

XIII

UMA VISÃO DO FUTURO DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE CELULOSE

Adriano Pinto Mariano¹

Introdução

Embora atualmente biorrefinaria seja uma oportunidade adicional para a crescente indústria de celulose de eucalipto, fazer parte da equipe de biorrefinaria de uma grande empresa brasileira de celulose foi uma experiência desafiadora na qual diariamente estive envolvido em uma série de atividades de análise técnico-econômica e planejamento estratégico que, em última instância, iriam dar subsídios às tomadas de decisões da empresa sobre questões críticas. Algumas destas fundamentais tais como “devemos transformar nossa empresa em uma biorrefinaria?” e outras mais avançadas no processo decisório, tais como “devemos ser um investidor de capital nessa tecnologia ou licenciá-la?” Além disso, uma vez que empresas de celulose são agora constantemente abordadas por empresas desenvolvedoras de tecnologia de biorrefinaria - que oferecem uma gama de soluções para a produção de açúcares lignocelulósicos a custo competitivo, bem como para a produção de produtos químicos, materiais e combustíveis - a equipe de biorrefinaria estava permanentemente interagindo com essas empresas e analisando criticamente seus relatórios técnico-econômicos.

Aos dois meses nessa atribuição, fui designado para um projeto bastante intrigante e, ao mesmo tempo, uma boa oportunidade para apresentar à equipe os meus pontos de vista sobre biorrefinaria, pautados a partir da minha experiência em projetos de biorrefinaria e desenvolvimento de tecnologia. Com

1. Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado (LOPCA). Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) adrianomariano@feq.unicamp.br
Originalmente publicado em Mariano, A.P. “How Brazilian pulp mills will look like in the future?” O PAPEL vol.76, num.6, pp. 55-61, JUN 2015.

um escopo geral, o projeto consistia na definição de diretrizes a serem entregues aos dirigentes da empresa sobre futuros investimentos e fornecer uma resposta à seguinte pergunta desafiadora: “como nossas fábricas de celulose se parecerão no futuro?” Um ponto de partida para abordar esta questão, certamente, é reconhecer que fábricas modernas de celulose Kraft de eucalipto no Brasil, com linhas de fibra que ultrapassam a capacidade de produção de 1,5 milhão de toneladas (secas ao ar – tsa) de celulose branqueada por ano, já estão funcionando com tecnologias de última geração; e que em combinação com excelência operacional nas atividades florestais, de manufatura e logística, têm melhorado continuamente a eficiência energética e ambiental dessas fábricas e mantido o custo caixa em níveis bastante competitivos (Martin, 2013a e b; Figueiredo, 2014).

No entanto, embora ainda haja oportunidades de melhoria tecnológica no processo Kraft nos anos vindouros (principalmente incrementais, dada a natureza de capital intensivo desta indústria e a sua maturidade avançada), o autor deste trabalho decidiu dar ao projeto uma abordagem estratégica com vistas às potenciais transformações disruptivas (incluindo os produtos de biorrefinaria) e, notavelmente, aos efeitos que aspectos relacionados com energia deverão ter na tomada de decisão em relação a essas transformações.

Nas próximas seções deste capítulo são apresentadas quatro orientações estratégicas destinadas a dar uma resposta coerente, embora não definitiva, à questão sobre como fábricas de celulose serão futuramente no Brasil. Com uma abordagem multidisciplinar (negócios e tecnológica), importantes decisões são discutidas, principalmente levando em conta aspectos relacionados com energia e a valorização de subprodutos e resíduos.

Quatro diretrizes estratégicas para futuros investimentos em fábricas de celulose Kraft, sejam estes em projetos novos (*greenfield*) ou de reequipamento (*retrofit*), foram concebidos com base em considerações abertas envolvendo (i) as principais tendências na indústria de celulose, (ii) aspectos pertinentes relacionados com a diversificação de produtos, e (iii) a competição cogeração *versus* novos produtos. A principal linha de raciocínio das diretrizes é a suposição de que uma sequência de decisões estratégicas levará a diferentes tipos de fábricas no futuro, em contraste com o modelo padrão atual de fábricas Kraft produzindo celulose de mercado e energia elétrica. Atenção especial foi dada no intento de introduzir aspectos energéticos no contexto das decisões. Deve-se notar que a abordagem metodológica e a resposta à pergunta sobre como as fábricas brasileiras de celulose se parecerão no futuro têm um caráter genérico e expressam apenas as visões e opiniões do autor.

Identificação das principais tendências na indústria brasileira de celulose

Foram identificadas quatro tendências seguidas pelas empresas de celulose brasileiras com o fim de promover o crescimento sustentável da corporação e a expansão dos negócios, a saber: (a) aumento permanente da produtividade e sustentabilidade da floresta de eucalipto, (b) contínuo incremento da eficiência energética, (c) ampliação do *portfolio* de produtos a partir de tecnologias ainda em desenvolvimento, e (d) criação de valor a partir de subprodutos e resíduos. No caso das principais empresas do setor, essas tendências são geralmente apoiadas por atividades *in-company* de pesquisa e desenvolvimento e inovação (P&DI) em melhoramento clássico, engenharia genética, práticas avançadas de silvicultura e desenvolvimento de produtos e processos (Figueiredo, 2014). Vale a pena ressaltar que fusões e aquisições (M&A) também são uma forte tendência na indústria, e que as quatro tendências identificadas ainda são válidas no caso de atividades de M&A.

