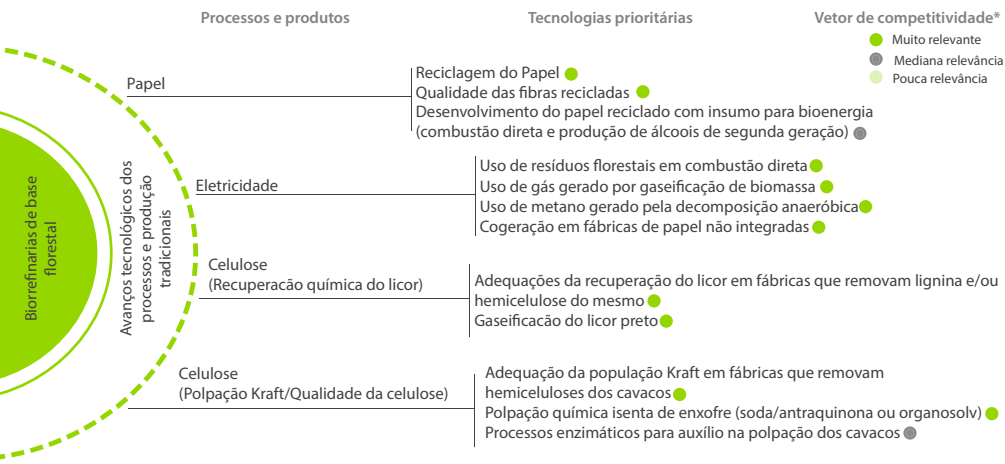


Figura 11 – Mapa tecnológico para grupo Avanços Tecnológicos dos Processos e Produtos tradicionais

\* Define o nível de prioridade conforme a competitividade.

Outra ênfase colocada pelos especialistas é a necessidade das fábricas conseguirem manter seus rendimentos, produtividades e qualidades nos seus produtos e processos vitais, que são aqueles associados à celulose e ao papel. Por essa razão, essas adequações tecnológicas estão sendo alavancadas com vigor para que, antes mesmo de 2020, estejam em plena utilização. O crescimento das biorrefinarias em grande parte dependerá dessas soluções tecnológicas nas áreas de polpação Kraft e de recuperação do licor.

Algumas dessas alterações podem ser significativas. O processo Kraft, que há mais de 130 anos domina soberano na indústria de celulose, poderá ter sua liderança ameaçada por outros processos isentos de enxofre ou por processos com base em solventes orgânicos. Isso dependerá do grau de sucesso que vier a ser atingido pelas biorrefinarias integradas e de suas viabilidades técnica e comercial. Até mesmo os processos enzimáticos poderão ter seu desenvolvimento acelerado como forma de facilitar a ação dos agentes químicos na polpação e no branqueamento.

Em relação à fabricação de papel, a reciclagem do papel já é hoje uma alternativa tecnológica conhecida e dominada, sendo praticada em nível global. Entretanto, ela poderá ser aperfeiçoada



em relação a novas disponibilizações de matérias-primas, qualidade das fibras recicladas e melhorias na qualidade dos papéis reciclados produzidos.

Com o aumento da coleta seletiva de lixo doméstico urbano e industrial e pela necessidade de se reduzir o volume de lixo gerado nas grandes cidades, surgiram outras oportunidades identificadas pelos especialistas em uma das oficinas promovidas pelo CGEE. Uma delas seria a própria utilização do papel coletado do lixo e de pior qualidade como biomassa combustível. Outra opção seria o uso desse papel como matéria-prima para produção de álcoois de segunda geração, da mesma forma que os resíduos florestais e lenhosos. São utilizações que demandarão pesquisas e estudos para viabilização.

As fábricas de papel (reciclados ou não) que não sejam integradas à fabricação de celulose em geral são carentes de eletricidade e vapor, exigindo tecnologias de produção que sejam eficientes e compatíveis com suas realidades. A cogeração (produção simultânea de eletricidade e vapor) é entendida pelos especialistas como uma das tecnologias de maior facilidade de implementação nessas fábricas no curto prazo. Trata-se de tecnologia dominada e que pode perfeitamente ser transferida e adaptada a cada situação particular desses fabricantes, em geral de pequeno e médio porte, no Brasil.

Já nas fábricas de celulose Kraft, a maior utilização de resíduos orgânicos (florestais ou gerados na própria fábrica) na combustão em caldeiras de força deve ser estimulada, com geração de maiores quantidades de energia, inclusive com excedentes para venda a terceiros. Também os gases gerados na gaseificação da biomassa ou mesmo de lignina e licores poderão alimentar caldeiras multicomcombustíveis. Isso é válido também para o metano, que pode ser produzido pela decomposição anaeróbica de resíduos.

## 6.4 Grupo Biomassa Florestal e Madeira

As biorrefinarias de base florestal, como o próprio nome identifica, dependem da base florestal, que funciona como provedora das matérias-primas fundamentais para os processos produtivos. Dessa forma, a qualidade da madeira e da biomassa (resíduos florestais e outros resíduos lenhosos fabris) interfere nos rendimentos, qualidades e níveis de produtividade dessas biorrefinarias.



Um esforço tecnológico para melhoria de diversas variáveis qualitativas dessas matérias-primas é entendido como fundamental pelos especialistas consultados. Em função da pesquisa estruturada e das discussões nas oficinas de especialistas coordenadas pelo CGEE, foram definidas algumas variáveis vitais e os processos tecnológicos prioritários que podem ser gerenciados para aperfeiçoá-las.

As variáveis da madeira e da biomassa definidas como mais importantes foram: teor de lignina, teor de hemiceluloses, teor de celulose e poder calorífico. Além dessas, um parâmetro operacional que é muito afetado pela gestão das operações e pela qualidade das florestas também foi definido como crítico pelos especialistas: trata-se da quantidade e qualidade dos resíduos florestais. As tecnologias prioritárias associadas a eles e o mapa tecnológico para este grupo estão relacionadas na Figura 12.

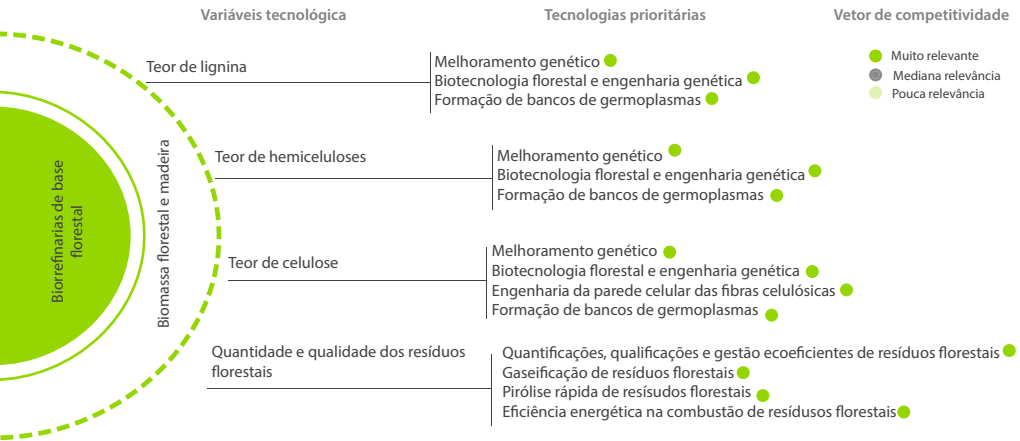


Figura 12 – Mapa tecnológico para grupo Biomassa Florestal e Madeira

\* Define o nível de prioridade conforme a competitividade.

As variáveis qualitativas pré-definidas como muito importantes para o melhoramento da qualidade da biomassa florestal e madeira foram entendidas pelos especialistas como fundamentalmente dependentes de dois processos tecnológicos prioritários: melhoramento genético e biotecnologia/engenharia genética. Em grande parte, o sucesso da silvicultura brasileira tem como fundações os estudos e pesquisas realizados nessas áreas da ciência florestal. Mais recentemente, as interações entre o melhoramento florestal, as práticas silviculturais e o ambiente onde as florestas são implantadas também passaram a ser evidenciadas como importantes no desenvolvimento de materiais com maior potencial produtivo e com qualidades mais uniformes em



função das demandas tecnológicas dos processos onde o material florestal deverá ser utilizado como matéria-prima. As variáveis: teores de lignina, de hemiceluloses, de celulose, bem como o poder calorífico da biomassa são definitiva e comprovadamente influenciados pela genética e pela biotecnologia. Por essa razão, a ênfase dada pelos especialistas para que essas rotas tecnológicas sejam prioritárias no melhoramento dos materiais. No caso da parede celular das células das árvores, os especialistas sugeriram ainda um maior desenvolvimento nas rotas de formação da madeira e na engenharia da parede celular, exatamente onde estão dispostos os componentes a serem melhorados: lignina, celulose e hemiceluloses.

A biotecnologia e a engenharia genética são vistas como tecnologias prioritárias no setor, porém os problemas enfrentados junto aos organismos certificadores de manejo florestal (que não autorizam estudos e plantios de organismos geneticamente modificados) deverão retardar os avanços práticos dessas tecnologias. Mesmo assim, o setor de celulose e papel tem feito enormes esforços para utilização de ferramental tecnológico com base biotecnológica, como é o caso da genômica, permitindo, com isso, aceleração do processo de melhoramento genético.

Houve também um foco em se criar bancos de germoplasmas em níveis nacionais como forma de perpetuar e conservar materiais genéticos que possam ser resgatados em momentos de mudanças ou adequações nas rotas tecnológicas de processos produtivos.

Em relação à quantidade e qualidade dos resíduos florestais, diversos fatores tecnológicos e de gestão foram recomendados para serem otimizados. A qualidade e quantidade dos resíduos florestais são funções de diversos fatores como: qualidade da floresta (forma, volume das árvores, etc.), qualidade das operações de colheita e transporte florestal, gestão ecoeficiente das operações, controle de desperdícios, etc. Estudos foram sugeridos para um maior entendimento dessas interações entre o que se pratica nas operações florestais e o que se obtém de resíduos. Importante salientar que aquilo que nos dias atuais recebe a denominação singela de resíduos, na era das biorrefinarias, passará a ser matéria-prima fundamental para diversas rotas tecnológicas, algumas de alta complexidade. Portanto, nada mais natural que os especialistas definam que essas atividades precisam ser melhoradas em horizonte temporal curto. Ou seja, antes mesmo de 2020, para alguns casos.







## 7. Recomendações de ações

Este capítulo descreve as recomendações de ações de CT&I derivadas das tendências e prioridades para o setor identificadas na etapa anterior. A construção das recomendações inicia identificando as oportunidades e desafios para as linhas temáticas e, com base nelas, elaborando as sugestões de ações de CT&I.

A identificação e a consequente construção das ações foram realizadas por meio de debate com um conjunto de atores, numa oficina de trabalho, com as participações da academia, indústria e governo. Após essa etapa, as ideias expostas foram consolidadas e validadas junto a um grupo menor de especialistas. A sistemática da oficina, por sua vez, segue uma ordem que iniciou com o debate sobre as oportunidades e os desafios das linhas temáticas priorizadas e segue com as recomendações.

Os trabalhos foram conduzidos nos quatro grupos técnicos, visando a uma melhor qualidade dos debates e a um melhor aproveitamento das propostas apresentadas. São eles:

- (v) Grupo Bioenergia;
- (vi) Grupo Produtos Não Energéticos;
- (vii) Grupo Processos e Produtos Tradicionais (Avanços Tecnológicos); e
- (viii) Grupo Biomassa Florestal e Madeira.

