



## REVISÃO DE BIORREFINARIAS E PROPOSTA DE MODELO COM ESTRUTURA DESCENTRALIZADA

Borges, F. C.<sup>1</sup>, Trierweiler, J. O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Integração, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)  
Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,  
E-MAIL: {feborges, jorge}@enq.ufrgs.br

---

**Resumo:** A busca por segurança energética tem feito com que a maioria dos países empenhe-se em buscar fontes alternativas de energia que permitam mitigar problemas de ordem econômica, social e ambiental. Assim, espera-se que a biomassa torne-se um dos principais recursos renováveis na produção de alimentos, materiais, produtos químicos, combustíveis e energia. O desenvolvimento de tecnologias em biorrefinarias representa a chave para essa produção integrada, combinando biotecnologias e conversões químicas de substâncias para processamento de biomassa em produtos intermediários e finais. Esse desenvolvimento é necessário para otimizar a utilização de biomassa, disponível geograficamente dispersada, com maior eficiência e menor impacto ambiental possível. Estudos desse tipo têm recebido especial atenção, de maneira que seus conceitos têm formado a base de investimentos em pesquisas e implementações mundiais.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão das pesquisas e desenvolvimentos atuais em biomassa, produtos de interesse e conceitos de biorrefinarias existentes, bem como propor um modelo de biorrefinaria com estrutura descentralizada, visando à otimização de um processamento sustentável de biomassa para obtenção de um espectro de produtos comerciáveis e energia. Através de análise na literatura disponível é possível propôr-se um modelo de biorrefinaria adaptado ao cenário brasileiro, dando diretrizes para investimentos na área.

**Palavras-chave:** biomassa, biorrefinaria, blocos de construção, produtos biobaseados.

---

### 1. Introdução

Atualmente, a segurança energética mundial depende em boa parte das decisões dos poucos países que integram a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Os preços crescentes dos combustíveis têm feito com que a maior parte dos países se empenhe em buscar fontes alternativas de energia que permitam mitigar problemas de ordem econômica, social (emprego, renda, fluxos migratórios) e ambiental (mudanças climáticas, poluição), motivando a antecipação de cronogramas determinados pela previsão do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis.

Dentro desse contexto, espera-se que a biomassa venha a tornar-se um dos principais recursos renováveis para a produção de alimentos, materiais, produtos químicos, combustíveis e energia. O potencial global de provisão de biomassa é grande: A expectativa é que em 2050 a provisão mundial de biomassa seca ultrapasse 25 bilhões de toneladas por ano (HOOGWIJK, FAAIJ *et al.*, 2003). Porém, como se espera que a demanda global aumente em grande extensão, é necessário que se estabeleça um pacote de medidas para que o cenário de uma sociedade sustentável seja alcançado. Dentre essas medidas pode-se citar o aumento em eficiência energética

global, redução de consumo e substituição de recursos fósseis por alternativas renováveis, além da necessidade de se oferecer uma base que viabilize a transição da larga-escala à economia biobaseada, procurando-se evitar também a concorrência com a produção de alimentos.

O desenvolvimento de tecnologias em biorrefinarias representa a chave para uma produção integrada, utilizando biotecnologias e conversões químicas, sendo o foco principal voltado para o processamento sustentável dos precursores da biomassa: os carboidratos, lignina, óleos, e proteínas. Este desenvolvimento é necessário para otimizar a utilização de biomassa, disponível geograficamente dispersada, com maior eficiência e o menor impacto ambiental possível.

Estudos desse tipo se enquadram no que hoje é chamado de desenvolvimento de biorrefinarias e têm recebido especial atenção, de maneira que seus conceitos têm formado a base de investimentos em pesquisas e implementações nacionais e internacionais.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão das pesquisas e desenvolvimentos atuais em biomassa, produtos de interesse e conceitos de biorrefinarias existentes atualmente, bem como propor um modelo de biorrefinaria com estrutura descentralizada, visando à otimização de um processamento sustentável de biomassa

para obtenção de um espectro de produtos comerciáveis e energia.

## 2. Motivação Brasileira

O Brasil é reconhecido mundialmente pelo pioneirismo na introdução do etanol em sua matriz energética, sendo um dos maiores produtores de álcool a partir da biomassa, e é responsável por mais de 1 milhão de empregos diretos (PESSOA, ROBERTO *et al.*, 2005).

A partir da crise do petróleo, na década de 1970, o Governo brasileiro criou o programa Proálcool, estimulando a criação de uma indústria de bioetanol. Porém, devido à crise de abastecimento ocorrida em 1989, o consumo de álcool apresentou queda gradual. Os motivos passam pela alta no preço internacional do açúcar, o que desestimulou a fabricação de álcool. No início do século XXI, na certeza de escassez e de crescente elevação no preço dos combustíveis fósseis, priorizam-se novamente os investimentos na produção de etanol por um lado e, por outro, um amplo investimento na pesquisa e criação de novos combustíveis e produtos obtidos a partir da biomassa.

Em 2003, uma das maiores indústrias brasileiras de etanol começou a consumir cerca de 50% do bagaço residual da cana-de-açúcar para a produção de energia elétrica (60MW), introduzindo uma nova proposta de bioenergia ao mercado brasileiro (PESSOA, ROBERTO *et al.*, 2005). Desde então, outras tecnologias para usos comerciais do bagaço residual estão em desenvolvimento.

