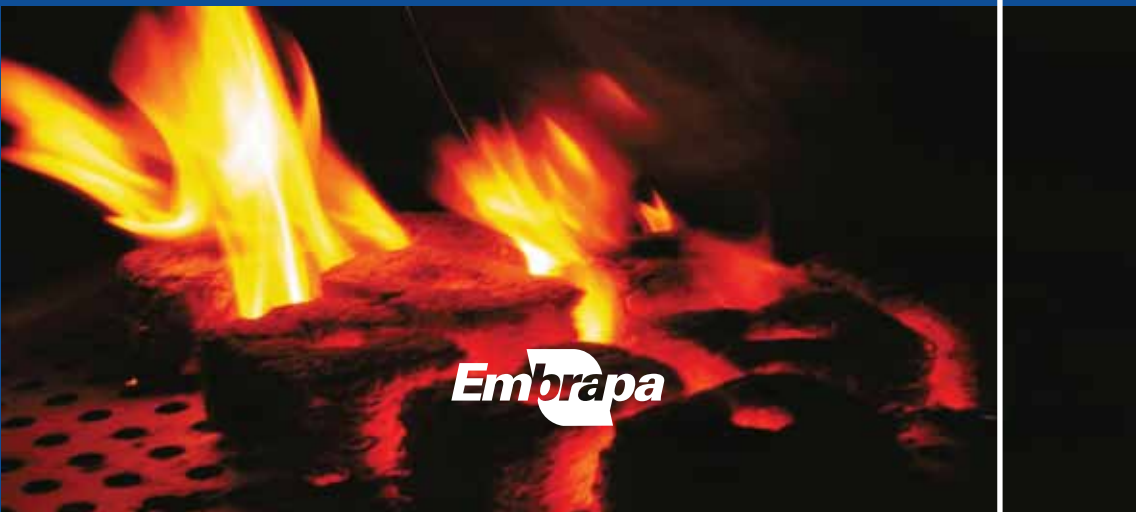




Biorrefinarias: Cenários e Perspectivas

Sílvio Vaz Jr.
Editor Técnico



Embrapa

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroenergia
Ministério Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Biorrefinarias:

Cenários e Perspectivas

Sílvio Vaz Jr.
Editor Técnico

Embrapa Agroenergia
Brasília, DF
2011

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agroenergia

Parque Estação Biológica, PqEB s/n, Brasília, DF

CEP: 70770-901

Caixa Postal: 40.315

Fone: (61) 3448-4246

Fax: (61) 3448-1589

www.cnpae.embrapa.br

sac@cnpae.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: José Manuel Cabral de Sousa Dias

Secretária-Executiva: Anna Leticia Montenegro Turtelli Pighinelli

Membros: Larissa Andreani, Leonardo Valadares e Alice Medeiros de Lima

Supervisão editorial: José Manuel Cabral de Sousa Dias

Revisão de texto: José Manuel Cabral de Sousa Dias

Normalização bibliográfica: Maria Iara Pereira Machado

Capa: Maria Goreti Braga dos Santos

Fotos da capa: FFFelfli e RGB Comunicação

Projeto gráfico e editoração eletrônica: Paulo Roberto Pereira Pinto

Impressão: Athalaia Gráfica e Editora

1ª edição

1ª impressão (2011): 500 exemplares

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Agroenergia

B 616 Biorrefinarias: cenários e perspectivas / editor
técnico Sílvio Vaz Junior. – Brasília, DF:
Embrapa Agroenergia, 2011.

176 p. ; il. color.

ISBN: 978-85-63276-02-5

Revisores técnicos: Mônica Carames Triches Damaso, José
Dilcio Rocha e Gilmar dos Santos

1. Biorrefinaria – Brasil I. Vaz Junior, Sílvio.

Alexandre Alonso Alves

Agrônomo, M.Sc. e D.Sc. em Genética e Melhoramento – Pesquisador da Embrapa Agroenergia.

Alfred Szwarc

Engenheiro Mecânico, M.Sc. em Controle de Poluição Ambiental - Consultor Técnico da União das Indústrias de Cana-de-Açúcar - UNICA.

Antonio Bonomi

Engenheiro Químico, Ph.D. em Engenharia Química - Diretor do Programa de Avaliação Tecnológica do CTBE.

Ayla Sant’Ana da Silva

Microbióloga, M.Sc. em Bioquímica – Doutoranda da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Bruno Galvêas Laviola

Agrônomo, M.Sc. e D.Sc. em Fitotecnia – Pesquisador da Embrapa Agroenergia.

Carolina A. Barcelos

Engenheira Química – Doutoranda da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Elba P. S. Bon

Bióloga, M.Sc. e Ph.D. em Engenharia Bioquímica – Professora Associada da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Hugo Bruno Correa Molinari

Agrônomo, M.Sc. em Genética e Biologia Molecular e D.Sc. em Agronomia – Pesquisador da Embrapa Agroenergia.

James Clark

Químico, Ph.D. em Química - Diretor do “Green Chemistry Centre of Excellence”, University of York, Inglaterra.

Luiz Fernando Leite

Engenheiro Químico, M.Sc. e D.Sc. em Engenharia Química - Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Marco Aurélio Pinheiro Lima

Físico, M.Sc. em Física e Ph.D. em Química - Diretor do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol – CTBE.

Mônica Caramez Triches Damaso

Engenheira Química, M.Sc. e D.Sc. em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - Pesquisadora da Embrapa Agroenergia.

Nei Pereira Jr.

Engenheiro Químico, M.Sc. em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos e Ph.D. em Biotecnologia – Professor Titular da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Paulo Coutinho

Engenheiro Químico, M.Sc. e D.Sc. em Engenharia Química - Gerente de P&D da Braskem.

Rafal Bogel-Lukasik

Engenheiro Químico, M.Sc. e Ph.D. em Química Tecnológica - Pesquisador do Laboratório Nacional de Energia e Geologia - Unidade de Bioenergia - Lisboa, Portugal.

Ricardo Sposina Sobral Teixeira

Biólogo, D.Sc. em Bioquímica – Pós-doutorando da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Sílvio Vaz Jr.

Químico, M.Sc. em Físico-Química e D.Sc. em Química Analítica – Pesquisador da Embrapa Agroenergia (silvio.vaz@embrapa.br)

Viridiana Ferreira-Leitão

Química, M.Sc. e D.Sc. em Bioquímica - Pesquisadora do Instituto Nacional de Tecnologia/MCTI.

Wesley Ambrósio

Engenheiro Químico, M.Sc. em Engenharia Química - Gerente de Tecnologias da BP Brasil.

Apresentação

A Embrapa Agroenergia é uma das 47 unidades descentralizadas da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sua missão é viabilizar soluções tecnológicas inovadoras para o desenvolvimento sustentável e equitativo do negócio da agroenergia do Brasil, em benefício da sociedade. Localizada estrategicamente em Brasília, a Embrapa Agroenergia tem a finalidade de coordenar e apoiar, no âmbito do Sistema Nacional de Pesquisa Agropecuária (SNPA), de forma a viabilizar a geração e transferência de conhecimentos e tecnologias necessárias para atender às demandas dos clientes e às políticas públicas das áreas energética, social, ambiental, agropecuária e de abastecimento. É fundamental que essas ações atendam às demandas nacional e internacional de biocombustíveis e de biomateriais, e que promovam o aperfeiçoamento contínuo dos agentes das cadeias produtivas do negócio da agroenergia.

No Brasil, as duas mais importantes cadeias produtivas do negócio da agroenergia são a de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar e a de produção de biodiesel a partir, principalmente, da soja. Ambas as cadeias já operam na lógica de biorrefinarias, fabricando outros produtos além dos biocombustíveis citados. A Embrapa Agroenergia está se organizando para uma atuação forte em PD&I e transferência

de tecnologia (TT), com o objetivo de fortalecer ainda mais essas duas cadeias produtivas. Buscamos parcerias sinérgicas para a geração de tecnologias que possibilitarão uma maior agregação de valor a essas cadeias, mediante a viabilização da produção de uma ampla gama de outros produtos a partir dos coprodutos e resíduos hoje gerados por elas.

Essas duas cadeias produtivas são, sem dúvida, as principais “estrelas” nessa “constelação” de oportunidades que a lógica de biorrefinarias oferece para a Embrapa Agroenergia e seus parceiros, mas não são as únicas. Precisamos também estar atentos a diversas outras cadeias do agronegócio brasileiro em que a grande quantidade de resíduos orgânicos eliminados safra após safra demandam um fim mais nobre. Cadeias que não têm, necessariamente, biocombustíveis como seu produto principal. Existem, no Brasil, diversas dessas cadeias produtivas, de abrangência estadual, regional ou nacional, que precisam ser avaliadas e organizadas de acordo com a lógica de biorrefinarias. O desafio é grande.

Os leitores constatarão, à medida que forem lendo os capítulos que compõem esse livro, que biorrefinaria é um tema complexo. Há desafios na organização da produção da matéria-prima para uma indústria que pode ser tanto baseada em uma única como em diversas matérias-primas. A logística da oferta dessa matéria-prima para a indústria, que precisa ser otimizada, tanto do ponto de vista temporal quanto territorial, é também complexa. Os desafios tecnológicos nas biorrefinarias encontram eco na química verde, e, sem sombra de dúvida, demandam uma ação organizada de caracterização e uso da grande biodiversidade brasileira ainda não explorada. Por fim, essa complexidade chega às

estratégias de desenvolvimento de biorrefinarias no Brasil, onde as parcerias público-privada (seja em PD&I, TT ou em produção e comercialização) precisam encontrar ambiente propício para ser erguidas.