### 7.1 Grupo Bioenergia

#### 7.1.1 Gaseificação de biomassa úmida

A tecnologia de gaseificação de biomassa consiste na conversão do estado sólido ao estado gasoso por meio de rota termoquímica (aquecimento forçado e em condições padronizadas para favorecer a decomposição térmica da biomassa com mínima geração de resíduo sólido ao final do processo). Nesse processo, são obtidos gases constituídos principalmente de CO e H<sub>2</sub>. Esses gases podem ser utilizados diretamente como combustíveis ou se tornarem matérias-primas para diversos processos de sínteses químicas.



Considerando os debates, foram recomendadas as seguintes ações para viabilizar a tecnologia de gaseificação para utilização pelo setor de celulose e papel:

- (i) Estimular a aquisição de um gaseificador para testes em escala industrial para gerar pesquisa consorciada entre empresas fabricantes de celulose e papel (por exemplo: Suzano, International Paper do Brasil, Eldorado, Fibria, Cenibra, etc.); instituições de pesquisa [por exemplo: Unifei-Itajubá, UFV-Viçosa; USP-São Carlos, Unicamp-Campinas, Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)-São Paulo, etc.] e fornecedores de equipamentos (por exemplo: Andritz, Metso, Termoquip, etc.), na área de integração do sistema de gaseificação de biomassa com o queimador do forno de cal, testando condições, matérias-primas, catalisadores, desempenhos, eficiências e outras inovações que favoreçam o uso dessa tecnologia para essa posição fabril;
- (ii) Incentivar a criação de um centro de estudos em gaseificação de biomassa florestal em universidade pública brasileira para coordenação e desenvolvimento de pesquisas, utilizando-se do gaseificador acima citado após o término da pesquisa orientada ao setor de celulose e papel (forno de cal);
- (iii) Promover editais para seleção dos grupos de pesquisa (universidades, empresas/centros de P&D) que possam conduzir os estudos tecnológicos e desenvolver capacitação dentro de metas e prazos adequados às necessidades brasileiras;
- (iv) Promover parcerias internacionais envolvendo a África do Sul (por exemplo: South African Forestry Company-Safcol) e outros países detentores de tecnologias, academias e experiências de sucesso como Canadá (por exemplo: Universidade de Toronto, FPInnovations-Montreal); Finlândia (por exemplo: VTT, Universidade de Helsinki, Universidade de Aalto, etc.) e Suécia (por exemplo: Innventia, Universidade de Chalmers, Universidade de Lulea – Swedish Gasification Centre, etc.) para a obtenção de informações tecnológicas e troca de experiências;
- (v) Desenvolver a tecnologia de gaseificação de forma a atingir gradativamente a escala e homogeneidade operacionais necessárias à indústria nacional de celulose e papel;
- (vi) Promover a qualificação/intercâmbio de pessoal técnico das empresas e das universidades/centros de pesquisa, aproveitando os estudos em gaseificação de biomassa para desenvolvimento de teses, dissertações, monografias, artigos, etc., bem como para a capacitação de recursos humanos, priorizando a adequação das tecnologias às condições brasileiras. Priorizar as áreas de engenharia para projetos, otimizações, controles operacionais, qualidade das matérias-primas florestais, automação na gaseificação da biomassa florestal;
- (vii) Incentivar o desenvolvimento de novos produtos energéticos sintetizados a partir dos materiais obtidos pela técnica de gaseificação (*syngas*) em parceria com o Cenpes-Petrobras e outras instituições de P&D (IPT, Unifei, Unicamp, etc.);



- (viii) Promover a capacitação em catálise e na integração da rota termoquímica (por exemplo: síntese de Fischer-Tropsch);
- (ix) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT nacionais ou internacionais.

### 7.1.2 Lignina

A lignina é um dos principais constituintes químicos da madeira e o principal responsável pelo seu poder calorífico. No processo de produção de celulose, é um componente que se busca reduzir na madeira ou eliminar no produto celulósico (no caso de se produzir celulose branqueada). Ao se conduzir o processo de polpação pelo processo Kraft ou sulfato (o mais utilizado em todo o mundo, inclusive no Brasil), os cavacos de madeira são submetidos ao licor de cozimento (a relativamente elevada temperatura: 140°C a 175°C) durante um período suficiente para promover a fragmentação e solubilização da lignina. Nesse processo, o licor de cozimento reage com os componentes da madeira e tem sua coloração e composição alteradas, passando a apresentar coloração escura em função da presença de matéria orgânica, especialmente fragmentos de lignina e de hemiceluloses, sendo extraído do digestor como licor preto que segue para um sistema de recuperação.

As seguintes ações para viabilizar a utilização energética de parte da lignina possível de ser removida do licor preto foram identificadas durante os debates:

- (i) Incentivar a participação de técnicos e pesquisadores brasileiros em eventos nacionais e internacionais com a finalidade de monitorar a evolução da tecnologia de remoção de lignina do licor preto em sua aplicação energética;
- (ii) Incentivar a realização de estudos e pesquisas no sentido de aperfeiçoar as características da lignina Kraft para a geração de energia (combustão direta), bem como para otimizar o processo de sua gaseificação;
- (iii) Inserir nas atividades do Programa Ciência sem Fronteiras a participação em eventos nacionais/internacionais e intercâmbio de pesquisadores, visando buscar compreender como é tratado o produto lignina em países detentores de tecnologia no tema (por exemplo: Suécia, Finlândia, Canadá, Estados Unidos, etc.);
- (iv) Investir na ampliação do número de laboratórios, bem como equipar os laboratórios já existentes (Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) em Belo Horizonte, Universidade de São Paulo (USP) em São Carlos, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), USP-São Paulo,



etc.) e capacitar os recursos humanos nas tecnologias de extração, produção e utilização industrial da lignina Kraft (ação conjunta com o Grupo Itens Não Energéticos);

- (v) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema, com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, sejam nacionais ou internacionais.

### 7.1.3 Álcoois

Dentre os álcoois, o etanol é o mais conhecido e o mais utilizado como combustível líquido no Brasil, quer seja em carros movidos a álcool ou nos carros flex. Em outros países, também tem sido adicionado à gasolina como uma forma de melhorar a matriz energética.

Dentre as ações sugeridas para viabilizar o desenvolvimento da produção de álcoois com base na biorrefinaria baseada na indústria de celulose podem-se relacionar as seguintes:

- (i) Incentivar ações articuladas com a indústria da cana (massa crítica), indústria de enzimas e indústria de celulose e papel juntamente com a academia;
- (ii) Investigar a rota bioquímica contemplando as duas tecnologias (enzimática e ácida), buscando desvendar quais são as melhores aplicações para cada uma. Deve-se investir em pesquisas utilizando a massa crítica gerada pela indústria da cana, por meio de parcerias com CTBE-Campinas, CTC-Piracicaba, Indústria Dedini, etc.;
- (iii) Promover parcerias internacionais com centros de excelência em produção de etanol celulósico, tais como: State University of New York-Syracuse/USA; NREL - National Renewable Energy Laboratory/Colorado/USA; Environment Canada/Canadá, etc.);
- (iv) Incentivar pesquisas para produção de álcoois via rota termoquímica, utilizando-se de infraestrutura de pesquisa contemplada em ações e recomendações previstas para o tópico Gaseificação de Biomassa Úmida;
- (v) Promover, por meio do lançamento de editais, a prospecção de materiais da biodiversidade florestal e o avanço tecnológico para produção de enzimas destinadas à geração de etanol celulósico (e outros álcoois), seja de carboidratos de cinco (pentoses) ou seis carbonos (hexoses);
- (vi) Disponibilizar linhas de financiamento para implantação de plantas piloto para produção de álcoois a partir de biomassa florestal no formato de subvenção ou parceria econômica [Financiadora de Estudos e Projetos (Finep)/ Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES)];
- (vii) Incentivar pesquisas genéricas em nível básico e aplicado sobre hidrólise da madeira;
- (viii) Fomentar parcerias tecnológicas entre a indústria de celulose e papel e os centros de pesquisa de biomassa existentes (centros de pesquisa/universidades em estudos de biomassa



e dedicados aos álcoois – etanol, butanol, metanol, etc.) com a finalidade de desenvolver tecnologias a partir da biomassa florestal;

- (ix) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema, com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, nacionais ou internacionais.

#### 7.1.4 Eletricidade e Vapor

A indústria de celulose e papel é intensiva no uso de energia seja na forma de vapor ou de eletricidade. Por essa razão, busca gerar, com base na biomassa, grande quantidade de energia que é utilizada no processo industrial. As modernas plantas de celulose Kraft não integradas são autossuficientes em energia e geram excedentes que muitas vezes podem ser disponibilizados para a rede de distribuição ou para abastecer arranjos produtivos regionais que têm empresas de celulose como âncoras energéticas.

Dentre as ações sugeridas para incentivar essa linha de produtos energéticos estão as seguintes:

- (i) Estimular e financiar pesquisas buscando técnicas para aumentar o poder calorífico dos resíduos florestais, objetivando sempre um balanço positivo no poder de geração energética [P&D / Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel)];
- (ii) Adotar mecanismos que tornem a eficiência energética um quesito atrativo para as empresas produtoras de celulose e papel com potencial de produção de excedente energético [Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) / [Programa de Eficiência Energética (PEE) / Aneel] – como sugestão de alteração no programa e em suas ações normativas;
- (iii) Estudar modelos de mercado que deem incentivos para que as novas plantas sejam dimensionadas de modo a produzir o máximo de energia elétrica que seus balanços permitam com redução das tarifas de uso da rede quando da venda do excedente energético;
- (iv) Fomentar políticas industriais que favoreçam os arranjos produtivos locais, investigando os melhores formatos/estruturas que atuariam como consumidores dos excedentes de geração energética sem a necessidade de grandes investimentos em redes de distribuição.

#### 7.1.5 Pirólise rápida/Síntese química

O processo de pirólise rápida, também conhecido como termólise rápida, consiste em se decompor termicamente a biomassa com elevação rápida da temperatura (até temperaturas da ordem de 500 oC - 550oC) sem a presença ou com quantidades limitadas de oxigênio. Isso faz



com que o material orgânico sólido seja decomposto principalmente em líquido (bio-óleo), gás pobre (que pode ser utilizado em sínteses químicas) e resíduo sólido (carvão vegetal).

Dentre as ações julgadas relevantes, destacaram-se as seguintes:

- (i) Estabelecer mecanismos de incentivo às pesquisas na área de pirólise rápida por meio de editais [Finep/ Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)] e apoios e/ou parceria com as entidades estaduais de pesquisa;
- (ii) Desenvolver catalisadores para pirólise rápida com suporte financeiro do [Cenpes/Agência Nacional do Petróleo (ANP)];
- (iii) Promover pesquisas ligadas à rota termoquímica para geração de produtos derivados de síntese química em complementação ao uso energético dos produtos diretamente obtidos pela pirólise rápida;
- (iv) Articular e promover pesquisas conjuntas com centros de pesquisa de biomassa florestal [por exemplo: Embrapa Energia, Embrapa Florestas, Fundação Centro Tecnológico (Cetec), IPT, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq)/USP, UFV, Rede Nacional de Biomassa para Energia (Renabio), etc.];
- (v) Fomentar a criação de uma rede tecnológica focada em pesquisas na temática pirólise rápida;
- (vi) Fomentar ações conjuntas entre empresas e centros de pesquisa/universidades, estimulando a aquisição de equipamentos em escala piloto para pirólise rápida com a finalidade de gerar desenvolvimentos tecnológicos na área de integração de sistemas, catálise, rota termoquímica, automação e outras inovações incrementais;
- (vii) Promover a capacitação de pessoal (academia, empresas e ICT) em pirólise rápida, catálise e integração da rota termoquímica e síntese química;
- (viii) Estabelecer parcerias internacionais com ICT e universidades estrangeiras (preferencialmente Finlândia, Canadá e Suécia, nas entidades já mencionadas anteriormente) como importante mecanismo para ampliação de conhecimentos e troca de experiências [Ciência sem Fronteiras/ The Seventh Framework Programme (FP7)].
- (ix) Lançar editais para adequar e desenvolver de forma continuada a tecnologia da pirólise rápida às condições nacionais;
- (x) Lançar editais para desenvolver novos produtos energéticos e não energéticos a partir das pesquisas com a pirólise;
- (xi) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema, com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, nacionais ou internacionais.