Assim, uma das principais razões para se focalizar no desenvolvimento de biorrefinarias no Brasil é que, apesar de ainda permanecerem obstáculos técnicos ao uso de resíduos de biomassa na indústria de bioprodutos até o momento, vários projetos de pesquisa foram desenvolvidos, contribuindo para geração de dados úteis e criação de oportunidades para novos produtos de alto valor-agregado, com uma utilização otimizada de biomassa.

Outra razão importante é o fato de que o Brasil não produz somente para seu mercado doméstico, mas também para mercados de exportação, pois além de ser o maior produtor e consumidor de etanol, é também o maior exportador no cenário global. A expectativa é de que o consumo atual, da ordem de 33,7 bilhões de litros por ano, salte para 79,4 bilhões em 2010. O Brasil consumiu 16,1 bilhões de litros de etanol em 2005, chegará a 16,9 bilhões este ano e tem uma demanda projetada de 27 bilhões para 2010 (SIMÕES, 2006).

Portanto, a necessidade de suprir o mercado interno em expansão e o mercado internacional, que busca fontes renováveis de energia, traz excelentes oportunidades para incrementos ainda maiores no crescimento do setor. A estimativa é de uma expansão potencial das exportações brasileiras em 4 bilhões de litros, chegando então a 7 bilhões de litros exportados em 2012 / 2013, contra os 3,1 bilhões vendidos hoje no mercado externo, podendo abastecer cerca de 10% desse mercado, sendo virtualmente a única origem de etanol porque é o único país com produção suficiente para exportar (SIMÕES, 2006).

Entretanto, diante dessa tendência, surge a preocupação relativa à expansão da monocultura para os

diferentes tipos de biomassas competitivas, que por sua vez está vinculada à macroescala, ou seja, na centralização da produção em grandes plantas industriais. Esta opção implica no desgaste de recursos humanos e ambientais em função da monocultura danosa, baixa interação com a pecuária, destruição da diversidade ecológica e das pequenas economias locais onde as grandes indústrias se instalam, tendo um baixo poder de distribuição de renda (ORTEGA, WATANABE *et al.*, 2006).

Um modelo de biorrefinaria descentralizada é de grande interesse para o atual cenário brasileiro, pois apresenta uma alternativa à monocultura em macroescala com produção em grandes plantas industriais. Esse modelo possui características que reúnem condições de integrar sistemas de produção de bioprodutos, bionergia e alimentos de forma ecologicamente correta e socialmente justa. A cultura diversificada é fundamental para a manutenção do bioma e também proporciona segurança financeira para o agricultor decorrente do aumento do seu portfólio de produtos, podendo ainda ser combinada com a pecuária, e direcionada ao aproveitamento integral de subprodutos.

## 3. Biomassa no Brasil e no Mundo

As principais regiões do mundo produtoras de energia da biomassa são a Ásia e Austrália, América Latina e Caribe, sendo também as regiões com maior potencial para incrementar o uso dessa fonte renovável. A produção de energia da biomassa nessas regiões mostra um incremento do uso da biomassa, acompanhada em paralelo pelo desenvolvimento da tecnologia e pela redução dos custos. A América Latina é a região que mais incrementou a produção de energia com a biomassa, em média 2,28% por ano. O crescimento médio mundial é 0,57% ao ano. As regiões como Europa e Oriente Médio têm a menor disponibilidade de biomassa e, conseqüentemente, a produção de energia com essa fonte é a mais baixa no mundo (OLADE, 2004).

A principal fonte para o aproveitamento de biomassa está nos resíduos sólidos urbanos, animais, vegetais, industriais e florestais, além das microalgas. Diferentes tecnologias para o processamento e transformação de biomassas têm sido apresentadas, mas todas as tecnologias atualmente usadas no mundo possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa e a eficiência energética de sua cadeia produtiva.

Houve muitas tentativas de estimar a produção e o uso dos resíduos globais, mas todas apresentam muitas variações, pela existência de diferentes usos alternativos, como a ração animal, controle de erosão, o uso como fertilizante e medicinal; e também pela necessidade de se determinar o que é ou não um resíduo reutilizável, e assim determinar sua verdadeira disponibilidade.

Os principais resíduos utilizados em nível mundial são os vegetais, que ultrapassam  $10 \times 10^9$  bep. Sendo produzidos no campo, resultantes das atividades de colheita dos produtos agrícolas, são constituídos basicamente de palha, folhas e caules, e têm um poder calorífico médio de 15,7MJ/kg de matéria seca (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008). Sua produção mundial é grande, tendo muitas possibilidades de incrementar sua competitividade, conforme é apresentado na Tabela 1.

O Brasil é um grande produtor agrícola, e nos últimos anos a área plantada e a produção agrícola tiveram um crescimento importante. A cana-de-açúcar é a matéria-prima de maior produção em todo o mundo, produção esta encabeçada pelo Brasil, com quase 400 Mt de produção anual, seguido por Índia, China, Tailândia, Paquistão e México (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

**Tabela 1.** Produção mundial dos principais produtos para a obtenção de energia.

Matéria-prima	Produção (Mt)	Produção de Resíduos (Mt)
Cana (bagaço)	1.318.178.070	395.453.421
Arroz (casca)	608.496.284	172.934.643,90
Mandioca (rama)	195.574.112	58.261.527,96
Milho (palha e sabugo)	705.293.226	934.442.995,10
Soja (restos de cultura)	206.409.525	320.966.811,40
Algodão	67.375.042	16.843.760,50
Beterraba	237.857.862	-

Fonte: (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

A Tabela 2 apresenta dados da produção de matéria-prima e seus resíduos no Brasil em 2008.