Para nós, da Embrapa Agroenergia, esse livro, e o Simpósio que o gerou, foram os primeiros passos nessa avenida de oportunidades que a lógica da biorrefinaria e da química verde oferecem. Continuaremos promovendo a discussão do tema no Brasil e a manutenção de um diálogo profícuo tanto com a academia, quanto com o setor privado. Nosso objetivo é trabalhar com foco na solução de problemas, priorizando nossas ações para a busca de soluções para as demandas identificadas junto ao setor produtivo. Boa leitura a todos!

Manoel Teixeira Souza Jr.

Chefe Geral

Embrapa Agroenergia

O conceito de biorrefinaria é ainda recente e intui um objetivo um tanto quanto ousado: substituir produtos e processos baseados em fontes de matérias-primas não renováveis, sobretudo o petróleo, por produtos e processos que utilizem a biomassa como matéria-prima.

Neste contexto, o desenvolvimento de novas tecnologias que levem ao aproveitamento de todo o potencial econômico e energético da biomassa é de fundamental importância, devendo ser considerada, ainda, a sustentabilidade das cadeias produtivas – o que passa por uma avaliação criteriosa dos impactos ambientais, econômicos e sociais.

O Brasil é um país mundialmente conhecido por sua grande capacidade de produção de biomassa muitas vezes refletida na exportação de *commodities* agrícolas. Porém, mesmo sendo estratégica a produção e exportação de tais *commodities*, a possibilidade de agregar valor à biomassa deve ser considerada como uma oportunidade de geração de conhecimentos técnico-científicos nacionais e de minimização dos impactos ambientais.

Os setores energético e químico são os que melhor poderão aproveitar as possibilidades técnicas e econômicas das biorrefinarias. O primeiro, por meio da produção de biocombustíveis e da geração de energia elétrica; e o segundo, pela obtenção de produtos químicos de alto valor.

Este livro tem como objetivo principal mostrar, de forma clara e prática, o que são as biorrefinarias, o atual estado da arte e desafios relacionados, bem como as necessidades de políticas e de parcerias público-privadas. Seus textos baseiam-se nas apresentações e discussões realizadas durante a primeira edição do Simpósio Nacional de Biorrefinarias (SNBr) organizado no ano de 2011 pela Embrapa Agroenergia, e abrangem: matérias-primas, produtos químicos e biocombustíveis, o conceito de química verde, plataformas tecnológicas, sustentabilidade e estratégias público-privadas.

Espera-se que esta obra possa contribuir na discussão do tema das biorrefinarias e na aplicação e desenvolvimento do conceito.

Sílvio Vaz Jr.
Editor Técnico

Sumário

Autores	3
Apresentação	7
Prefácio	11

PARTE 1 - INTRODUÇÃO

1 O Potencial e a Importância das Biorrefinarias para o Brasil	17
--	----

PARTE 2 - MATÉRIAS-PRIMAS PARA BIORREFINARIAS

2 Matérias-primas Oleaginosas para Biorrefinarias	29
3 Matérias-primas Sacarinas e Lignocelulósicas para Biorrefinarias	45

PARTE 3 - CENÁRIOS, ESTADO DA ARTE E DESAFIOS TECNOLÓGICOS

4 A Usina de Cana-de-Açúcar como Exemplo de Biorrefinaria	69
5 A Indústria Brasileira de Cana-de-açúcar: um Ambiente Favorável à Introdução de Tecnologias de Produção de Etanol Lignocelulósico	81
6 Biorrefinarias: Tecnologias e Produtos Segundo a Visão da Braskem	101
7 A Importância da Química Verde para as Biorrefinarias	117
8 Química Verde com Potencial Econômico	131

PARTE 4 - ESTRATÉGIAS PÚBLICO-PRIVADAS

9 Biorrefinarias: a Visão de Futuro da ÚNICA	141
10 Considerações sobre as Estratégias Público-Privadas para o Desenvolvimento de Biorrefinarias	147

PARTE 5 - CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

11 Conclusões do Simpósio e Perspectivas para as Biorrefinarias no Brasil	169
---	-----

1

INTRODUÇÃO

O Potencial e a Importância das Biorrefinarias para o Brasil

Sílvio Vaz Jr.

O conceito de biorrefinaria no Brasil ainda é recente e, apesar de ter uma grande importância socioeconômica devido ao aproveitamento mais eficiente da biomassa, traz um grande número de questões conceituais e de cenários técnico-econômicos a ser definidos. Tais questões estão diretamente relacionadas ao entendimento do potencial da biomassa para um país, como o Brasil, que é grande produtor de matérias-primas e ao *modus operandi* mais adequado para sua discussão e para o seu completo desenvolvimento.

O potencial e a importância das biorrefinarias para o Brasil

As biorrefinarias fazem parte da agenda de PD&I da maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, como o Brasil, mobilizando esforços públicos e privados e grandes quantias de recursos voltados para o aproveitamento otimizado das matérias-primas, para agregar valor às cadeias produtivas da biomassa e reduzir possíveis impactos ambientais das mesmas.

Os conceitos de biorrefinaria e química verde enfocam este aproveitamento de modo que se tenham cadeias de valor similares àquelas dos derivados do petróleo, porém com menor impacto ao meio ambiente, contemplando sistemas

integrados (matérias-primas, processos, produtos e resíduos) sustentáveis, de acordo com parâmetros técnicos que levam em consideração, entre outros aspectos, os balanços de energia e de massa, o ciclo de vida e a redução de gases do efeito estufa. Uma biorrefinaria pode integrar, em um mesmo espaço físico, processos de obtenção de biocombustíveis, produtos químicos, energia elétrica e calor.

Os produtos químicos desenvolvidos a partir de coprodutos e resíduos são os que possuem maior potencial em agregar valor às cadeias produtivas da biomassa, em função da participação estratégica da indústria química no fornecimento de insumos e produtos finais a diversos setores da economia, como: petroquímico, farmacêutico, automotivo, da construção civil, agronegócio, cosméticos, etc. A Figura 1 destaca o potencial econômico dos produtos de uma biorrefinaria.

Como o conceito de biorrefinaria é amplo por sua própria definição e abrangente em seu potencial de aplicação industrial e econômico, podem-se destacar as pesquisas voltadas para desenvolver produtos químicos e processos a partir da desconstrução do material lignocelulósico constituinte das plantas, além de seu processamento térmico. Na desconstrução, a biomassa, após passar por diversos tipos de pré-tratamentos físicos e químicos, disponibiliza os polímeros lignina, celulose e hemicelulose. No processamento térmico, no caso da pirólise rápida, a biomassa é incinerada em presença controlada de oxigênio, fornecendo o bio-óleo e o biocarvão (*biochar*).

Segundo levantamento do *U.S. Department of Energy* (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2007), existe a possibilidade de utilização da lignina como precursor de produtos químicos, em sua maioria em alternativa aos derivados

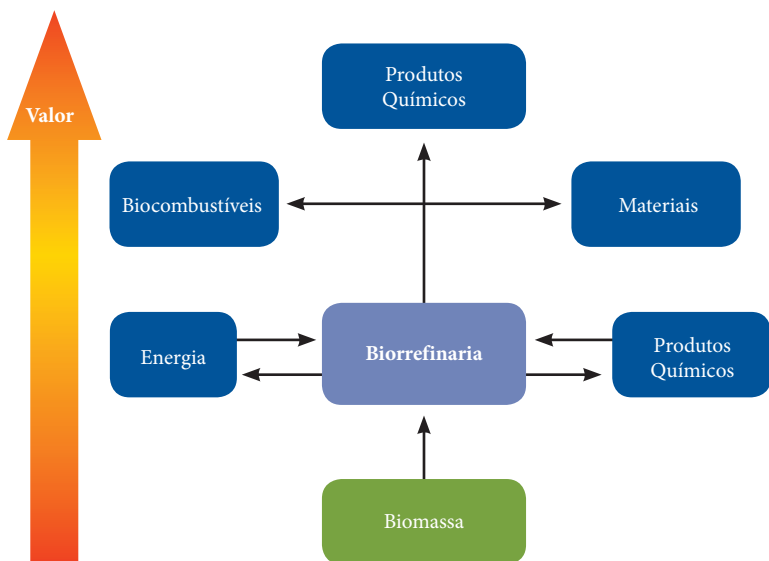


Figura 1. Diagrama do conceito de biorrefinaria apresentando o potencial de valor agregado dos produtos. Fonte: adaptado da *Sociedade Ibero-Americana para o Desenvolvimento das Biorrefinarias* (SOCIEDADE IBERO-AMERICANA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS BIORREFINARIAS, 2011).

de petróleo, a ser utilizados como antioxidantes, resinas fenólicas, solventes, agentes antivirais, agentes sequestrantes, preservantes de madeira, estabilizantes enzimáticos, controladores de vazamento de óleo, dentre outros. Cabe ressaltar que tais usos dependerão grandemente do tipo de pré-tratamento aplicado para a obtenção da lignina, já que ela possui estrutura molecular heterogênea e complexa, e do uso de catalisadores químicos.

A celulose e a hemicelulose, uma vez hidrolisadas, decompõem-se em hexoses e pentoses. Os novos produtos derivados desses açúcares também foram objeto de publicação do

DOE e revistos em artigo publicado recentemente no Reino Unido (BOZELL; PETERSEN, 2010; UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2004), tendo-se concluído que os derivados dos açúcares mencionados de maior potencial industrial são ácidos carboxílicos como ácido lático e succínico, etanol, sorbitol, entre outros de menor uso. Tais compostos poderão ser utilizados como solventes, combustíveis, monômeros para plásticos, intermediários químicos para a indústria farmacêutica e de química fina em geral.

O biocarvão, por sua vez, é um coproduto tanto de interesse agrônômico para aplicação como fertilizante de liberação controlada (SOHI *et al.* 2010), quanto ambiental, por suas possíveis aplicações na prevenção da poluição ambiental e na descontaminação de corpos d'água e de solo impactados por metais tóxicos (MOHAN *et al.*, 2007). O bio-óleo, por sua vez, poderá ser utilizado como combustível em substituição aos óleos derivados do petróleo para a produção de calor e geração de energia, com um menor impacto ambiental.