### 7.1.6 Outros/Decomposição anaeróbica

A decomposição anaeróbica é uma tecnologia bem consolidada e relativamente simples, apesar de importante, mas que ainda não tem sido utilizada pelas indústrias de celulose e papel. Sem grandes necessidades de investimentos em ações de CT&I, poder-se-ia adaptar essa tecnologia a esse segmento industrial. Haveria, entretanto, a necessidade de desenvolver a engenharia de reatores anaeróbicos para esse fim.

As ações propostas no sentido de implementar essa tecnologia estão apresentadas a seguir:

- (i) Promover o desenvolvimento da engenharia de reatores anaeróbicos para o tratamento de resíduos específicos do setor de celulose e papel por meio de linhas de financiamento e editais específicos;
- (ii) Promover o desenvolvimento de pesquisas buscando melhorar a concentração e consequentemente incrementar o poder calorífico do gás gerado a partir do lodo e efluentes;
- (iii) Incrementar as políticas públicas para estimular o uso energético do biogás obtido de resíduos orgânicos dentro das metas de redução de gases de efeito estufa (por exemplo: metano);
- (iv) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, nacionais ou internacionais.

## 7.2 Grupo Madeira e Biomassa Florestal

### 7.2.1 Teor de lignina – teor de hemiceluloses

A lignina é um dos componentes químicos da parede celular das células vegetais. O teor de lignina apresenta variações significativas entre espécies. Para árvores a serem utilizadas para produção de celulose, buscam-se selecionar espécies/clones com baixo teor de lignina, já que a lignina interfere tanto nos rendimentos quanto nos consumos de produtos químicos na polpação da madeira e no branqueamento da celulose. O oposto ocorre quando se buscam selecionar espécies/clones para uso em produção de florestas energéticas. Isso porque a lignina é rica em carbono, com isso, oferece mais energia que os carboidratos em aplicações energéticas.

Considerando os debates, chegou-se a um consenso de que deveriam ser desenvolvidas as seguintes ações no sentido de ampliar os conhecimentos de teor de lignina e de hemiceluloses:



- (i) Financiar, catalisar e estimular pesquisas visando ao domínio da técnica para a alteração do teor e do tipo de lignina e de hemiceluloses na madeira por melhoramento genético clássico, assim como por engenharia genética (desenvolvimento de árvores geneticamente modificadas). Devem, ainda, ser consideradas as perspectivas de ampliação do uso de lignina no mercado;
- (ii) Incentivar pesquisas genéricas para melhor compreensão da composição química da madeira com ênfase nos diferentes tipos de hemiceluloses e ligninas;
- (iii) Criar e manter em entidade pública (por exemplo: Embrapa Florestas) um banco nacional de germoplasmas (banco de material genético) que possibilite o resgate de materiais genéticos conforme a necessidade do segmento;
- (iv) Incentivar pesquisas genéricas para redução no teor de lignina das madeiras para incremento de rendimento da polpação química e redução de consumo de álcali na polpação e da geração de sólidos secos dissolvidos no licor preto residual do cozimento Kraft. Porém, associá-las à melhor compreensão dos efeitos das hemiceluloses e ligninas, sua remoção e efeitos nos processos tecnológicos e na qualidade dos produtos da fábrica de celulose Kraft;
- (v) Acelerar, por meio de financiamento de pesquisas e investimentos em laboratórios, o projeto Genolyptus, com vistas à identificação dos genes responsáveis pelos teores e tipos de lignina e de hemiceluloses (conhecer os genes responsáveis pelas diferentes características);
- (vi) Ampliar a capacitação formal (doutores e mestres) nos temas melhoramento genético, biotecnologia e engenharia genética para qualidade da madeira;
- (vii) Incentivar intercâmbio de profissionais em nível internacional (eventos, estágios em universidades, estágios em empresas do setor, etc.);
- (viii) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, nacionais ou internacionais.

## 7.2.2 Poder calorífico

O poder calorífico é um dos principais fatores a serem considerados quando do uso energético de algum material. No que se refere ao uso energético da madeira, o Brasil domina amplo conhecimento, em especial no setor de carvão vegetal.

Em face aos debates, chegou-se, por consenso, a recomendar as seguintes ações no tocante a poder calorífico num horizonte de 2020:

- (i) Ampliar estudos e pesquisas no setor de celulose e papel para florestas plantadas com destinação também energética;





- (ii) Lançar editais sobre biotecnologia, engenharia genética e melhoramento florestal tradicional com vistas ao teor e tipo de lignina e qualidade da madeira para uso também energético;
- (iii) Criar e manter em entidade pública (por exemplo: Embrapa Florestas) um banco nacional de germoplasmas (banco de material genético) que possibilite o resgate de materiais genéticos orientados para bioenergia conforme a necessidade dos segmentos de celulose e papel e de madeira energética (carvão vegetal, siderurgia, etc.);
- (iv) Incentivar intercâmbio de profissionais em nível nacional e internacional (eventos, estágios em universidades, estágios em empresas do setor, etc.);
- (v) Estimular a participação de estudantes em universidades internacionais envolvendo as temáticas: biotecnologia florestal, engenharia genética e melhoramento florestal; valendo-se do Programa Ciência sem Fronteiras;
- (vi) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema, com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, nacionais ou internacionais.

### 7.2.3 Teor de celulose

Celulose é um dos produtos mais comuns na natureza. É o resultado do processo de fotossíntese, no qual as plantas clorofiladas capturam o gás carbônico do ar e água do solo e sob ação da energia luminosa, catalisada pela clorofila nos cloroplastos, os convertem em glicose, que é posteriormente polimerizada, formando a celulose e outros compostos.

Após extensivo debate, chegou-se à indicação das seguintes ações a serem desenvolvidas considerando o horizonte inicial de 2020:

- (i) Incentivar estudos que permitam dominar a técnica de alteração da composição química da madeira (biotecnologia florestal, engenharia genética, melhoramento florestal);
- (ii) Promover editais de pesquisa para melhoramento da qualidade das fibras a fim de permitir a obtenção de diferentes graus de fibrilação (para produção de géis) ou para produção de nanocristais (utilizados em compósitos);
- (iii) Promover editais de pesquisa para aprofundar o conhecimento sobre a celulose e outros componentes químicos das paredes celulares das fibras das madeiras utilizadas no Brasil pela indústria de celulose e papel (cristalinidade, teores, estrutura, etc.);
- (iv) Investir na formação de especialistas (CNPq) para estudar a química da madeira e na infraestrutura de laboratórios especializados no tema [Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), Finep];
- (v) Incentivar a participação da massa crítica brasileira em eventos técnicos e científicos (nacio-



- nais e internacionais) para trocas de experiências e divulgação de trabalhos de pesquisas;
- (vi) Fomentar o intercâmbio de pesquisadores (universidades x empresas e ICT) para maior troca de experiências em melhoramento genético/biotecnologia/engenharia genética;
  - (vii) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, nacionais ou internacionais.

## 7.2.4 Quantidade e qualidade dos resíduos

Considerando o foco da biorrefinaria, o aproveitamento dos resíduos passa a ser bastante relevante. As quantidades e a qualidade dos resíduos deixados no campo são grandes e variáveis, necessitando de um processo mais qualificado de gestão para tornar o aproveitamento viável, técnica e economicamente.

As abordagens aplicadas anteriormente para teor de lignina e poder calorífico são plenamente adaptadas à questão da qualidade dos resíduos.

Após amplo debate, chegou-se às seguintes ações a serem viabilizadas:

- (i) Incentivar pesquisas genéricas sobre características dos resíduos florestais e lenhosos, buscando quantificar e qualificar (poder calorífico, umidade, etc.) os resíduos das florestas e das fábricas;
- (ii) Incentivar pesquisas genéricas sobre logística e gestão acerca das técnicas de colheita e transporte florestal envolvendo estudos de equipamentos e de modais mais apropriados conforme as diferentes condições de solo, clima e topografia;
- (iii) Desenvolver estudos para aproveitamento industrial dos resíduos florestais conforme explicitado no Grupo Bioenergia (gaseificação, combustão, pirólise, etc.);
- (iv) Incentivar parcerias entre universidades (Engenharia Florestal, Engenharia de Produção, Engenharia Industrial Madeireira e outros cursos de gestão e de logística) e as empresas geradoras e potencialmente usuárias dos resíduos;
- (v) Incentivar estudos de gestão da ecoeficiência, incluindo nesse tema a gestão adequada da umidade dos resíduos;
- (vi) Capacitar profissionais das empresas de base florestal sobre a gestão e o aproveitamento de resíduos florestais;
- (vii) Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICT, nacionais ou internacionais.



## 7.3 Grupo Bio-Produtos (Não Energéticos)

### 7.3.1 Nanocelulose

A nanocelulose – nanocristais e nanofibras – compreende dois materiais derivados da celulose. O termo “nano” se refere a diâmetro/espessura das microfibrilas presentes na celulose, que têm escala nanométrica.

- **Impacto da tecnologia**

As nanofibras são (ainda) potencialmente grande consumidoras de energia devido ao processo mecânico de fabricação, mas o consumo deve cair significativamente com pré-tratamentos. Os nanocristais demandam pouca energia na sua fabricação.

As nanoceluloses – na dimensão do seu mercado – têm grande potencial de substituir produtos que atualmente são feitos a partir de produtos de base fóssil. Poderão, portanto, servir como depósito de CO<sub>2</sub>.

As nanocelulose têm potencial de se tornar um mercado de dimensões razoáveis, além de ter a biomassa como uma forte composição no custo final de produção. O Brasil é um candidato natural a ter forte competitividade internacional em um mercado que pode ter um impacto significativo no PIB brasileiro.

- **Ações propostas**

- (i) Financiar pesquisa sobre produção, caracterização e aplicações de nanocelulose e seus derivados em centros de excelência no Brasil – especialmente, mas não exclusivamente: Universidade Federal de São Carlos, USP São Carlos, Embrapa, Unicamp, UFMG e UFBA;
- (ii) Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior em produção, caracterização e aplicação de nanocelulose. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa sobre biorrefinaria, nomeadamente Canadá (FPInnovations), Suécia (Universidade de Luleå, Innventia), Finlândia (VTT), França (Cermav, Pagora e CTP), Estados Unidos (USDA – Forest Products) e Japão (Universidade de Tóquio e Quioto);



- (iii) Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que intencionam fornecer para alguma etapa da cadeia de produção da nanocelulose. Podem ser de duas modalidades:
  - Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e
  - Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.

### 7.3.2 Lignina

A lignina perfaz cerca de um quarto da biomassa do eucalipto (além da uma parte considerável da parte fibrosa da cana-de-açúcar) e somente o volume produzido já a faz objeto de interesse de utilização econômica. A lignina contém grandes quantidades de grupos aromáticos e por tal sua aplicação econômica ocorre principalmente em substituição – com ou sem modificação – a compostos aromáticos de origem fóssil tal como organosulfonados e o fenol.