**Tabela 2.** Produção de matéria-prima e seus resíduos no Brasil em 2008.

Matéria-Prima	Produção Agrícola (t)	Produção de Resíduos (t/Ha)	Matéria Seca (%)	Produção Total de Resíduos (t)
Cana (bagaço)	396.012.158	7,0 – 13,0	23,4	59.401.824
Arroz (casca)	10.334.603	4,0 – 6,0	89	2.937.094
Café (casca)	2.454.470	-	-	1.662.658
Mandioca (rama)	21.961.082	6,0 – 10,0	90,4	6.542.206
Milho (palha e sabugo)	48.327.323	5,0 – 8,0	90,5	64.028.870
Soja (restos de cultura)	51.919.440	3,0 – 4,0	88,5	80.746.839
Mamona	111.100	-	-	-
Algodão	2.199.268	-	-	-

Fonte: (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

Essa grande quantidade de resíduos pode ser aproveitada em virtude das tecnologias existentes, mas atualmente o Brasil não aproveita mais de 200 milhões de toneladas de resíduos agroindustriais (CIRAD, 2004). Parte dos resíduos não aproveitados encontra uso na ração animal, e nas áreas de medicina e fertilizantes.

De acordo com o levantamento sistemático da produção agrícola feito pelo IBGE, para as safras de 2003 e 2004, a região Nordeste responde por 7,87% da produção total, e as regiões Norte, Sudeste e Centro-Oeste são responsáveis, respectivamente, por 2,40%, 13,30% e 32,03%; a região Sul tem a participação de 44,40%. Constatou-se um crescimento médio de 12,22% em comparação à safra anterior em todo país, tendo como principais culturas a cana-de-açúcar, o milho e a soja.

Dos principais fatores de crescimento, tem-se o zoneamento, refletido num melhor planejamento da ação agrícola, permitindo economia dos recursos e menor expectativa de frustração da safra; e também as tecnologias desenvolvidas nos últimos anos no país.

Os resíduos sólidos urbanos são obtidos dos resíduos domiciliares e comerciais. Segundo Veja Engenharia, empresa de limpeza pública de atuação nacional, há um crescimento em torno de 5% ao ano na quantidade de lixo gerado.

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), para estimar a quantidade de resíduos sólidos dispostos, adotaram-se os índices de produção por habitante no estado de São Paulo, o que é mostrado na Tabela 3.

**Tabela 3.** Índices de produção *per capita* de resíduos sólidos domiciliares em função da população urbana.

População	Produção (kg/hab.dia)
Até 100.000	0,4
De 100.001 a 200.000	0,5
De 200.001 a 500.000	0,6
Maior que 500.001	0,7

Fonte: (CETESB, 2008).

Em pesquisa feita no ano de 2008, a CETESB coletou as informações dos 645 municípios do estado de São Paulo. Essas informações permitiram conhecer o índice de Qualidade de Aterros de Resíduos (IQR), cuja pontuação varia de 0 a 10. Já as quantidades de resíduos gerados nos municípios foram calculadas com base na população urbana de cada cidade e nos índices de produção de resíduos por habitante. Foram considerados os resíduos de origem domiciliar, ou seja, aqueles gerados nas residências, no pequeno comércio e em empreendimentos de pequeno porte. Os resultados dessa pesquisa são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Geração de resíduos domiciliares nos municípios de São Paulo.

População do Município (habitantes)	IQR Médio (2008)	Município	Resíduos Gerados (t/dia)	% de Resíduos
Até 100.000	7,9	575	3.730	13,5
De 100.001 a 200.000	8,4	33	2.202	8
De 200.001 a 500.000	8,4	28	4.864	17,6
Maior que 500.001	8,9	9	16.832	60,9
Total	-	645	27.629	100

Fonte: (CETESB, 2008).

O total de resíduos domiciliares gerados em São Paulo é 27.629 toneladas por dia. O IQR mostra que nas maiores cidades do estado existem condições mais adequadas nos aterros sanitários, mas no geral a maioria dos municípios do estado não tem suas condições controladas no tratamento e/ou na destinação dos resíduos sólidos domiciliares.

O teor de matéria orgânica (C, H, O, N) do lixo brasileiro está em 60% aproximadamente, o que lhe

confere bom potencial energético. O Poder Calorífico Inferior (PCI) médio do resíduo domiciliar é de 1.300 kcal/kg, o que equivale a 5,44 MJ/kg (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

Os resíduos industriais são provenientes do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais, do uso do carvão vegetal no setor siderúrgico de ferro-gusa e aço e do gás de alto-forno a carvão vegetal.

A indústria madeireira produz resíduos a partir do beneficiamento de toras. Os tipos de resíduos produzidos são casca, cavaco, costaneira, pó de serra, maravalha e aparas. As indústrias de alimentos e de bebidas produzem resíduos na fabricação de sucos e aguardentes, no beneficiamento de arroz, café, trigo, milho, coco da Bahia, amendoim, castanha de caju e etc.

O uso energético dos resíduos agroindustriais é obtido, na maioria dos casos, por meio da queima direta em fornos e caldeiras ou, de maneira mais inovadora, através da biodigestão anaeróbia. O que determina o processo utilizado de conversão energética dos resíduos é seu teor de umidade, pois, em termos práticos, só é possível queimar resíduos com até 50% de umidade. Então, resíduos como a vizinhança resultante da produção do álcool, os afluentes de matadouros, os derivados do leite, dentre outros, são apropriados para a produção de biogás (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

A Tabela 5 resume os potenciais de produção de resíduos, com seu poder calorífico superior, umidade e capacidade de suprimento energético (vapor e eletricidade) de três dos principais resíduos aproveitados pela indústria.