Cabe ressaltar, ainda, a possibilidade de uso da glicerina, o principal coproduto da produção do biodiesel, como matéria-prima para a obtenção de *commodities* químicas e de antioxidantes e que, assim como no caso da lignina, este aproveitamento depende do uso de catalisadores químicos (MOTA *et al.*, 2009). A alcoolquímica, que utiliza principalmente o etanol como matéria-prima para a obtenção de produtos químicos, como eteno, propeno, buteno, etilenoglicol e propilenoglicol, também pode compor uma biorrefinaria. Soma-se a estas vertentes tecnológicas a oleoquímica, que utiliza óleos e gorduras vegetais e animais para a obtenção de ácidos graxos, ésteres como o biodiesel, amidas, polímeros e resinas (FAIRBANKS, 2003; SUAREZ *et al.*, 2007).

Vaz Junior (2010) observa que a importância do uso da biomassa para a obtenção de insumos químicos renováveis é evidente, cabendo estabelecer rotas químicas e métodos que viabilizem esse aproveitamento. Soma-se a isto o fato de que a diversificação de produtos a ser obtida certamente impactará de forma positiva a indústria química e o setor agroenergético, repercutindo em grandes benefícios para a sociedade.

Desta forma, as possibilidades advindas do desenvolvimento das biorrefinarias apontam para enorme potencial econômico de tais instalações no Brasil, país que ainda possui grande deficiência tecnológica em setores químicos e afins, refletida na balança comercial (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA, 2011), apesar de ocupar posição de destaque no agronegócio e na produção de biocombustíveis, além de possuir uma matriz energética de forte caráter renovável. Abre-se, portanto, uma nova fronteira tecnológica e econômica para o agronegócio e para a química, devendo o país estar atento e preparado a participar de forma efetiva, e não de forma secundária ou periférica.

O Simpósio Nacional de Biorrefinarias como fórum de discussão para o desenvolvimento tecnológico da cadeia da biomassa

O Simpósio Nacional de Biorrefinarias (SNBr) é um projeto permanente que tem por objetivo acompanhar o desenvolvimento do tema no Brasil e no mundo, segundo a perspectiva de importância para a Embrapa Agroenergia e para o Brasil, através do envolvimento, bianual, de profissionais, instituições e empresas que estejam diretamente relacionados

e comprometidos com as biorrefinarias e com as ciências e tecnologias afins.

Os assuntos abordados dizem respeito aos cenários nacionais e mundiais das biorrefinarias, à importância da química verde para as biorrefinarias, aos esforços da Embrapa relacionados ao tema, ao potencial econômico das biorrefinarias, aos desafios técnico-científicos, às estratégias públicas e privadas, e à sustentabilidade dos processos produtivos da cadeia da biomassa. A partir da definição apresentada na Figura 1, o SNBr busca responder a questões como:

- *Qual é o cenário atual e futuro das biorrefinarias em nível mundial?*
- *Qual é o cenário atual e futuro das biorrefinarias em nível nacional?*
- *Quais são os principais desafios técnicos e econômicos a serem superados?*
- *Quais as rotas tecnológicas e os produtos de maior potencial econômico?*
- *As biorrefinarias são renováveis e sustentáveis?*
- *Quais as estratégias público-privadas necessárias para o desenvolvimento das biorrefinarias no Brasil?*

A organização de eventos técnico-científicos dedicados ao estabelecimento de parcerias entre instituições de pesquisa e o setor produtivo é uma ferramenta de grande relevância,

pois permite, além de discutir os desafios, apresentar problemas e propor soluções, baseando-se em uma avaliação criteriosa dos cenários técnicos e econômico atuais.

Apesar do Brasil já contar com um número considerável de eventos de qualidade relacionados à área de bioenergia e/ou agroenergia, um simpósio brasileiro voltado exclusivamente para a discussão das biorrefinarias deve ser visto como inovador, podendo oferecer grande repercussão e destaque nacional e internacional aos produtos dele obtidos, como parcerias que estimulem o desenvolvimento tecnológico aplicado à biomassa e às biorrefinarias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. ABIQUIM. **A indústria química: balança comercial.** Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/conteudo.asp?princ=ain&pag=balcom>>; Acesso em: out. 2011.

BOZELL, J.J.; PETERSEN, G.R. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates – the U.S. Department of Energy’s “Top 10” revisited. **Green Chemistry**, v. 12, p. 539-554, 2010.

FAIRBANKS, M. Mercado graxo: origem natural garante evolução de negócios. **Química e Derivados**, n. 419, p. 12-15, 2003.

MOHAN, D.; PITTMAN-JUNIOR; C.U.; BRICKA, M.; SMITH, F.; YANCEY, B.; MOHAMMAD, J.; STEELE,

P.H.; FRANCO, M.F.A.; GÓMEZ-SERRANO, V.; GONG, H. Sorption of arsenic, cadmium, and lead by chars from fast pyrolysis of wood and bark during bio-oil production. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 310, p. 57-73, 2007.

MOTA, C. J.A.; DA SILVA, C.X.A.; GONÇALVES, V.L.C. Glicerquímica: novos produtos e processos a partir da glicerina de produção de biodiesel. **Química Nova**, v. 32, p. 639-648, 2009.

SOCIEDADE IBERO-AMERICANA PARA O DESENVOLVIMENTO DAS BIORREFINARIAS. SIADEB. Disponível em: <<http://www.siadeb.org/pt/BrochuraSIADEB-PT.pdf>>. Acesso em: out. 2011.

SOHI, S.P.; KRULL, E.; LOPEZ-CAPEL, E.; BOL, R.A Review of biochar and its use and function in soil (Chapter 2). **Advances in Agronomy**, v. 105, p. 47-82, 2010.

SUAREZ, P.A.Z.; MENEGHETTI, S.M.P.; WOLF, C.R. Transformação de triglicerídeos em combustíveis, materiais poliméricos e insumos químicos: algumas aplicações da catálise na oleoquímica. **Química Nova**, v. 30, p. 667-676, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Top value-added chemicals from biomass. Volume II: results of screening for potential candidates from biorefinery lignin**. Springfield, 2007.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Top value-added chemicals from biomass. Volume I – results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas.** Springfield, 2004.

VAZ JUNIOR, S. **Uso dos coprodutos e resíduos de biomassa para obtenção de produtos químicos renováveis.** Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2010. 4 p. il. color. (Embrapa Agroenergia. Circular técnica, 002).

2

MATÉRIAS-PRIMAS PARA BIORREFINARIAS

Matérias-primas Oleaginosas para Biorrefinarias

*Bruno Galvêas Laviola
Alexandre Alonso Alves*

A demanda mundial por combustíveis e produtos químicos obtidos de fontes renováveis tem se expandido de forma muito rápida nos últimos anos, e deverá acelerar-se ainda mais, principalmente nos países em fase de desenvolvimento econômico, como o Brasil.

O Brasil é um país com grande potencial na produção de biocombustíveis e de outros derivados de óleos vegetais para atender tanto ao mercado nacional quanto ao mundial. Possui localização privilegiada na região tropical, com alta incidência de energia solar, regime pluviométrico adequado e conta com grandes reservas de terras, o que possibilita planejar o uso agrícola em bases sustentáveis, sem comprometer os grandes biomas terrestres. Existem, no Brasil, cerca de 90 milhões de hectares de terras disponíveis para expansão agrícola, sem considerar a existência de 210 milhões de hectares de pastagens com algum grau de degradação, que, pela aplicação de tecnologia, podem ser recuperadas e usadas na produção de alimentos e biocombustíveis. Além disto, existem no país mais de 200 espécies vegetais que produzem óleo em frutos e grãos, com diferentes potencialidades e adaptações naturais a condições edafoclimáticas, que podem ser usadas para produção de biocombustíveis ou outros fins de maior valor agregado.

O desafio é aproveitar ao máximo as potencialidades regionais e obter o maior benefício social da produção do biodiesel, aplicando a tecnologia tanto às culturas tradicionais quanto às novas oleaginosas a ser exploradas.

Os desafios e as estratégias de desenvolvimento das biorrefinarias no Brasil passam pelos gargalos técnico-científicos em produção de matérias-primas, processamento industrial e integração com cadeias produtivas regionalizadas. Tomando-se como exemplo o biodiesel, em março de 2011, cerca de 86% desse biocombustível era produzido a partir de óleo de soja. A gordura bovina era a segunda maior fonte, com 13,82%, e a seguir o algodão era a matéria-prima com maior participação na produção do biodiesel, com apenas 0,80%. As demais oleaginosas são agrupadas e representavam uma contribuição de aproximadamente 1% na cadeia de produção do biodiesel (Figura 1).

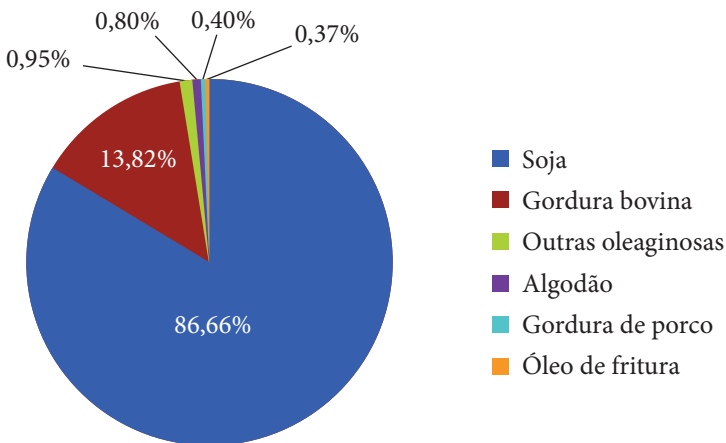


Figura 1. Participação de matérias-primas na matriz energética nacional da produção de biodiesel (ANP, mês de referência março/2011).