- **Impacto da tecnologia**

A utilização da lignina como substituto de produtos de base fóssil pura e simplesmente levaria a uma redução da produção de energia na proporção de 1,3 - 1,8 MWh/t lignina (em ciclo Rankine padrão da queima de licor negro). No entanto, é de se esperar que o ganho de retorno com a lignina leve a uma expansão de sua produção. Nesse caso, o impacto final pode mesmo ser um incremento de produção de energia elétrica verde.

A produção da lignina melhoraria a competitividade da indústria de base florestal no Brasil já que esta é uma grande produtora de lignina. A tecnologia em uso atualmente não permite bom retorno sobre sua produção. O impacto sobre o PIB seria de uma parte significativa do setor de celulose e papel (considerando que uma parcela significativa da lignina produzida encontre mercado).

- **Ações propostas**

- (i) Financiar pesquisa sobre produção (extração), caracterização e aplicações da lignina (nos seus diversos tipos, exemplo: lignina Kraft, soda, soda-AQ, organosolv, como resíduo da produção de etanol de segunda geração, etc.) e seus derivados em centros de excelência no Brasil – especialmente, mas não exclusivamente: UFV, USP (campi São Paulo, Lorena, São Carlos e Piracicaba), UFSCar e Unicamp, CTBE. Há uma planta piloto de extração de lignina



Kraft em funcionamento na unidade de Limeira da Suzano que poderia ser utilizada para testes de processo e fornecimento de lignina Kraft para pesquisa;

- (ii) Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior com foco em produção (extração), caracterização e aplicação da lignina nas suas diversas formas e seus derivados. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa sobre biorrefinaria, nomeadamente Canadá (FPIInnovations), Suécia (Universidade de Chamlers, Innventia, Universidade do Centro da Suécia – Mid Sweden University), Finlândia (VTT) e Estados Unidos (Universidade da Carolina do Norte);
- (iii) Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que trabalhem direta ou indiretamente com a aplicação comercial da lignina e seus derivados. Podem ser de duas modalidades:
  - Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e
  - Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.
- (iv) Desenvolver infraestrutura na forma de plantas piloto, por exemplo, para craqueamento da lignina em compostos que dela podem ser produzidos (i.e.: fenol, tolueno, xileno, etc.);
- (v) Executar estudos de viabilidade de mercado da lignina para que balizem o desenvolvimento desse novo produto;
- (vi) Estimular parcerias intrasetoriais que podem envolver e/ou se beneficiar do produto lignina (i.e.: compósitos para a Embraer e aplicações para poliuretano com a Oxiten).

### 7.3.3 (Bio) Polímeros

Os biopolímeros (talvez fosse melhor falar em bioprodutos) são produtos fabricados a partir de uma matéria-prima de fonte renovável. Para ser interessante para o setor, é quase que primordial que se utilize um de seus grandes componentes (i.e.: celulose, hemiceluloses e lignina). Há uma pletora de produtos que se podem produzir a partir desses três componentes básicos.



- **Impacto da tecnologia**

Devido ao grande número de possibilidades de produtos e processos de geração dos biopolímeros, é difícil (se não impossível) levantar o impacto com relação ao consumo de energia. No entanto, poder-se-ia dividir os produtos em: i) a partir de celulose; e ii) a partir de hemiceluloses ou lignina. Uma maior demanda por celulose (para outras aplicações que não para fabricação de papel, evitando o risco de superprodução de celulose de mercado), muito possivelmente levaria a uma maior produção de energia (verde) já que o processo de produção de celulose é superavitário em energia. Por outro lado, caso os biopolímeros sejam majoritariamente feitos a partir de lignina e/ou hemiceluloses, o balanço deverá ser o contrário, já que são utilizados atualmente como fonte de energia.

- **Ações propostas**

- (i) Financiar pesquisa sobre produção, caracterização e aplicações de biopolímeros em centros de excelência no Brasil;
- (ii) Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior em produção, caracterização e aplicação de biopolímeros. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa e desenvolvimento em produção de biopolímeros;
- (iii) Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que intencionam inovar em alguma etapa da cadeia de produção de biopolímeros a partir de celulose, hemiceluloses e lignina. Podem ser de duas modalidades:
  - Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e
  - Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.

### 7.3.4 Hemiceluloses

As hemiceluloses são polissacarídeos contendo uma mistura, principalmente, de pentoses e hexoses. São amorfos e de fácil hidrólise. As hemiceluloses, tal como a lignina, perfazem cerca de um quarto da biomassa do eucalipto. Portanto, o interesse pelas hemiceluloses deriva de sua



enorme produção pelo setor. Parte significativa compõe a celulose de mercado, enquanto que outra é queimada por estar contida no licor negro.

- **Impacto da tecnologia**

A utilização de hemiceluloses como precursores químicos deve reduzir a produção de energia – já que ela é atualmente utilizada como fonte de energia. O seu Poder Calorífico Inferior (PCI) é baixo, no entanto.

Tal como mencionado em relação aos biopolímeros, a competitividade do setor brasileiro melhoraria já que o valor das hemiceluloses é muito baixo (aproximadamente, a metade do valor da lignina como produtora de energia).

Similarmente a todos os outros itens mencionados acima, em se substituindo produtos de base fóssil (e substituindo ao menos parcialmente a produção de energia por fonte renovável), ter-se-á um efeito ambiental positivo.

- **Ações propostas**

- (i) Financiar pesquisa sobre produção (extração), caracterização e aplicações de hemiceluloses em centros de excelência no Brasil. Em específico, podemos citar a UFV como centro de excelência em produção e aplicação das hemiceluloses no Brasil;
- (ii) Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior em produção, caracterização e aplicação de hemiceluloses. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa em extração e aplicação de hemiceluloses, nomeadamente Canadá (FPInnovations), Suécia (Innventia) e Finlândia (VTT);
- (iii) Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que intencionam inovar a partir de hemiceluloses. Podem ser de duas modalidades:
  - Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e
  - Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.



### 7.3.5 Ações propostas comuns a todas as variáveis tecnológicas

O grupo considerou que, para os quatro assuntos de maior relevância, o foco das ações poderia ser acrescido de algumas propostas aplicáveis a todas as variáveis tecnológicas, como, por exemplo, capacitação de pessoas, parcerias entre empresas e ICT e parcerias internacionais. Especificamente, foram propostas as seguintes ações de CT&I que abrangem as quatro linhas selecionadas:

- (i) Criar um fundo setorial de ciência e tecnologia para o setor de celulose, papel e biorrefinarias;
- (ii) Criar uma rede nacional de material lignocelulósico (discussão entre cadeiras de química, física e engenharia);
- (iii) Criar INCT para papel, celulose e biorrefinarias (laboratórios, plantas piloto para escalonamento). Discutiram-se duas possíveis localizações:
  - Na UFV, por ter a melhor estrutura de pesquisa nas áreas escolhidas;
  - Em algum dos outros centros no eixo São Paulo-Campinas, por ter melhor logística;
- (iv) Utilizar modelo de edital Fapesp de cooperação empresa-universidade-ICT (que poderia ser utilizado por outras agências de fomento à pesquisa). Nesse caso, a empresa propõe linhas de pesquisa de seu interesse com o aval da Fapesp. A empresa tem o direito de escolher as propostas que lhe interessam e a Fapesp financia parte da pesquisa. Discutiu-se a possibilidade de o edital não ser uma parceria entre uma empresa, mas de todo o setor de celulose e papel com a agência de fomento.

## 7.4 Grupo Processos e Produtos Tradicionais

Com relação aos processos e produtos tradicionais, foram selecionados os seguintes tópicos como os mais relevantes:

- Papel – reciclagem do papel;
- Eletricidade – uso de resíduos florestais;
- Eletricidade – cogeração em fábricas de papel;
- Celulose – recuperação química;
- Celulose – polpação Kraft e qualidade da celulose.

Os tópicos sobre eletricidade, tanto o uso de resíduos florestais quanto a cogeração em fábricas de papel, foram tratados conjuntamente devido a sua grande interdependência.





### 7.4.1 Papel – reciclagem do papel

- **Impacto da tecnologia**

O impacto do aumento da reciclagem no consumo de energia não deve ser significativo. Por outro lado, a reciclagem em si reduz a demanda por celulose, que, por ser superavitária em energia, poderia reduzir a oferta de energia.

Os benefícios ambientais são claros, já que há menor volume de resíduo sólido a ser processado.

Um aumento na reciclagem deveria melhorar a competitividade do setor, que contará com custo mais baixo de aparas para produção de papel.

- **Ações propostas**

- (i) Estimular a integração horizontal (associativista) e vertical (modelo APL); integração de negócios e criação de novos negócios;
- (ii) Realizar pesquisa nas propriedades das fibras recicladas devido ao impacto da biorrefinaria nas fibras virgens (i.e.: retirada de lignina) (há alteração nas propriedades da fibra);
- (iii) A pressão pela substituição de produtos sintéticos por produtos naturais, como agentes químicos na produção de papel, vai exigir a realização de pesquisas para a criação desses produtos (naturais);
- (iv) Promover ações de *marketing* (governo) para a separação de lixo;
- (v) Realizar pesquisa para utilização de fibras provenientes da reciclagem para sacarificação visando à fabricação de produtos diversos (etanol, derivados de celulose, produtos químicos, polímeros, biomateriais, etc.).

### 7.4.2 Eletricidade – uso de resíduos florestais e cogeração em fábricas de papel

Os resíduos florestais já são em grande parte utilizados na geração de energia por cogeração nas grandes produtoras de celulose do setor. A dificuldade parece mais de viabilidade econômica dos investimentos quando os resíduos não são tão volumosos devido à pequena escala. A solução para esse problema poderia advir de consórcio de várias pequenas indústrias em condomínios industriais em que o fornecimento de vapor e energia é destinado a todas as consorciadas de uma dada zona industrial.



- **Impacto da tecnologia**

Naturalmente que uma maior produção de energia elétrica por cogeração diminuirá o consumo de energia da rede. No entanto, a viabilidade desses projetos é normalmente o maior entrave para sua disseminação onde ela ainda não está presente.

Os benefícios ambientais são claros, já que, nas pequenas empresas onde ainda não há cogeração, as empresas compram energia da rede ao mesmo tempo em que queimam combustíveis (ou fóssil ou biomassa) para produção de vapor (esse poderia ter sido usado para produção de energia elétrica).

- **Ações propostas**

- (i) Criar linhas de financiamento para atualização das plantas visando à utilização da biomassa como fonte geradora de energia;
- (ii) Criar mecanismos que permitam comercialização de eletricidade a partir da indústria de papel (redução da defasagem entre o preço de compra e o preço de venda);
- (iii) Criar *clusters* para o aproveitamento do excedente de energia gerado a partir da planta da indústria de celulose;
- (iv) Realizar estudos para a utilização de gaseificadores para cogeração na indústria de papel;
- (v) Expandir o modelo de financiamento por cogeração para o setor de papel em que o produtor pode usar a carta de venda em leilões da Aneel para obter crédito (hoje utilizado para indústria de açúcar e álcool).

### 7.4.3 Celulose – recuperação química

A recuperação química foi abordada principalmente sob a perspectiva de um futuro com biorrefinaria, onde há redução de hemiceluloses e/ou lignina durante o processo de recuperação. Essas modificações têm algumas implicações para o processo de recuperação.

Foi levantada também a possibilidade se trabalhar com polpação livre de enxofre, o que é melhor para uma biorrefinaria. Tal transformação implicaria profundas modificações no processo de recuperação química – basicamente, deixaria os equipamentos mais simples.



- **Ações propostas**

- (i) Estudar o impacto da redução do teor de lignina e de hemiceluloses no licor negro no processo com relação ao aumento da incrustação nos evaporadores, corrosão, PCI, etc.
- (ii) Realizar pesquisa acerca do uso da gaseificação de licor negro no processo de recuperação química – especialmente em relação a problemas devido à presença de enxofre.