**Tabela 5.** Disponibilidade de resíduos agroindustriais.

Resíduos	Produção	PCS (MJ/kg) base seca	Disponibilidade (%)
Bagaço de cana-de-açúcar	250 – 300 kg/t cana	18,4	100
Licor negro	2,5 – 2,8 t/t celulose	12,5	80
Borra de café	4,5 t/t café solúvel	14,6	60 a 80

Fonte: (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

Os resíduos industriais no Brasil ainda são pouco controlados: dos 5.471 municípios do país, apenas 551 fizeram o controle dos resíduos gerados pelo setor produtivo privado em 2003, e 1,4 milhão de toneladas de resíduos foi gerado somente nos principais pólos industriais do Brasil. De acordo com esse estudo, são geradas anualmente no Brasil aproximadamente 2,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos industriais, sendo 600 mil toneladas, um valor próximo de 22%, que recebem tratamento adequado (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

Os resíduos animais são determinados pela capacidade de produção de excrementos das criações mais importantes, variando de acordo com as práticas culturais, pois, no caso de criações em confinamento, o custo e a viabilidade da coleta são grandemente melhorados.

Os mais importantes resíduos gerados pela atividade biológica são os do gado bovino, suíno, caprino e ovino que são criações relevantes e justificam seu aproveitamento energético. Na Tabela 6 é apresentada a quantidade de

animais vivos para esses tipos de rebanho no Brasil nos anos de 2003 e 2004.

**Tabela 6.** Efetivo dos rebanhos em 2004 comparativamente a 2003 no Brasil.

Rebanho	Efetivo 2003	Efetivo 2004	Varição 2004/2003
Bovino	195.551.576	204.512.737	4,58
Suíno	32.304.905	33.085.299	2,42
Caprino	9.581.653	10.046.888	4,86
Ovino	14.556.484	15.057.838	3,44

Fonte: (IBGE, 2004).

A Tabela 7 apresenta a quantidade de excremento produzido por tipo de rebanho.

**Tabela 7.** Quantidade de excremento produzido por diferentes animais.

Animal	Massa Animal (kg)	Volume Excremento (m <sup>3</sup> /dia)	Massa Úmida Excremento (kg/dia)	Matéria Seca (%)
Gado de corte	500	0,028 – 0,037	27,7 – 36,6	10
Gado de leite	500	0,031 – 0,035	30,2 – 35,0	10
Suínos	100	0,0056 – 0,0078	5,4 – 7,6	10
Ovelhas	-	-	2	20

Fonte: (CETESB, 2008).

O esterco seco pode ser queimado diretamente e tem um poder calorífico típico de 14,6 MJ/kg (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008). Além dos usos energéticos, os dejetos são utilizados como fertilizantes, diminuindo a poluição e melhorando as características físicas, químicas e biológicas do solo.

Os resíduos florestais são constituídos pelo material que é deixado para trás na coleta da madeira, como folhas, galhos, e o material resultante da destoca, além de serragem e aparas produzidas no seu processamento.

Para todos esses casos, incluindo o dos resíduos de serragem, que pode ser superior à produção de madeira trabalhada, deve ser assumido o poder calorífico da madeira de 13,8 KJ/kg re resíduo produzido (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

O Brasil tem 5 milhões de quilômetros quadrados de floresta nativa, o que representa 64% de sua área (FAO, 2004). O Brasil é o maior produtor de madeira proveniente de bosques cultivados, com mais de 2.965.000 ha e uma área plantada de pinus de 1.840.050 ha (SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA, 2001). Estima-se que 1 milhão de ha está destinado à produção de lenha e carvão vegetal (FAO, 2004).

De modo geral, os resíduos gerados em uma cadeia produtiva de serrados constituem-se 7% de casca, 10% de serragem e 28% de pedaços, isso sem considerar as perdas na extração da madeira e aproxima-se que um mínimo de 18 milhões de toneladas de resíduos de madeira ficaria nas serrarias. Se essa quantidade for somada aos resíduos de madeira provenientes do processamento industrial e da exploração florestal sustentável no país todo, a quantidade de resíduos pode chegar a 50 milhões de toneladas/ano (CORTEZ, LORA *et al.*, 2008).

Uma alternativa emergente é a utilização de biomassa aquática. Estima-se que da produção primária global de biomassa 50% seja terrestre e 50% aquática. Atualmente as políticas de governo têm focado quase exclusivamente o uso de biomassa terrestre, dando pouca atenção às culturas aquáticas, tendo como exemplos as microalgas (BOWLES, 2007).

As microalgas apresentam características de especial interesse para sua utilização: além de seqüestrar CO<sub>2</sub>, necessário para o crescimento, não compete com culturas alimentares, pode ser produzida em qualquer tipo de terreno, inclusive em zonas áridas, reproduz-se de forma exponencial e cuja duplicação se faz em torno de um dia, em qualquer tipo de água (salgada, salobra ou residual), em qualquer período do ano, sem riscos de perdas por alterações climáticas, necessitando de pouco mais do que luz solar e CO<sub>2</sub>, podendo ser colhida todos os dias.

As diatomáceas são a forma de vida dominante no fitoplâncton e provavelmente representam o maior potencial de biomassa do planeta, sendo estimado que existam mais de 100.000 espécies (BOWLES, 2007). Dependendo do tipo de alga escolhido e as condições de crescimento, a biomassa marinha pode acumular quantias significantes de produtos biobaseados, tendo como exemplos óleos, carboidratos, gomas e vitaminas. As diatomáceas frequentemente acumulam óleos, enquanto as alvas verdes acumulam gomas e óleos, e algas douradas, óleos e carboidratos.