Situação atual das matérias-primas com domínio tecnológico

As oleaginosas com domínio tecnológico, como soja, algodão e girassol, apresentam, em geral, rendimento de óleo abaixo de 1.000 kg de óleo por hectare (Tabela 1). Uma exceção diz respeito à palma de óleo ou dendê (*Elais gunieensis*) que apresenta elevada produtividade por hectare associada a elevado rendimento de óleo, cujo cultivo está restrito a condições edafoclimáticas específicas do país. Para as oleaginosas com domínio tecnológico as ações governamentais são de fortalecimento das cadeias produtivas para promover aumento das áreas plantadas visando, principalmente, o abastecimento das plantas de biodiesel nas diferentes regiões do país.

Soja

Apesar de ser uma oleaginosa de baixa densidade energética, a soja (*Glycine Max*) é a única dentre as oleaginosas tradicionais que atende na totalidade os três parâmetros básicos de um programa com dimensões do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) (LAVIOLA; ALVES, 2011), que são:

- a) **domínio tecnológico** - o Brasil é um dos países líderes no desenvolvimento de pesquisas e geração de conhecimento na produção de soja tropical (o que permitiu, por exemplo, a produção da oleaginosa com dependência mínima de fertilizantes nitrogenados pela melhoria da eficiência simbiótica entre soja e bactérias fixadoras de nitrogênio);

- b) **escala de produção** - atualmente menos de 20% da produção de soja é suficiente para atender as demandas correntes do programa de biodiesel. Outras oleaginosas, como algodão, girassol e mamona, não possuem volume suficiente na produção de matéria-prima para suportar um programa com 5% de mistura de biodiesel ao diesel fóssil;
- c) **logística** - representa a distribuição espacial da produção de matéria-prima ao longo do país, sendo a soja uma das únicas matérias-primas com produção em todas as regiões brasileiras.

Embora essas características façam da soja, atualmente, a principal matéria-prima do PNPB, é importante ressaltar que são necessários a busca e o desenvolvimento contínuo de outras oleaginosas com maior adensamento energético, considerando questões relacionadas à diversificação e regionalização, como pode ser observado nos dados de produtividade e produção apresentados na Tabela 1.

Palma de óleo (dendê)

Das oleaginosas em que se detém domínio tecnológico, a palma de óleo ou dendê (*Elaies guineenses*) é a espécie que apresenta maior produtividade de óleo, que pode chegar a 5.000 kg de óleo por hectare por ano. Ainda que no Brasil a maior produção de óleo provenha da soja, o óleo de dendê representa a maior produção no mundo. Na produção do biodiesel brasileiro, apesar das potencialidades da palma de óleo,

a oleaginosa ainda contribui com participação irrisória. Em função disso, o Governo Federal lançou o Programa Nacional de Produção Sustentável de Palma de Óleo (OLIVEIRA; RAMALHO, 2006; MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2010) que estimula o plantio da espécie, regulamenta sua expansão e estabelece o zoneamento agroecológico e econômico desta oleaginosa no Brasil. O programa tem por objetivo disciplinar a expansão da produção de óleo de palma e ofertar instrumentos para garantir a produção em bases sustentáveis. As regras para expansão preveem o plantio apenas em áreas antropizadas, o que restringe o plantio a 86 % das áreas aptas do ponto de vista agroecológico; proíbe, ainda, a derrubada de vegetação nativa e direciona o plantio de dendê para a recuperação de áreas degradadas.

Tabela 1. Características técnicas das principais matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel no Brasil. Fonte: Laviola e Alves (2011).

Matéria-prima	% óleo	Produtividade (kg ha⁻¹)	Produção de óleo (kg ha⁻¹)
Soja	18	3.000	540
Algodão	20	1.900	360
Girassol	42	1.500	630
Amendoim	45	1.800	800
Dendê	20	20.000	4.000
Mamona	47	1.500	705
Canola	40	1.300	500
Dendê	20	20.000	4.000

Matérias-primas potenciais

Como orienta o Plano Nacional de Agroenergia (OLIVEIRA; RAMALHO, 2006), as pesquisas devem buscar novas fontes de matérias-primas com maior adensamento energético, objetivando um acréscimo do rendimento em óleo do nível atual de 350-600 kg ha⁻¹ para até 5.000 kg ha⁻¹. Deve-se considerar, ainda, a regionalização. Ou seja, produzir as oleaginosas mais adequadas a cada região do país. Estas ações visam proporcionar competitividade crescente ao biodiesel, especialmente se for considerado que cerca de 40 a 60% do custo de produção do biodiesel advém das matérias-primas. Como no Brasil existe uma grande diversidade de matérias-primas alternativas com potencial para produção de biodiesel e biomassa para cogeração de energia, é notória a oportunidade de desenvolvimento de novas tecnologias para a produção de combustíveis a partir dessas matérias-primas. Para transformar a possibilidade em realidade, são necessários investimentos constantes em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I).

Dentre as oleaginosas potenciais, destacam-se o pinhão-manso (*Jatropha curcas*, L.) e as palmeiras nativas, como a macaúba (*Acrocomia aculeata*, Jacq), o tucumã (*Astrocaryum urumuru*, Mart), o babaçu (*Orbignya phalerata*, Mart.) e o inajá (*Maximiliana maripa*) (Figura 2). Tem sido demonstrado que estas espécies têm grande potencial como matéria-prima para a produção de biodiesel, tanto em função das maiores produtividades previstas de óleo (Tabela 2) como em função da aptidão agroclimática, que aponta possibilidade de expansão dos plantios sem comprometer as áreas atualmente cultivadas com culturas tradicionais e/ou alimentícias.

Tabela 2. Características técnicas das principais matérias-primas potenciais para a produção de biodiesel no Brasil. Fonte: Laviola e Alves (2011).

Matéria-prima	% óleo	Produtividade potencial de grãos ou frutos (kg ha⁻¹)	Produção de óleo (kg ha⁻¹)
Pinhão Manso	35	4.500	1.500
Macaúba	20	20.000	4.000
Inajá	20	17.500	3.500
Tucumã	20	12.000	2.400
Babaçu*	5	10.000	500

* Considerando o principal uso para cogeração de energia.

Em um país continental como o Brasil, com elevada diversidade de solos, climas e biomas, as pesquisas com as espécies potenciais devem ser regionalizadas. Nesse contexto, destaca-se que o pinhão-manso está presente em quase todas as regiões brasileiras, apresentando ampla adaptabilidade ambiental e deverá ser uma opção para região central do Brasil.

A palmeira macaúba está distribuída em toda a região central do Brasil e apresenta-se como opção para expansão da produção de biocombustíveis e derivados de óleos vegetais no cerrado, em sistemas de produção sustentáveis. Pode ser usada, inclusive, em arranjos produtivos que permitam a produção de alimento e matéria-prima para fins energéticos em uma mesma área.

Já as palmeiras inajá e tucumã são opções para a região norte do Brasil, onde existem amplos maciços que podem ser explorados por extrativismo de forma sustentável. O babaçu,









Figura 2. Matérias-primas potenciais para produção de óleos vegetais e seus derivados: **A e B.** plantas e frutos de pinhão manso (Autor: Bruno Laviola, Embrapa Agroenergia); **C e D.** plantas em maciços e frutos de macaúba (Autor: Sergio Motoike, UFV); **E.** Tucumã (Autor: Maria do Socorro Padilha de Oliveira, Embrapa Amazonia Oriental); **F.** Babaçú (Autor: Eugênio Celso Emérito Araújo, Embrapa Cocais); **G e H.** plantas e frutos de Inajá (Autor: Otoniel Ribeiro Duarte, Embrapa Roraima).

por sua vez, tem ampla distribuição em regiões do nordeste e seu uso poderá contribuir com o programa de biodiesel e a cogeração de energia na forma de carvão vegetal em sistema de produção integrada.

Para que estas espécies possam ser domesticadas e, posteriormente utilizadas, por exemplo, no contexto do PNPB, é necessário o desenvolvimento de pesquisas em (i) melhoramento genético para explorar racionalmente a diversidade

genética destas espécies; (ii) sistemas de produção sustentáveis; e (iii) processos agroindustriais, visando à melhor eficiência na extração e qualidade do óleo vegetal obtido. O programa de PD&I para a domesticação de novas espécies deve promover a consolidação de redes de competências público-privadas, em âmbito nacional e internacional, com metas programadas para curto, médio e longo prazo. A adoção de espécies potenciais deve ser considerada na elaboração de políticas públicas e nos programas de governo para a agroenergia, de forma a garantir a continuidade das pesquisas, que devem ser focadas no uso eficiente e eficaz da espécie e dos sistemas associados à produção do óleo, de coprodutos e resíduos, considerando a oportunidade de desenvolvimento local, regional e nacional.

Outra questão importante a ser considerada em paralelo ao domínio tecnológico é o conceito de arranjos produtivos locais no entorno de plantas industriais de biodiesel. Em muitos casos, o centro de fornecimento de matéria-prima está distante do centro de transformação, o que eleva os custos e aumenta os riscos à sustentabilidade. Os arranjos produtivos locais devem ser organizados visando a garantir e potencializar a logística e o suprimento da matéria-prima nas diversas fases da produção além de envolver os distintos atores associados ao sistema produtivo (produtores, comunidades, associação e instituições de capacitação).