Empresas brasileiras de celulose têm um longo e constante histórico no desenvolvimento de florestas de eucalipto cada vez mais produtivas e na melhoria da qualidade da madeira para produção de celulose. Além de reduzir custos de produção, espera-se que os ganhos contínuos de produtividade também atenuem a pressão sobre os preços da madeira resultantes da competição por esta matéria-prima em outros usos na medida em que o setor expande seu *portfolio* de produtos para mercados nascentes, incluindo novos materiais de fibra, lignina, açúcares lignocelulósicos, produtos químicos e biocombustíveis avançados. Por outro lado, as novas unidades fabris e as florestas cada vez mais têm avançado para as regiões centro e norte do Brasil (por exemplo, Mato Grosso do Sul e Maranhão) atraídas por preços de terra muito competitivos e incentivos governamentais regionais. Por exemplo, no Mato Grosso do Sul, a área de floresta de eucalipto subiu 475% (de 120.000 para 690.000 ha) entre 2006 e 2013 como resultado da instalação de duas fábricas de celulose Kraft (Celulose Online 2014). Embora o custo de transporte da celulose de mercado a partir destas novas e distantes fronteiras de investimento para os portos marítimos seja compensado pelos baixos preços da terra, caso esta tendência de movimento persistir, as empresas terão de incluir novas e específicas restrições logísticas durante a concepção de novos *portfolios* de produtos. Como tal, é necessário ter em conta que diferentes categorias de bio-produtos (energia, combustíveis, produtos químicos de commodities, química fina, e materiais) estão sujeitas a diferentes estratégias competitivas na cadeia logística, que envolvem aquisição, produção, distribuição e vendas (Dansereau *et al.*, 2014).

Eficiência energética tem sido o principal propulsor de inovação tecnológica na última década (Martin, 2013a,b) e a decisão sobre como usar a energia excedente e biomassa terá grande impacto na concepção das futuras fábricas de celu-

lose. No momento atual, em resposta ao crescente aumento dos preços de energia nos últimos anos, o investimento em cogeração de energia tem sido a escolha preferida (ou exclusiva), e a venda de energia à rede tornou-se uma importante fonte de receita para as fábricas não-integradas de celulose Kraft. Além disso, em virtude de secas severas e recorrentes (que impactam a geração de energia hidrelétrica) e da escassez de gás natural, o preço de energia nos leilões sofreu uma disparada significativa, aumentando a atratividade da cogeração (Carranca, 2014). Na presente situação de alta do mercado brasileiro de energia elétrica, é razoável supor que a maior parte dos projetos de valorização de subprodutos e resíduos está direcionada a utilização destes para a cogeração de energia elétrica.

Os diferentes aspectos relacionados com as quatro grandes tendências apresentadas nesta seção servem como base para o desenvolvimento e a discussão das diretrizes estratégicas apresentadas em seguida. Como mencionado acima, ao invés de apresentar uma resposta fechada para a pergunta sobre como as fábricas de celulose serão no futuro, as diretrizes são construídas a partir de decisões estratégicas que estão agora na mesa dos tomadores de decisão e acabarão por levar a diferentes tipos de fábricas no futuro.

Diretrizes estratégicas

(1) *Portfolio* de produtos

Empresas brasileiras de celulose de mercado de eucalipto estão buscando transformar-se em empresas florestais (ou até mesmo empresas de biomassa em referência a outras matérias-primas) como um sinal claro dos seus planos de expandir seus negócios para mercados novos e diversificados. Como tal, a definição do *portfolio* de produtos numa instalação nova (incluindo aqui o reequipamento de uma fábrica) deve ser considerada como a principal decisão estratégica, a qual finalmente irá balizar o projeto da unidade fabril. Dessa maneira, são esperados diferentes modelos de fábricas. Dada a crescente participação de fibras curtas em mercados de papel *tissue* e de embalagens, é esperado que uma fração importante das futuras instalações permaneça com o modelo consolidado de fábrica com baixo risco de tecnologia, ou seja, uma fábrica de celulose Kraft não-integrada tendo como objetivo mercados dos EUA, Europa e China. Por outro lado, seguindo uma tendência mundial, as empresas brasileiras também estão acompanhando a crescente demanda de celulose solúvel pela indústria têxtil chinesa. De fato, o grupo Jari anunciou a conversão de uma fábrica de celulose para a produção de celulose solúvel com uma capacidade anual de 250.000 toneladas

(RISI, 2014). Um projeto integrado que permite uma produção flexível entre polpas para papel e polpas para celulose solúvel, na mesma fábrica, certamente irá atenuar os riscos de mercado de ambos os produtos. Particularmente no caso da polpa solúvel, as tarifas *anti-dumping* aplicadas pela China, a evolução da indústria do algodão, e a falta de integração vertical com os produtores de têxteis são os principais riscos para futuros produtores brasileiros (Vidal, 2014).

O projeto das futuras instalações também considerará novas matérias-primas e novos produtos de biorrefinaria (lignina, produtos químicos, biocombustíveis avançados, e novos materiais de fibras, tais como nanocelulose). Estas unidades fabris poderão ser biorrefinarias *greenfield* independentes (próximas às fontes de matéria-prima que podem ser diferentes das florestas de eucalipto, por exemplo, a “cana-energia”), ou muito provavelmente instalações anexas às fábricas Kraft. Enquanto o primeiro caso expande os negócios da empresa com relação à matéria-prima, o segundo caso pode se beneficiar das oportunidades de integração em diferentes níveis com a fábrica (energia, massa, fornecimento de matéria-prima, e compartilhamento de equipamentos), as quais são vantagens competitivas a serem exploradas.