Produtividades anuais de 10 a 30 e 50 a 60 toneladas de base seca por hectares cultivados, para sistemas abertos e fotobiorreatores, respectivamente, já têm sido registrados (BOWLES, 2007). A colheita da biomassa pode representar de 20 a 30% dos custos totais da biomassa, sendo os processos convencionais utilizados para colheita de microalgas a centrifugação, fracionamento de espuma, floculação, filtração por membrana e separação com ultrassom (BOWLES, 2007).

Culturas aquáticas oferecem a possibilidade de aumentar a disponibilidade de biomassa significativamente, fato que norteia as pesquisas de obtenção e processamento eficientes de biomassa. Hoje, as pesquisas em tecnologia de produção de microalgas buscam a melhor espécie a ser cultivada, melhoramento genético e diminuição dos custos de produção. E atualmente estão sendo desenvolvidos interessantes conceitos de cultivo e processamento em infra-estruturas *offshore*.

Quando se busca determinada disponibilidade de biomassa para obtenção de produtos e energia em um país ou região, é importante considerar as restrições de ordem ecológica, econômica e tecnológica. Somente assim toda a biomassa potencialmente disponível pode assumir o conceito de reserva, a partir do qual se determina o potencial anual de produção.

#### 4. Princípios de Biorrefinarias

Biorrefinaria é o processo sustentável de transformação de biomassa em um espectro de produtos comercializáveis de maior valor agregado e energia. Na chamada biorrefinaria primária tem-se a alimentação de biomassa que, após pré-tratamento e a separação primária obtém-se os produtos primários, que são diretamente

comercializáveis após a separação, e intermediários, que se tornam comercializáveis após tratamentos adicionais e separações na biorrefinaria secundária.

Uma refinaria tradicional abastece principalmente combustíveis de transporte e energia, e somente uma fração relativamente pequena é direcionada para a química. Através de processos de biorrefinarias uma quantia relativamente maior pode ser direcionada para a química e utilização material. Porém, produtos biobaseados só podem competir com produtos petroquímicos quando os recursos da biomassa são processados de forma otimizada através de sistemas de biorrefinarias (KAMM, GRUBER *et al.*, 2006).

A biomassa, assim como o petróleo, apresenta uma composição complexa, sendo apropriado fazer uma separação primária dos principais grupos de substâncias que a compõem. A biomassa proveniente de plantas consiste em produtos básicos, como carboidratos, lignina, proteínas e gorduras, além de várias outras substâncias como vitaminas, pigmentos, sabores e essências aromáticas das mais variadas estruturas químicas, para esses produtos o termo “precursores” é usado (KAMM e KAMM, 2007).

Aproxima-se que da produção anual de biomassa vegetal 75% seja carboidrato, principalmente na forma de celulose, goma e sacaroses, 20% seja lignina e somente 5% da composição como outros componentes naturais, tais como gorduras, proteínas e várias outras substâncias (KAMM e KAMM, 2007). Assim, a atenção deveria ser focada primeiramente no acesso eficiente aos carboidratos e suas subseqüentes conversões a produtos intermediários e finais.

Glicose, acessível por métodos microbianos ou químicos a partir da goma, açúcares ou celulose, também é predestinada a uma posição fundamental como substância química básica por causa da vasta gama de produtos biotecnológicos ou químicos acessíveis a partir da sua composição. No caso da goma a vantagem do processo enzimático, comparado com a hidrólise, já tem sido estudada (LINKO e JAVANAINEN, 1996). Existem muitas opções para a conversão microbiana de substâncias a partir da glicose, sendo as reações energeticamente vantajosas.

No caso da celulose isso não foi feito ainda. As enzimas utilizadas na hidrólise da celulose somente podem agir efetivamente após um pré-tratamento para a quebra as ligações de lignina, celulose e hemicelulose. Esses tratamentos, em geral, são térmicos, termomecânicos ou termoquímicos, requerendo um acréscimo considerável de energia ao processo.

Entre a variedade de possíveis produtos microbianos e químicos acessíveis a partir da glicose, em particular o ácido láctico, etanol, ácido acético, e ácido levulínico, diversos intermediários favoráveis para a geração de produtos industrialmente relevantes podem ser obtidos.

#### 5. Blocos de Construção, Seleção Química e Potencial

Um grupo de pesquisadores do *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) e *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) identificou os doze produtos químicos biobaseados potenciais, chamados Blocos de Construção, que a partir da biomassa pudessem técnica e

economicamente suportar a produção de combustíveis e energia num processo integrado de biorrefinaria, identificando os desafios e barreiras associados às tecnologias de produção.

A lista de mais de trezentos foi reduzida a quase cinquenta candidatos, e o critério para essa seleção incluiu os custos estimados de matérias-primas e processamento, preço estimado de venda, complexibilidade técnica associada à melhor rota de processamento e potencial de mercado para cada um dos candidatos a Bloco de Construção.

O passo seguinte foi a organização dos cinquenta candidatos por número de carbonos em suas estruturas. Em seguida, revisou-se o grupo de candidatos por funcionalidade química e uso potencial. Depois se excluíram os candidatos que poderiam classificar-se como *supercommodity* químico, sendo esses derivados de Blocos de Construção ou subprodutos do refino petroquímico, pois apesar da possibilidade da biomassa servir como fonte desses componentes, os empecilhos econômicos de um alto investimento e baixos preços para concorrência no mercado seriam difíceis de serem superados.

