

Biorrefinaria integrada à indústria de celulose no Brasil: oportunidade ou necessidade?

Eduardo Christensen Nali
Leonardo Brandão Nader Magliano Ribeiro
André Barros da Hora*

Resumo

O segmento de celulose compete em âmbito global. As empresas localizadas no hemisfério Norte, com condições menos propícias para a formação de base florestal, vêm testemunhando constante perda de competitividade, o que faz com que desenvolvam ou adotem novas tecnologias visando à confecção de produtos de maior valor agregado, utilizando como base a fábrica de celulose, o que define o conceito de biorrefinaria. Não obstante o potencial que se apresenta nas biorrefinarias, os países localizados no hemisfério Sul – com destaque para o Brasil, em virtude da alta competitividade florestal – têm mantido o foco na produção da celulose, enquanto investem em pesquisas sobre biorrefinarias e buscam parcerias e tecnologias que possam ser adotadas nas plantas industriais locais, altamente competitivas e de grande escala. A inegável vocação florestal brasileira, tanto natural quanto oriunda de esforços em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), tem potencial para pôr o país em uma posição singular no que tange ao mercado de bioprodutos derivados de biorrefinarias integradas às plantas de celulose.

* Respectivamente coordenador, administrador e gerente do Departamento de Indústria de Base Florestal Plantada da Área de Insumos Básicos do BNDES.

Motivação e objetivo do estudo

A conjunção do crescente interesse público no desenvolvimento de uma economia de baixo carbono – apoiada na utilização de recursos renováveis e com potencial para geração de emprego e renda – com a alta competitividade da indústria brasileira de base florestal plantada – destacando-se a de celulose – serve de motivação para o presente estudo. São objetivos deste artigo:

- i. apresentar os principais conceitos relacionados ao tema biorrefinaria;
- ii. discutir os potenciais benefícios decorrentes da integração desse tema às unidades fabris de celulose;
- iii. fazer breves considerações sobre o potencial mercadológico para bioprodutos derivados de uma biorrefinaria; e
- iv. encaminhar questões que possam auxiliar os agentes no processo de tomada de decisão acerca do tema proposto.

Este estudo não visa à realização de análises técnico-científicas, mas sim à abordagem genérica de questões diversas que, espera-se, possam contribuir para as discussões acerca do desenvolvimento das biorrefinarias integradas às plantas de celulose no Brasil.

Principais conceitos: bioeconomia, biomassa e biorrefinaria

A bioeconomia – que compreende a parte da economia que utiliza recursos naturais renováveis para a produção de bioenergia, biocombustíveis e bioprodutos (KAMM; GRUBER; KAMM, 2006) – representa alternativa ao risco e limitações do modelo econômico atual, baseado em recursos fósseis, e pode ser o próximo vetor de desenvolvimento do Brasil, pois traz grandes oportunidades para inovação, emprego e crescimento. Ao considerar que a base fundamental para o desenvolvimento da bioeconomia são os recursos naturais renováveis, é possível afirmar que:

O Brasil se encontra em uma posição privilegiada para assumir a liderança no aproveitamento integral das biomassas pelo fato de possuir a maior biodiversidade do planeta; possuir intensa radiação solar; água em abundância; diversidade de clima e pioneirismo na produção de biocombustíveis da biomassa em larga escala, com destaque para a indústria canavieira, o etanol. [...] O país reúne, ainda, condições para ser o prin-

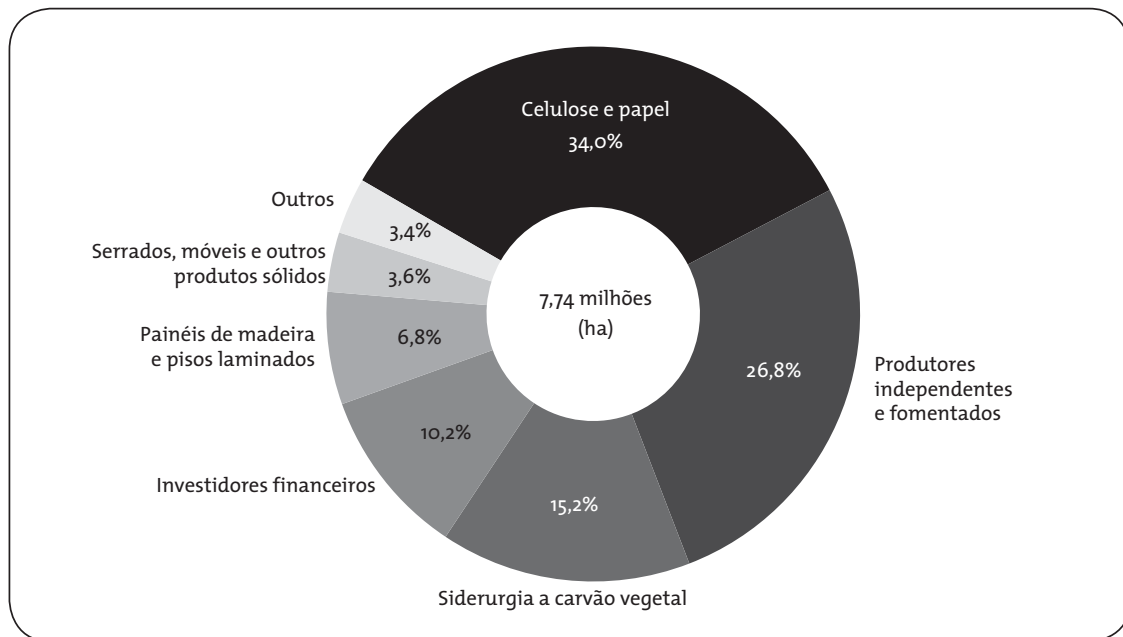
principal receptor de recursos de investimentos provenientes do mercado de carbono no segmento de produção e uso de bioenergia, por ter no meio ambiente a sua maior riqueza e possuir enorme capacidade de absorção e regeneração atmosférica (CGEE, 2010, p. 11).

Por biomassa entende-se qualquer matéria orgânica com conteúdo de energia química que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Pode ser de origem florestal, agrícola, de rejeitos urbanos, industriais ou animais, e seus derivados podem ser obtidos por intermédio das biorrefinarias, a depender tanto da matéria-prima utilizada quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos.

Segundo Foelkel (2015), destaca-se o interesse na biomassa florestal como matéria-prima para as biorrefinarias no Brasil em função de: (i) as florestas brasileiras serem certificadas como cultivos sustentáveis, muitas vezes realizados em áreas degradadas, o que significa que competem muito pouco por terras destinadas aos cultivos agrícolas de alimentos; e (ii) os produtos florestais não estarem sujeitos a influências sazonais e poderem ser colhidos durante o ano todo com elevada produtividade.

De acordo com dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), apresentados no Relatório Ibá 2015, o Brasil conta com uma área florestal plantada de apenas 7,74 milhões de hectares, como mostra o Gráfico 1, o que equivale a 0,9% do território nacional. Entretanto, esse plantio é responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país. Essa atividade madeireira dá origem a uma série de produtos, como “celulose, diversos tipos de papel, [...] pisos laminados, painéis compensados, móveis, demais produtos sólidos de madeira, carvão vegetal e outras biomassas para fins energéticos” (IBÁ, 2015, p. 5). Investimentos em PD&I vêm sendo feitos pela indústria, com o objetivo de desenvolver bioprodutos inovadores capazes de atender às demandas populacionais futuras. Ainda conforme a IBÁ, o setor de árvores plantadas é aquele que tem o maior potencial para o desenvolvimento de uma economia verde.

Biorrefinaria se refere, de forma geral, a uma planta industrial de processamento que, ao utilizar biomassa como insumo e ter seus processos e equipamentos altamente integrados, produz uma gama de produtos de maior valor agregado, como combustíveis, energia e químicos. Seria, portanto, um conceito análogo ao atualmente utilizado pelas refinarias petroquímicas, as quais fabricam múltiplos produtos de petróleo bruto (NREL; DOE *apud* KAMM; GRUBER; KAMM, 2006).

Gráfico 1 | Composição da área de árvores plantadas por segmento, 2014

Fonte: IBÁ (2015).

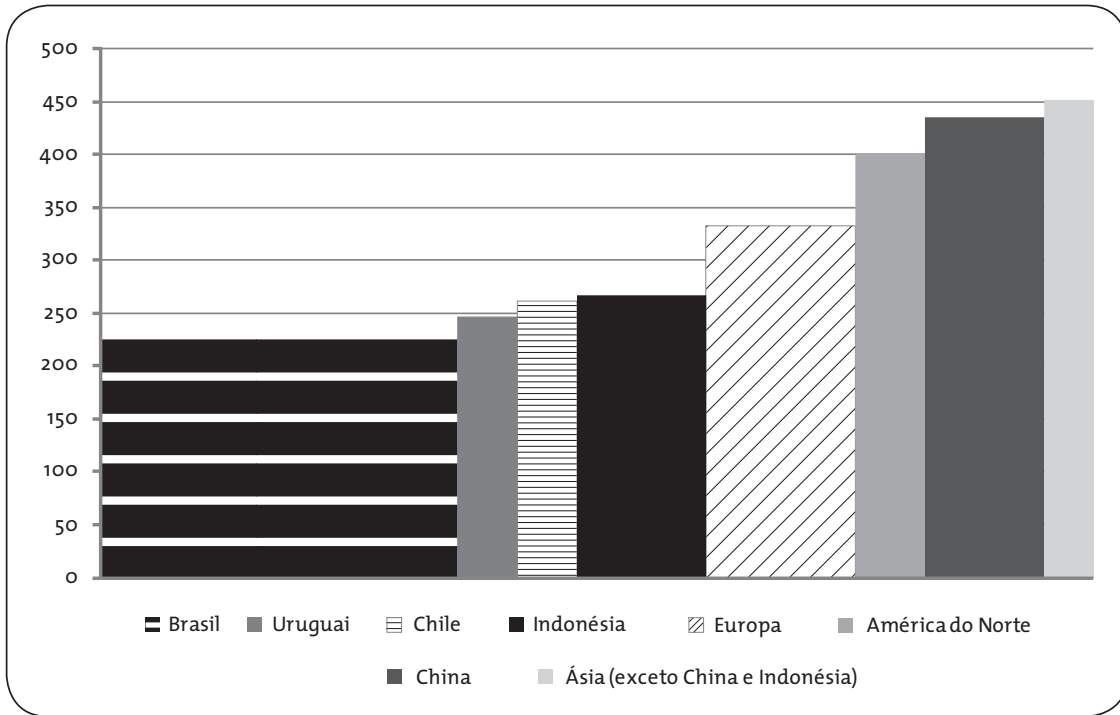
Em outras palavras, biorrefinaria nada mais é do que uma instalação industrial que, por diferentes rotas tecnológicas, converte os diversos tipos de biomassa em biocombustíveis, eletricidade, calor e insumos químicos.

Breve panorama setorial da celulose e da biorrefinaria

A situação da indústria produtora de celulose é diametralmente oposta quando se comparam os países do hemisfério Norte aos países ao sul do Equador, como Brasil, Chile, Uruguai e Indonésia.