Como ilustrado na Figura 1, a decisão “manter o negócio como tal” *versus* “novos negócios” será afetada por vários aspectos, incluindo a forma como as empresas irão evoluir com relação ao tradicional pensamento de commodities (competição por volume e não por diferenciação) e a característica forte aversão ao risco. Além disso, a diversificação das receitas além da cogeração implica na transformação da corporação e adaptação a novos modelos de negócios. Não menos importante, fatores externos também vão desempenhar um papel significativo na tomada de decisões. Estes incluem a taxa de progressão das curvas de aprendizagem das novas tecnologias e a redução de custos (incluindo custos de capital) associada à aprendizagem, a evolução dos novos mercados, e incentivos governamentais.

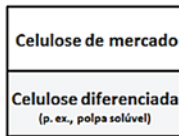


Figura 1. *Portfolio* de produtos: a principal diretriz estratégica para definição de futuros investimentos

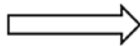
(2) Cogeração *versus* biorrefinaria

Enquanto que alta eficiência energética é um objetivo comum dos potenciais modelos de diferentes fábricas do futuro, os motivos para a geração de energia excedente são diferentes. As empresas que ao final decidirem por investir no modelo “negócio como tal” procurarão basicamente aumentar a penetração no mercado de eletricidade a fim de reduzir o custo caixa da polpa, e por fim eliminar o uso de combustíveis fósseis (com atenuação das emissões de gases do efeito estufa, GEE), como representado na Figura 2. De fato, como a maioria das fábricas de celulose no Brasil não são integradas (sem produção de papel, e estrategicamente não limitadas pelo decrescente mercado de papel de impressão e escrita), a grande parte dessas fábricas já tem excedente de energia. Notavelmente, investimentos recentes em novas fábricas de celulose, que apresentam processos com alta eficiência energética e unidades integradas de forma mais eficiente, tem gerado receitas significativas a partir da energia excedente. Por exemplo, em 2013 a unidade Três Lagoas da Fibria, que iniciou operação em 2009, atingiu um excedente de energia de 35%. Em combinação com outra fábrica, mais antiga e com um saldo excedente de 9%, a empresa teve uma receita de R\$ 67,3 milhões (USD 25 milhões) a partir da venda de energia à rede (30 MW), o que corresponde a um crédito de cerca de 6 USD/tsa (Fibria, 2013).

Modelo de fábrica: “manter o negócio como tal”



Impulsionadores

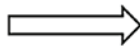


- Aumento da venda de energia elétrica para a rede
- Redução do custo caixa
- Autossuficiência energética incluindo substituição de combustíveis fósseis (redução de emissões de GEE)

Modelo de fábrica: “novos negócios”



Impulsionadores



- Aumento da biomassa excedente para a biorrefinaria
- Mais vapor disponível para a biorrefinaria (disponibilidade de vapor é uma restrição de projeto importante)
- Redução do custo caixa e de emissões de GEE

Figura 2. Impulsionadores do aumento da eficiência energética segundo o modelo de fábrica e o *portfolio* de produtos correspondentes

Considerando que a instalação de turbinas de condensação de baixa pressão possibilita o uso do excesso de biomassa (resíduos florestais e do pátio da madeira) e da lignina para a produção de um saldo positivo de eletricidade através da expansão e condensação do vapor excedente, os fluxos de matéria e energia excedentes podem, por outro lado, alimentar um processo de biorrefinaria integrado, ou em paralelo, ao processo Kraft. No caso da biorrefinaria, o aumento da eficiência energética é impulsionado pela necessidade de minimizar o investimento em caldeiras de energia complementares, bem como para evitar a compra de combustíveis fósseis relativamente caros (no Brasil, o preço do gás natural atual é de cerca de 10 USD/MMBTU). Por exemplo, estudos demonstraram que a produção de borracha de etileno-propileno (27 mil toneladas/ano) a partir da gaseificação do excesso de licor preto de uma instalação padrão de fibra longa Kraft branqueada iria demandar que as caldeiras de força operassem a plena capacidade (com compra adicional de biomassa e gás natural) e também a importação de 4,3 MWe da rede (em contraste com os 6,8 MWe originais vendidos à rede). No entanto, tal projeto apresentou atratividade econômica promissora, com investimento de capital de USD 237 milhões, e atraente 26% de TIR (Taxa Interna de Retorno) e 3,3 anos de tempo de retorno do investimento (*payback*) (Mariano *et al.* 2013).