#### 7.4.4 Celulose – polpação Kraft e qualidade da celulose

A polpação Kraft também foi abordada sob a perspectiva de um futuro prevendo a polpação para biorrefinaria – e não somente para produção de celulose. As modificações são principalmente de dois tipos: i) remoção prévia de hemiceluloses dos cavacos; e ii) fazer cozimento sem presença de enxofre.

- **Impacto da tecnologia**

A remoção do enxofre deixaria as fábricas de celulose sem seu cheiro característico de mercaptanas, uma clara melhoria para a comunidade que se encontra nas cercanias das fábricas de celulose.

- **Ações propostas**

- (i) Estudar o impacto da redução do teor de hemiceluloses do cavaco no processo Kraft e na qualidade da celulose produzida com relação a refinabilidade, propriedades físico-mecânicas da polpa, etc.;
- (ii) Estudar a viabilidade da completa substituição do processo Kraft por processos livres de enxofre (ex. soda/antraquinona e processos a base de solventes-organosolv);
- (iii) Desenvolver substitutivos de hemiceluloses para a etapa de fabricação de papel.



## REFERÊNCIAS

---

- BAJAY, S.V.; WALTER, A.C.S.; FERREIRA, A.L.; CARVALHO, E.B.; ATHAYDE, M.A.P. **Desenvolvimento de programas de conservação de energia elétrica e modulação de carga nos segmentos industriais de papel e celulose e fundição, na região administrativa de Campinas**. Relatório da Atividade II: Revisão de estudos anteriores pertinentes a este assunto e compilação de dados publicados sobre estes segmentos industriais, Contrato Eletrobrás (PROCEL) / UNICAMP / Funcamp no 4065/95, NIPE/UNICAMP, dezembro de 1995, 98 p.
- BAJAY, S.V. A indústria de papel e celulose: Seu consumo energético, por usos finais e tipos de plantas, evolução tecnológica e perspectivas de conservação de energia. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO SOBRE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 3. Campos de Jordão, SP, 1997. **Anais...**, v. 2. UNESP, Guaratinguetá, SP, Brasil, p. 699-704.
- BAKHITIARI, B.; FRADETTE, L.; LEGROS, R.; PARIS, J. Opportunities for the integration of absorption heat pumps in the pulp and paper process, **Energy**, v.35, p. 4600-06, 2010.
- BARBELI, M.C.; BAJAY, S.V. Produção e consumo de energia na indústria de papel e celulose: P&D e o estado da arte das principais tecnologias disponíveis. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 9. Rio de Janeiro, 2002. **Anais...**, v. 3. COPPE/UFRJ, Clube de Engenharia e SBPE, Rio de Janeiro, p. 1188-93.
- BERNI, M.D.; BAJAY, S.V. Eficiência energética e impactos ambientais nos processos de produção de papel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 4. Itajubá, MG, 2004. **Anais...** SBPE e UNIFEI, Itajubá, MG, 6 p (anais distribuídos na forma de CD-ROM, sem numeração das páginas).
- \_\_\_\_\_. Sustentabilidade ambiental e geração de energia na indústria de papel com o uso de reator anaeróbico no tratamento de efluentes. In: CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL, 34. São Paulo, SP, 2001. **Anais...** Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP), São Paulo, SP (anais distribuídos na forma de CD-ROM, sem numeração das páginas).
- BERNI, M.D.; BAJAY, S.V.; GORLA, F.D. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria – Relatório setorial: Setor papel e celulose**, Brasília, DF: Confederação Nacional da Indústria – CNI e PROCEL Indústria / Eletrobras, 2010, 88 p.
- BRACELPA. **Estatísticas BRACELPA**: Relatório Anual 2009/2010. São Paulo, SP: Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA), 2010. Disponível em <http://www.bracelpa.org.br/estatisticas>. Acesso em 09/06/2011.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Química verde no Brasil: 2010-2030** - Ed. rev. e atual. - Brasília, DF: CGEE, 2010.



- CLAYTON, D.W. Impact of selected technologies on the Canadian pulp and paper industry in 2010. In: **Energy efficiency improvement utilizing high technology - an assessment of energy use in industry and buildings**, London, UK: World Energy Council, 1995, p. 8.1 - 8.16.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. **Novas tecnologias para processos industriais: Eficiência energética na indústria**. Relatório técnico, convênio entre a (CNI) e a Eletrobrás/ Procel, 2010.
- FOELKEL, C. **Um guia referencial sobre ecoeficiência energética para a indústria de papel e celulose Kraft de eucalipto no Brasil**, *Eucalyptus* Online Book & Newsletter, maio de 2010.
- FONSECA, M.G. **Estudo da competitividade de cadeias integradas no Brasil: impactos das zonas de livre comércio, cadeia de papel e celulose**. UNICAMP, Campinas, SP, 2003.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. **Manual de recomendações: conservação de energia na indústria de celulose e papel**. Vols. I e II, São Paulo, SP: IPT, 1985. Publicação IPT n. 1628,
- KRAMER, K.J.; MASANET, E.; WORRELL, E. Energy efficiency opportunities in the U.S. pulp and paper industry. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory –LBNL. Paper LBNL- 2268E, 2010.
- MATEOS-ESPEJEL, E.; SAVULESCO, L.; MARÉCHAL, F.; PARIS, J. Systems interactions analysis for the energy efficiency improvement of a Kraft process, **Energy**, v. 35, p. 5132-42, 2010.
- THE SWEDISH ENERGY AGENCY. **Swedish pulp mill biorefineries – a vision of future possibilities**. Report ER 2008:26, Stockholm, Sweden, 2008.

## SITES PESQUISADOS

---

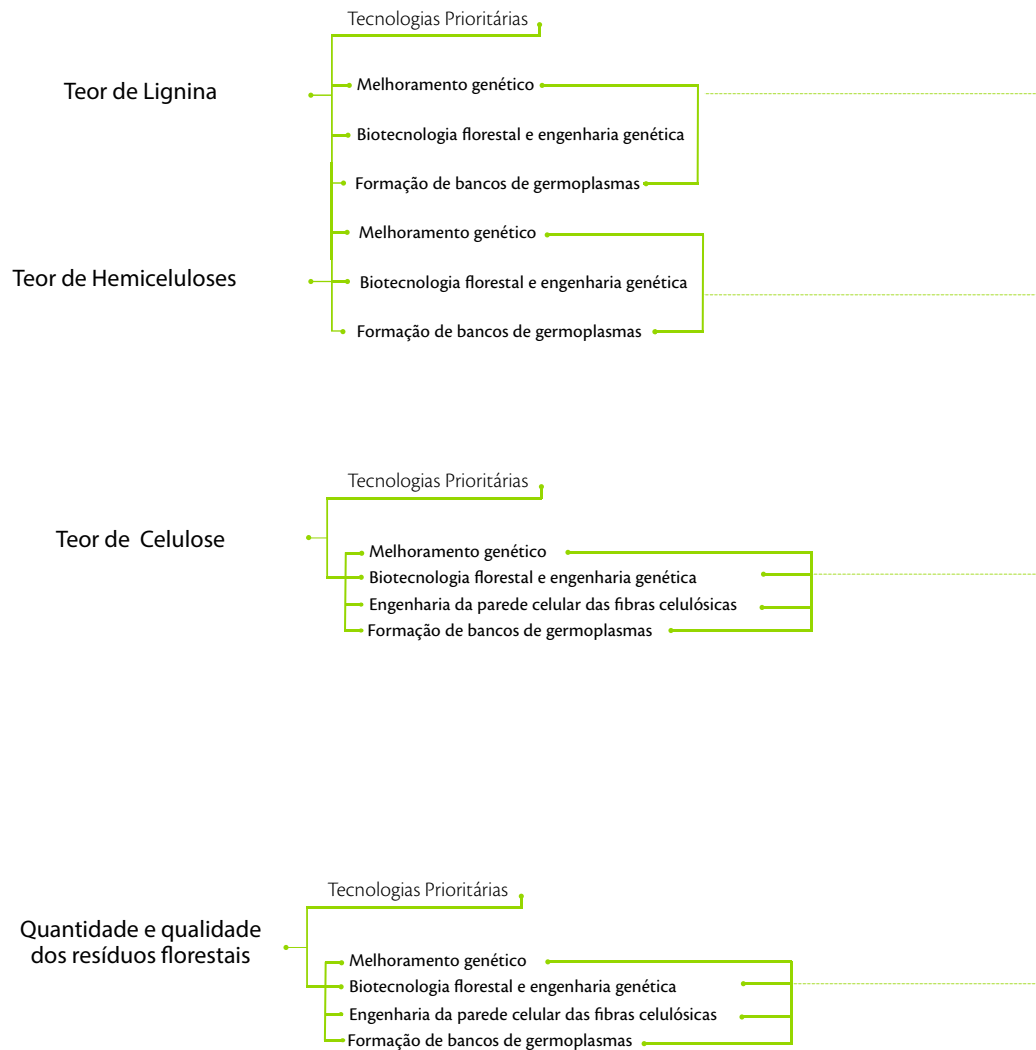
Associação Brasileira de Celulose e Papel (BRACELPA) em 28.08.2011:

Disponível em: [www.bracelpa.org.br/estatísticas](http://www.bracelpa.org.br/estatísticas)



---

ANEXOS







# Anexo I – Mapa Estratégico – Biomassa Florestal e Madeira

## Biomassa Florestal e Madeira

### Ações de CT&I

Financiar, catalisar e estimular pesquisas visando ao domínio da técnica para a alteração do teor e do tipo de lignina e de hemiceluloses na madeira por melhoramento genético clássico, assim como por engenharia genética (desenvolvimento de árvores geneticamente modificadas). Deve-se ainda considerar as perspectivas de ampliação de lignina no mercado.

Incentivar pesquisas genéticas para melhor compreensão da composição química da madeira com ênfase nos diferentes tipos de hemicelulose e ligninas.

Criar e manter em entidade pública (por exemplo: Embrapa Florestal) um banco nacional de germoplasma (banco de material genético) que possibilite o resgate de materiais genéticos conforme a necessidade do segmento.

Incentivar pesquisas genéticas para redução no teor de lignina das madeiras para incremento de rendimento da polpação química e redução do consumo de álcali na polpação e da geração de sólidos secos dissolvidos no licor preto residual do cozimento do Kraft. Porém, associá-la à melhor compreensão dos efeitos das hemiceluloses e ligninas, sua remoção e efeitos nos processos tecnológicos e na qualidade dos produtos da fábrica de celulose Kraft.