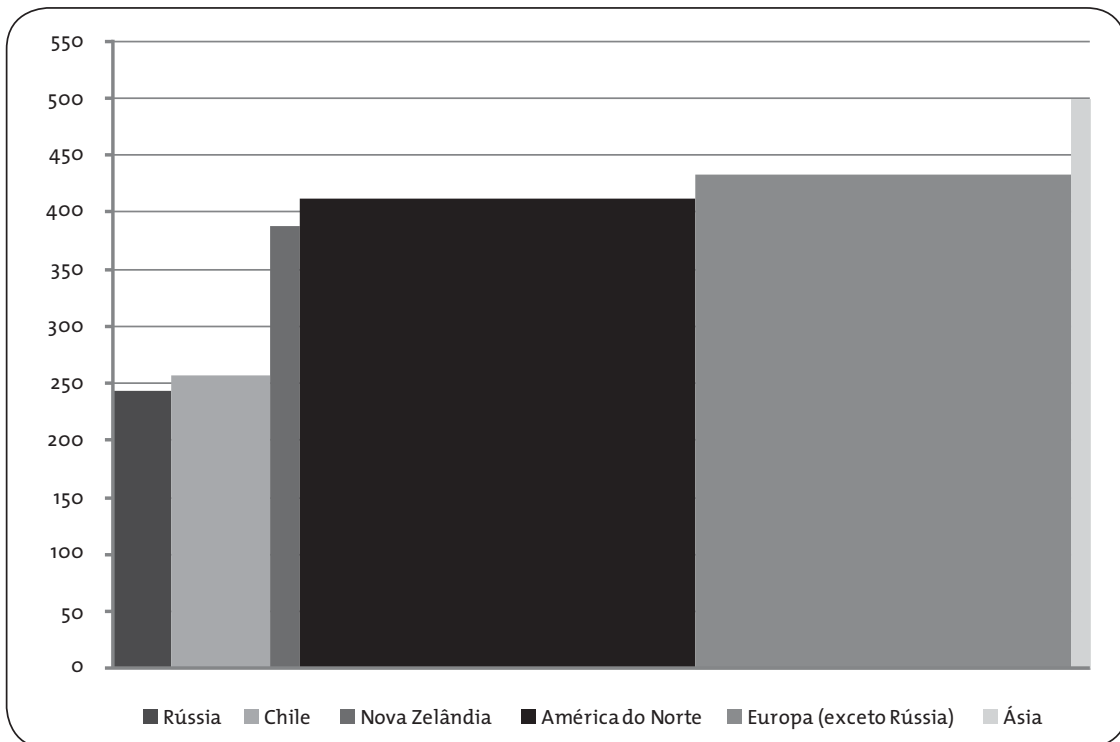
Enquanto em países do Norte a indústria vem passando por uma perda constante de competitividade em virtude do custo elevado de produção (principalmente em função de suas florestas com baixa produtividade), em países como o Brasil – que ostentam florestas de alto crescimento e grande disponibilidade de terras –, o futuro é bem mais promissor e a rentabilidade do negócio mais elevada. Nos gráficos 2 e 3, é possível comparar o custo caixa da produção de celulose tanto de fibra curta (folhosas) quanto de fibra longa (coníferas), entre diversas regiões no mundo. O Gráfico 4, por sua vez, evidencia as diferentes produtividades florestais por região.

Gráfico 2 | Custo caixa da celulose de fibra curta branqueada de mercado, sem frete e ordenado por capacidade produtiva (US\$/tonelada)

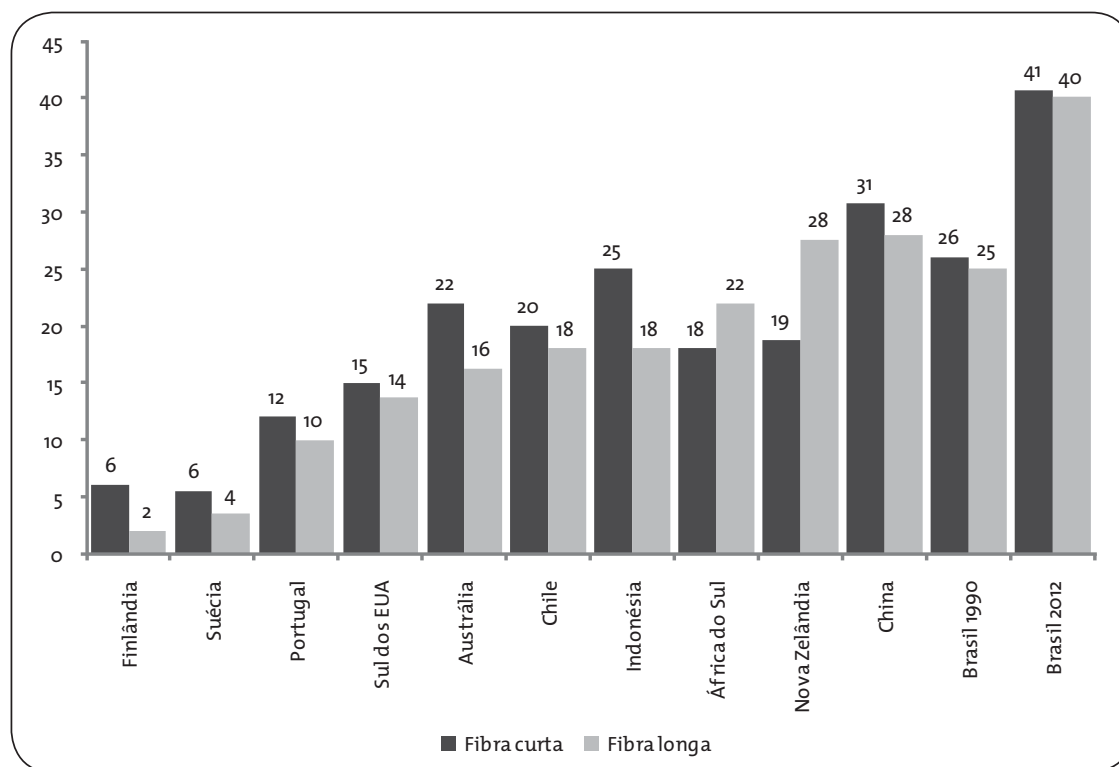


Fonte: Elaboração do BNDES, com base em dados do portal da Risi.

Gráfico 3 | Custo caixa da celulose de fibra longa de mercado, sem frete e ordenado por capacidade produtiva (US\$/tonelada)



Fonte: Elaboração do BNDES, com base em dados do portal da Risi.

Gráfico 4 | Comparação entre produtividade florestal média de fibra longa e de fibra curta do Brasil e de países selecionados, 2012 (m³/ha/ano)

Fontes: Abraf (2013).

Observa-se que o Brasil tem a maior produtividade florestal do mundo, tanto no cultivo de pinus quanto no de eucalipto. Como ilustração, pode-se analisar nas tabelas 1 e 2 a produtividade das florestas em diferentes regiões, dada pela rotação e Incremento Médio Anual (IMA).¹

Tabela 1 | Comparativo do rendimento das florestas de fibra curta

Espécies	Países	Rotação (anos)	IMA (m ³ /ha/ano)
Eucalipto	Brasil	7	44
Eucalipto	África do Sul	8-10	20
Eucalipto	Chile	10-12	25
Eucalipto	Portugal	12-15	12
Eucalipto	Espanha	12-15	10
Bétula	Suécia	35-40	6
Bétula	Finlândia	35-40	4

Fonte: Bracelpa (2014).

¹ IMA, medido em m³/hectare/ano, refere-se ao volume médio anual de madeira (em m³) obtido em determinada área de floresta plantada (em hectares) ao fim do ciclo de crescimento (ou na data do corte das árvores).

Tabela 2 | Comparativo do rendimento das florestas de fibra longa

Espécies	Países	Rotação (anos)	IMA (m ³ /ha/ano)
<i>Pinus spp</i>	Brasil	15	38
<i>Pinus radiata</i>	Chile	25	22
<i>Pinus radiata</i>	Nova Zelândia	25	22
<i>Pinus elliottii/taeda</i>	Estados Unidos	25	10
<i>Pinus de Oregon</i>	Canadá (costa)	45	7
<i>Picea abies</i>	Suécia	70-80	4
<i>Picea abies</i>	Finlândia	70-80	4
<i>Picea glauca</i>	Canadá (interior)	55	3
<i>Picea mariana</i>	Canadá (leste)	90	2

Fonte: Bracelpa (2014).

Essa vantagem brasileira reflete-se, também, na área necessária para a produção de 1,5 milhão de toneladas/ano de celulose, que é de 140 mil hectares² no Brasil, trezentos mil na China e 720 mil na Escandinávia. Isso faz com que o investimento em terras no Brasil seja bastante reduzido se comparado ao de outras regiões.

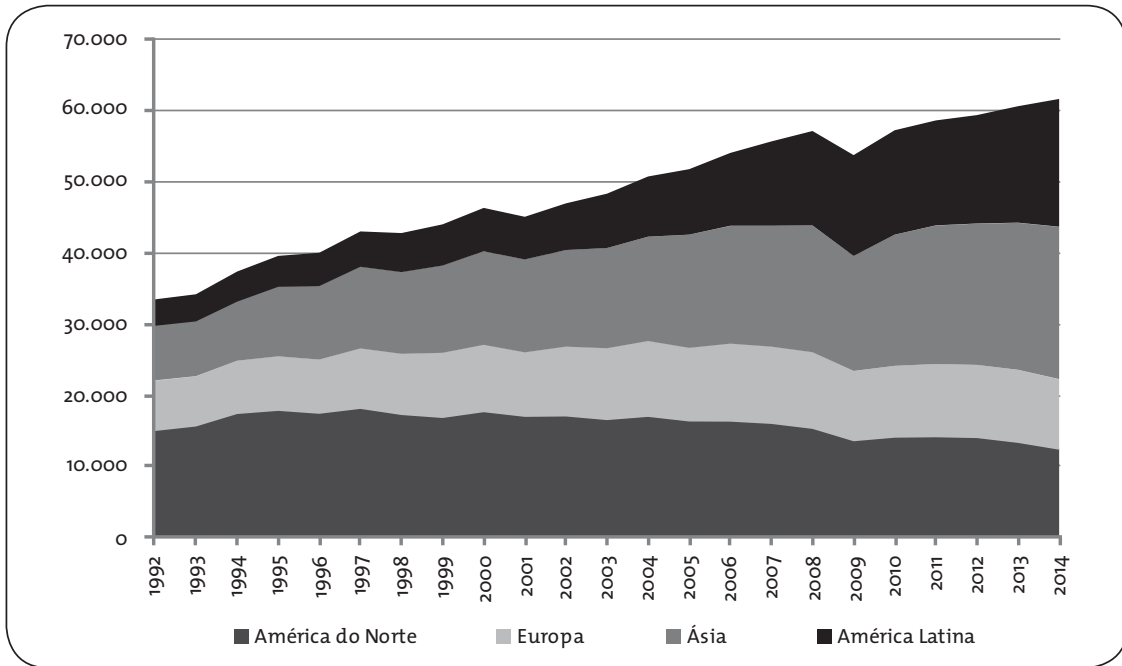
Além do menor custo das terras, a menor quantidade de área requerida pelos projetos florestais brasileiros também é uma vantagem para os custos de colheita e transporte da madeira, uma vez que a distância média entre os plantios e as unidades industriais é pequena.

Não surpreende que o hemisfério Norte enfrente estagnação nesse setor há algum tempo (Gráfico 5) – principalmente no que tange aos investimentos em produção de celulose de fibra curta –, ao mesmo tempo que grandes projetos são implantados em países como Brasil, Chile, Uruguai e Indonésia. De fato, o que se percebe é que América Latina e Ásia foram as regiões que mais ganharam mercado, em um movimento que se intensificou nos anos mais recentes.

Outra forma de verificar essa informação é observar onde ocorreram fechamentos de capacidades menos produtivas e aberturas de capacidades mais eficazes de plantas de celulose de fibra curta nos últimos dez anos.