A competição “cogeração *versus* biorrefinaria” não é exclusiva do setor florestal. Na verdade, é uma escolha frequentemente encontrada em projetos de biorrefinarias e permeia outras indústrias, incluindo as de cana-de-açúcar e milho (Dias *et al.*, 2011; Davis *et al.* 2013). A título de ilustração, em uma biorrefinaria para o processamento de palha de milho em hidrocarbonetos, estudos técnico-econômicos recomendaram a conversão da lignina em químicos commodities com valor agregado, tais como o ácido adípico. Apesar de resultar na importação de eletricidade, os créditos do produto derivado de lignina podem, potencialmente, baixar o preço de venda dos bio-hidrocarbonetos de 5,10 USD/GGE (por *Gallon of Gasoline Equivalent*) para 3 USD/GGE, correspondente ao preço alvo estabelecido para 2022 (Davis *et al.* 2013). Interessante, e igualmente válido para a indústria florestal, este mesmo estudo demonstrou que, dependendo da quantidade de lignina desviada para gerar produtos químicos, a conversão de lignina pode oferecer melhores retornos com relação às emissões dos GEE do que a combustão da lignina. No que diz respeito às métricas de sustentabilidade, vale a pena observar que a rede de eletricidade nos EUA é intensiva em carbono e, portanto, cogeração de eletricidade é responsável por um abatimento expressivo de emissões de GEE de 0,78 kgCO₂-eq/kWh (Davis *et al.*, 2013). Por outro lado, a rede elétrica brasileira é baseada principalmente na geração de energia hidrelétrica renovável (~70%)

e o fator de emissão é baixo, correspondendo a 0,096 kgCO₂-eq/kWh (MCT, 2011). Consequentemente, no Brasil, menores reduções de emissões (e potenciais créditos de carbono) seriam alcançadas com a cogeração em comparação aos EUA, aumentando o desempenho ambiental da opção de biorrefinaria (sobre cogeração) no contexto brasileiro.

Evidentemente, a competição “cogeração *versus* biorrefinaria” deve ser cuidadosamente avaliada além de um contexto estritamente ambiental e econômico. É aconselhável que as empresas empreguem metodologias sistemáticas de projeto para auxiliar a tomada de decisão, levando em consideração as incertezas das condições do mercado de energia, a evolução dos custos das novas tecnologias de biorrefinaria, e os riscos de mercado relacionados com os produtos de biorrefinaria (Svensson & Berntsson, 2011; Cohen *et al.*, 2010; Mohammadi, 2014). Além disso, dada a situação de impasse econômico enfrentada por empresas europeias e norte-americanas de celulose, é possível que essas empresas sejam as primeiras a se transformarem em empresas de biorrefinaria (*first movers*). Se a indústria brasileira de celulose decidir manter a estratégia de seguidor rápido (*fast followers*), e só investir em biorrefinaria no momento em que a penetração de fibras curtas no mercado de celulose de fibras longas estagnar, é esperado que essas empresas enfrentem fortes barreiras no acesso a mercados de baixo volume e com altas margens de lucros (de modo geral, outros além dos biocombustíveis), os quais já estarão devidamente protegidos. O ponto mais importante, a definição do momento mais oportuno e a capacidade de uma empresa transformar a sua estratégia de competição (não mais baseada em custos, que é característica do mercado de celulose) serão os fatores críticos de sucesso quando a escolha for pela biorrefinaria.

(3) Estratégia de biorrefinaria e energia

De um ponto de vista bastante pragmático, para uma empresa de celulose, biorrefinaria é uma opção de investimento na qual o excesso de energia (vapor, eletricidade e energia contida na biomassa) é depositado e se deseja um retorno econômico superior em relação ao negócio da atividade principal (celulose). Obviamente, as empresas estão buscando a maximização do valor econômico de suas florestas de eucalipto. No entanto, elas terão de enfrentar uma definição menos agradável de biorrefinaria, que envolve a criação de novos modelos de negócios, a diversificação de receitas e produtos e a penetração em novos mercados, e mais importante, a transformação da empresa (Janssen & Stuart, 2010). Além disso, a sustentabilidade no longo prazo do

novo negócio depende muito da solução de um quebra-cabeça intrincado com peças espalhadas em diferentes domínios: *portfolio* de produtos, tecnologia e matéria-prima (Figura 3). Nesta tarefa, a identificação e mitigação de riscos financeiros, tecnológicos e de negócio são cruciais. Além disso, a forte tendência tecnológica da atividade principal referente ao desenvolvimento de florestas com árvores de eucalipto geneticamente modificado pode estar em conflito com alguns mercados de biorrefinaria. Por exemplo, Corbion Purac afirma que a empresa “exclusivamente utiliza matérias-primas isentas de organismos geneticamente modificados para a produção de monômeros de PLA (ácidos polilácticos)”.

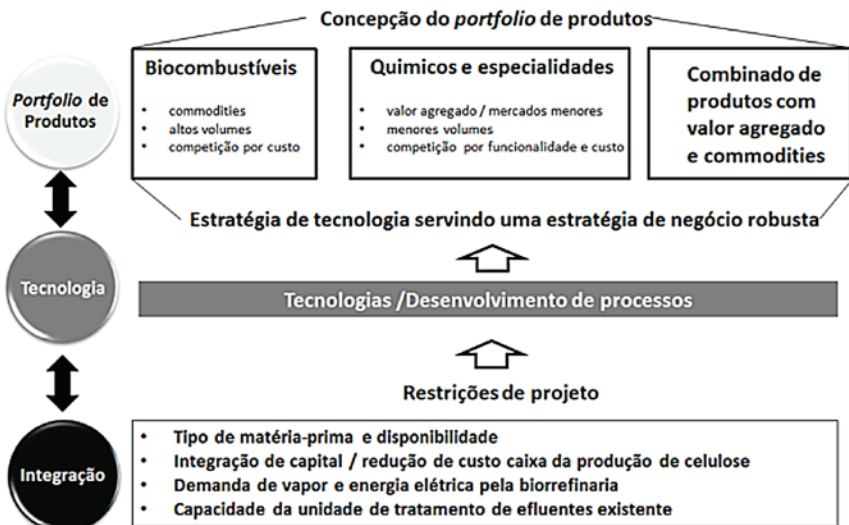


Figura 3. Peças do quebra-cabeça do projeto de uma biorrefinaria. Inspirado pelos conceitos apresentados em Batsy *et al.*(2013)