Embora o foco deste texto seja o uso de novas fontes de matérias-primas para a produção de biodiesel, é preciso considerar que o mercado de óleos é bastante dinâmico, com diversas aplicações e níveis de valorização econômica, o que remete ao conceito de biorrefinarias. Os óleos produzidos pelas espécies abordadas neste capítulo apresentam propriedades

físico-químicas que podem ser interessantes, por exemplo, às indústrias de lubrificantes, produtos farmacêuticos ou cosméticos, com maior valorização econômica. Mesmo para o mercado de biocombustíveis, recentemente tem crescido o interesse em produzir óleo para atender a produção de bioquerosene, seja com amplitude nacional ou internacional. Até o momento, não existe no Brasil regulamentação para o uso de bioquerosene, mas é sabido que no mundo estão sendo discutidas metas de mistura de bioquerosene com o objetivo de atenuar os efeitos nocivos da emissão de carbono pela queima do querosene, principalmente aquela utilizada pela aviação. No ano de 2010 foi realizado com sucesso um voo comercial da empresa aérea brasileira TAM com o uso da mistura de 50% bioquerosene de pinhão-mansão em uma de suas turbinas. De acordo com os resultados divulgados na mídia, o uso do biocombustível proporcionou menor aquecimento médio da turbina e uma economia de combustível de 2%, o que poderia levar a empresa a deixar de queimar 44 milhões de litros de querosene de petróleo por ano (JORNAL DA GLOBO, 2010).

Considerações finais

Nos próximos anos, e em caráter irreversível, a participação dos biocombustíveis na matriz energética brasileira e global aumentará gradativamente. O biodiesel possui papel importante não só por diversificar a matriz energética, mas também por equacionar questões como a distribuição de renda e a segurança ambiental. A soja é, atualmente, a oleaginosa com maior participação na cadeia de produção do biodiesel, com esta supremacia continuando nos próximos anos. Em

cenários futuros, com aumento das misturas de biodiesel no diesel (B10, B20, ...) tornar-se-á fundamental a utilização de matérias-primas de maior densidade energética, e do desenvolvimento tecnológico destas para dar suporte à incorporação na matriz energética do biodiesel e outros biocombustíveis. A palma de óleo e as espécies alternativas, como pinhão-manso e palmeiras nativas (macaúba, tucumã, babaçu e inajá), em função das maiores produtividades potenciais e das aptidões edafoclimáticas, são ótimas opções para atender as demandas quantitativas e ecoregionais de óleo. Obviamente, este potencial só se transformará em realidade se forem realizados investimentos significativos e constantes em pesquisa e desenvolvimento destas culturas e das tecnologias relacionadas, para que se tornem não apenas alternativas viáveis, mas também soluções sociais, ambientais e econômicas para um país em ascensão e para acomodar a mudança global de comportamento socioambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LAVIOLA, B. G. ; ALVES, A. A. Matérias-primas potenciais para a produção de biodiesel: situação atual e perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL - SIMBRAS, 3., 2011, Viçosa, MG. **O uso de tecnologias limpas e agroenergia**. Viçosa, MG: Arka Editora, 2011. p.17-47. Organizadores: Lana, R. P.; Guimarães, C.; Lima, G. S.; Veloso, C. M.; Patino, H. O.

JORNAL DA GLOBO, Acessado em: Disponível em: <http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2010/11/aviao-parcialmente-abastecido-com-bioquerosene-voa-no-rio-de-janeiro.html?utm_source=twitterfeed&utm_medium=twitter>. Acesso em: 17 out. 2011.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Palma de Óleo - Programa de Produção Sustentável, Brasília (DF), 2010. 12 p.

OLIVEIRA, A. J. de; RAMALHO, J. (Coord.). **Plano Nacional de Agroenergia**: 2006 - 2011. 2. ed. rev. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110 p.

Matérias-primas Sacarinas e Lignocelulósicas para Biorrefinarias

*Hugo Bruno Correa Molinari
Ayla Sant'Ana da Silva
Ricardo Sposina Sobral Teixeira
Carolina A. Barcelos
Nei Pereira Jr.
Elba P. S. Bon
Viridiana Ferreira-Leitão*

O Brasil e os Estados Unidos são os líderes mundiais na produção de etanol. No Brasil, a produção de etanol está baseada na fermentação alcoólica da sacarose presente no caldo da cana-de-açúcar. Já nos Estados Unidos, o amido de milho é hidrolisado enzimaticamente a glicose, que é fermentada a etanol pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Em ambos os casos, as tecnologias e os mercados já são maduros e consolidados. O etanol produzido a partir desses processos é também conhecido como “etanol de primeira geração” (1G), enquanto processos que utilizem a matéria-prima lignocelulósica resultam no chamado “etanol de segunda geração” (2G).

Em 2010, os Estados Unidos alcançaram uma produção recorde de 51 bilhões de litros de etanol (RFA, 2011), enquanto no Brasil as previsões indicam que em 2011 o Brasil terá uma produção de 27 bilhões de litros (CONAB, 2011a). Apesar de a produção brasileira ser, atualmente, inferior à americana, é importante destacar que o Brasil produz o etanol mais

competitivo do mundo (US\$ 35/barril). Além disso, o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar apresenta um balanço energético 7 vezes superior ao etanol de milho (PERRONE *et al.*, 2011).

Os principais produtos do setor sucroenergético são o álcool, o açúcar e a bioeletricidade. Em um cenário em que a produção de etanol lignocelulósico seja uma realidade comercial, essa tecnologia será complementar àquela já existente e consolidada, beneficiando-se ainda da energia gerada internamente à usina.

Embora o pacote tecnológico da produção de etanol de biomassa necessite de investimentos importantes, o seu estabelecimento significaria uma diversificação estratégica para o agronegócio da cana-de-açúcar. A diversidade de produtos possíveis, incluindo produtos de maior valor agregado, impulsionaria a área química, com o desenvolvimento de bioprodutos, via fermentação, e substituintes de derivados do petróleo, via síntese química, através do conceito de biorrefinarias.

Cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar seguido por Índia, Tailândia e Austrália (UNICA, 2011). Segundo o IBGE, a produção de cana dividida por região do país indica que o Norte-Nordeste representa 15% da produção total e a região Centro-Sul concentra a maior parte da produção correspondendo a 85%, sendo que somente o Estado de São Paulo é responsável por mais de 60% da safra nacional.

Em um hectare de terras agricultáveis no Brasil é possível colher aproximadamente 80 toneladas de cana-de-açúcar, e a

partir de uma tonelada o rendimento de açúcar é de 143 kg e a produção de 80 litros de etanol (CONAB, 2011a). Aproximadamente, 50,1% do rendimento anual de cana-de-açúcar são utilizados para produzir etanol, e 49,9% é destinada a produção de açúcar (Valdes, 2007).

Para a safra 2010/2011 a área colhida de cana-de-açúcar está estimada em 8.091,5 milhões de hectares, com produtividade média de 82.103 kg ha⁻¹, 0,6% a mais que a safra de 2009/2010. Do total de cana esmagada (301.517 mil toneladas) 45,4% foram destinados a produção de açúcar, o que equivale a 38.667 mil toneladas de açúcar e 54,6% destinados à produção de 28,5 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2011a). De acordo com Neves e Conejero (2007), um panorama geral brasileiro do setor sucroalcooleiro realizado em 2006 mostra que o agronegócio é responsável por 28% do Produto Interno Bruto (PIB) e a cana-de-açúcar responsável por 7,5% do PIB brasileiro, gerando mais de 4 milhões de empregos diretos e indiretos.

Na região Centro-Sul a produção de cana-de-açúcar ocorre predominantemente entre os meses de maio e novembro, e na região Nordeste entre setembro e março. Devido à topografia da região Centro-Sul, a colheita de cana-de-açúcar pode ser mecanizada. A primeira cana-de-açúcar, chamada de cana-planta, é colhida 18 meses após o plantio (VALDES, 2007). Os demais cortes, realizados na cana-soca, resultante da rebrota, são feitos uma vez por ano e normalmente se estendem por cerca de 5 anos com redução gradual de produtividade. Passado o período em que a cana-soca é viável economicamente, o canavial é reformado, normalmente com o plantio de uma variedade mais produtiva e iniciando um novo ciclo

de produção. Uma parte da cana-de-açúcar total produzida pode ser destinada à reforma do canavial, cerca de 8%, o que indica que a produção anual de cana-de-açúcar efetivamente processada é inferior a produção anual de cana colhida (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2008).

A colheita da cana-de-açúcar ainda é realizada (em 70% de área cultivada) com a queima prévia do canavial e subsequente corte manual da cana inteira. Devido a restrições ambientais à prática da queima e a acordos entre o governo e os produtores, aos poucos o procedimento de queima está sendo substituído pela colheita mecanizada. Espera-se que até 2020 toda colheita da cana seja feita de maneira mecanizada (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2008).

O Brasil possui 437 unidades de processamento de cana-de-açúcar, incluindo usinas produtoras somente de açúcar, usinas produtoras somente de etanol e unidades mistas que corresponde a 253 estabelecimentos (BRASIL, 2011). As usinas instaladas em regiões mais ocupadas (como o Estado de São Paulo) têm a capacidade de processar entre 1,5 e 2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra. Em regiões pouco ocupadas a capacidade de esmagamento é maior, atingindo de 3 a 4 milhões de toneladas. O custo da terra e a distância da área de colheita são menores em São Paulo, porém as novas usinas levam a maiores custos de transporte para levar os produtos finais aos consumidores (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2008).