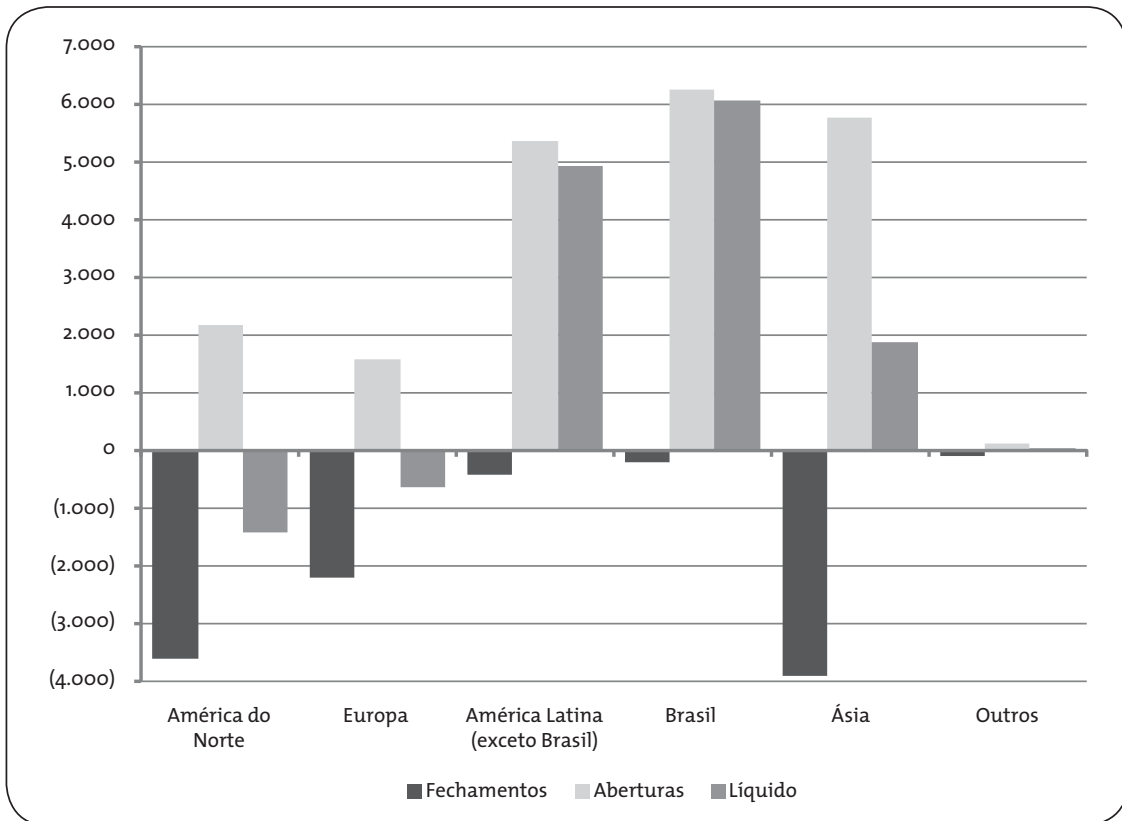
² Área útil de plantio, desconsiderando regiões de reserva legal e preservação permanente.

Gráfico 5 | Evolução da produção de celulose de fibra curta (t/ano)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados do portal da Risi.

Gráfico 6 | Aberturas e fechamentos de plantas produtoras de celulose de eucalipto branqueada de mercado, 2005-2014 (mil toneladas)



Fonte: Elaboração própria, com base em dados do portal da Risi.

Em função da perda de rentabilidade enfrentada pelas empresas de base florestal instaladas no hemisfério Norte, a busca por novas oportunidades se intensificou nessa região. Atualmente, a criação de novos negócios associados à produção de papel e celulose é condição necessária para a sobrevivência dessas empresas. Isso passa, sem dúvida, pelo investimento no desenvolvimento das biorrefinarias associadas às unidades industriais.

Atrelada a isso, a mudança estratégica observada nesses países encontra reforço em diversos fatores, por exemplo:

- i. na busca pela redução na dependência do petróleo, o que incentiva a utilização de novas fontes de energia, entre elas a biomassa;
- ii. no potencial de crescimento dos biocombustíveis;
- iii. nas oportunidades de crescimento da chamada química verde; e
- iv. na redução gradativa do consumo *per capita* de alguns tipos de papel (CGEE, 2013).

No entanto, conforme destaca o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), a alta competitividade das empresas brasileiras faz com que o novo ciclo de expansão do setor de celulose tenha foco na produção da *commodity* (CGEE, 2013). Ainda de acordo com o CGEE, o Brasil enfrenta uma migração tímida para plataformas industriais integradas em biorrefinaria, pois enfatiza mais a venda de excedentes de eletricidade e vapor do que a produção e venda de novos e valiosos produtos, como biocombustíveis e biomateriais não energéticos, apesar de as unidades fabris e florestais serem grandes fornecedoras de biomassa de alta qualidade (CGEE, 2014a).

A biorrefinaria

Para compreender o potencial da biorrefinaria em plantas de celulose no Brasil, é necessário entender a organização industrial, os processos tecnológicos e potenciais de mercado desse segmento.

Cadeia de valor e classificações de uma biorrefinaria

De acordo com o documento Biorefinery Roadmap (FNR, 2012),³ a cadeia de valor em uma biorrefinaria (Figura 1) consiste basicamente em

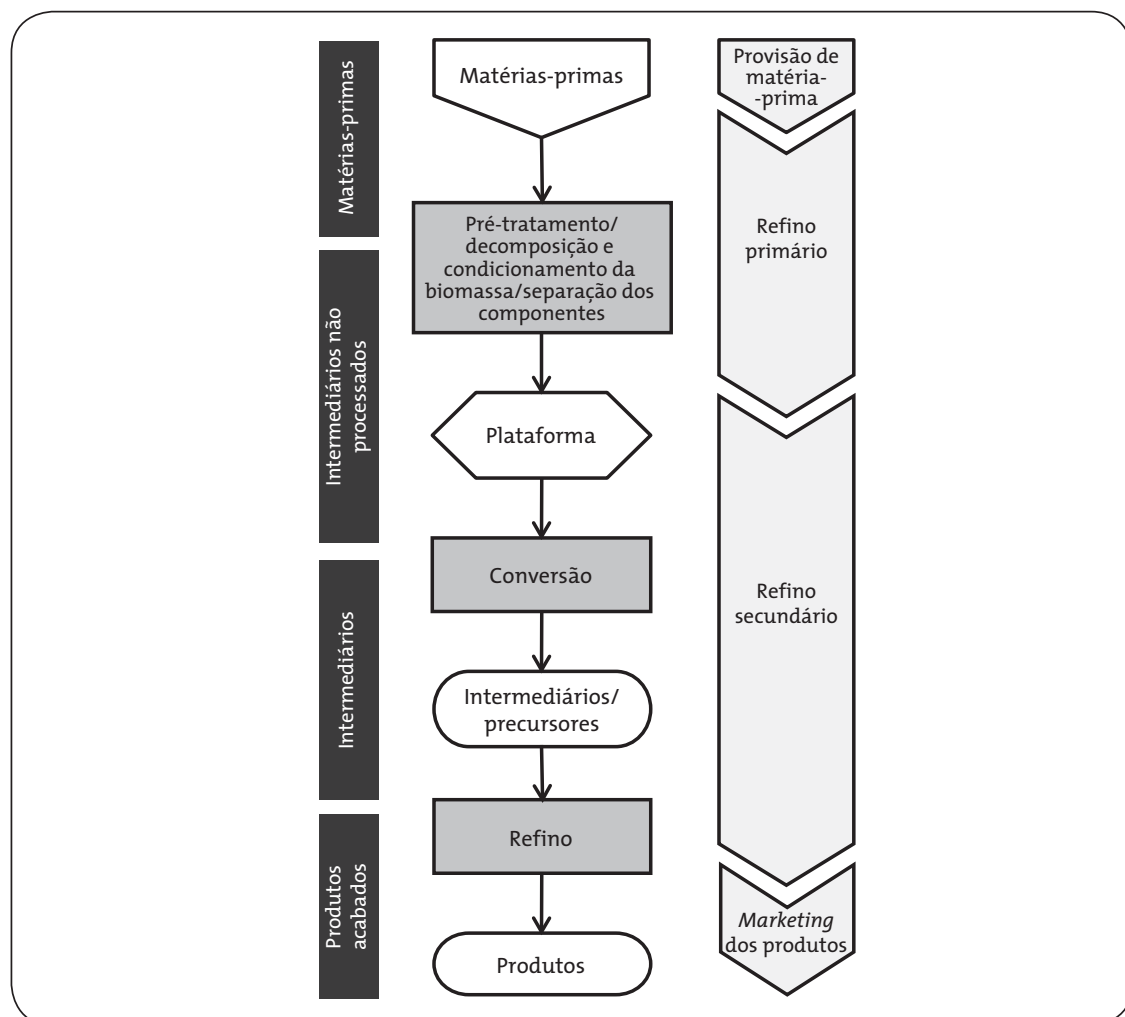
³ Elaborado pelo Governo Federal alemão, por meio da Agency for Renewable Resources (FNR), o Biorefinery Roadmap representa parte do plano de ação para o uso de materiais derivados de fontes renováveis, visando à estratégia de desenvolvimento de uma bioeconomia nacional, formulada no National Research Strategy Bioeconomy 2030.

elos destinados ao tratamento, desagregação dos componentes da biomassa, e em sua subsequente conversão.

O refino primário envolve a separação dos componentes da biomassa em intermediários (celulose, amido, açúcar, óleo vegetal, lignina, biogás, gás de síntese etc.) e, geralmente, inclui o pré-tratamento e condicionamento da biomassa. Enquanto a separação dos componentes ocorre na biorrefinaria, o pré-tratamento/condicionamento pode ser descentralizado e executado onde for necessário.

O refino secundário é o passo seguinte na conversão e processamento dos elementos intermediários gerados durante o refino primário. Os precursores são, completa ou parcialmente, refinados em produtos acabados ou semiacabados, dentro da biorrefinaria. Os subprodutos decorrentes dos refinamentos primário e/ou secundário são utilizados para a geração de energia ou para a produção de alimentos ou ração.

Figura 1 | Cadeia de valor em biorrefinarias



Fonte: FNR (2012).

Já a ideia básica de classificação desenvolvida por Cherubini *et al.* (2009), como parte da International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 42,⁴ é que cada biorrefinaria, de forma individualizada, possa ser definida por meio das seguintes características principais, por ordem de importância:

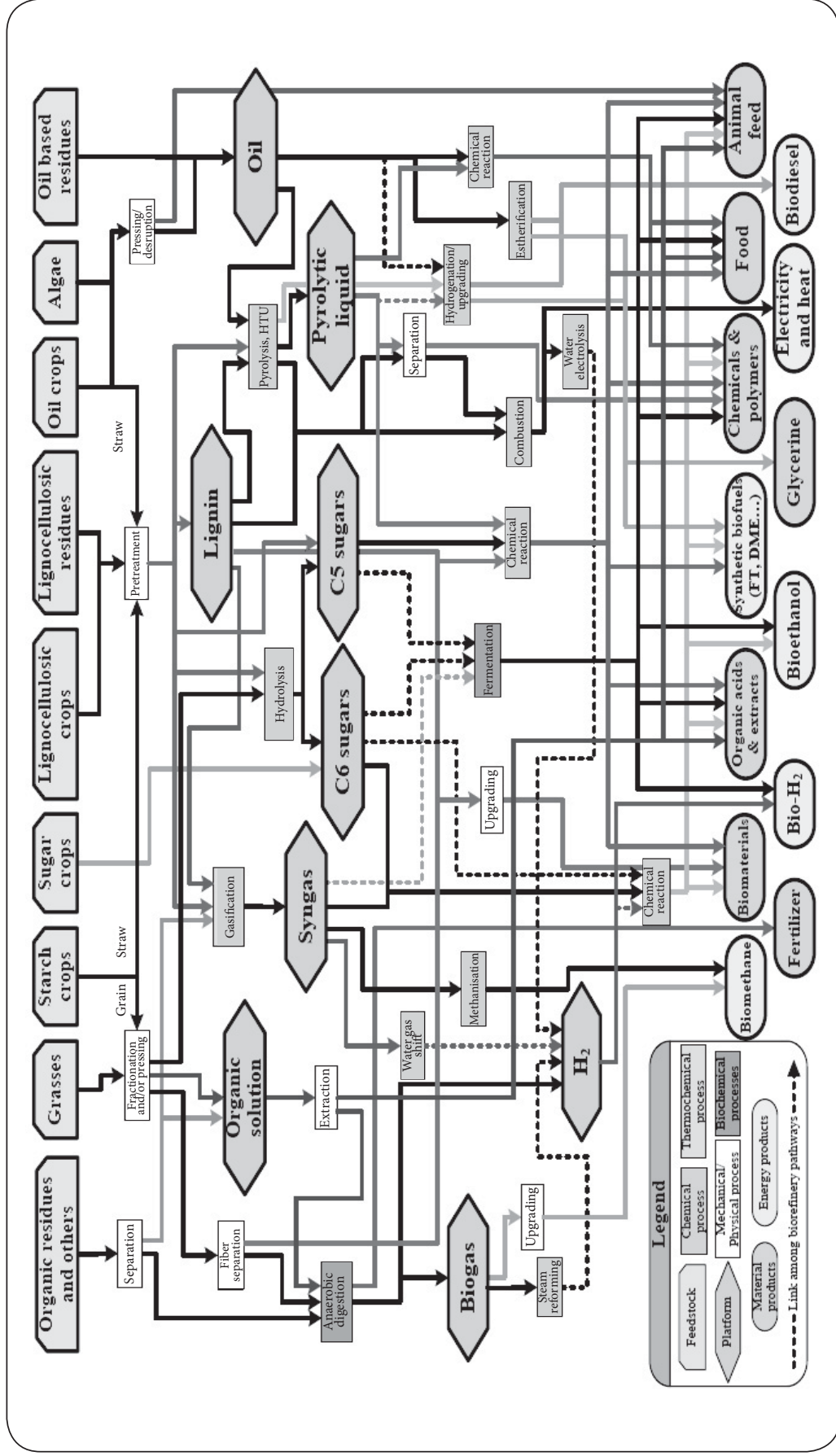
- i. plataformas: representam a ligação entre a matéria-prima e o produto final;
- ii. produtos: referem-se ao principal mercado de uma biorrefinaria e podem ser divididos em produtos energéticos ou não energéticos;
- iii. matérias-primas: classificadas em primárias (colhidas da floresta ou dos campos de cultivos agrícolas), secundárias (resíduos provenientes do processo principal, como o licor negro), e terciárias (dejetos pós-consumo humano ou industrial); e
- iv. processos: dividem-se em mecânico/físico, bioquímico, químico ou termoquímico – uma biorrefinaria é descrita como um caminho ou rota de conversão da matéria-prima até o produto, por meio de plataformas e processos.