Acelerar, por meio de financiamento de pesquisas e investimentos em laboratórios, o projeto Genolyptus, com vistas à identificação dos genes responsáveis pelos teores e tipos de lignina e de hemiceluloses (conhecer os genes responsáveis pelas diferentes características);

Ampliar a capacitação formal (doutores e mestres) nos temas melhoramento genético, biotecnologia e engenharia genética para qualidade da madeira;

Incentivar intercâmbio de profissionais em nível internacional (eventos, estágios em universidades, estágios em empresas do setor, etc.);

Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs, nacionais ou internacionais

Incentivar estudos que permitam dominar a técnica de alteração da composição química da madeira (biotecnologia florestal, engenharia genética, melhoramento florestal);

Promover editais de pesquisa para melhoramento da qualidade das fibras a fim de permitir a obtenção de diferentes graus de fibrilação (para produção de géis) ou para produção de nanocristais (utilizados em compósitos);

Promover editais de pesquisa para aprofundar o conhecimento sobre a celulose e outros componentes químicos das paredes celulares das fibras das madeiras utilizadas no Brasil pela indústria de celulose e papel (cristalinidade, teores, estrutura, etc.);

investir na formação de especialistas (CNPq) para estudar a química da madeira e na infraestrutura de laboratórios especializados no tema (Capes, Finep);

Incentivar a participação da massa crítica brasileira em eventos técnicos e científicos (nacionais e internacionais) para trocas de experiências e divulgação de trabalhos de pesquisas;

Fomentar o intercâmbio de pesquisadores (universidades x empresas e ICTs) para maior troca de experiências em melhoramento genético/biotecnologia/engenharia genética;

Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs, nacionais ou internacionais

Incentivar pesquisas genéricas sobre características dos resíduos florestais e lenhosos, buscando quantificar e qualificar (poder calorífico, umidade, etc.) os resíduos das florestas e das fábricas;

Incentivar pesquisas genéricas sobre logística e gestão acerca das técnicas de colheita e transporte florestal envolvendo estudos de equipamentos e de modais mais apropriados conforme as diferentes condições de solo, clima e topografia;

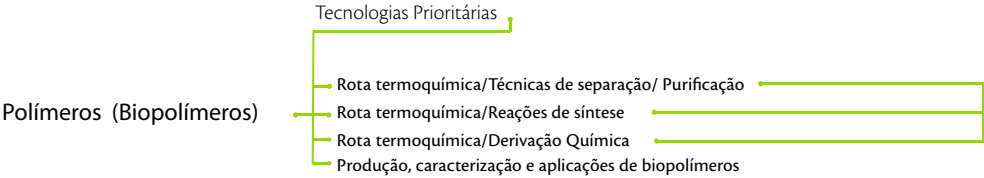
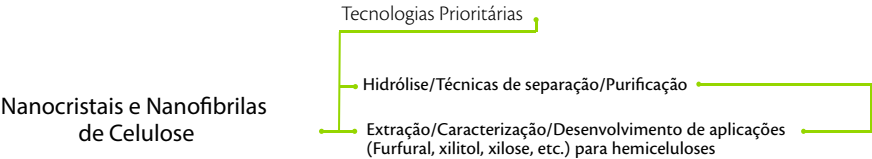
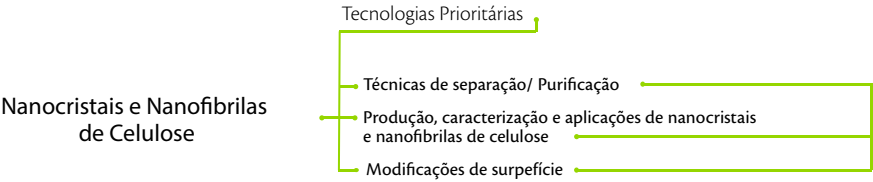
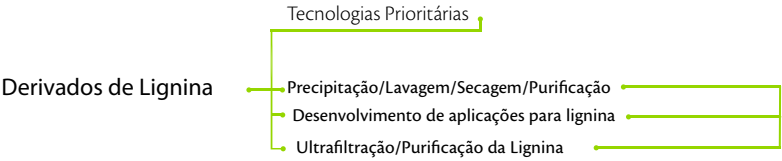
Desenvolver estudos para aproveitamento industrial dos resíduos florestais conforme explicitado no Grupo Bioenergia (gaseificação, combustão, pirólise, etc.);

Incentivar parcerias entre universidades (Engenharia Florestal, Engenharia de Produção, Engenharia Industrial Madeireira e outros cursos de gestão e de logística) e as empresas geradoras e potencialmente usuárias dos resíduos;

Incentivar estudos de gestão da ecoeficiência, incluindo nesse tema a gestão adequada da umidade dos resíduos;

Capacitar profissionais das empresas de base florestal sobre a gestão e o aproveitamento de resíduos florestais;

Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs, nacionais ou internacionais.





## Anexo II – Mapa Estratégico – Produtos não Energéticos

### Produtos não energéticos

#### Ações de CT&I

Financiar pesquisa sobre produção (extração), caracterização e aplicações da lignina (nos seus diversos tipos, exemplo: lignina Kraft, soda, soda-AQ, organosol, como resíduo da produção de etanol de segunda geração, etc.) e seus derivados em centros de excelência no Brasil – especialmente, mas não exclusivamente: UFV, USP (campi São Paulo, Lorena, São Carlos e Piracicaba), UFSCar e Unicamp, CTBE. Há uma planta piloto de extração de lignina Kraft em funcionamento na unidade de Limeira da Suzano que poderia ser utilizada para testes de processo e fornecimento de lignina Kraft para pesquisa;

Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior com foco em produção (extração), caracterização e aplicação da lignina nas suas diversas formas e seus derivados. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa sobre biorrefinaria, nomeadamente Canadá (FPIInnovations), Suécia (Universidade de Chalmers, Innventia, Universidade do Centro da Suécia – Mid Sweden University), Finlândia (VTT) e Estados Unidos (Universidade da Carolina do Norte);

Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que trabalhem direta ou indiretamente com a aplicação comercial da lignina e seus derivados. Podem ser de duas modalidades: Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.

Desenvolver infraestrutura na forma de plantas piloto, por exemplo, para craqueamento da lignina em compostos que dela podem ser produzidos (i.e.: fenol, tolueno, xileno, etc.);

Executar estudos de viabilidade de mercado da lignina para que balizem o desenvolvimento desse novo produto;

Estimular parcerias intrasetoriais que podem estar envolvidos ou se beneficiar do produto lignina (i.e.: com compósitos para a Embraer e aplicações para poliuretano com a Oxiteno).

Financiar pesquisa sobre produção, caracterização e aplicações de nanocelulose e seus derivados em centros de excelência no Brasil – especialmente, mas não exclusivamente: Universidade Federal de São Carlos, USP São Carlos, Embrapa, Unicamp, UFMG e UFBA;

Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior em produção, caracterização e aplicação de nanocelulose. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa sobre biorrefinaria, nomeadamente Canadá (FPIInnovations), Suécia (Universidade de Luleå, Innventia), Finlândia (VTT), França (Cermav, Pagora e CTP), Estados Unidos (USDA – Forest Products) e Japão (Universidade de Tóquio e Quioto);

Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que intencionam fornecer para alguma etapa da cadeia de produção da nanocelulose. Podem ser de duas modalidades:

Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.

Financiar pesquisa sobre produção (extração), caracterização e aplicações de hemiceluloses em centros de excelência no Brasil. Em específico, podemos citar a UFV como centro de excelência em produção e aplicação das hemiceluloses no Brasil;

Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior em produção, caracterização e aplicação de hemiceluloses. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa em extração e aplicação de hemiceluloses, nomeadamente Canadá (FPIInnovations), Suécia (Innventia) e Finlândia (VTT);

Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que intencionam inovar a partir de hemiceluloses. Podem ser de duas modalidades:

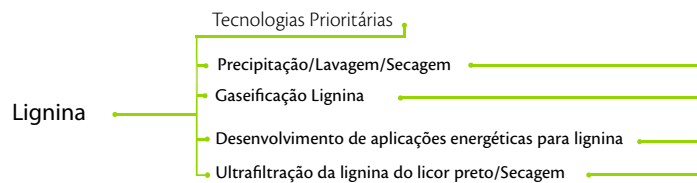
Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.

Financiar pesquisa sobre produção, caracterização e aplicações de biopolímeros em centros de excelência no Brasil;

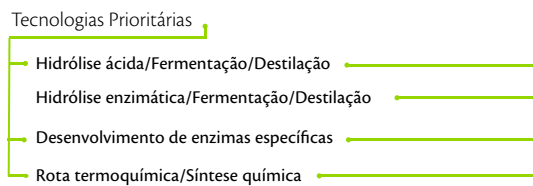
Formar doutores e pós-doutores (um ano) no Brasil e no exterior em produção, caracterização e aplicação de biopolímeros. Foco na formação de doutores no Brasil, mas com fortalecimento da integração do pesquisador na arena internacional. Deve-se, portanto, dar apoio à participação em conferências internacionais. Essas iniciativas poderiam, com vantagem, ser feitas no âmbito do Programa Brasil Sem Fronteiras. Colaborações deverão ser feitas preferencialmente com os países mais avançados em pesquisa e desenvolvimento em produção de biopolímeros;

Apoiar a formação de doutorandos industriais em indústrias que intencionam inovar em alguma etapa da cadeia de produção de biopolímeros a partir de celulose, hemiceluloses e lignina. Podem ser de duas modalidades:

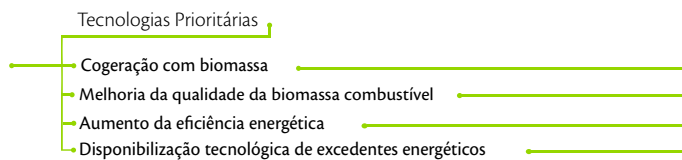
Doutorando (ou mestrando) da universidade trabalha fisicamente na indústria (com seu trabalho de pesquisa); e Pesquisadores da indústria têm alguns dias livres por semana para fazer trabalho de pesquisa e cursos na universidade. O trabalho de pesquisa seria financiado pelas instituições de apoio à pesquisa.



Álcoois  
(Etanol, metanol, butanol)



Eletricidade e vapor





## Anexo III – Mapa Estratégico – Bioenergia

### Bioenergia

#### Ações de CT&I

Incentivar a participação de técnicos e pesquisadores brasileiros em eventos nacionais e internacionais com a finalidade de monitorar a evolução da tecnologia de remoção de lignina do licor preto em sua aplicação energética;

Incentivar a realização de estudos e pesquisas no sentido de aperfeiçoar as características da lignina Kraft para a geração de energia (combustão direta), bem como para otimizar o processo de sua gaseificação;

Inserir nas atividades do Programa Ciência sem Fronteiras a participação em eventos nacionais/internacionais e intercâmbio de pesquisadores, visando buscar compreender como é tratado o produto lignina em países detentores de tecnologia no tema (por exemplo: Suécia, Finlândia, Canadá, Estados Unidos, etc.);

Investir na ampliação do número de laboratórios, bem como equipar os laboratórios já existentes (UFMG-Belo Horizonte, USP-São Carlos, UFU- Uberlândia, USP-São Paulo, etc.) e capacitar os recursos humanos nas tecnologias de extração, produção e utilização industrial da lignina Kraft (ação conjunta com o Grupo Itens Não Energéticos);

Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema, com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs, sejam nacionais ou internacionais.

Incentivar ações articuladas com a indústria da cana (massa crítica), indústria de enzimas e indústria de celulose e papel juntamente com a academia;

Investigar a rota bioquímica contemplando as duas tecnologias (enzimática e ácida), buscando desvendar quais são as melhores aplicações para cada uma. Deve-se investir em pesquisas utilizando a massa crítica gerada pela indústria da cana, por meio de parcerias com CTBE-Campinas, CTC-Piracicaba, Indústria Dedini, etc.;

Promover parcerias internacionais com centros de excelência em produção de etanol celulósico, tais como: State University of New York-Syracuse/USA; NREL - National Renewable Energy Laboratory/Colorado/USA; Environment Canada/Canadá, etc.);

Incentivar pesquisas para produção de álcoois via rota termoquímica, utilizando-se de infraestrutura de pesquisa contemplada em ações e recomendações previstas para o tópico Gaseificação de Biomassa Úmida;

Promover, por meio do lançamento de editais, a prospecção de materiais da biodiversidade florestal e o avanço tecnológico para produção de enzimas destinadas à geração de etanol celulósico (e outros álcoois), seja de carboidratos de cinco (pentoses) ou seis carbonos (hexoses);

Disponibilizar linhas de financiamento para implantação de plantas piloto para produção de álcoois a partir de biomassa florestal no formato de subvenção ou parceria econômica (Finep/BNDES);

Incentivar pesquisas genéricas em nível básico e aplicado sobre hidrólise da madeira;

Fomentar parcerias tecnológicas entre a indústria de celulose e papel e os centros de pesquisa de biomassa existentes (centros de pesquisa/universidades em estudos de biomassa e dedicados aos álcoois – etanol, butanol, metanol, etc.) com a finalidade de desenvolver tecnologias a partir da biomassa florestal;

Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema, com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs, nacionais ou internacionais.