Podemos separar didaticamente a cana-de-açúcar em três frações ou produtos de importância econômica, quais sejam:

bagaço, caldo, e palhada e ponteiros. A produção atual de açúcar e etanol provém do caldo, que corresponde a um terço do potencial energético da planta. O coproduto da extração do caldo é o bagaço, que corresponde a outro terço deste potencial. Trata-se de uma biomassa heterogênea, com variação em suas composição e estrutura morfológica. Cerca de 90% do bagaço total é utilizado na geração de energia elétrica e vapor. Estudos vêm sendo conduzidos visando utilizar o bagaço excedente para a produção de etanol lignocelulósico. Palhada e ponteiros, que correspondem ao último terço, não são recuperadas atualmente. Se aproveitadas, 70% de palhada e ponteiros podem ser utilizadas na produção de energia elétrica e calor, assim como na produção de bioetanol a partir de material lignocelulósico. Os 30% excedentes devem ser deixadas no campo, com vantagens agronômicas como: auxiliar no controle de ervas daninha e aumentar a fertilidade do solo (INSTITUTO EUVALDO LODI, 2008).

O caldo obtido da moagem do colmo pode ser destinado à produção de açúcar ou etanol. Mantelatto (2005) compilou uma série de dados sobre características e composição da cana-de-açúcar. De acordo com estes dados, ela possui de 10 a 16% de sólidos solúveis, encontrados em sua grande maioria no caldo. Destes sólidos solúveis, de 75 a 93% correspondem a açúcares, incluindo os açúcares redutores glicose e frutose, que não são interessantes para a produção de açúcar, mas podem ser utilizados para a produção de bioetanol.

No processo de produção de açúcar são formados a torta de filtro e o melaço ou mel final. A torta de filtro é resultante da decantação de impurezas do caldo tratado quimicamente e é utilizada como fertilizante. Cerca de 40 kg de torta de filtro

úmida resultam do processamento de uma tonelada de cana. No processo de cristalização nem toda sacarose é convertida em açúcar, resultando em uma mistura residual denominada melaço, que ainda contém sacarose e é rica em açúcares redutores (glicose e frutose), podendo ser utilizada para a produção de bioetanol (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2008).

A produção de etanol se baseia na fermentação direta tanto do caldo quanto de misturas de caldo e melaço de cana, sendo esta última prática mais frequentemente utilizada no Brasil. O caldo previamente tratado é misturado ao melaço e evaporado para ajustar a concentração de açúcares dando origem ao mosto, que está pronto para ser fermentado. Na fermentação, ocorre a conversão dos açúcares em etanol por meio da ação de leveduras da espécie *Saccharomyces cerevisiae*. Durante o tempo de fermentação, que varia de 4 a 10 horas, ocorre a liberação de dióxido de carbono e a formação de subprodutos como alcoóis superiores, aldeídos e glicerol. Ao término da fermentação ocorre a formação do vinho fermentado, que contém de 7% a 10% (em volume) de etanol. O etanol presente no vinho é concentrado por destilação originando o etanol hidratado e um subproduto denominado vinhaça. Esta é produzida no processo de destilação em uma proporção de 13 L para cada litro de etanol produzido, e é constituída principalmente de água, sais, sólidos em suspensão e solúveis. A vinhaça é utilizada como fertilizante na produção da cana-de-açúcar. O etanol hidratado ainda pode sofrer desidratação e originar o etanol anidro, utilizado como aditivo na gasolina.

O bagaço vem sendo utilizado como fonte de energia para atender a demanda energética nas usinas produtoras de açúcar

e/ou etanol. O bagaço consiste em cerca de 46% de água, 50% de sólidos insolúveis e 4% de açúcares solúveis. A partir de uma tonelada de cana-de-açúcar são obtidos de 240 kg a 280 kg de bagaço. O calor liberado pela combustão do bagaço nas caldeiras produz vapor de alta pressão, que é utilizado em turbinas a vapor para gerar energia elétrica e acionamentos mecânicos. Esta tecnologia é denominada cogeração e é aplicada nas usinas visando à autossuficiência energética.

Sorgo como cultura energética

O sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) é originário da África e situa-se em quinto lugar entre os cereais mais plantados no mundo, depois do trigo, arroz, cevada e milho (SHEWALE; PANDIT, 2009). É utilizado como principal fonte de alimento em grande parte dos países da África, Sul da Ásia e América Central, já que mais de 40% da produção mundial é usada para o consumo humano (ROONEY; WANISKA, 2000). É também um importante componente da alimentação animal nos Estados Unidos, Austrália e América do Sul (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2008).

A capacidade do sorgo de adaptar-se a uma ampla gama de ambientes, e, principalmente, sob condições de deficiência hídrica que são desfavoráveis à maioria de outros cereais, tornou essa cultura popular em muitas partes do mundo (WILLIAMS *et al.*, 1999). Além disso, diversas vantagens podem ser atribuídas à cultura do sorgo, entre elas: (i) é uma cultura de ciclos mais curtos (cerca de 90 dias), necessita de 33 a 50% menos água que a cana-de-açúcar; (ii) é resistente ao estresse hídrico e encharcamento; (iii) apresenta baixo

requerimento de fertilizantes; (iv) é resistente à toxicidade, salinidade e acidez do solo; (v) pode ser cultivado junto a pequenos e médios produtores na rotação de culturas, uma vez que o cultivo é semelhante ao do milho, podendo ser manual ou mecanizado; (vi) pode ser cultivado tanto em zonas temperadas como em tropicais; (vii) possui alta produção de massa verde (28,6 a 137,7 ton ha⁻¹) e massa seca (8,9 a 39,5 ton ha⁻¹), quando comparada com a do milho (29,4 a 59,4 ton ha⁻¹ de massa verde e 11,4 a 23 ton ha⁻¹ de massa seca); (viii) é uma das plantas mais eficientes fotossinteticamente (usa o ciclo C4); e (ix) alguns híbridos atingem a maturidade em menos de 75 dias e podem fornecer três colheitas por ano (PAZIANI; DUARTE, 2006; ESTADOS UNIDOS, 1996).

O sorgo é uma cultura 100% mecanizável e em sua exploração podem ser utilizados os mesmos equipamentos de plantio, cultivo e colheita utilizados para outras culturas de grãos como a soja, o arroz e o trigo. Por outro lado, a cultura pode ser também conduzida manualmente com boa adaptação a sistemas utilizados por pequenos produtores (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2008).

Agronomicamente, os sorgos são classificados em quatro grupos: (i) granífero; (ii) forrageiro para silagem e/ou sacarino; (iii) forrageiro para pastejo, corte verde, fenação e cobertura morta; e (iv) vassoura.

Dos quatro grupos, o sorgo granífero é o que tem maior expressão econômica (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2008). A produção mundial de grãos de sorgo foi estimada em cerca de 60 milhões de toneladas na safra de 2009/10 (USDA, 2011). Segundo a CONAB (2011b), a área destinada ao cultivo de sorgo granífero no Brasil totalizou 698 mil ha na safra de 2009/10,

sendo que a região centro-oeste representa 56,9%, seguido da região Sudeste com 21,4% da área plantada total do país. Dentre os estados brasileiros, Goiás se destaca como o maior produtor, com um total de 601 mil toneladas na safra de 2009/10, seguido de Minas Gerais (305), Mato Grosso do Sul (172) e São Paulo (154). O potencial de rendimento dos grãos de sorgo pode ultrapassar 10 ton ha⁻¹ e 7 ton ha⁻¹, em condições favoráveis no verão e em plantios de sucessão, respectivamente.

O sorgo forrageiro apresenta-se alto, chegando a dois metros, com muitas folhas, panículas abertas e com poucas sementes, estando adaptado ao Agreste e Sertão de Alagoas e regiões similares. É também conhecido como silageiro devido ao seu uso para a produção de silagem. O sorgo vassoura apresenta como característica principal a panícula na forma de vassoura. Tem importância regionalizada, principalmente no Sul do Brasil e no interior de São Paulo onde é usado na fabricação de vassouras e também como produto artesanal (GOVERNO DE ALAGOAS, 2010).

O sorgo sacarino, originário do Sudão, é uma cultura rústica com aptidão para cultivo em áreas tropicais, subtropicais e temperadas. Apresenta ampla adaptabilidade, tolerância a estresses abióticos e pode ser cultivado em diferentes tipos de solos (EMYDIO, 2010). O sorgo sacarino vem recebendo especial destaque dentre as diversas matérias-primas renováveis disponíveis para produção de etanol. Seus grãos (ricos em amido) e colmos podem ser utilizados como substrato para a produção de açúcar, etanol, xarope, forragem, combustível, cercas, telhados e papel. Com o uso de sementes, o sorgo pode ser plantado em rotação com outros cultivos anuais, complementando a produção de matéria-prima e potencialmente

semeados em áreas não cultivadas, assim como em terras desfavoráveis para a cana-de-açúcar. Essa flexibilidade é resultado da robustez desta planta e do seu rápido crescimento (CERES SEMENTES DO BRASIL, 2010).

As facilidades de mecanização da cultura, o alto teor de açúcares diretamente fermentescíveis contidos no colmo, a elevada produção de biomassa e a antecipação da colheita em relação à da cana-de-açúcar, colocam o sorgo sacarino como uma excelente matéria-prima para produção de etanol. Outra vantagem em relação à cana-de-açúcar é o fato de apresentar ciclo curto (120 – 130 dias), permitindo que a cultura seja estabelecida e colhida durante a entressafra da cana-de-açúcar, fornecendo à indústria alcooleira matéria-prima para a produção de etanol na entressafra (EMYDIO, 2010). Outras vantagens do sorgo sacarino, em relação à cana-de-açúcar, relacionam-se ao fato de ser propagado por sementes e de ser mais eficiente no uso de insumos e de água.

Os coprodutos da produção do etanol a partir de sorgo sacarino são os grãos e o bagaço, que podem ter uso direto na alimentação animal ou serem utilizados para produção de ração animal e para a produção de etanol de segunda geração. Adicionalmente, o bagaço do sorgo pode ser usado para geração de energia e/ou produção de etanol, e os grãos restantes, após a fermentação, podem ser empregados para produção de ração animal (EMBRAPA MILHO E SORGO, 2008). O bagaço do sorgo sacarino também pode ser utilizado para produção de ração, sendo mais compatível à alimentação animal do que o bagaço da cana-de-açúcar (ALMODARES; HADI, 2009).