Dessa forma, chega-se às inúmeras possibilidades de rotas (Figura 2) para a definição de uma biorrefinaria, que tem início com a matéria-prima, convertida em uma plataforma, por meio da qual são gerados produtos e energia.

Visto que determinados processos são aplicáveis a mais de uma plataforma, o desenvolvimento e a adoção de diversas rotas são possíveis pela combinação de uma variedade de matérias-primas, plataformas, produtos e processos dentro de uma biorrefinaria ou de um complexo de biorrefino.

⁴ IEA Bioenergy é um dos acordos de implementação estabelecidos pela IEA. Disponível em: <<http://www.iea-bioenergy.task42-biorefineries.com/en/ieabiorefinery.htm>>. O Task 42 teve início em 2007. Dentre suas atividades, destacam-se: (i) o desenvolvimento de uma definição comum para a atividade de biorrefino; e (ii) o desenvolvimento de um sistema de classificação comum e utilizável para os processos das biorrefinarias.

Figura 2 | Possibilidade de rotas de conversão em biorrefinarias



Fonte: Cherubini *et al.* (2009).

Modelos de implantação de uma biorrefinaria

Segundo o Biorefinery Roadmap (FNR, 2012), há dois modelos principais para a implementação de uma biorrefinaria: *bottom-up* e *top-down*.

O modelo de implantação *bottom-up* ou “de baixo para cima” refere-se à expansão de uma planta de refino já existente e que fabrique um ou poucos produtos. Busca-se, por meio desse modelo, ampliar o leque de produtos e/ou aumentar as possibilidades de utilização das frações de biomassa, o que integra os processos preexistentes de refino primário e secundário a processos e tecnologias adicionais.

O modelo *top-down* ou “de cima para baixo” é utilizado quando a ênfase é dada a um modelo novo, altamente integrado, de sistemas projetados para o uso de diversas frações de biomassa, e objetiva a otimização dos recursos e a fabricação de produtos destinados a diferentes mercados. Nesse modelo, não se interligam processos preexistentes de conversão de biomassa.

No Brasil, em virtude da relativa incipiência do tema “biorrefinaria” e da elevada competitividade da indústria de celulose em relação a seus concorrentes externos, a preferência é pelo modelo *bottom-up*, que permite às empresas iniciarem suas experiências por meio de projetos-pilotos com escalas reduzidas, com base na utilização de subprodutos de seus processos principais já existentes, conforme aponta o documento técnico elaborado pelo CGEE (CGEE, 2013).

O potencial de desenvolvimento de biorrefinarias na indústria de celulose

Como apresentado, as biorrefinarias podem ser autônomas ou integradas. No primeiro caso, trata-se de unidades industriais que são projetadas para operar independentemente de outras indústrias. No segundo caso, são biorrefinarias integradas a unidades industriais já existentes, que, neste estudo, são aquelas integradas às fábricas de celulose e que se aproveitam de parte do processo produtivo previamente instalado para gerar os bioprodutos.

Uma biorrefinaria deve ser sustentável, ambientalmente correta e economicamente viável; ou seja, deve produzir, de forma competitiva, bens que tenham potencial mercadológico.

No caso de uma biorrefinaria integrada ao setor de celulose e papel, além dos pontos expostos anteriormente, é preciso que ela não prejudique

a eficiência da produção ou a qualidade do produto final. Isso pode parecer óbvio, mas carece de uma interpretação mais aprofundada, já que a adição de um processo industrial paralelo a uma linha de produção de celulose – para a obtenção de bioprodutos diversos das fibras e da energia – poderá afetar, em algum grau, a estabilidade operacional ou o balanço energético da planta.

Assim, uma biorrefinaria integrada tem como necessidades, por exemplo:

- i. aumentar a receita e/ou a produção;
- ii. melhorar a agregação de valor aos novos produtos e a toda a unidade industrial integrada;
- iii. ter como base o uso de biomassas que não são utilizadas para a produção das fibras de celulose e/ou de papel;
- iv. ter excelente integração aos processos para máxima ecoeficiência (mínimos desperdícios e impactos com poluentes);
- v. deter tecnologias que não inviabilizem ou prejudiquem os processos e produtos tradicionais do setor;
- vi. melhorar a eficiência de reciclagem dos resíduos industriais e florestais;
- vii. ser neutra ou positiva na geração de carbono;
- viii. não impedir as vantagens do crescimento da escala de produção das fábricas de celulose, que hoje já atinge cerca de 1,5 milhão de toneladas/ano em uma única unidade industrial (FOELKEL, 2015).

Apesar das inúmeras oportunidades pesquisadas e desenvolvidas, as tecnologias com aplicação direta na melhoria do desempenho das fábricas de celulose e papel e que não trazem distúrbios operacionais nos processos existentes são as que têm, na atualidade, despertado maior interesse de implementação a curto prazo.

Principais produtos oriundos da madeira

A composição química da madeira não pode ser definida com exatidão, uma vez que ela varia de acordo com a espécie, com as partes da árvore (raízes, tronco, ramos e casca) e com as condições ambientais (localização geográfica, clima, tipo de solo etc.), como demonstra a Tabela 3. Todavia,

de forma geral, é possível separá-la em dois grandes grupos de componentes químicos: estruturais e não estruturais (extrativos). O primeiro grupo engloba as substâncias macromoleculares que constituem a parede celular de todas as madeiras: a celulose, as hemiceluloses e a lignina. Do segundo grupo fazem parte as substâncias de massa molecular pequena, como os extrativos e as substâncias minerais, vulgarmente designadas como cinzas.

Tabela 3 | Composição química da madeira (percentagem de seu peso seco)

Tipo	Celulose	Lignina	Hemiceluloses	Outros
Fibra longa (coníferas)	40-44	19-33	25-29	2-8
Fibra curta (folhosas)	43-47	13-31	25-35	1-5

Fonte: Vidal e Da Hora (2011).

É possível extrair da celulose o etanol celulósico, além de outros produtos como os nanocristais de celulose microfibrilados, úteis na produção de materiais que necessitem de alta resistência. A hemicelulose pode ser útil na obtenção de produtos altamente valorizados, tais como hidrogéis para a indústria farmacêutica, bioplásticos, resinas furânicas e reagentes químicos verdes (REVISTA O PAPEL, 2011).

Os produtos da lignina, por sua vez, são usados, entre outras aplicações, como agentes dispersantes que dão fluidez e estabilização ao concreto, corantes têxteis, pesticidas, baterias e produtos de cerâmica, ou como aditivos em alimentos para animais e briquetes.⁵ A lignina pode, ainda, dar origem a produtos de grande valor agregado, como as fibras de carbono.

Entretanto, para que seja possível obter esses produtos, a biomassa deverá passar por uma série de processos que visam a sua desconstrução e posterior transformação de seus componentes nos mais diversos bioprodutos. Para tanto, algumas rotas tecnológicas são desenvolvidas com base em duas plataformas principais.

Plataformas tecnológicas em destaque e principais rotas de conversão

Para que seja possível a produção desses diversos bioprodutos, duas plataformas tecnológicas principais, entre as apresentadas anteriormente,

⁵ Disponível em: <<http://www.borregaard.com/Business-Areas/Borregaard-LignoTech>>. Acesso em: 31 out. 2014.

podem ser empregadas, isoladamente ou em conjunto, em uma biorrefinaria: a bioquímica e a termoquímica.

A plataforma bioquímica (hidrólise) age por intermédio do uso de um agente biológico para conversão dos açúcares presentes na biomassa em combustíveis líquidos e produtos químicos. Hemicelulose e celulose podem ser hidrolisadas a açúcares e fermentadas microbianamente para a produção, por exemplo, do etanol, ou serem convertidas quimicamente em outros elementos.

Para tanto, duas rotas são frequentemente empregadas, hidrólise ácida e hidrólise enzimática do material pré-tratado (OGEDA; PETRI, 2010). Nesse processo, uma ou mais etapas de pré-tratamento da biomassa são necessárias, com o intuito de remover ou quebrar as camadas de lignina e hemicelulose, o que permite que as enzimas acessem a celulose com mais facilidade. Logo, a combinação de diferentes pré-tratamentos e enzimas para hidrólise gera uma grande diversidade de rotas tecnológicas para a produção de açúcares (ALVES, 2013).

Já a plataforma termoquímica consiste em converter termicamente a biomassa em combustível/energia, com destaque para os processos de: combustão (biomassa em calor), gaseificação (gás combustível), pirólise rápida (óleo combustível), carbonização (carvão vegetal) e torrefação (biomassa torrada). A principal diferença entre esses processos ocorre pela temperatura da conversão e pela presença ou ausência de um agente oxidante, como ar, oxigênio ou vapor d'água (PELLEGRINI, 2012).

Em cada uma dessas plataformas, diversas rotas tecnológicas para a obtenção dos diferentes bioprodutos estão em constante desenvolvimento. Segundo CGEE (2013), o fracionamento da biomassa, com o intuito de obter diversos bioprodutos, encontra rotas tecnológicas já conhecidas e comprovadas, caso da gaseificação e da pirólise rápida de materiais lignocelulósicos, e rotas tecnológicas desconhecidas ou que precisam ser aperfeiçoadas, no que tange tanto à economia quanto à qualidade e eficiência dos processos. Exemplos disso são a produção de etanol de segunda geração com base em resíduos lignocelulósicos (ricos em lignina e carboidratos de cinco carbonos) e a extração e derivação de compostos de lignina para usos em fibras de carbono e adesivos.

Ainda de acordo com o CGEE, por um lado, as alternativas tecnológicas de implementação mais simples são as que convertem a biomassa em biocombustíveis sólidos para combustão direta, tais como briquetes, *pellets* e

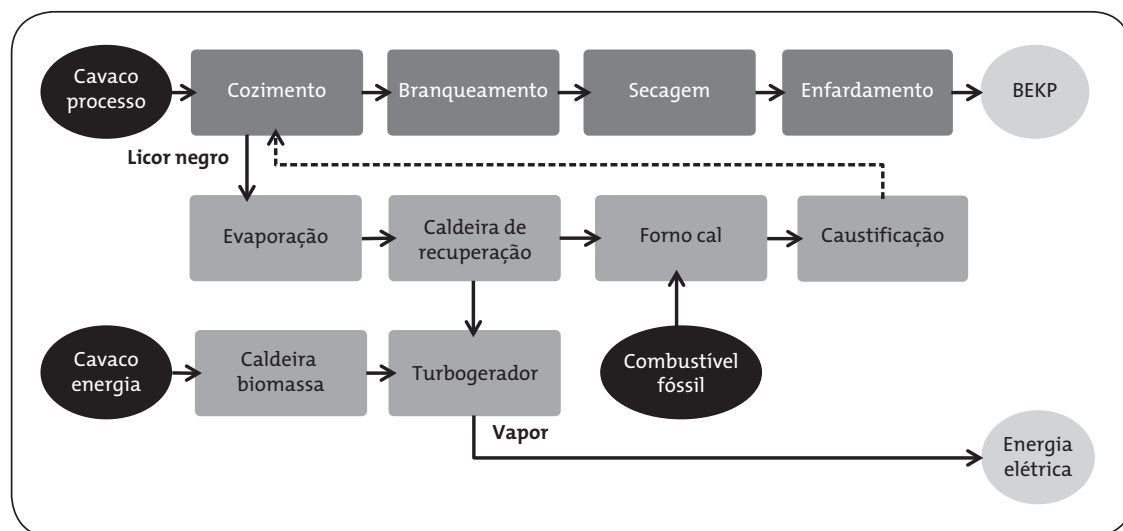
até mesmo lenha. Ocorre que essas rotas estão longe de serem inovadoras e não acrescentam muito à biomassa. Por outro, uma simples adição de um processo de torrefação para produzir um biogás combustível e um material sólido de maior poder calorífico, que pode ser convertido em briquetes mais valiosos, pode servir para atender a mercados mais exigentes.