Focando na peça do quebra-cabeça correspondente à tecnologia, tecnologias de biorrefinaria têm diferentes eficiências energéticas (GJ/ton-produtos), e por esta razão, uma importante restrição de projeto, assumindo o modelo integrado, é a compatibilidade da quantidade e tipo de energia (vapor/energia elétrica) requerida pela tecnologia com aquela disponível na fábrica de celulose, cujo perfil de energia é geralmente específico para cada unidade. No entanto, a integração energética entre o processo de bior-

refinaria e a fábrica de celulose pode, potencialmente, melhorar a economia e eficiência energética global da unidade (Svensson & Berntsson, 2011; Rohani, 2014). Geralmente, há um impasse entre CAPEX e a redução de OPEX devido ao aumento da eficiência energética. Além disso, muitas vezes o aumento da eficiência energética e a melhoria do desempenho ambiental são oferecidos por tecnologias avançadas ainda em desenvolvimento, aumentando assim o risco tecnológico. Como ilustração, a produção de bio-butanol através duma fermentação em batelada e a recuperação do produto por destilação - ambas as tecnologias comercialmente comprovadas - demanda um consumo de vapor de aproximadamente 30 GJ/tonelada-butanol e uma geração de vinhaça de 80 litros/litro-butanol. Por outro lado, as tecnologias avançadas ainda em desenvolvimento, com biorreatores integrados a sistemas alternativos de recuperação de produtos (por exemplo, membranas) podem trazer significativas vantagens energéticas e ambientais, com as respectivas pegadas reduzidas para aproximadamente 10 GJ/ton-butanol e 20 litros/litros-butanol (Mariano & Maciel Filho, 2012). Essa classe de tecnologia avançada coloca a produção de butanol num nível de eficiência energética similar ao duma usina de etanol, e com isso pode permitir uma escala mais competitiva de produção. Certamente, esta é uma informação importante para uma empresa que almeja o mercado de biocombustíveis e tem que decidir entre um biocombustível tradicional (com mercados cada vez mais saturados) e biocombustíveis avançados (mais compatíveis com a infraestrutura existente e com mercados em crescimento).

Associando tecnologia com robustez de negócio, é importante lembrar que processos de separação no final do processo (*downstream*) são muitas vezes o gargalo em bioprocessos industriais e oferecem um grande potencial de economia de energia (Rohani, 2014; Kraemer *et al.* 2011). Num relatório para o Departamento de Energia dos Estados Unidos, Eldridge *et al.* (2005) descrevem processos híbrido/intensificados de separação como uma tecnologia-chave no esforço para reduzir a demanda de energia em bioprocessos. No entanto, a partir de uma perspectiva de sistemas, a escolha por uma tecnologia intensificada avançada para separação/purificação não deve (ou pelo menos minimamente) comprometer a flexibilidade do processo, que é um fator fundamental para uma implantação bem-sucedida de biorrefinaria em face às volatilidades de mercado, e, ao mesmo tempo, é importante para atender às demandas de mercado (Mansoornejad *et al.* 2010). Assim, para diferentes estratégias de biorrefinaria, é importante explorar os conflitos entre

a flexibilidade do processo e a intensificação do processo de separação, considerando-se a eficiência energética global, e os efeitos sobre os custos.

No que diz respeito aos negócios, tomando como exemplo a biorrefinaria da plataforma dos açúcares, fábricas de celulose podem estabelecer diferentes modelos de negócios e estes certamente estão ligados a diferentes demandas de energia. Na plataforma dos açúcares, a biomassa geralmente passa através de um tratamento físico-químico e enzimático, a fim de quebrar a estrutura lignocelulósica e produzir açúcares monoméricos. Estes são biologicamente convertidos em produtos químicos e combustíveis em tanques de fermentação, seguidos pela separação e purificação do produto. Nesta cadeia de valor, uma empresa de celulose pode decidir ser um produtor de açúcares lignocelulósicos e fornecer esse produto a clientes externos, que podem converter os açúcares em produtos químicos (por exemplo, ácido láctico) e combustíveis. Neste modelo de negócio, receitas são geradas a partir da venda de açúcares e o novo processo é suprido com vapor e energia elétrica gerados na fábrica de celulose (Figura 4). No caso de clientes que se instalem na área da fábrica, ou vizinhos a esta, a fábrica também pode gerar receitas adicionais com a venda de vapor e energia.