Assim, uma lista *Top 30* Blocos de Construção foi alcançada, verificando-se que esses candidatos possuem múltiplas funcionalidades satisfatórias para conversões adicionais a derivados ou famílias moleculares; podem ser produzidos tanto de lignocelulósicos como de goma; são monômeros de 1 a 6 carbonos; não são aromáticos derivados da lignina e ainda não são *supercommodity* químicos (PNNL e NREL, 2004).

A Tabela 8 apresenta a seleção *Top 30*.

**Tabela 8.** Resultado da seleção *Top 30*

Nº Carbonos	Candidatos Potenciais <i>Top 30</i>
1	Monóxido de Carbono e Hidrogênio
2	Nenhum
3	Glicerol, 3-Ácido Hidroxipropiônico, Ácido Láctico, Ácido Malônico, Ácido Propiônico e Serina
4	Acetoína, Ácido Aspártico, Ácido Fumárico, 3-Hidroxibutirilactona, Ácido Málico, Ácido Succínico e Treonina
5	Arabinitol, Furfural, Ácido Glutamâmico, Ácido Itacônico, Ácido Levulínico, Prolina, Xilitol e Ácido Xilônico
6	Ácido Aconítico, Ácido Cítrico, 2,5-Ácido Furandicarboxílico, Ácido Glucárico, Ácido Glucônico, Lisina e Sorbitol

Fonte: *Top Value Added Chemicals From Biomass (PNNL e NREL, 2004)*.

O passo seguinte foi a identificação de doze Blocos de Construção derivados de açúcar. São eles 1,4-Diácidos (Succínico, Fumárico e Málico), 2,5-Ácido Furandicarboxílico, 3-Ácido Hidroxipropiônico, Ácidos Aspártico, Glucárico, Glutâmico, Itacônico e Levulínico, 3-Hidroxibutirilactona, Glicerol, Sorbitol e Xilitol/Arabinitol.

Segundo a PNNL e NREL, hidrogênio e metanol cumprem com a melhor alternativa de prospecção de artigos biobaseados por possibilitar a obtenção de alcoóis simples, aldeídos, alcoóis mistos e líquidos de Fischer-Tropsch a partir da biomassa, porém esses processos não

são economicamente viáveis, requerendo desenvolvimentos adicionais. Assim, nenhum produto derivado de Gás de Síntese foi selecionado. Essa decisão foi tomada pelo grupo com base em revisões bibliográficas que identificaram a limpeza de gás como uma das principais barreiras para a produção econômica de Gás de Síntese a partir da biomassa.

A finalidade do estudo proposta pelos grupos PNNL e NREL seria a de identificar as dez melhores oportunidades para a obtenção de produtos químicos em biorrefinarias. Porém, os critérios de seleção para a redução do leque de possibilidades, que partiu de mais de 300 candidatos, excluíram produtos que podem técnica e economicamente contribuir com a produção de combustíveis e energia num processo integrado de biorrefinaria.

Um dos compostos eliminados da seleção é o etanol, sendo excluído por ter sua principal aplicação como combustível e assim seria um Bloco de Construção limitado, além de esperar-se que se torne um *supercommodity* químico, assim os empecilhos econômicos de um alto investimento e baixos preços para concorrência no mercado seriam difíceis de serem superados. Entretanto o etanol tem recebido especial atenção no mercado energético global como biocombustível, além de abrir a gama de produtos da indústria alcoolquímica.

Outro produto não considerado é o biodiesel. Esse pode vir a substituir total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo. Pode ser produzido a partir de qualquer fonte de ácidos graxos, sendo necessário, porém, avaliar se a fonte de ácidos graxos viabiliza o processo para uma determinada escala. Os resíduos graxos e as microalgas também aparecem como possíveis fontes de matéria-prima para a produção do biodiesel.

Tanto para o etanol, como para o biodiesel, o desenvolvimento tecnológico permitirá otimizar os processamentos de biomassas, sendo possível atingir preços concorrentes com os do mercado atual. Além disso, há possibilidade de cooperar com o desenvolvimento econômico de diversas regiões do Brasil, uma vez que é possível explorar regionalmente a melhor alternativa de matéria-prima.

Assim sendo, é importante considerar o etanol, o biodiesel, além do metano, como produtos de interesse a serem obtidos em processos integrados de biorrefinaria e serão incluídos na seleção final de Blocos de Construção para terem sua viabilidade analisada no estudo de biorrefinarias em desenvolvimento.

## 6. Conceitos de Biorrefinarias

As biorrefinarias convencionais (em inglês: *Conventional Biorefineries (CBR)*) são indústrias que utilizam tecnologias convencionais e que têm sido melhoradas para separar a biomassa e obter produtos e subprodutos.

Muitas indústrias existentes já são na realidade um tipo de CBR como, por exemplo, as indústrias açucareiras, de amiláceos, de óleos vegetais, alimentícias, papeleiras, químicas e de bicombustíveis.

Estas indústrias procuram agregar valor direcionando seus subprodutos a outros setores, dando ênfase, no

entanto, aos produtos principais. Atualmente esforços têm sido empregados para aumentar a gama de produtos com alto valor agregado, produzidos a partir dessas biorrefinarias. Esta estratégia provavelmente conduzirá a uma mudança, com melhoras econômicas e ecológicas para os processos das CBR existentes. Em muitos casos uma extensão de uma CBR formará a base para o desenvolvimento dos tipos mais novos de biorrefinarias (REE e ANNEVELINK, 2007).