Todavia, são as rotas tecnológicas mais modernas que podem trazer maiores vantagens para a indústria mediante o fracionamento da biomassa e posterior conversão dos produtos intermediários como álcoois, furfural, dimetil-éter e biodiesel (FOELKEL, 2015).

Sendo assim, a vantagem para o setor de celulose com a introdução de processos de biorrefinaria em suas unidades industriais está no fato de que as instalações de extração das fibras são plantas químicas, por definição, o que significa que a introdução de novos processos para a conversão da biomassa não traria grandes alterações em suas rotinas operacionais.

De fato, as modernas plantas de celulose que utilizam o processo *kraft*⁶ já funcionam como biorrefinarias, pelo menos quando se fala da produção de energia elétrica e térmica por meio da utilização de resíduos industriais e florestais que seriam destinados a aterros ou estações de tratamento de efluentes (Figura 3).

Figura 3 | Fluxograma do processo de produção de celulose pelo método *kraft*



Fonte: Elaboração própria.

⁶ No processo *kraft*, a madeira em cavacos sofre cozimento com a adição de sulfato de sódio e soda cáustica, processo que separa a lignina, a hemicelulose e os demais componentes da madeira das fibras de celulose (ainda não branqueadas).

Segundo CGEE (2014b), pela perspectiva da biorrefinaria, o processo *kraft* apresenta clara vantagem na obtenção de produtos de base renovável em relação a outros processos que partem da biomassa “crua”. Isso se deve porque a biomassa é desconstruída para a obtenção da celulose e deixa no licor negro outras macromoléculas já convertidas em diversos componentes que são candidatos imediatos à conversão de produtos em biorrefinaria.

Nas plantas de produção de celulose, o licor negro gerado no processo de cozimento é separado das fibras de celulose e enviado para os evaporadores com o objetivo de elevar sua concentração de sólidos e possibilitar sua combustão. Em seguida, esse licor concentrado é encaminhado para a caldeira de recuperação. Sua queima possibilita, além da recuperação dos reagentes químicos, que retornam ao cozimento, o aproveitamento da energia térmica para a geração de vapor, que é utilizado em várias etapas do processo produtivo, até mesmo nos turbogeradores, para a produção de energia elétrica.

Dessa forma, nessas plantas industriais (com exceção da celulose), todos os demais componentes da madeira são atualmente queimados para a obtenção de energia elétrica e vapor e não são utilizados para a produção de elementos de maior valor. Isso denota a grande possibilidade de criação de valor no segmento por intermédio das biorrefinarias.

Entretanto, a queima do licor negro na caldeira de recuperação, apesar de gerar energia elétrica e vapor – tanto para sua utilização no processo quanto para a venda –, ainda é um dos gargalos no aumento da produção de celulose nas fábricas atuais. Segundo Foelkel (2015), apesar de as fábricas de celulose *kraft* terem passado por um grande aumento de capacidade nos últimos sessenta anos, o crescimento da escala industrial só não foi mais intenso por conta das limitações impostas por uma complexa engenharia que visava ao aumento da capacidade das caldeiras de recuperação e dos fornos de cal.

Sendo assim, a simples remoção de parte da lignina do licor negro reduz o volume destinado à queima nas caldeiras de recuperação, o que oferece uma oportunidade para o aumento da produção de sua linha de fibras, sem ter gargalos na recuperação dos químicos.

O desenvolvimento da biorrefinaria integrada à indústria de celulose no Brasil

Inicialmente, é importante entender o contexto institucional da pesquisa em biorrefino no Brasil, em que as biorrefinarias lignocelulósicas têm por base a cana-de-açúcar e as florestas plantadas de pínus e eucalipto. De fato, as técnicas para a produção de etanol de segunda geração, a partir do bagaço da cana-de-açúcar, já estão consolidadas (REVISTA O PAPEL, 2011). Falta, entretanto, desenvolver essa tecnologia para que sua produção seja mais competitiva e com custo comparável ao etanol de primeira geração. Ademais, a indústria sucroalcooleira tem quase quatro décadas de experiência na produção de etanol de primeira geração, o que pode facilitar a integração de novos processos.

Cabe salientar a contribuição do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE), que integra o Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM). O CTBE foi inaugurado em 2010, com os objetivos de contribuir para a competitividade brasileira na produção e conversão industrial de biomassas em combustíveis (primeira e segunda geração), eletricidade e compostos derivados da química verde e de realizar pesquisa e desenvolvimento tecnológico de ponta nessa área. Contudo, apesar de o CTBE objetivar as pesquisas em biomassa para a produção de fontes energéticas em geral – o que pode beneficiar diretamente o setor de celulose e papel –, esse laboratório é ligado ao setor sucroalcooleiro e desenvolve, majoritariamente, pesquisas voltadas à utilização da cana-de-açúcar.

Quanto às pesquisas em biorrefinarias para o setor de celulose e papel, CGEE (2013) informa que o Brasil conta com diversos grupos de estudos, com destaque para o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, a Embrapa Florestas e a Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Diversas universidades vêm se dedicando ao tema, com a publicação de trabalhos acadêmicos. Cabe destacar a atuação das grandes empresas do setor: Fibria, Suzano e Klabin.

Apesar disso, não há um centro de tecnologia (CT) voltado para o desenvolvimento de tecnologias em biorrefinarias de celulose tal qual o CTBE para a cana-de-açúcar. Por essa razão, entre 2012 e 2014, formou-se um grupo de estudos para a criação de um CT voltado à celulose, liderado pelo CGEE e com as participações dos seguintes órgãos: CTBE, Ministério de

Ciência, Tecnologia e Inovação, Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, BNDES, além das principais empresas do setor. Em princípio, o referido centro seria composto por oito laboratórios considerados os mais importantes para o apoio e desenvolvimento de pesquisas em análise de biomassa, rota termoquímica, rota química, extração, derivatização, análise, matriz celulósica e planta-piloto.

A expectativa era que esse novo centro pudesse atuar em parceria com o CTBE por conta das similaridades entre as pesquisas acerca das biorrefinarias que utilizam cana-de-açúcar e as que utilizam biomassa florestal. Isso alavancaria pesquisas e o desenvolvimento de tecnologias em biorrefinarias para o setor de celulose e papel.

Apesar de o grupo ter concluído um estudo com recomendações para a implantação do CT, a conclusão do projeto ainda depende de fatores como a definição do modelo jurídico a ser adotado, o detalhamento técnico do escopo de atuação do centro, além de que forma se daria a proteção ou partilha da propriedade intelectual dos resultados.

Rotas de conversão implementadas ou com potencial de implementação em fábricas de celulose no Brasil

Como já explicitado anteriormente, a produção de eletricidade e vapor por cogeração, para uso próprio ou venda de excedentes a terceiros, já é amplamente difundida nas plantas de produção de celulose no Brasil. A gaseificação da biomassa florestal para sua utilização no processo produtivo, sobretudo no forno de cal, também será potencialmente utilizada nas novas plantas produtoras de fibras, assim como a produção de biogás de resíduos sólidos orgânicos da fábrica. A pirólise rápida da biomassa florestal para a produção de bio-óleo combustível (para uso no processo ou para coprocessamento com o petróleo) e de gás combustível é outra tecnologia que pode começar a ser implementada em um prazo mais curto, a depender, sobretudo, de sua viabilidade econômica.

A extração da lignina do licor negro para uso interno como combustível no forno de cal e desgargamento do sistema de recuperação do licor, por sua vez, é amplamente estudada no país. O processo necessário para sua implementação está bastante avançado e já existe, até mesmo, uma planta-piloto, construída pela Suzano, com essa tecnologia. Entretanto, o posicionamento das principais empresas do setor é que a extração da lignina para

simples queima não teria atratividade econômica suficiente para justificar os investimentos.

Por esse motivo, as principais ações que focam a utilização da lignina priorizam o avanço de processos produtivos mais eficazes e menos custosos, para que sua utilização se torne viável não só para a queima, mas também para a fabricação de produtos de maior valor, como fibras de carbono, vanilina, aromáticos, carvão ativado e resinas fenólicas.

A peletização ou briquetagem de resíduos florestais, por sua vez, também são tecnicamente possíveis, mas não se mostram economicamente viáveis a curto prazo.

A obtenção de nanocelulose fibrilar (NCF) e cristalina (NCC) também se mostra potencialmente promissora tanto para a melhoria no revestimento e resistência de papéis (NCF) quanto para a utilização na elevação da força, resistência, refletividade e impermeabilidade de materiais (NCC).

As rotas de hidrólise para a produção de açúcares e posterior conversão em combustíveis líquidos e produtos químicos também se mostram tecnologicamente promissoras. Todavia, por conta da competição com a indústria sucroalcooleira, mais avançada nesse setor, podem não se mostrar economicamente interessantes para as empresas do setor de celulose, a curto e médio prazos.

Rotas tecnológicas alternativas também são estudadas. Porém, a utilização de processos mais complexos para a obtenção de produtos de maior valor dependerá não somente dos avanços tecnológicos e mercadológicos, mas também da estruturação de parcerias comerciais entre as empresas produtoras de celulose e papel e as indústrias química, automobilística, de bens de capital, de biotecnologia, entre outras, o que significa alterar a cultura do setor, contumaz criador isolado de poucos produtos.

Estudos de caso globais em biorrefinaria e potenciais desdobramentos para as empresas brasileiras

Com base em uma apresentação realizada em outubro de 2013, na cidade de São Paulo, pela Pöyry – importante empresa de consultoria e engenharia do setor de papel e celulose –, são descritos cinco estudos de caso de projetos que foram ou estão sendo desenvolvidos em todo o mundo. Além disso, são identificadas oportunidades e iniciativas para as empresas brasileiras.

Caso 1: Extração de lignina da Domtar, com capacidade de 27 mil t/ano

Domtar é uma empresa canadense que, até recentemente, tinha como principal produto papéis de imprimir e escrever. Com o declínio desse segmento, passou a atuar na busca de novos mercados – como celulose *fluff* e biorrefinarias. A Domtar utiliza tecnologia patenteada LignoBoost, criada pelo instituto de pesquisas Innventia⁷ e vendida para a Metso, em 2008.

Esta é a rota utilizada pela Suzano em sua planta-piloto, em Limeira. Segundo a Suzano, a tecnologia de extração da lignina foi totalmente desenvolvida pela própria empresa, em parceria com fornecedores de equipamentos nacionais.

Apesar da possibilidade de utilização da lignina como combustível no forno de cal, o que reduz a necessidade do emprego de combustíveis fósseis no processo de fabricação de celulose, a extração do produto do licor negro para esse fim não é interessante em termos econômicos. Por conta disso, usos mais nobres da lignina estão sendo desenvolvidos por empresas brasileiras do setor, sobretudo a Fibria e a Suzano. A perspectiva é que, a médio prazo, seja possível obter vanilina, resinas fenólicas, dispersantes, ácidos aromáticos e fibras de carbono para a utilização, principalmente, no setor automobilístico.

Um dos principais usos já comprovados para a lignina ocorreu mediante a obtenção de aglutinantes para a substituição de parte da resina ureia-formaldeído na fabricação de painéis de madeira, fruto de uma parceria entre Suzano e Duratex. A Suzano já anunciou a implantação de uma linha de extração comercial, com início de produção previsto para o segundo trimestre de 2017.