Estimular e financiar pesquisas buscando técnicas para aumentar o poder calorífico dos resíduos florestais, objetivando sempre um balanço positivo no poder de geração energética (P&D Aneel);

Adotar mecanismos que tornem a eficiência energética um quesito atrativo para as empresas produtoras de celulose e papel com potencial de produção de excedente energético (Procel/PEE Aneel – como sugestão de alteração no programa e suas ações normativas);

Estudar modelos de mercado que deem incentivos para que as novas plantas sejam dimensionadas de modo a produzir o máximo de energia elétrica que seus balanços permitam com redução das tarifas de uso da rede quando da venda do excedente energético;

Fomentar políticas industriais que favoreçam os arranjos produtivos locais, investigando os melhores formatos/estruturas que atuariam como consumidores dos excedentes de geração energética sem a necessidade de grandes investimentos em redes de distribuição.



Gás combustível/Gás síntese

Tecnologias Prioritárias

- Gaseificação de biomassa combustível (lignina, resíduos florestais, licor preto)
- Síntese química (síntese de Fischer-Tropsch, etc)

Bio-óleo e biodiesel

Tecnologias Prioritárias

- Pirólise rápida/Uso de resíduos madeireiros e florestais
- Pirólise rápida/Desenvolvimento de catalisadores
- Síntese química/Desenvolvimento de derivados de bio-óleo

Bio-óleo e biodiesel

Tecnologias Prioritárias

- Decomposição anaeróbica de biomassa orgânica
- Enriquecimento de gás pobre para combustão



## Ações de CT&I

Estimular a aquisição de um gaseificador para testes em escala industrial para gerar pesquisa consorciada entre empresas fabricantes de celulose e papel (por exemplo: Suzano, International Paper do Brasil, Eldorado, Fibria, Cenibra, etc.); instituições de pesquisa (por exemplo: Unifei-Itajubá, UFV-Viçosa; USP-São Carlos, Unicamp-Campinas, IPT-São Paulo, etc.) e fornecedores de equipamentos (por exemplo: Andritz, Metso, Termoquip, etc.), na área de integração do sistema de gaseificação de biomassa com o queimador do forno de cal, testando condições, matérias-primas, catalisadores, desempenhos, eficiências e outras inovações que favoreçam o uso dessa tecnologia para essa posição fabril;

Incentivar a criação de um centro de estudos em gaseificação de biomassa florestal em universidade pública brasileira para coordenação e desenvolvimento de pesquisas, utilizando-se do gaseificador acima citado após o término da pesquisa orientada ao setor de celulose e papel (forno de cal);

Promover editais para seleção dos grupos de pesquisa (universidades, empresas/centros de P&D) que possam conduzir os estudos tecnológicos e desenvolver capacitação dentro de metas e prazos adequados às necessidades brasileiras;

Promover parcerias internacionais envolvendo a África do Sul (por exemplo: South African Forestry Company-Safcol) e outros países detentores de tecnologias, academias e experiências de sucesso como Canadá (por exemplo: Universidade de Toronto, FPInnovations-Montreal); Finlândia (por exemplo: VTT, Universidade de Helsinki, Universidade de Aalto, etc.) e Suécia (por exemplo: Innventia, Universidade de Chalmers, Universidade de Lulea – Swedish Gasification Centre, etc.) para a obtenção de informações tecnológicas e troca de experiências;

Desenvolver a tecnologia de gaseificação de forma a atingir gradativamente a escala e homogeneidade operacionais necessárias à indústria nacional de celulose e papel;

Promover a qualificação/intercâmbio de pessoal técnico das empresas e das universidades/centros de pesquisa, aproveitando os estudos em gaseificação de biomassa para desenvolvimento de teses, dissertações, monografias, artigos, etc., bem como para a capacitação de recursos humanos, priorizando a adequação das tecnologias às condições brasileiras. Priorizar as áreas de engenharia para projetos, otimizações, controles operacionais, qualidade das matérias-primas florestais, automação na gaseificação da biomassa florestal;

Incentivar o desenvolvimento de novos produtos energéticos sintetizados a partir dos materiais obtidos pela técnica de gaseificação (syngas) em parceria com o Cenpes-Petrobras e outras instituições de P&D (IPT, Unifei, Unicamp, etc.);

Promover a capacitação em catálise e na integração da rota termoquímica (por exemplo: síntese de Fischer Tropsch);

Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs nacionais ou internacionais.

Estabelecer mecanismos de incentivo às pesquisas na área de pirólise rápida por meio de editais Finep/CNPq e apoios e/ou parceria com as entidades estaduais de pesquisa;

Desenvolver catalisadores para pirólise rápida com suporte financeiro do Cenpes/ANP;

Promover pesquisas ligadas à rota termoquímica para geração de produtos derivados de síntese química em complementação ao uso energético dos produtos diretamente obtidos pela pirólise rápida;

Articular e promover pesquisas conjuntas com centros de pesquisa de biomassa florestal (por exemplo: Embrapa Energia, Embrapa Florestas, Cetec, IPT, Esalq/USP, UFV, Renabio, etc.);

Fomentar a criação de uma rede tecnológica focada em pesquisas na temática pirólise rápida;

Fomentar ações conjuntas entre empresas e centros de pesquisa/universidades, estimulando a aquisição de equipamentos em escala piloto para pirólise rápida com a finalidade de gerar desenvolvimentos tecnológicos na área de integração de sistemas, catálise, rota termoquímica, automação e outras inovações incrementais;

Promover a capacitação de pessoal (academia, empresas e ICTs) em pirólise rápida, catálise e integração da rota termoquímica e síntese química;

Estabelecer parcerias internacionais com ICTs e universidades estrangeiras (preferencialmente Finlândia, Canadá e Suécia, nas entidades já mencionadas anteriormente) como importante mecanismo para ampliação de conhecimentos e troca de experiências (Ciência sem Fronteiras/FP7). Lançar editais para adequar e desenvolver de forma continuada a tecnologia da pirólise rápida às condições nacionais;

Lançar editais para desenvolver novos produtos energéticos e não energéticos a partir das pesquisas com a pirólise;

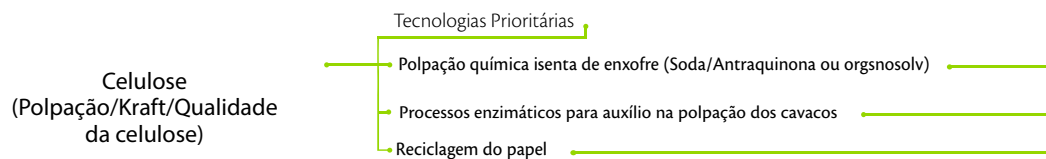
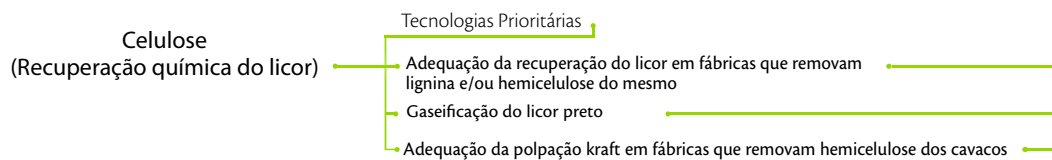
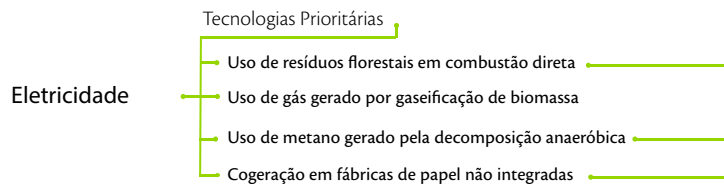
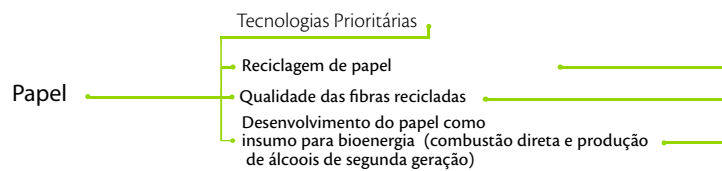
Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema, com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs, nacionais ou internacionais.

Promover o desenvolvimento da engenharia de reatores anaeróbicos para o tratamento de resíduos específicos do setor de celulose e papel por meio de linhas de financiamento e editais específicos;

Promover o desenvolvimento de pesquisas buscando melhorar a concentração e consequentemente incrementar o poder calorífico do gás gerado a partir do lodo e efluentes;

Incrementar as políticas públicas para estimular o uso energético do biogás obtido de resíduos orgânicos dentro das metas de redução de gases de efeito estufa (por exemplo: metano);

Estimular a criação de fóruns de debates e eventos sobre o tema com a participação de profissionais das universidades, empresas e ICTs, nacionais ou internacionais.







## Anexo IV – Mapa Estratégico – Avanços Tecnológicos dos Processos e Produtos Tradicionais

### Avanços tecnológicos dos processos e produtos tradicionais

#### Ações de CT&I

Estimular a integração horizontal (associativista) e vertical (modelo APL); integração de negócios e criação de novos negócios;

Realizar pesquisa nas propriedades das fibras recicladas devido ao impacto da biorrefinaria nas fibras virgens (i.e.: retirada de lignina) (há alteração nas propriedades da fibra);

A pressão pela substituição de produtos sintéticos por produtos naturais, como agentes químicos na produção de papel, vai exigir a realização de pesquisas para a criação desses produtos (naturais);

Promover ações de marketing (governo) para a separação de lixo;

Realizar pesquisa para utilização de fibras provenientes da reciclagem para sacarificação visando à produção de produtos diversos (etanol, derivados de celulose, produtos químicos, polímeros, biomateriais, etc.).

Criar linhas de financiamento para atualização das plantas visando à utilização da biomassa como fonte geradora de energia;

Criar mecanismos que permitam comercialização de eletricidade a partir da indústria de papel (redução da defasagem entre o preço de compra e o preço de venda);

Criar clusters para o aproveitamento do excedente de energia gerado a partir da planta da indústria de celulose;

Realizar estudos para a utilização de gaseificadores para cogeração na indústria de papel;

Expandir o modelo de financiamento por cogeração para o setor de papel em que o produtor pode usar a carta de venda em leilões da Aneel para obter crédito (hoje utilizado para indústria de açúcar e álcool).

A tecnologia para produção de energia por cogeração na indústria de papel.

Estudar o impacto da redução do teor de lignina e de hemiceluloses no licor negro no processo com relação ao aumento da incrustação nos evaporadores, corrosão, PCI, etc.

Realizar pesquisa acerca do uso da gaseificação de licor negro no processo de recuperação química – especialmente em relação a problemas devido à presença de enxofre. (Esse tópico está relacionado com polpação).

Estudar o impacto da redução do teor de hemiceluloses do cavaco no processo Kraft e na qualidade da celulose produzida com relação a refinabilidade, propriedades físico-mecânicas da polpa, etc.;

Estudar a viabilidade da completa substituição do processo Kraft por processos livres de enxofre (ex. soda/antraquinona e processos a base de solventes-organosolv);

Desenvolver substitutivos de hemiceluloses para a etapa de fabricação de papel.