As biorrefinarias verdes (em inglês: *Green Biorefineries* (GBR)) baseiam-se na pressurização de biomassa úmida, resultando em uma torta prensada, rica em fibras, e um suco extraído, rico em nutrientes.

O conceito de GBR difere dos demais pelo processamento da biomassa fresca. Assim a implementação deste tipo de biorrefinarias exige que alguns pontos específicos sejam levados em conta como, por exemplo, um rápido processamento primário ou métodos de preservação para prevenir a degradação dos materiais colhidos.

Os preços dos produtos, tratando-se de bioprocessos, são altamente afetados através de custos de matéria-prima. As vantagens da GBR estão no alto ganho de biomassa por hectare e uma boa interação com a produção agrícola, além dos preços das matérias-primas manterem-se baixos e tecnologias simples poderem ser usadas (REE e ANNEVELINK, 2007).

As biorrefinarias integrais, ou a base de grãos (em inglês: *Whole Crop Biorefineries* (WCBR)) utilizam a biomassa úmida ou seca para a moenda.

Primeiramente é feita uma separação mecânica do grão e da fração de palha. Posteriormente ambas as frações serão processadas separadamente: Do grão será originada a goma e a palha pode ser utilizada como fonte de alimentação lignocelulósica, tendo inclusive a possibilidade de ser processada em outros conceitos de biorrefinarias.

No caso da moenda utilizando a matéria-prima úmida, o grão é inchado e posteriormente é prensado, liberando um produto com potencial de alto valor-agregado. As vantagens de utilizar um sistema nestas condições é que os elementos de estruturas naturais como goma, celulose e proteínas são preservados. Além disso, tecnologias básicas conhecidas também podem ser aplicadas (REE e ANNEVELINK, 2007).

As biorrefinarias de lignocelulose (em inglês: *Ligno Cellulosic Feedstock Biorefineries* (LCFBR)) se baseiam no fracionamento de biomassa rica em materiais lignocelulósicos como fonte para a produção de correntes intermediárias de celulose, hemicelulose e lignina.

As correntes intermediárias podem ser posteriormente processadas para obtenção de um portfólio de produtos finais. Estes produtos biobaseados possuem uma boa aceitação na indústria petroquímica tradicional e nos esperados mercados biobaseados (REE e ANNEVELINK, 2007).

As biorrefinarias de plataforma dual baseiam-se no fracionamento da biomassa em açúcar (celulose e hemicelulose) e uma fração de lignina.

A fração de açúcar será bioquimicamente convertida através da chamada “Plataforma de Açúcar”, produzindo um portfólio de bioprodutos potenciais.

A fração de lignina e os resíduos do processo bioquímico serão termoquimicamente convertidos a Gás de Síntese através da chamada “Plataforma de Gás de Síntese”, produzindo uma gama de produtos biobaseados, incluindo calor e energia para satisfazer as demandas internas do processo.

Em uma biorrefinaria termoquímica várias tecnologias podem ser aplicadas, tais como pirólise e gaseificação. Neste conceito a biomassa é termoquimicamente refinada produzindo um portfólio de produtos de valor agregado.

Uma opção promissora é a co-produção de substâncias químicas de valor-agregado, tais como misturas de alcoóis e Gás Natural sintético (em inglês: *Synthetic-Natural-Gas* (SNG)) a partir de biomassa, pelo desenvolvimento de um conceito inovador de biorrefinaria termoquímica que se baseia em gaseificação a baixas temperaturas, limpeza avançada de gases, separação e melhoramento do produto intermediário (Angelopoulou, 2007).

Um tipo específico de biorrefinaria termoquímica utiliza as infra-estruturas já existentes de processamento de petróleo da indústria petroquímica. Biomassa ou seus derivados intermediários podem ser condicionados e posteriormente introduzidos nas infra-estruturas existentes, substituindo os combustíveis fósseis e matérias-primas para a produção sustentável de um portfólio de produtos petroquímicos convencionais (REE e ANNEVELINK, 2007).

Outro conceito desenvolvido é a biorrefinaria com catálise em etapas, que se baseia no processamento de biomassa utilizando uma sequência de diferentes tecnologias. A diferença são as faixas de temperaturas utilizadas para cada uma das tecnologias e, embora a distinção entre elas não seja tão rigorosa uma aproximação por etapas tem a vantagem de oferecer a possibilidade de separar diferentes produtos e substâncias químicas em cada uma das fases (REE e ANNEVELINK, 2007).

Atualmente o detalhamento das etapas tem recebido especial atenção em pesquisas da área, sendo um dos desafios o desenvolvimento de um catalisador com desempenho satisfatório para as diferentes tecnologias.

Para aplicação em biorrefinarias marinhas (em inglês: *Marine Biorefinery* (MBR)), as microalgas ficam liofilizadas ou mantidas em meio, mas dormentes. Quando se deseja começar o crescimento se fornece meio ou nutrientes, fazendo com que repliquem e cresçam. Depois passam para pequenos reatores verticais, onde há borbulhamento de ar ou CO<sub>2</sub>, replicando-se em maior intensidade, sendo que o crescimento é feito depois em mangas plásticas, econômicas e compactas. Quando atingiram um bom crescimento passam então para fotobiorreatores ou lagoas. Para iniciar uma nova produção basta vaziar os sistemas e limpá-los, um processo que dura de três a quatro dias (ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2008).