Caso 2: Produção de nanocristais de celulose (NCC) no Canadá

A produção dos nanocristais de celulose se iniciou com a criação de uma *joint venture* entre a Domtar e a FPIinnovations, denominada CelluForce, cuja planta, com capacidade de produção de apenas 1 t/dia, começou suas operações em 2012. A canadense FPIinnovations é uma instituição de pesquisa privada, sem fins lucrativos, voltada para o setor florestal.

⁷ Instituto de origem sueca, Innventia é líder mundial em pesquisa e desenvolvimento de inovações aplicáveis a matérias-primas de origem florestal.

Os nanocristais de celulose têm aplicações teóricas em uma vasta gama de produtos, uma vez que melhoram a força e a resistência dos materiais e podem reduzir danos causados por desgaste, umidade e radiação espectral. Além disso, sua refletividade à luz (ultravioleta a infravermelho), impermeabilidade e estabilidade ao longo do tempo favorecem a criação de diversos novos nanoprodutos florestais que podem ser utilizados em numerosos setores industriais.

Dentre as principais utilizações, destacam-se: os biocompósitos para substituição óssea e reparação dental; usos farmacêuticos para a administração de medicamentos; aditivos para alimentos e cosméticos; produtos de papel e de construção melhorados; fibras fiadas e têxteis de alta resistência; aditivos para revestimentos; tintas; vernizes e adesivos; polímeros reforçados e bioplásticos; diversos materiais e compostos reforçados; componentes recicláveis estruturais e de interior para a indústria de transporte e aeroespacial; filmes iridescentes e de proteção; pigmentos e tintas; impressoras de papel eletrônico; e novos tipos de revestimentos para a fabricação de papel.

Apesar dos avanços em pesquisas na área, esta foi a única iniciativa comercial acerca desse produto mapeada pelos autores até o momento. Com relação às empresas brasileiras, apesar de não classificarem essa área como prioritária, diversas pesquisas são realizadas em parcerias com laboratórios internacionais, sobretudo pela Fibria.

Caso 3: Remoção de hemiceluloses mediante a utilização de pré-hidrólise na produção de celulose solúvel

Para o desenvolvimento dessa tecnologia, a finlandesa Andritz redesenhou o processo de cozimento na produção de celulose solúvel ao eliminar algumas instabilidades presentes em sistemas anteriores. Isso permitiu a remoção de hemiceluloses por cozimento contínuo, em vez dos processos tradicionais, por batelada.

A vantagem dessa tecnologia é que ela pode ser facilmente aplicada em instalações existentes. Entretanto, apesar do uso potencial da hemicelulose retirada, sua principal vantagem, a curto prazo, é a flexibilidade que proporciona ao processo produtivo, que pode alternar entre a fabricação de celulose solúvel e tradicional, a depender das condições de mercado.

O Brasil tem, atualmente, duas produtoras de celulose solúvel: a Jari Celulose e a Bahia Specialty Cellulose, com boas oportunidades para o

futuro. Por serem empresas de pequeno porte, os desenvolvimentos tecnológicos e os investimentos em pesquisas não deverão acontecer sem apoio externo. A implantação do CT para pesquisas e desenvolvimento em biorrefinarias seria de grande importância nesses casos.

Caso 4: Biorrefinaria da UPM-Kymmene Corporation (UPM) com uso do tall oil, na Finlândia, com capacidade de produção de 100 mil t/ano de biodiesel

Assim como a Domtar, a UPM tinha como um de seus principais mercados os papéis gráficos (a empresa ainda é a líder global do segmento), mas, nos últimos anos, investiu pesado em novos mercados, em busca de uma diversificação de negócios.

Essa biorrefinaria, localizada em Lappeenranta, Finlândia, com capacidade de produção de 100 mil t/ano de biodiesel, é a primeira aposta da companhia na produção de biocombustíveis usando a madeira.

O biodiesel da UPM ganhou o prêmio European Union's Sustainable Energy Europe Award 2014, e a empresa se associou à WWF para promover o uso do novo biodiesel sustentável.

Uma vez que o *tall oil* é um subproduto do processo *kraft* de produção de celulose com base em coníferas (como o pínus), o Brasil não tem um grande potencial de produção nesse mercado. Além disso, quanto mais velha é uma árvore, maior o volume de resina nela existente, o que, novamente, põe o Brasil em desvantagem, por conta do curto ciclo de corte das árvores.

É importante destacar que a Klabin, inicialmente, planejava produzir e vender *tall oil* por meio de seu novo *site* de produção de celulose em Ortigueira (PR). Entretanto, a empresa acabou decidindo utilizar o produto na própria planta para geração de energia.

A Irani Celulose S.A. é outra empresa que detém parcela significativa dos plantios de pínus no Brasil e comercializa as resinas da madeira na forma de terebintina e breu (extraídas antes do corte, por processo semelhante ao da extração da borracha). Por conta do pequeno porte da empresa, é difícil imaginar projetos dessa natureza enquanto a tecnologia não estiver plenamente dominada e disponível. A implantação do CT, anteriormente citado, poderia auxiliar na pesquisa e no desenvolvimento dessas tecnologias.

Caso 5: Gaseificação da madeira para substituição de combustíveis fósseis no forno de cal, realizada pela Metsa, na Finlândia

A finlandesa Metsa é uma empresa bastante diversificada, com receita anual de cerca de €5 bilhões e que atua nos setores de madeira, painéis de madeira, celulose e papel.

A planta de gaseificação, cuja tecnologia foi fornecida pela Andritz, foi iniciada em 2012 e utiliza como matéria-prima as cascas das coníferas oriundas do processo produtivo da celulose. Com essa tecnologia, a empresa conseguiu zerar as emissões de carbono da planta ao substituir 100% do gás natural que era utilizado. Em função do sucesso do empreendimento, a Metsa estuda implantar essa tecnologia em suas outras três unidades na Finlândia.

A gaseificação da madeira é uma das linhas mais promissoras em biorrefinarias de papel e celulose, com potencial de aplicação a curto prazo. Apesar de a matriz energética setorial brasileira ser bastante limpa, a utilização de combustíveis fósseis, como o gás natural, ainda existe, sobretudo no forno de cal. Com o uso dessa tecnologia, é possível atingir uma matriz energética 100% verde, principalmente nas grandes unidades produtoras de celulose.

A Fibria pretende utilizar essa tecnologia em sua nova linha de produção de celulose em Três Lagoas (MS). O objetivo é reduzir a praticamente zero a utilização de combustíveis fósseis em seu processo produtivo. Além disso, a adoção desse método é benéfica a toda a indústria nacional, uma vez que pode reduzir a praticamente zero a utilização setorial de gás natural.

O gás combustível, obtido pelo processo da gaseificação da biomassa, apesar de tornar a matriz energética setorial ambientalmente mais limpa, é de difícil estocagem e transporte. Por isso, a produção de bio-óleo apresenta vantagens logísticas, já que esse material pode ser estocado e transportado com facilidade e segurança.

Questões relativas ao mercado para bioprodutos derivados da biorrefinaria integrada às plantas de celulose

O desenvolvimento do setor de biorrefinarias, atrelado às plantas de celulose e papel, depende não somente de questões técnicas, mas também mercadológicas. O estudo Potencial de Diversificação da Indústria Química Brasileira (BAIN & COMPANY; GÁS ENERGY, 2014) abordou essa questão voltando-se, principalmente, para as condições de demanda dos

químicos renováveis. A pesquisa conclui que a química de renováveis (que inclui os bioprodutos oriundos das biorrefinarias integradas às plantas de celulose e papel) passará a ganhar importância – independentemente de regulações governamentais – apenas quando conseguir alcançar tecnologias que a ponham em pé de igualdade quanto aos custos com as rotas tradicionais, ou seja, com as rotas baseadas na cadeia petroquímica.

Produtos e volumes potenciais

Segundo Foelkel (2015), por meio de uma fábrica com produção de um milhão de toneladas/ano de celulose *kraft*, seria possível obter:

- Entre cinquenta mil e cem mil toneladas de lignina extraída, sem que sejam antecipados problemas maiores ao sistema de recuperação *kraft*.
- Entre dez mil e vinte mil toneladas de hemiceluloses extraídas de cavacos ou licores.
- Cerca de vinte mil toneladas de serragem da classificação de cavacos.
- Cerca de vinte mil toneladas de cavacos desclassificados.
- Cerca de dez mil toneladas de lodo orgânico (primário e secundário), provenientes da estação de tratamento de efluentes.
- Cerca de dez mil toneladas de metanol obtido dos gases não condensáveis concentrados.

Ao adotar-se o conceito de biorrefinaria, ainda de acordo com Foelkel (2015), seria possível transformar os materiais anteriormente descritos em diversos produtos, tais quais:

- Celulose: fibras celulósicas, nanocelulose, nanofibrilas de celulose, etanol e outros químicos, gás de síntese e derivados, fermentos, proteínas, eletricidade e vapor.
- Hemiceluloses: furfural e hidroximetilfurfural, xilose, xilitol, etanol e outros químicos, fermentos, proteínas, ácido levulínico, eletricidade e vapor, gás de síntese e derivados.
- Lignina: biocombustíveis, ligantes, espessantes, resinas fenólicas, carvão ativo, fibras de carbono, eletricidade e vapor.
- Extrativos: taninos, polifenóis, amido, ceras e graxas, suberina, eletricidade e vapor.

- Resíduos lenhosos e florestais: bio-óleo, gás de síntese e derivados, etanol, eletricidade e vapor.
- Resíduos orgânicos industriais: etanol, biogás, composto orgânico, eletricidade e vapor.
- Resíduos minerais industriais: corretivos e fertilizantes para o solo, cal, composto organomineral, entre outros.

Além dos produtos obtidos por intermédio do processo químico *kraft*, predominante no Brasil, grandes oportunidades também podem ser extraídas do processo conhecido como pré-hidrólise⁸ *kraft*, dominante nas empresas produtoras de celulose solúvel, como a Bahia Specialty Cellulose e, mais recentemente, a Jari Celulose. Esse processo torna disponível um líquido proveniente da hidrólise ácida da madeira, rico em açúcares hemicelulósicos degradados e passíveis de fermentações enzimáticas para a produção de furfural, xilose, etanol, ácido acético, xilitol etc.

Especificamente com relação à produção de celulose de fibra longa, que utiliza as coníferas como matéria-prima, é possível extrair o *tall oil*, obtido pela separação de uma nata de ácidos graxos saponificados presentes no licor negro oriundo do processamento dessa madeira.

Segundo Foelkel (2015), as principais utilizações para o *tall oil* são:

- *Tall oil* bruto: fabricação de sabões, detergentes, desincrustantes, tintas, lacas, vernizes, emulsões de cola de asfalto, óleos aglomerantes, graxas e lubrificantes, plastificantes para a fabricação de borracha sintética.
- *Tall oil* destilado: fabricação de sabões, detergentes, lacas, vernizes, tintas gráficas, esmaltes, emulsões, borracha sintética, colas, aditivos de óleos lubrificantes, entre outros.

Infelizmente não há dados públicos disponíveis que analisem os diversos mercados potenciais já abordados neste estudo. Os autores, contudo, obtiveram informações que possibilitam dimensionar razoavelmente o mercado de bioprodutos derivados da lignina.

⁸ Etapa de pré-tratamento da madeira no processo de obtenção de celulose solúvel, cujo objetivo é a remoção de hemiceluloses. O tratamento da madeira é realizado a altas temperaturas, com utilização de água ou ácido mineral (SANTOS, R., 2011).

Dimensionamento do mercado de bioprodutos derivados da lignina

Como apresentado anteriormente, o processo para a implementação da tecnologia de extração da lignina e transformação em derivados está bastante avançado e já existe, até mesmo, uma planta industrial em construção (pela Suzano) para explorar esse insumo pela ótica da biorrefinaria. Além disso, é tido como um dos mercados mais promissores para biorrefinarias integradas a plantas de celulose.