Por outro lado, no caso de uma empresa de celulose decidir por avançar na cadeia de valor, e assim investir em uma planta de combustíveis/produtos químicos a ser instalada na área da fábrica, a empresa pode decidir por tecnologias não patenteadas de prateleira, tais como fermentadores de batelada para a produção de solventes (n-butanol e acetona) usando microrganismos convencionais. Em vez disso, a empresa pode decidir por licenciar o uso de biorreatores avançados com recuperação de produto integrada e microrganismos geneticamente modificados, visando à melhoria de desempenho do processo (produtividade, rendimento e eficiência energética). Em suma, enquanto que os modelos de negócios e as opções tecnológicas são associados com diferentes retornos econômicos e riscos, uma questão crítica a ser abordada já na fase inicial do projeto é se as demandas de energia das estratégias preferenciais (ou mais promissoras) de biorrefinaria podem ser atendidas pela capacidade de geração de energia da fábrica que a abriga. Se não, o respectivo dispêndio de capital tem que ser adicionado ao fluxo de caixa do projeto, geralmente apresentado pelo fornecedor de tecnologia em um primeiro momento, e uma TIR “ajustada” deve ser considerada durante as fases iniciais do processo de tomada de decisão, como corroborado por Cohen *et al.* (2010).

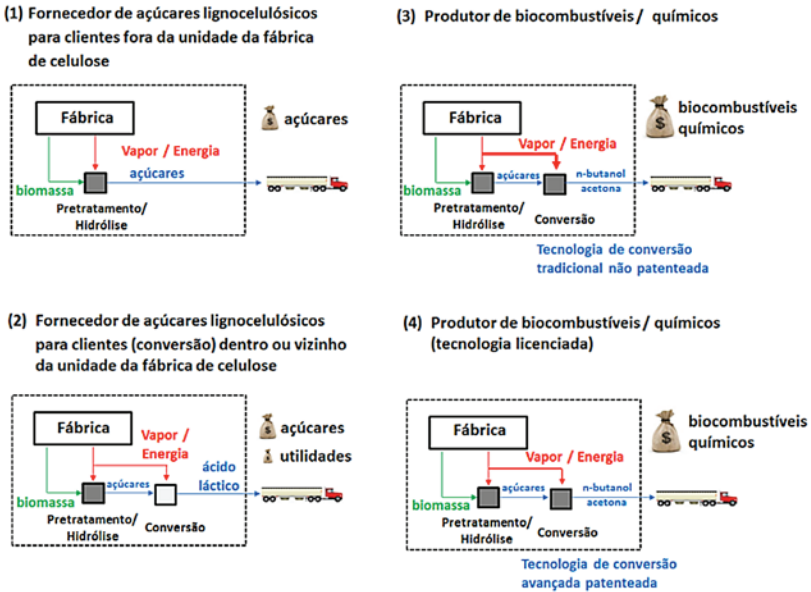


Figura 4. Modelos de negócios associados a tecnologias de biorrefinaria da plataforma dos açúcares e respectivas demandas de energia da fábrica de celulose. Produtos derivados de açúcares lignocelulósicos foram escolhidos por razões ilustrativas

(4) Valorização de subprodutos e resíduos: energia versus novos produtos

Resíduos e subprodutos são gerados tanto em operações florestais quanto em industriais. No primeiro caso, a casca de eucalipto merece uma atenção especial, não só por causa de seu uso atual para geração de energia (somente nos casos em que o descascamento do eucalipto é feito na fábrica, caso contrário, a casca é deixada no campo para fins agrônômicos), mas também como uma fonte de açúcares para serem convertidos em produtos químicos e combustíveis. No Brasil, os resíduos florestais correspondem a aproximadamente 30% da produção total da floresta de eucalipto, e a casca por 10-12% desses resíduos, ou 3 a 6 milhões de toneladas por ano no total (Bragatto, 2010; Lima *et al.*, 2013). Curiosamente, 20% w/w da casca corresponde a açúcares hexoses solúveis (glicose, frutose e sacarose) prontamente disponíveis. Estes podem ser recuperados através duma extração com água quente a 80 °C em uma única etapa, podendo gerar, por exemplo, cerca de 100 litros de etanol por tonelada seca de casca (Bragatto, 2010). O restante da casca, a matriz lignocelulósica, pode ser tratada para produzir açúcares lignocelulósicos, ou alimentar uma caldeira de força. Mesmo

admitindo que, pelo menos, 50% da casca produzida devam ser deixados no campo devido a restrições agrônômicas, certamente a casca de eucalipto é uma fonte complementar de açúcares promissora para uma biorrefinaria.

Nas operações industriais, a indústria de celulose já domina o uso de licor preto para fins de geração de energia. No futuro (próximo), tecnologias de gaseificação darão aos produtores de celulose a opção de conversão da corrente de licor preto em gás de síntese e a conversão deste em produtos químicos, combustíveis e energia. Além disso, a separação de uma porção da lignina do licor preto já é realizada em plantas pioneiras em escala comercial almejando mercados além da cogeração (por exemplo, a unidade Plymouth da Domtar na Carolina do Norte, e a unidade Sunila da Stora Enso na Finlândia). Outra importante fonte de carbonos de subprodutos são os efluentes líquidos do processo Kraft e de algumas tecnologias de biorrefinarias, especialmente da plataforma dos açúcares. A digestão anaeróbia de efluentes com elevada carga orgânica gera quantidades significativas de biogás, que pode ser queimado em sistemas de cogeração. Por exemplo, o reator anaeróbio da fábrica de celulose da Millar Western no Canadá vem produzindo cerca de 30.000 metros cúbicos por dia de metano para a geração de até 6 MW de eletricidade verde (REW, 2013). Por outro lado, outras utilizações de biogás incluem a sua purificação para gás natural com especificação compatível com gasodutos, ou a conversão catalítica do biogás para metanol. Uma fonte ainda inexplorada de carbono é o CO₂ no gás de combustão das fábricas Kraft existentes e dos processos futuros de biorrefinaria, incluindo CO₂ biogênico, tais como o produzido nos processos de fermentação. Como no processo desenvolvido por Kouhia (2013), tecnologias baseadas em microalgas certamente desempenharão um papel importante a fim de monetizar o CO₂ gerado em futuras fábricas de celulose.