O sorgo sacarino já é fonte de produção de etanol em países como Índia, China, Austrália e África do Sul. Considerado

a “cana-de-açúcar” do meio-oeste americano, o sorgo sacarino é hoje umas das apostas americanas para substituir o milho na produção de etanol. De acordo com a MyBeloJardim (2011), já existem mais de 12.000 ha plantados com sorgo sacarino no Brasil, onde estão sendo realizados testes com uma variedade híbrida. Este híbrido tem produtividade esperada entre 60 e 80 ton ha⁻¹, 12% de teor de açúcar, entre 11% e 15% de fibra, além de produzir grãos. Já a cana-de-açúcar tem produtividade média de 90 ton ha⁻¹, entre 13% e 14% de açúcar e até 12% de fibras. O rendimento médio em ton ha⁻¹ de um híbrido de sorgo sacarino produzido no Brasil na safra de 2010 foi de 80 ton ha⁻¹ de biomassa, 30 ton ha⁻¹ de bagaço, 45 ton ha⁻¹ de caldo, 4 ton ha⁻¹ de folhas e palhas e 4-5 ton ha⁻¹ de grãos (MYBELOJARDIM, 2011).

Apesar da produção de etanol a partir de cana-de-açúcar representar um complexo produtivo dos mais representativos, este processo está baseado em apenas uma cultura. Faz-se, portanto, necessário a busca por outras fontes de matérias-primas para produção de etanol, visando à sustentabilidade e à consolidação do conceito de energia renovável. O Brasil, além de concentrar grande número de pequenos, médios e grandes produtores, apresenta uma diversidade de condições ambientais que permitem, ao explorar o potencial de matérias-primas renováveis e com aptidão regional, promover a descentralização da produção de etanol.

Diante do exposto, ambas as variedades de sorgo (granífero e sacarino) possuem alto potencial, do ponto de vista agrônomico e industrial, para a produção de energia renovável, devido a sua alta produtividade, tolerância à seca, baixo requerimento de nutrientes e habilidade de crescimento em regiões com diferentes condições climáticas.

Estas qualidades fazem do sorgo uma importante matéria-prima para a produção de etanol, principalmente em regiões com condições de clima não favoráveis para o cultivo de cana-de-açúcar. Adicionalmente, em regiões adaptadas para o cultivo da cana-de-açúcar, o sorgo seria uma cultura complementar na entressafra, o que estenderia o período de colheita por mais três a quatro meses, evitando a ociosidade das destilarias. Vale também lembrar que a produção de etanol a partir de amido é um processo industrial estabelecido, não necessitando de grandes adaptações nas plantas industriais.

Gramíneas perenes como culturas energéticas

As culturas energéticas são culturas produzidas com o objetivo principal de utilizar a biomassa como fonte de energia. A presença de altos teores de lignina e celulose na biomassa é desejável para a sua utilização como combustível sólido no processo de combustão, por duas razões principais: o alto poder calorífico da biomassa devido ao elevado conteúdo de carbono na lignina (cerca de 64%) e pelo fato de culturas lignificadas manterem-se viáveis mesmo com uma baixa composição de água, podendo ser colhidas tardiamente e aumentando, assim, a qualidade da biomassa.

As gramíneas perenes têm sido amplamente utilizadas como culturas de forragem ao longo dos séculos, contribuindo significativamente na alimentação animal. Entretanto, no século 21, as gramíneas podem ter um papel adicional como culturas energéticas, através de diversas rotas de conversão (VOGEL, 1996). A partir de meados da década de 80 do século passado, na Europa e nos Estados Unidos, cresceu

o interesse no uso de gramíneas perenes com esta finalidade devido ao seu alto rendimento de produção, alto conteúdo de lignina e celulose e ao impacto ambiental positivo destas culturas. Em geral, a biomassa das gramíneas perenes apresenta maior conteúdo de lignina e celulose em relação às culturas anuais (LEWANDOWSKI *et al.*, 2003).

A maioria dos estudos de gramíneas perenes tem foco na sua utilização como combustível sólido, para produção de *pellets* e eletricidade. No entanto, estudos em escala laboratorial e piloto também têm considerado esse tipo de biomassa para a produção de etanol.

Muitos benefícios ecológicos foram relacionados à produção e ao uso de gramíneas perenes. Comparadas a outras culturas, que apresentam ciclo fotossintético C3, as gramíneas C4 apresentam rendimento em biomassa anual pelo menos duas vezes maior, devido ao uso de uma via fotossintética mais eficiente. Além disso, como a necessidade de preparo do solo para as gramíneas perenes é limitada ao ano de estabelecimento da cultura, existe redução do risco de erosão do solo e aumento no conteúdo de carbono acumulado no mesmo. Adicionalmente, devido à capacidade de reciclagem de nutrientes pelo rizoma, as gramíneas necessitam de pouca adubação e, como são poucas as pragas que as afetam, o uso de agrotóxicos é limitado.

Existem estudos com diversas gramíneas perenes como culturas energéticas, que diferem no seu potencial de produtividade, propriedades físico-químicas da biomassa, demandas ambientais e necessidades de manejo. Entre as gramíneas perenes mais estudadas nos Estados Unidos e na Europa estão *Panicum virgatum* (“*switchgrass*”), *Miscanthus spp.* (miscanto),

Phalaris arundinacea (capim amarelo) e *Arundo donax* (cana-do-reino), enquanto no Brasil, a gramínea *Pennisetum purpureum* (capim elefante) também vem sendo alvo de estudos.

Considerações finais

O Brasil já é um líder internacional na produção de energia a partir da biomassa, pois 27,4% da matriz energética nacional provêm do uso destes recursos renováveis. O país apresenta, também, vantagens comparativas importantes para aumentar esta liderança, calcada nos produtos da atividade agrícola, pecuária e agroindustrial e da silvicultura. Destacam-se, neste contexto, as atividades relacionadas à agroenergia, tanto em relação às culturas energéticas quanto em relação aos subprodutos de outras culturas. As vantagens relacionam-se às áreas disponíveis para a agricultura com impactos ambientais circunscritos aos socialmente aceitos, à possibilidade de múltiplos cultivos por ano, à radiação solar anual intensa, além da abundância de água, da diversidade do clima e da existência de agroindústria sólida e produtiva amparada por investimentos científicos e tecnológicos para a agricultura em zona tropical.

O setor sucroalcooleiro já desempenha um papel importante no cenário energético brasileiro por meio da produção do etanol para consumo veicular e na venda de energia elétrica para o Sistema Interligado Nacional (SIN). Entretanto, as projeções de demanda de etanol e açúcar apontam a necessidade de crescimento dessa indústria. Este cenário engloba oportunidades para a expansão das tecnologias de aproveitamento dos rejeitos do cultivo da cana-de-açúcar, já que a ampliação

das culturas irá resultar em maior disponibilidade de bagaço e palha para cogeração de energia e para a produção de etanol lignocelulósico. Considerando apenas a queima da biomassa de cana-de-açúcar, existe expectativa de que a oferta total de bioenergia atribuída a este procedimento seja superior a 19% em 2019.

Adicionalmente, é de fundamental importância a implantação de políticas públicas e a disponibilização de recursos para o aprimoramento e crescimentos de outras culturas com um grande potencial para a geração de biocombustíveis e energia. O capim-elefante e o sorgo, entre outras forrageiras, pelo seu potencial energético, deverão receber a merecida atenção das políticas públicas para o setor. Devido à ampla utilização das gramíneas forrageiras para alimentação animal no país, a área utilizada para a produção de sementes corresponde a 140.000 ha ano⁻¹, acumulando-se, após a colheita, cerca de 20 ton ha⁻¹ de palhada. Assim sendo, estima-se em 2,8 milhões de toneladas a quantidade de material lignocelulósico disponível para fins energéticos e para a obtenção de bioprodutos; faz-se necessário, entretanto, o desenvolvimento no Brasil de tecnologias de conversão apropriadas.

Outra cultura com grande potencial econômico é o sorgo, que vem ganhando espaço no cenário nacional; a área correspondente ao cultivo de sorgo granífero no Brasil totalizou 697,8 mil ha na safra de 2009/10 e aquela correspondente ao sorgo sacarino já é superior a 12.000 ha.

A expansão do potencial de uso da biomassa deve ser bem planejada e gerenciada sob a égide da sustentabilidade e da preservação ambiental, onde se inclui a manutenção da qualidade do solo, do ar, dos recursos hídricos e dos biomas,

sem competir com a produção de alimentos. Esta perspectiva precisa ser também realista; o uso da biomassa não será a solução universal para a demanda nacional e internacional de energia e de produtos químicos. Terá, entretanto, juntamente com outras fontes renováveis e não renováveis, um papel relevante na matriz energética brasileira e internacional e na substituição dos petroquímicos, com a implantação gradual de biorrefinarias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMODARES, A.; HADI, M. R. Production of bioethanol from sweet sorghum: a review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 9, p. 772-780, 2009.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. 1 ed. Rio de Janeiro: BNDES: Brasília, DF: CGEE, 2008. 318 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>. Acesso em: 02 out. 2011.

CERES SEMENTES DO BRASIL. **Sorgo sacarino tem vantagens que o diferenciam da cana-de-açúcar**. 2010. Disponível em: <<http://www.ceres.net/ceressementes/Etanol/Etanol-Vantagens.html>>. Acesso em: 05 jun. 2011.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento**. 2011a. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_27_11_53_13_boletim_cana_portugues_-_maio_2011_1o_lev..pdf>. Acesso em: 21 jun. 2011.

CONAB. **Séries históricas**. 2011b. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=3#A_objcmsconteudos>. Acesso em: 2 jun. 2011.