Isso se confirma pelos diversos segmentos industriais que se utilizam de intermediários e/ou produtos químicos que podem ser obtidos a partir da lignina, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 | Características e aplicações para a lignina

Grupo de aplicação	Características da lignina para a aplicação	Segmentos e usos
Aditivos	Melhorar a propriedade específica de um material	Indústria de cimento e concreto Pastilha de ração animal Indústria de polímeros Setor de pintura
Ligantes, aglutinantes e adesivos	Ter função de ligação ou “cola”, para servir como adesivo em aglomerados ou materiais compactados	Pastilha de ração animal Em substituição a resinas fenólicas Produção de painéis de fibra de madeira
Dispersantes	Evitar o acúmulo e a sedimentação de partículas não dissolvidas na suspensão	Indústria de pesticida Lamas de produção de petróleo Curtimento do couro Indústria de corantes
Emulsificante	Estabilizar emulsões de líquidos imiscíveis, como óleo e água, tornando-os resistentes à ruptura	Indústria de pesticida
Sequestrantes	Associar-se a íons de metal, impedindo-os de reagir com outros compostos, tornando-os insolúveis	Micronutrientes agrícolas Tratamento de água Agente de limpeza industrial
Energia	Ter alto poder calorífico	Geração de energia, na forma de eletricidade e vapor de processo
Adsorção	Promover a adsorção de metais	Como adsorvente natural
Produto químico	Ter caráter aromático	Na obtenção da vanilina
Outros	Apresentar propriedades antimicrobianas dos fragmentos fenólicos de lignina	Atividade antimicrobiana

Fonte: Santos, M. (2011).

No entanto, de acordo com Foelkel (2015, p. 151):

A lignina extraída não é pura, ela contém contaminações como enxofre, sódio, potássio, hemiceluloses etc. Por essa razão, quanto mais sofisticado for o uso desejado para essa lignina, melhor deve ser o processo de purificação [...]. Esse talvez seja hoje um dos principais entraves tecnológicos – purificar a lignina a um nível tal de pureza que possibilite a ela ser matéria-prima para produtos nobres e valiosos, como a fibra de carbono.

A lignina é, portanto, classificada conforme seu grau de pureza, que se reflete em seu preço de comercialização. O uso da lignina para a fabricação de químicos é limitado, por conta da presença de contaminantes, como sais, açúcares, partículas, voláteis etc. Produtos químicos de maior valor poderão ser obtidos à medida que ligninas mais puras (de melhor qualidade) estiverem disponíveis.

As ligninas com baixo grau de pureza, que contêm compostos de enxofre em sua estrutura, dominam o mercado. Todavia, mesmo contendo contaminantes, são, normalmente, comercializadas pelo dobro do valor da tonelada da celulose.⁹

O Gráfico 7 e a Figura 4 apresentam estimativas de preços dos derivados da lignina em função de sua aplicação e grau de pureza, bem como o tamanho do mercado potencial para cada produto.

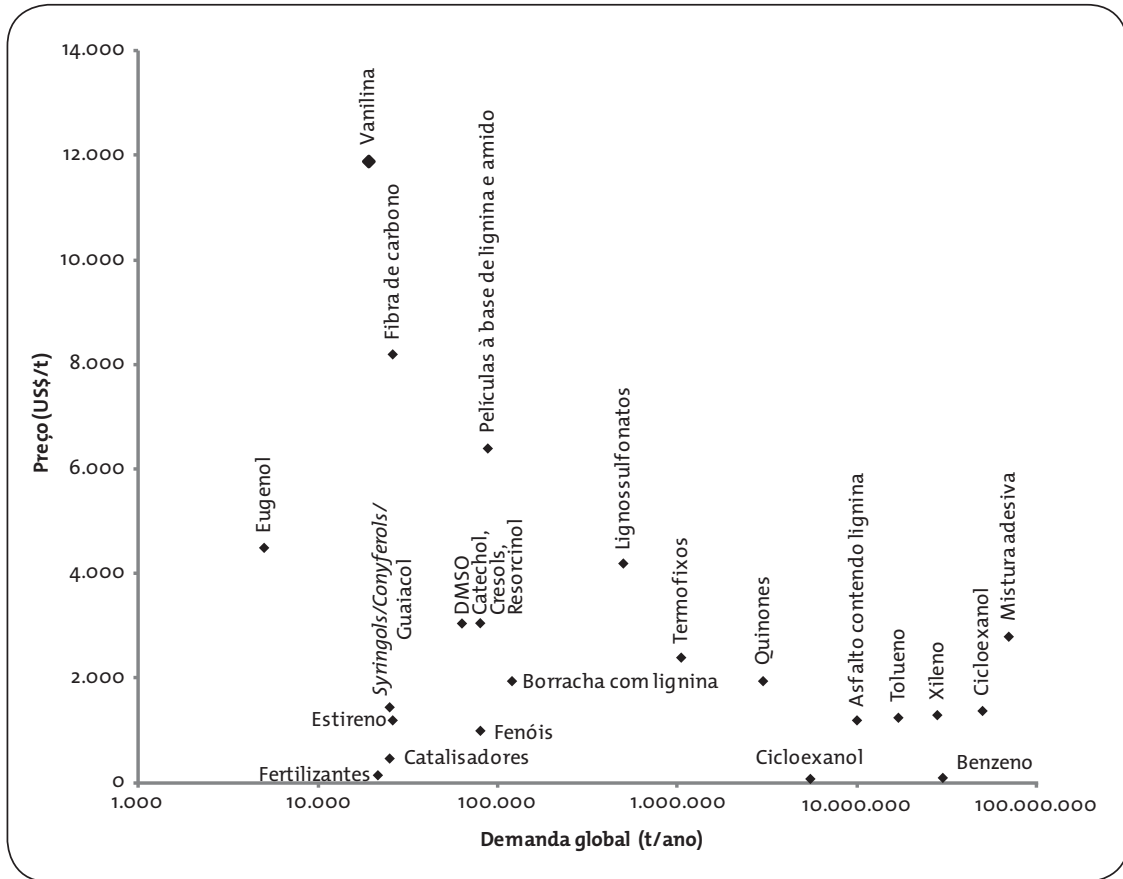
O Quadro 1 mostra o potencial de desenvolvimento para cada tipo de lignina e segmento de aplicação. Os segmentos mais promissores quanto à demanda potencial são: construção civil, automotivo, eletrônicos, fabricantes de equipamentos, mineração, ração animal e agricultura (GRAND VIEW RESEARCH, 2015; MORDOR INTELLIGENCE, 2016).

Em 2014, o mercado global de lignina teria alcançado o patamar de 1,1 milhão de toneladas comercializadas – 85% desse volume representado por ligninas de baixo grau de pureza (ZION RESEARCH, 2015; RADIANT INSIGHTS, 2015). A demanda ficou amplamente concentrada nos Estados Unidos e na Europa, que juntos consumiram mais de 70% do volume produzido (GRAND VIEW RESEARCH, 2015). Espera-se, entretanto, que regiões em desenvolvimento, como Ásia e América Latina,

⁹ Disponível em: <<http://purelignin.com/lignin>>. Acesso em: 8 dez. 2015.

contribuam significativamente para o desenvolvimento do mercado global de lignina, em função de dois fatores importantes: (i) a crescente tendência na busca pelo desenvolvimento de produtos por meio de fontes renováveis; e (ii) a existência de robusta indústria de papel e celulose nessas regiões (GRAND VIEW RESEARCH, 2015).

Gráfico 7 | Preço de mercado x demanda por produtos derivados da lignina

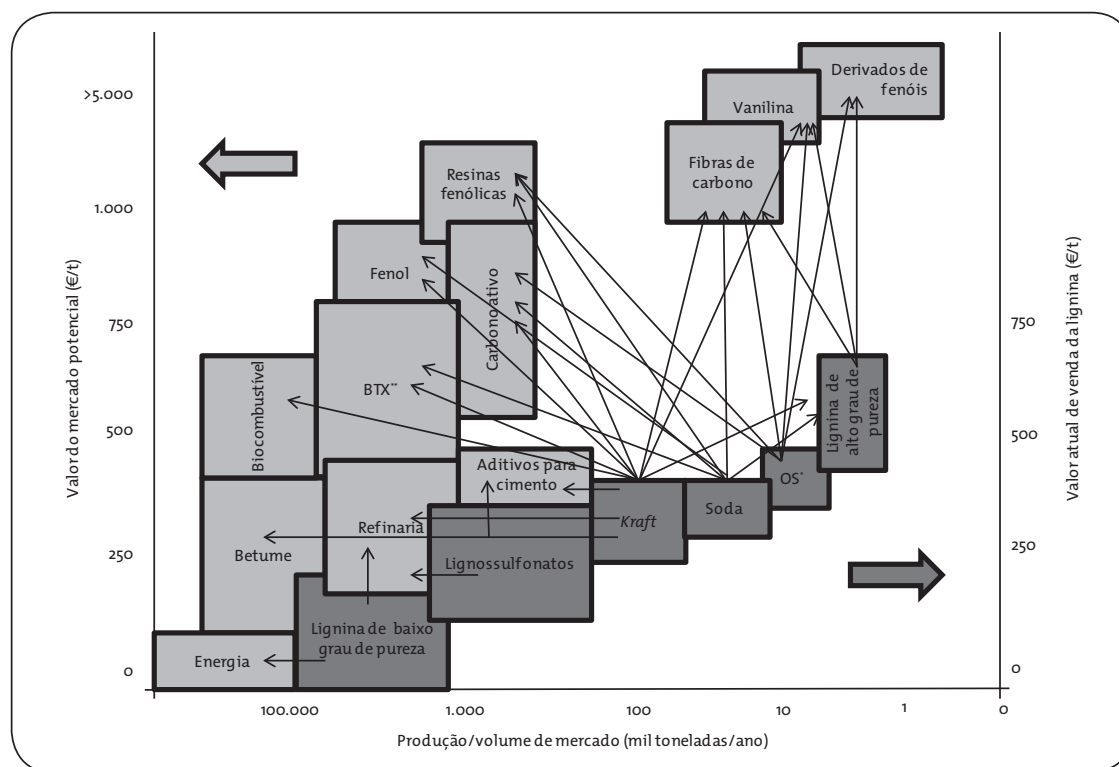


Fonte: Varanasi *et al.* (2013).

Em relação ao valor do mercado global de lignina, os números divergem consideravelmente. Segundo a consultoria de mercado Zion Research (2015), o mercado global de lignina teria atingido um valor próximo a US\$ 775 milhões em 2014, e a previsão é que alcance um patamar de US\$ 900 milhões em 2020.

Em contrapartida, Radiant Insights (2015), outra empresa especializada em pesquisa de mercado, estima que o mercado global de lignina deverá apresentar números bem mais promissores, superando os US\$ 6 bilhões até 2022.

Figura 4 | Potencial de mercado de derivados da lignina



Fonte: Gosselink (2011).

* *Organosolv*.

** Benzeno, tolueno, xileno.

Questões para reflexão

Apesar do potencial brasileiro e de toda a expectativa em torno do tema “economia verde”, em que a implantação do conceito de biorrefinaria integrada desempenha papel fundamental, há pontos importantes que necessitam ser investigados pelas partes interessadas, a fim de permitir: (i) uma adequada análise dos investimentos necessários e retornos esperados; (ii) a definição do momento mais apropriado para implementação de uma biorrefinaria; e (iii) a escolha da estratégia mais adequada, levando-se em conta os estágios tecnológico e mercadológico da indústria.

Algumas questões essenciais constam no documento técnico elaborado pelo CGEE (CGEE, 2013):

- Quais bioprodutos oferecerão margens mais atrativas e serão mais competitivos a longo prazo?
- Quais portfólios de produtos serão mais interessantes, em aspectos econômicos, considerando-se as vantagens competitivas de cada empresa?

- Quais são as melhores opções tecnológicas para a obtenção desses bioprodutos e como serão os processos produtivos e a estrutura de custos perante a maturação dessas tecnologias?
- O modelo de fábrica integrada a uma biorrefinaria seria realmente mais lucrativo do que o existente hoje, sem integração e operando somente a produção e venda de celulose e o excedente de energia?
- É possível mapear as sinergias e os conflitos potenciais que residem na adoção do conceito de biorrefinaria integrada a uma planta fabril antes de sua efetiva implantação?
- Qual a melhor maneira de implementar uma biorrefinaria integrada a uma fábrica de celulose de forma a otimizar o uso da infraestrutura existente?
- Quais são e como devem ser tratados os pontos indispensáveis à implantação do conceito de biorrefinaria no Brasil (alianças, políticas públicas, financiamento dos investimentos, legislação associada ao tema, sustentabilidade, desenvolvimento mercadológico etc.)?