Os tipos e possíveis usos de resíduos e subprodutos apresentados acima não cobrem todas as possibilidades e servem apenas para ilustrar a tomada de decisão “energia *versus* novos produtos” associada com a monetização de correntes secundárias de processo. Em geral, a opção de cogeração é a que apresenta menor risco de mercado por diferentes razões, tais como (i) empresas de celulose sabem atuar no mercado de eletricidade; (ii) contratos de fornecimento de longo prazo com o governo (estadual e federal) atenuam a volatilidade dos preços; e (iii) legislação e incentivos governamentais estão apoiando o crescimento da cogeração no mercado de eletricidade. De fato, as secas recorrentes foram reduzindo a capacidade hidrelétrica brasileira em face de uma demanda crescente. Além disso, juntamente com o baixo risco tecnológico associado com a maioria dos projetos de cogeração, créditos de energia podem reduzir no curto prazo o custo caixa da produção de celulose.

Por outro lado, a opção por “novos produtos” é um novo negócio para a empresa e, a fim de gerar receitas significativas, não deve visar correntes secundárias de processo com baixo volume (por exemplo, rejeitos das peneiras na polpação, e resíduos gerados no tratamento das águas residuais) que também limitariam as economias de escala do projeto. Enquanto que os novos produtos são geralmente associados a melhores retornos sobre o investimento, esta opção incorre em aumento dos riscos tecnológicos e de mercado, e, geralmente, os efeitos sobre os custos de produção da celulose são observados em médio prazo. Neste contexto, lignina Kraft é um candidato bastante promissor para o futuro próximo e a empresa Stora Enso, certamente, oferece um bom exemplo de como desenvolver estrategicamente um novo negócio com lignina. Enquanto eles estão avançando sobre a curva de aprendizagem da tecnologia (reduzindo o custo de produção) e também desenvolvendo novas aplicações e mercados para lignina, tanto os riscos de tecnologia quanto os de mercado são mitigados ao direcionar a produção de lignina internamente como um substituto para o gás natural no forno de cal.

Sem dúvida, a decisão sobre a forma de valorizar correntes secundárias de processo é específico para cada unidade fabril e se apresenta como um problema multivariável e multidimensional, e particularmente no caso da casca do eucalipto, a decisão envolve interesses conflitantes entre o manejo florestal e a operação industrial. A fim de facilitar a tomada de decisões (válida também para as outras três orientações estratégicas), uma abordagem sistemática deve incluir (a) a proposição de alternativas com combinações tecnologias-produtos e a avaliação do desenvolvimento (técnico/mercado) destas, esperado ao longo dos anos (semelhante ao formato dum *roadmap*), bem como (b) a definição dum conjunto de critérios de seleção multidimensionais, a fim de avaliar as alternativas a partir duma perspectiva de negócios e sustentabilidade ambiental, tais como aqueles apresentados em Senaei (2014).

Conclusões

As quatro diretrizes apresentadas neste trabalho prospectivo fornecem uma discussão estratégica sobre as principais questões que empresas de celulose são aconselhadas a analisar a fim de conduzirem decisões sistemáticas, baseadas em informação, sobre o projeto de suas futuras fábricas e possíveis reequipagens das unidades existentes. A ruptura de um projeto com foco exclusivo em celulose de mercado e cogeração pode trazer valor adicional para as florestas de eucalipto e apoiar expansões sustentáveis dos negócios, tanto no lado da matéria-prima quanto em relação aos produtos.

Para tanto, é esperado que a taxa de sucesso aumente se na fase de síntese

do projeto é dada prioridade à definição dos *portfolios* de produtos candidatos e às respectivas opções de modelos de negócios. Soluções tecnológicas disponíveis para um determinado *portfolio* de produtos devem ser avaliadas de acordo com os seus riscos e potenciais problemas de integração com a fábrica de celulose, especialmente a disponibilidade e a demanda de energia.

No caminho em direção à transformação para biorrefinaria, até o momento em que as perspectivas do mercado de celulose de fibra curta ainda sejam atraentes, é muito provável que as empresas brasileiras de celulose deem preferência para biorrefinarias alimentadas com resíduos florestais e correntes secundárias de processo (principalmente lignina). Durante este período, a capacidade de uma empresa de evoluir com relação ao tradicional pensamento de commodities será um fator chave de sucesso do negócio.