## GLOSSÁRIO

---

**Briquetização ou peletização:** processos de compactação de partículas de madeira para tornar a madeira mais adequada à combustão como combustível de biomassa. Briquetes são cilindros de madeira compactada de maiores dimensões (lembra toretes), enquanto os pêletes têm dimensões menores, que lembram a uma ração animal.

**Celulose de mercado (*market pulp*):** celulose que é produzida em uma unidade industrial e vendida para ser convertida em papel em outras empresas.

**Cogeração:** produção simultânea de eletricidade e vapor.

**Clusters:** é uma concentração de empresas que se comunicam por possuírem características semelhantes e coabitarem no mesmo local. Elas colaboram entre si e, assim, se tornam mais eficientes.

**Edafoclimáticas:** Relativo aos solos e ao clima (ex.: o vinho é produzido em condições edafoclimáticas excepcionais).

**Globulização:** processo de melhoramento genético do eucalipto brasileiro que objetiva a introdução de genes da espécie *Eucalyptus globulus*.

**Lignocelulósica:** biomassa vegetal contendo em sua composição lignina e carboidratos celulósicos (celulose e hemiceluloses).

**Lógica fuzzy:** lógica difusa ou lógica *fuzzy* é uma extensão da lógica booleana que admite valores lógicos intermediários entre o FALSO (0) e o VERDADEIRO (1).

**Market-oriented:** cultura industrial focada no mercado, nas demandas dos clientes.

**Polissacarídeos:** Açúcares poliméricos formados pela polimerização de inúmeros monômeros de açúcares simples como glucose, manose, xilose, arabinose, etc.

**Production-driven:** cultura industrial focada na produção.

**Tall oil – Sabão de espuma:** Substância graxa que se forma como uma nata na superfície do licor preto em tanques de estocagem. Quando separada, essa substância pode ter diversos usos, desde biocombustível até produção de biomateriais.

**Royalties:** pagamentos de direitos de propriedade industrial ou intelectual.

**Silviculturais:** florestais. Silvicultura é a ciência dedicada ao estudo dos métodos naturais e artificiais de regenerar e melhorar os povoamentos florestais com vistas a satisfazer as necessidades do mercado e, ao mesmo tempo, é aplicação desse estudo para a manutenção, o aproveitamento e o uso racional das florestas.



## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 – Produtores de Pastas de Celulose - 2012	30
Figura 2 – Maiores Produtores de Celulose – 2012	30
Figura 3 – Destino da Produção Nacional de Pasta de Celulose - 2012	31
Figura 4 – Maiores Produtores de Papel - Estados - 2012	32
Figura 5 – Maiores Produtores de Papel - Empresas - 2012	32
Figura 6 – Destino da Produção Nacional de Papel - 2012	33
Figura 7 – Ilustração dos princípios associados a uma biorrefinaria	52
Figura 8 – Representação – Equação da Fotossíntese	59
Figura 9 – Mapa tecnológico para grupo Bioenergia (Bioprodutos energéticos)	100
Figura 10 – Mapa tecnológico para grupo Produtos Não Energéticos	103
Figura 11 – Mapa tecnológico para grupo Avanços Tecnológicos dos Processos e Produtos tradicionais	105
Figura 12 – Mapa tecnológico para grupo Biomassa Florestal e Madeira	108

## LISTA DE TABELAS

---

Tabela 1 – Produtividades do eucalipto e do pínus no Brasil, em m <sup>3</sup> /ha. ano, em 1980 e em 2009	20
Tabela 2 – Evolução das produções de pastas de celulose e de papel no Brasil, em toneladas, de 1988 a 2012	25
Tabela 3 – Produção, exportação, importação e consumo aparente, em 103 toneladas, dos vários tipos de pastas de celulose no Brasil, em 2012. Não inclui celulose solúvel (dissolução) e aparas (reciclados)	26
Tabela 4 – Produção, exportação, importação e consumo aparente, em 103 toneladas, dos vários tipos de papel no Brasil, em 2012	26
Tabela 5 – Lista de Instituições Nacionais	35
Tabela 6 – Lista de Instituições de Pesquisa Internacionais	37



## SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>ABDI</b>   Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial	<b>EUA</b>   Estados Unidos da América
<b>ABTCP</b>   Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel	<b>Fapesp</b>   Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
<b>Aneel</b>   Agência Nacional de Energia Elétrica	<b>Feagri</b>   Faculdade de Engenharia Agrícola
<b>ANP</b>   Agência Nacional do Petróleo	<b>Finep</b>   Financiadora de Estudos e Projetos
<b>APL</b>   Arranjo Produtivo Local	<b>FP7</b>   The Seventh Framework Programme
<b>ASAQ</b>   Sulfito Alcalino de Antraquinona	<b>Furg</b>   Universidade Federal do Rio Grande
<b>BEM</b>   Balanço Energético Nacional	<b>GTL</b>   Gas-to-Liquids
<b>BNDES</b>   Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social	<b>ICT</b>   Institutos de Ciência e Tecnologia
<b>Bracelpa</b>   Associação Brasileira de Celulose e Papel	<b>IEA</b>   International Energy Agency
<b>Capex</b>   Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	<b>IEE</b>   Instituto de Eletrotécnica e Energia – USP
<b>Cenargen</b>   Centro Nacional de Pesquisa de Recursos Genéticos e Biotecnologia	<b>INCT</b>   Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
<b>Cenpes</b>   Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello	<b>INT</b>   Instituto Nacional de Tecnologia
<b>Cepasa</b>   Celulose e Papel de Pernambuco	<b>Ipef</b>   Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais
<b>Cermav</b>   Centre de Recherches sur les Macromolécules Vegetales	<b>IPT</b>   Instituto de Pesquisas Tecnológicas
<b>Cetec</b>   Fundação Centro Tecnológico	<b>ISO</b>   International Organization for Standardization
<b>CGEE</b>   Centro de Gestão e Estudos Estratégicos	<b>MCTI</b>   Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
<b>CNI</b>   Confederação Nacional das Indústrias	<b>MDIC</b>   Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
<b>CNPq</b>   Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico	<b>MDL</b>   Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
<b>CT&amp;I</b>   Ciência, Tecnologia e Inovação	<b>NSAQ</b>   Sulfito neutro de atraquinona
<b>CTBE</b>   Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol	<b>NREL</b>   National Renewable Energy Laboratory
<b>CTC</b>   Centro de Tecnologia Canavieira	<b>P&amp;D</b>   Pesquisa e Desenvolvimento
<b>CTP</b>   Centre Technique du Papier	<b>PD&amp;I</b>   Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
<b>C&amp;P</b>   Celulose e Papel	<b>Pagora</b>   Ecole Internationale du Papier, de la Communication Imprimée et des Biomatériaux
<b>DQO</b>   Demanda Química de Oxigênio	<b>Papier</b>   Canadian Pulp and Paper Network for Innovation in Education and Research
<b>ECF</b>   Elemental Chlorine Free	<b>Paprican</b>   Pulp and Paper Research Institute of Canada
<b>Embrapa</b>   Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	<b>PARs</b>   Pastas de Alto Rendimento
<b>EPE</b>   Empresa de Pesquisa Energética	<b>PCI</b>   Poder Calorífico Inferior
<b>Esalq</b>   Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz	<b>PEE</b>   Programa de Eficiência Energética
	<b>PIB</b>   Produto Interno Bruto
	<b>Procel</b>   Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica



<b>Renabio</b>   Rede Nacional de Biomassa para Energia	<b>UFRB</b>   Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
<b>Senai</b>   Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial	<b>UFRGS</b>   Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<b>Secex</b>   Secretaria de Comércio Exterior	<b>UFRJ</b>   Universidade Federal do Rio de Janeiro
<b>SHF</b>   Separate Hydrolysis and Fermentation	<b>UFSC</b>   Universidade Federal de Santa Catarina
<b>SSF</b>   Simultaneous Saccharification and Fermentation	<b>UFRRJ</b>   Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
<b>TCF</b>   Totally Chlorine Free	<b>UFSM</b>   Universidade Federal de Santa Maria
<b>UEL</b>   Universidade Estadual de Londrina	<b>UFV</b>   Universidade Federal de Viçosa
<b>UEM</b>   Universidade Estadual de Maringá	<b>UFU</b>   Universidade Federal de Uberlândia
<b>UFAM</b>   Universidade Federal do Amazonas	<b>Unesp</b>   Universidade Estadual Paulista
<b>UFBA</b>   Universidade Federal da Bahia	<b>Unicamp</b>   Universidade de Campinas
<b>UFC</b>   Universidade Federal do Ceará	<b>Unifei</b>   Universidade Federal de Itajubá
<b>UFCG</b>   Universidade Federal de Campina Grande	<b>Univille</b>   Universidade da Região de Joinville
<b>Ufersa</b>   Universidade Federal Rural do Semi-Árido	<b>USA</b>   United States of America
<b>UFF</b>   Universidade Federal Fluminense	<b>USDA</b>   United States Department of Agriculture
<b>Ufla</b>   Universidade Federal de Lavras	<b>USP</b>   Universidade de São Paulo
<b>UFMG</b>   Universidade Federal de Minas Gerais	<b>UTFPR</b>   Universidade Tecnológica Federal do Paraná
<b>UFPE</b>   Universidade Federal de Pernambuco	<b>VTT</b>   Technical Research Centre of Finland
<b>UFPel</b>   Universidade Federal de Pelotas	
<b>UFPR</b>   Universidade Federal do Paraná	

## Documentos Técnicos disponíveis:

- 01 - 10 – Avaliação do programa de apoio à implantação e modernização de centros vocacionais tecnológicos (CVT)
- 02 - 10 – Energia solar fotovoltaica no Brasil
- 03 - 10 – Modelos institucionais das organizações de pesquisa
- 04 - 10 – Rede de inovação tecnológica para o setor madeireiro da Amazônia Legal
- 05 - 10 – Quadro de atores selecionados no Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação: Universidades brasileiras
- 06 - 10 – Quadro de atores selecionados no Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação: Instituições de Ciência, Tecnologia e Inovação
- 07 - 10 – Hidrogênio energético no Brasil: Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025
- 08 - 10 – Biocombustíveis aeronáuticos: Progressos e desafios
- 09 - 10 – Siderurgia no Brasil 2010-2025
- 10 - 11 – Inovações Tecnológicas em Cadeias Produtivas Selecionadas: Oportunidades de negócios para o município de Recife (PE)
- 11 - 11 – Avaliação do impacto da Olimpíada Brasileira de Matemática nas Escolas Públicas (OBMEP)
- 12 - 11 – Eletrônica Orgânica: contexto e proposta de ação para o Brasil
- 13 - 12 – Análises e percepções para o desenvolvimento de uma política de CT&I no fomento da energia eólica no Brasil
- 14 - 12 – *Roadmap* tecnológico para produção, uso limpo e eficiente do carvão mineral nacional: 2012 a 2035
- 15 - 12 – Inovações tecnológicas em cadeias produtivas selecionadas - Oportunidade de negócios para o município de Recife (PE): saúde, logística, petróleo e gás
- 16 - 12 – Redes Elétricas Inteligentes: contexto nacional
- 17 - 13 – Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para o Desenvolvimento da Amazônia Legal
- 18 - 13 – Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados – Edificações Eficientes
- 19 - 13 – Desafios ao desenvolvimento brasileiro: uma abordagem social-desenvolvimentista
- 20 - 13 – Eficiência Energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos da indústria selecionados – Celulose e Papel



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos  
*Ciência, Tecnologia e Inovação*

Ministério da  
**Ciência, Tecnologia  
e Inovação**