Tentou-se responder a algumas dessas questões ao longo deste estudo. Porém, faz-se necessário um aprofundamento nas discussões, de modo a viabilizar efetivamente a implantação das biorrefinarias em plantas de celulose no Brasil.

Oportunidades

No Brasil, atualmente, uma nova fábrica de celulose tem capacidade de produção de cerca de 1,5 milhão de t/ano e demanda investimentos da ordem de R\$ 6 bilhões, somente para a parte industrial. O setor é intensivo em capital e tem longo prazo de maturação, o que o torna bastante conservador quando o assunto é o retorno sobre o investimento.

Contudo, apoiadas nos fatores relacionados a seguir, as empresas menos competitivas na produção de celulose têm buscado uma mudança na estratégia de atuação, focando seus esforços em projetos industriais que propiciem um uso mais completo e rentável da biomassa para a obtenção de produtos de maior valor agregado:

- i. busca pela redução na dependência do petróleo, que incentiva a utilização de novas fontes de energia, entre as quais a biomassa;

- ii. potencial de crescimento dos biocombustíveis;
- iii. oportunidades de crescimento da chamada química verde; e
- iv. redução gradativa do consumo *per capita* de alguns tipos de papel.

Em virtude de seu diferencial de competitividade, as empresas brasileiras ainda tendem a manter a atual estrutura organizacional. Porém, o fato de os projetos industriais em biorrefinarias integradas não serem relevantes no Brasil (até o presente momento) não significa, de modo algum, que o país esteja à parte dos avanços nessa área.

As pesquisas estão surgindo em bom número, embora, muitas vezes, voltadas para o setor de cana-de-açúcar. Segundo CGEE (2013), foram publicados mais de duzentos artigos científicos de pesquisadores nacionais sobre biorrefinarias lignocelulósicas.

Além disso, as grandes empresas brasileiras do setor, mais notadamente Fibria, Suzano e Klabin, investem, de forma ininterrupta, em PD&I com foco em biorrefinarias integradas ao setor de celulose e papel. Exemplos disso são: a primeira planta de extração de lignina da América Latina da Suzano; a compra de 6% das ações da empresa americana Ensyn pela Fibria, o que deve direcionar a empresa para a produção de biocombustíveis; e a construção, pela Klabin, de um grande laboratório científico voltado para pesquisas nesse nicho.

Existe, ainda, outro ponto que merece atenção. As tecnologias que forem desenvolvidas para a utilização de biomassa no âmbito das biorrefinarias, independentemente da localização geográfica, poderão ser utilizadas no Brasil em condições bastante vantajosas, dada a disponibilidade de matéria-prima de excelente qualidade e de baixo custo.

Entretanto, uma vez que o nível de urgência no Brasil não é o mesmo que no hemisfério Norte, é compreensível que as empresas sediadas no país tenham uma postura mais conservadora, mesmo porque muitas das tecnologias ainda estão em desenvolvimento, o que gera o risco de investir em uma rota que pode não ser a mais eficaz.

As oportunidades para o desenvolvimento dos bioprodutos são inúmeras, principalmente quando se considera o modelo de biorrefinarias integradas às plantas de produção de celulose. Isso porque as unidades industriais de extração das fibras são plantas químicas por definição, o que significa que a introdução de novos processos para converter a biomassa não traria grandes alterações em suas rotinas operacionais.

Conclusões

Não obstante as grandes oportunidades potenciais que se apresentam em relação ao tema biorrefinaria, há de se compreender que uma mudança inovadora – independentemente da indústria em que ocorra – traz consigo a necessidade de maturação do processo de tomada de decisão por parte dos agentes.

Entretanto, a consolidação de um mercado de bioprodutos é fundamental para o sucesso do conceito de biorrefinaria. Segundo Niklas Berglin, diretor adjunto da área de Negócios de Biorrefinaria do Innventia, há “alguns nichos de mercado que sequer existem. Em outros casos, ainda são muito pequenos perto do volume de produtos que poderemos fabricar a partir desse conceito” (REVISTA O PAPEL, 2013, p. 10). Conforme apregoa Paulo César Pavan, gerente de Desenvolvimento de Processo e Produto da Fibria, novos nichos deverão ser consolidados a partir das vantagens percebidas pelo mercado em se utilizar produtos verdes, advindos de processos fabris sustentáveis e, talvez, com preços mais reduzidos em relação aos atualmente consumidos (REVISTA O PAPEL, 2013).

Além disso, levando-se em conta o potencial de melhora do desempenho ambiental que a implantação do conceito de biorrefinaria pode oferecer à indústria de celulose, tradicionalmente comprometida com a sustentabilidade de suas operações, pode-se afirmar – respeitados os impactos sobre os negócios atuais e as estratégias corporativas de cada grupo empresarial – que o setor não desperdiçará a oportunidade de melhorar sua imagem como fomentador da economia verde (CGEE, 2013).

É plausível afirmar que o setor no Brasil não se encontra alijado das discussões que ocorrem acerca do desenvolvimento das biorrefinarias integradas às plantas de produção de papel e celulose em todo o mundo. Além dos estudos realizados pela academia, a pesquisa e o desenvolvimento estão em constante transformação nas principais empresas da indústria, inclusive em parceria com vários dos melhores institutos internacionais.

Se ainda não foi possível observar um forte movimento para implantar fisicamente essas unidades de biorrefinaria associadas, isso se deve mais à falta de maturidade tecnológica e mercadológica do que ao desinteresse setorial.

Por fim, muito embora as empresas brasileiras já tenham mapeado, de forma bastante detalhada, as possíveis utilizações para a biomassa no futuro, bem como as rotas tecnológicas com maior ou menor probabilidade de sucesso,

falta ao setor um julgamento mais claro e criterioso dos benefícios econômicos que esses investimentos em diversificação da produção podem trazer.

Ainda que se tenha conhecimento de que algumas tecnologias já sejam passíveis de implementação, os autores deste artigo não conseguiram analisar o dimensionamento dos investimentos tanto em relação à capacidade quanto a valores, tampouco os retornos esperados nos diferentes mercados em que se pretende atuar. Os números, quando existem, são muito imprecisos.

É imprescindível identificar, contudo, em quais condições pode-se competir internacionalmente nesses novos setores e investigar quais riscos estão associados a essa nova matriz produtiva. Apesar das adversidades, a inegável vocação florestal brasileira tanto natural quanto oriunda de esforços em PD&I tem potencial para pôr o país em uma posição ímpar no mercado de bioprodutos renováveis oriundos de madeira plantada. Para tanto, o maior alinhamento entre empresas, universidades e poder público pode gerar ganhos futuros relevantes para o setor.

Espera-se, portanto, que à medida que os desafios forem suplantados, os projetos comecem a ocorrer em maior número. Isso possibilitará às empresas brasileiras consolidarem sua competitividade internacionalmente no setor de base florestal.

Referências

ABRAF – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. *Anuário estatístico ABRAF 2013 – ano base 2012*. Brasília, 2013.

ALVES, F. C. Agenda tecnológica setorial – Químicos a partir de renováveis. *Panorama Tecnológico*, 2013.

BAIN & COMPANY; GÁS ENERGY. Potencial de diversificação da indústria química brasileira. *Chamada Pública de Seleção BNDES/FEP PROSPECÇÃO n. 03/2011 – Relatório 4 – Químicos com base em fontes renováveis*. Rio de Janeiro, 2014.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. *Dados do setor: Março – 2014*. São Paulo, 2014.

CGEE – CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. *Química verde no Brasil: 2010-2030*. Ed. rev. e atual. Brasília, 2010.

_____. Eficiência energética: recomendações de ações de CT&I em segmentos selecionados – celulose e papel. *Série Documentos Técnicos*, Brasília, 2013.

_____. Nota técnica: O desenvolvimento da biorrefinaria no segmento de celulose e papel. *Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada: celulose e papel*, Brasília, 2014(a).

_____. Relatório: Detalhamento técnico do projeto demonstrativo em biorrefinaria na indústria de celulose e papel. *Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada: celulose e papel*, Brasília, 2014(b).

CHERUBINI, F. *et al.* Toward a common classification approach for biorefinery systems. In: *International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 42*. Áustria, 2009.

FNR – AGENCY FOR RENEWABLE RESOURCES E. V. *Biorefinery Roadmap*. Berlim: Druckerei Schlesener, 2012.

FOELKEL, C. As biorrefinarias integradas no setor brasileiro de fabricação de celulose e papel de eucalipto. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*, 2012, rev., 2015.

GOSSELINK, R. J. A. Lignin as a renewable aromatic resource for the chemical industry. In: MINI-SYMPOSIUM ORGANISED BY UR WAGENINGEN UR LIGNIN PLATAFORM, Wageningen, Holanda, 6 Dec. 2011.

GRAN VIEW RESEARCH MARKET RESEARCH & CONSULTING. *Lignin Market Analysis By Product (Ligno-sulphonates, Kraft Lignin, Organosolv Lignin, High Purity Lignin) By Application (Macromolecules, Aromatics) And Segment Forecasts To 2022*.

Nov. 2015. Disponível em:

<<http://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lignin-market>>.

Acesso em: 10 dez. 2015.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. *Relatório Ibá 2015*.

Disponível em: <<http://iba.org/pt/9-conteudo-pt/338-outras-publicacoes>>.

Acesso em: 6 out. 2015.

KAMM, B.; GRUBER, P. R.; KAMM, M. *Biorefineries: industrial processes and products: status quo and future directions*, v. I e II.

Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2006.

- MORDOR INTELLIGENCE. *Global Lignin Products Market – Segmented By Product Type, Source, Application, And Geography – Trends And Forecasts (2015-2020)*. May 2016. Disponível em: <<http://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-lignin-products-market-industry>>. Acesso em: 14 dez. 2015.
- OGEDA, T. L.; PETRI, D. F. S. Hidrólise enzimática de biomassa. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 7, p. 1549-1558, 2010.
- PELLEGRINI, L. *Tecnologia para conversão de biomassa em energia*. Nov. 2012. Disponível em: <www.biomassabr.com/bio/resultadonoticias.asp?id=1803>. Acesso em: 30 set. 2014.
- RADIANT INSIGHTS. *Lignin Market By Product (Low-Purity, Ligno-Sulphonates, Kraft Lignin), By Application (Macromolecules, Aromatics) And Segment Forecasts To 2022*. Oct. 2015. Disponível em: <<http://www.radiantinsights.com/press-release/global-lignin-market>>. Acesso em: 14 dez. 2015.
- REVISTA O PAPEL. São Paulo: ABTCP, mar. 2011.
- _____. São Paulo: ABTCP, out. 2013.
- SANTOS, M. F. R. F. *Elaboração do technology roadmap para biorrefinaria de produtos da lignina no Brasil*. 2011, xxxi, 307 f.: il. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- SANTOS, R. *Produção de polpa solúvel a partir de Eucalyptus urograndis*. Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial Madeireira – Campus Experimental de Itapeva, UNESP, 2011.
- VARANASI, P. *et al.* Survey of renewable chemicals produced from lignocellulosic biomass during ionic liquid pretreatment. *Biotechnology for Biofuels* 2013, 6:14. Disponível em: <www.biotechnologyforbiofuels.com/content/pdf/1754-6834-6-14.pdf>. Acesso em: 22 out. 2015.
- VIDAL, A. C. F.; DA HORA, A. B. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. *BNDES Setorial*, v. 33, Rio de Janeiro, 2011, p. 261-314.

ZION RESEARCH. *Lignin Market (Lignosulfonates, Kraft Lignin and Others) for Concrete Additive, Animal Feed, Dye Stuff, and Other Applications: Global Industry Perspective, Comprehensive Analysis and Forecast 2014 – 2020*. Oct. 2015. Disponível em:

<<http://globenewswire.com/news-release/2015/11/20/789059/0/en/Global-Lignin-Market-is-Expected-to-Reach-US-900-Million-by-2020-Growing-at-2-5-CAGR.html>>. Acesso em: 24 nov. 2015.

Sites consultados

INNVENTIA – <<http://www.innventia.com/en/About-us/>>.

MDIC – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR – <<http://www.desenvolvimento.gov.br/>>.

PURE LIGNIN ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY – <<http://purelignin.com/lignin>>.

REUTERS – <<http://www.reuters.com/article/idUSnMKW7by5va+1c0+MKW20150624>>.

RISI – <<http://www.risiinfo.com/>>.