Referências

- Batsy, D. R., Solvason, C. C., Sammons, N. E., Chambost, V., Bilhartz, D. L., Eden, M. R., El-Halwagi, M. M., Stuart, P. R. In *Integrated biorefineries: Design, Analysis and Optimization*; Stuart, P. R., El-Halwagi, M. M., eds; CRC Press: New York, 2013; ch 1.
- Bragatto, J. (2010): Avaliação do potencial da casca de *Eucalyptus spp.* para a produção de bioetanol. PhD dissertation. University of São Paulo, Piracicaba.
- Carranço, T. (2014): Cogeração avança na indústria em meio à falta de gás e crise hidrológica. DCI. Available [Online] www.dci.com.br/negocios/cogeracao-avanca-na-industria-em-meio-a-falta-de-gas-e-crise-hidrologica-id416110.html [16September2014].
- Celulose Online (blog) (2014): Em seis anos area plantada com eucalipto cresce 475% no MS. Available [Online] <http://celuloseonline.com.br/em-seis-anos-area-plantada-com-eucalipto-cresce-475-no-ms/> [11July2014].
- Cohen, J., Janssen, M., Chambost, V., Stuart, P. (2010): Critical analysis of emerging forest biorefinery (FBR) technologies for ethanol production. *Pulp & Paper Canada*. May/June 24-30.
- Dansereau, L. P., El-Halwagi, M., Chambost, V., Stuart, P. (2014): Methodology for biorefinery portfolio assessment using supply-chain fundamentals of bioproducts. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 8 716-727.
- Davis, R., Tao, L., Tan, E. C. D., Bidy, M. J., Jacobson, J., Cafferty, K., Ross, J., Lukas, J., Knorr, D., Schoen, P. (2013): Process Design and Economics for the Conversion of Lignocellulosic Biomass to Hydrocarbons: Dilute-Acid and Enzymatic Deconstruction of Biomass to Sugars and Biological Conversion of Sugars to Hydrocarbons. Technical Report, NREL/TP-5100-60223.
- Dias, M. O. S., Cunha, M. P., Jesus, C. D. F., Rocha, G. J. M., Pradella, J. G. C., Rossell, C. E. V., Maciel Filho, R., Bonomi, A. (2011): Second generation ethanol in Brazil: can it compete with electricity production? *Bioresource Technology*. 102 8964-8997.
- Eldridge, R. B., Seibert, A. F., Robinson, S. (2015): Hybrid separations/distillation technology. Research opportunities for energy and emissions reduction. Industrial Technologies Program, U.S. Department of Energy.

- Fibria (2013): Firms no Rumor. Report. Available [Online] www.fibria.com.br/relatorio2013/shared/relatorio-de-2013-firmes-no-rumor-7abr2014.pdf [7April2014].
- Figueiredo, P. N. (2014): Beyond technological catch-up: An empirical investigation of further innovative capability accumulation outcomes in latecomer firms with evidence from Brazil. *Journal of Engineering and Technology Management*. 31(1) 73-102.
- Janssen, M., Stuart, P. (2010): Drivers and barriers for implementation of the biorefinery. *Pulp & Paper Canada*. 111(3) 13-17.
- Kouhia, M. (2013): Integration of a microalgae-utilizing biorefinery into a pulp and paper mill? PhD dissertation, Aalto University, Espoo.
- Kraemer, K., Harwardt, A., Bronneberg, R., Marquardt, W. (2011): Separation of butanol from acetone-butanol-ethanol fermentation by a hybrid extraction-distillation process. *Computers & Chemical Engineering*. 35 949-963.
- Lima, M. A., Lavorente, G. B., Silva, H. K. P., Bragatto, J., Rezende, C. A., Bernardinelli, O. D., Azevedo, E. R., Gomez, L. D., McQueen-Mason, S. J., Labate, C. A., Polikarpov, I. (2013): Effects of pretreatment on morphology, chemical composition and enzymatic digestibility of eucalyptus bark: a potentially valuable source of fermentable sugars for biofuel production – part 1. *Biotechnology for Biofuels*. 6 75.
- Mansoornejad, B., Chambost, V., Stuart, P. (2010): Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery. *Computers & Chemical Engineering*. 34(9) 1497-1506.
- Mariano, A. P., Harlin, A.; Manninen, J.; Chambost, V.; Stuart, P. (2013): Techno-economic analysis of process alternatives for the production of ethylene-propylene rubber from forest-based feedstocks. *Tappi Journal*. 12 19-32.
- Mariano, A. P., Maciel Filho, R. (2012): Improvements in biobutanol fermentation and their impacts on distillation energy consumption and wastewater generation. *BioEnergy Research*. 5(2) 504-514.
- Martin, C. (2013a): Eficiência energética. *O Papel*. September 32-38.
- Martin, C. (2013b): Indústria Ecoeficiente. *O Papel*. October 32-40.
- MCT - Ministry of Science and Technology (Brazil) (2011). Available [Online] <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/74694.html> [retrieved 21January2015].
- Mohammadi, S. (2014): Adapting the experience curve for estimating biorefinery costs. MSc thesis. École Polytechnique de Montreal, Montreal.
- REW - Renewable Energy from Waste (2013): Alberta Pulp Mill to Upgrade Wastewater Treatment System. Available [Online] <http://www.rewmag.com/slave-lake-pulp-adi-systems-install-ad.aspx> [2July2013].
- Risi (2014): Brazilian Jari expects to produce DP by July; negotiates antidumping duties with China. April.
- Rohani, N. M. (2014): Design methodology for integrated downstream separation systems in an ethanol biorefinery. MSc thesis. École Polytechnique de Montreal, Montreal.
- Senaei, S. (2014): Sustainability assessment of biorefinery strategies under uncertainty and risk using multi-criteria decision-making (MCDM) approach. PhD dissertation. École Polytechnique de Montreal, Montreal.
- Svensson, E., Berntsson, T. (2011): Planning future investments in emerging energy technologies for pulp mills considering different scenarios for their investment cost development. *Energy*. 36 6508-6519.
- Vidal, A. C. F. (2014): O renascimento de um mercado: o setor de celulose solúvel. BNDES Setorial. 38 79.