A produção de energia tem que ser combinada com, por exemplo, recuperação e tratamento de água e a co-produção de produtos com valor agregado para que o processo seja economicamente viável. Para o cultivo de colônias de microalgas tanto sistemas abertos, como fotobiorreatores têm sido desenvolvidos e utilizados. A vantagem da utilização de fotobiorreatores é a

possibilidade de uma produção com taxas potencialmente maiores, sendo os custos de investimento uma desvantagem já que estes são relativamente altos. A vantagem de usar sistemas abertos é a estrutura simples e investimentos relativamente baixos, sendo uma o risco de contaminação das culturas por bactérias, ou outros microrganismo, uma desvantagem (REE e ANNEVELINK, 2007).

## 7. Biorrefinaria com Estrutura Descentralizada

Tendo o crescente interesse em se reduzir a escala de produção, se faz necessário desenvolver um novo modelo de biorrefinaria descentralizado em duas ou três etapas.

A Biorrefinaria Primária, como etapa descentralizada, usaria a biomassa disponível na região, passando por um pré-tratamento para uma separação primária, obtendo produtos primários e intermediários. A idéia principal é que poderiam ser implementadas biorrefinarias regionais em menor escala, ao invés de operar em largas escalas de produção.

Os produtos primários podem ser diretamente comerciáveis, enquanto os produtos intermediários podem ser transportados a uma unidade regional central para um pré-tratamento da conversão primária, passando a seguir pela separação secundária, obtendo produtos finais comerciáveis e outra gama de produtos intermediários, comerciáveis após uma conversão secundária.

A proposta desse modelo de biorrefinaria é uma alternativa à centralização de produções, com redução da escala de produção dos compostos intermediários, utiliza biomassas disponíveis regionalmente, integra sistemas de produção de alimentos, produtos químicos, materiais e energia, potencializando os recursos regionais, além de reduzir custos com logística.

Outras vantagens oriundas da redução da escala é a agregação de valor, diversificação da produção, baixo menor impacto ambiental e melhora da distribuição da renda.

## 8. Conclusão

As biorrefinarias já são aplicadas em uma variedade de setores industriais. Porém, almeja-se a produção sustentável de um espectro de produtos biobaseados e energia, com um melhor aproveitamento de recursos.

É necessário o desenvolvimento de uma metodologia de análise e determinação de pontos de atenção estratégica dando uma primeira avaliação das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças da implementação do modelo proposto, dando a diretriz do tipo de biomassa a ser utilizada como matéria-prima, produtos primários, secundários e finais de interesse, escala ótima de produção e conceitos a serem implementado em uma biorrefinaria, de acordo com o cenário de cada região.

## 9. Referências

BOWLES, D. Micro- and macro-algae: utility for industrial applications. Output from the EPOBIO project: CPL Press 2007.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. "Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares". Relatório 2008. Secretaria do Estado do

Meio Ambiente: Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em 15/09/2009.

CIRAD. Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento: Disponível em <<http://www.cirad.org.br/>>. Acesso em 14/09/2009.

COMMITTEE ON BIOBASED INDUSTRIAL PRODUCTS. Biobased Industrial Products: Research and Commercialization Priorities. National Research Council: National Academy of Sciences 2000.

CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., *et al.* Biomassa para energia. Campinas, SP: Unicamp. 2008

ENERGIAS RENOVÁVEIS. Biocombustíveis: microalgas são solução ideal: Disponível em <<http://energiasrenovaveis.wordpress.com/>>. Acesso em 30/09/2009.

FAO. Agricultural production, crops primary — Live animals in the world: Disponível em <<http://www.fao.org/>>. Acesso em 16/09/2009.

HOOGWIK, M., FAAL, A., *et al.* Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy. Biomass and Bioenergy, v.25, n.2, p.119-133. 2003.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa da Pecuária Municipal. Ano base de 2004.: Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 16/09/2009.

KAMM, B., GRUBER, P. R., *et al.* Biorefineries - Industrial Processes and Products: Status Quo and Future Directions. Weinheim: WILEY-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, v.2. 2006

KAMM, B. e KAMM, M. Biorefineries - multi product processes. Advances in biochemical engineering/biotechnology, v.105, p.175-204. 2007.

LINKO, Y. Y. e JAVANAINEN, P. Simultaneous liquefaction, saccharification, and lactic acid fermentation on barley starch. Enzyme and Microbial Technology, v.19, n.2, p.118-123. 1996.

OLADE. World energy production. Year base 2003. Energy statistic.: Disponível em <<http://www.olade.org.ec/>>. Acesso em 13 de setembro de 2009.

ORTEGA, E., WATANABE, M., *et al.* A Produção de Etanol em Micro e Mini-destilarias. 2006.

PESSOA, A., ROBERTO, I. C., *et al.* Perspectives on Bioenergy and Biotechnology in Brazil. In: (Ed.). Twenty-Sixth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals, 2005. Perspectives on Bioenergy and Biotechnology in Brazil, p.59-70

PNNL e NREL. Top Value Added Chemicals From Biomass. U. S. D. O. Energy;: U.S. Department of Commerce;. VI. Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas 2004.

REE, R. V. e ANNEVELINK, B. Status Report Biorefinery 2007. Agrotechnology and Food Sciences Group. Wageningen: November 2007.

SIMÕES, J. A oportunidade do Brasil: Produtividade e eficiência energética da cana-de-açúcar dão ao Brasil dianteira mundial em etanol; mantê-la depende de mais P&D. Inovação Unicamp. 2006.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. Estatísticas do setor florestal brasileiro: Disponível em <<http://www.sbs.org.br/>>. Acesso em 16/09/2009.