COSTA, R. C. da. Mitigação de riscos e ampliação de retornos: aplicação dos conceitos de fronteira eficiente de Markowitz e de carteira alavancada ao setor sucroalcooleiro. **BNDES Setorial**, n.29, p.37-76, mar. 2009.

EMBRAPA MILHO E SORGO. **Sistemas de Produção 2. Cultivares do Sorgo**. Versão Eletrônica. 4. ed. set. 2008. ISSN 1679-012X. Disponível em: <http://sistemas-deproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sorgo/CultivadoSorgo_4ed/>. Acesso em: 11 jun. 2009.

EMYDIO, B.M. **Produção de etanol a partir de sorgo sacarino**. 2010. Artigo em Hypertexto. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2010_4/sorgo/index.htm. Acesso em: 28 fev. 2011.

ESTADOS UNIDOS. National Research Council. **Lost crops of Africa**. Volume I: Grains. Washington, D.C.: National Academy Press, 1996. 386 p.

GOVERNO DE ALAGOAS. Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento Rural -DIPAP. **Aspectos gerais do cultivo do sorgo para o semiárido alagoano**. 2010. Disponível em: <http://www.agricultura.al.gov.br/informativo/SORGO%20DIPAP-2010.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2011.

INSTITUTO EUVALDO LODI. Núcleo Central. Álcool combustível. **Brasília : IEL/NC, 2008. 163 p. (Série Indústria em Perspectiva)**.

LEWANDOWSKIA, I.; SCURLOCKB, J.M.O.; LINDVALLC, E.; CHRISTOUD, M. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. **Biomass and Bioenergy**, v. 25, p. 335–361, 2003.

MANTELATTO, P. E. **Estudo do processo de cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

MYBELOJARDIM - Portal de Tecnologias, AquaBusiness, Construindo Vidas e Liderança TQLSystems. Sorgo Sacarino: uma Alternativa Doce na Controvérsia de Alimentos versus Combustíveis – Parte II. Disponível em: <http://mybelojardim.com/sorgo-sacarino-uma-alternativa-doce-na-controversia-de-alimentos-combustiveis-%E2%80%93-parte-ii/>. Acesso em: 20 jun. 2011.

NEVES, M.F.; CONEJERO, M.A. **Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica**. **Economia Aplicada**, v. 11, n. 4, p. 587-604, 2007.

PAZIANI, S.F.; DUARTE, A.P. **Avaliação de cultivares de milho e sorgo para silagem**. 2006. Disponível em: http://www.aptaregional.sp.gov.br/artigo.php?id_artigo=444. Acesso em: 13 jun. 2009.

PERRONE, C.C.; APPEL, L. G.; LELLIS, V. L. M.; FERREIRA, F. M.; SOUSA, A. M.; FERREIRA-LEITÃO, V.S. Ethanol:

An evaluation of its scientific and technological development and network of players during the period of 1995 to 2009. **Waste Biomass Valor**, v.2, p.17-32, 2011.

RFA - RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Ethanol Industry Outlook**: Building bridges to a more Sustainable Future. 2011. Disponível em: <http://www.ethanolrfa.org/pages/annual-industry-outlook>. Acesso em: 20 maio 2011.

ROONEY, L. W.; WANISKA, R. D. Sorghum food and industrial utilization. In: SMITH, C. W.; FREDERIKSEN, R. A (Ed.) **Sorghum**: origin, history, technology, and production. New York: John Wiley and Sons, 2000. p.680-750.

SHEWALE, S.D.; PANDIT, A.B. Enzymatic production of glucose from different qualities of grain sorghum and application of ultrasound to enhance the yield. **Carbohydrate Research**, v. 344, p.52-60, 2009.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Disponível em: <<http://www.portalunica.com.br>>. Acesso em: 02 out. 2011.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE World Agricultural Production.2011. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/wap/circular/2011/11-04/productionfull04-11.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2011.

- VALDES, C. Ethanol demand driving the expansion of Brazil's sugar industry. **Sugar Journal**, 2007. Disponível em: <<http://www.sugarjournal.com>>. Acesso em: out. 2011.
- VOGEL, K.P. Energy production from forages (or American agriculture: back to the future). **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p.137–139, 1996.
- WILLIAMS, J.R.; DELANO, D.R.; HEINIGER, R.W.; VANDERLIP, R.L.; LLEWELYN, R.V. Replanting strategies for grain sorghum under risk. **Agricultural Systems**, v. 60, p. 137-155,

3

CENÁRIOS, ESTADO DA ARTE
E DESAFIOS TECNOLÓGICOS

A Usina de Cana-de-Açúcar como Exemplo de Biorrefinaria

Wesley Ambrósio

A pergunta em discussão hoje é: que papel o etanol e a bioeletricidade podem ter na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas? Para contextualizar esta questão é válido lembrar o que motivou a BP, uma empresa global de petróleo e gás, a escolher os biocombustíveis como parcela significativa de nosso portfólio de energias alternativas.

Ao fazer esta escolha, a BP responde a duas grandes tendências que afetam o setor de energia. A primeira, naturalmente, é a necessidade de maior segurança energética em um mercado no qual a demanda está crescendo e a oferta é limitada. A segunda é a necessidade urgente de lidar com os riscos das mudanças climáticas através da redução global das emissões de gases de efeito estufa.

Essa necessidade de mudança é particularmente aparente nos combustíveis para transporte: mais de 60% do petróleo do mundo vai para este uso, e mais de 90% do combustível usado é de origem fóssil. O setor de transporte representa aproximadamente 20% das emissões de gases de efeito estufa e está crescendo rapidamente – em 2030 o número de carros de passeio nas estradas deve dobrar, chegando a 1,4 bilhão de unidades (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2004). Enquanto existem várias alternativas para descarbonizar a geração de energia elétrica – como, por

exemplo, as energias nuclear, eólica e solar – o setor de transporte tem menos opções para considerar.

Na BP, acreditamos que os biocombustíveis são a única solução viável para fornecer energia de baixo carbono para transporte de forma segura, competitiva e em larga escala. E, naturalmente, o investimento em agricultura, implícito na produção de biocombustíveis, terá um efeito significativo na melhoria das condições rurais, tanto nos países desenvolvidos quanto nos em desenvolvimento.

Estes fatos ajudam a explicar porque os legisladores em todo o mundo têm tratado os biocombustíveis com certo entusiasmo, demandando um crescimento significativo dessa indústria.

O Brasil foi pioneiro, no mundo, na criação de uma indústria de biocombustíveis sustentáveis, tornando-se o maior produtor e consumidor de etanol de cana-de-açúcar, e o maior exportador de etanol do mundo. Isso foi o resultado de um cenário de políticas e regulamentações que promoveram a inovação, o empreendedorismo e o crescimento – na verdade, um modelo de sucesso que encoraja o desenvolvimento de energia limpa e segura em todo o mundo.

A Agência Internacional de Energia projeta que 26% do volume global de combustíveis usados para transporte serão biocombustíveis em 2050 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011). Na BP, acreditamos que percentuais superiores a este são possíveis, com o nível correto de investimento em tecnologias avançadas e desenvolvimento de infraestrutura.

Desde que o negócio *BP Biofuels* foi criado em 2006, procuramos oportunidades para fazer contribuições concretas para a segurança energética e para a redução da emissão dos

gases de efeito estufa. Consideramos apenas o uso de matérias-primas sustentáveis que tenham potencial para reverter o baixo investimento em agricultura, bem como o desenvolvimento de tecnologias avançadas para fazer os bons biocombustíveis ainda melhores.

Da grande variedade de opções tecnológicas em desenvolvimento – fotossíntese de algas, gaseificação de biomassa, etc. – acreditamos que as tecnologias que melhor atenderão nossos critérios de seleção serão aquelas que envolvem a conversão de açúcares de baixo custo e baixa emissão de carbono. Neste cenário, a cana-de-açúcar sempre será competitiva. Será necessário converter estes açúcares em moléculas de combustível para movimentar a frota mundial de transporte. Isso significa a produção de bioetanol e de biodiesel, mas também de uma nova molécula de combustível, o biobutanol.

Desde 2008, a BP tem feito grandes investimentos na indústria de biocombustíveis no Brasil, iniciando com a participação na Tropical Bioenergia, passando pela aquisição da CNAA (Companhia Nacional de Açúcar e Álcool) em 2011 e finalmente, adquirindo as ações remanescentes da Tropical Bioenergia. Estes investimentos foram nossos primeiros passos – a ambição da BP é ser um dos líderes desta indústria.

Sustentabilidade é um valor chave para a BP e faz parte da nossa atuação no setor, desde o início. Em nossas operações, além de produzir combustível limpo, a cana cresce em áreas que anteriormente eram utilizadas para agricultura e pasto, subutilizadas, e milhares de árvores foram plantadas para minimizar a erosão do solo e promover a biodiversidade.

A geração de bioeletricidade por meio da queima do bagaço também faz parte de nossas operações, permitindo não

só a autossuficiência das usinas, mas também a exportação de eletricidade para o *grid* – Sistema Interligado Nacional (SIN).

Na perspectiva da BP, os biocombustíveis são a única opção viável que o mundo tem para lidar com as emissões no setor de transporte no curto e médio prazo. No Brasil, o etanol e a bioeletricidade a partir do bagaço têm um papel chave. No futuro, biobutanol e biodiesel a partir de açúcar se juntarão a este esforço de redução nas emissões de gases de efeito estufa, assim como o etanol de segunda geração – utilizando como matéria-prima o bagaço e a palha da cana-de-açúcar. A BP investe no desenvolvimento destas tecnologias e planeja sua aplicação no Brasil, como um potencial de adição de valor à cadeia da cana-de-açúcar, conforme os exemplos que se seguem.

Biobutanol

A BP vê o butanol como uma molécula que representa um dos elementos necessários para atender o crescimento da procura de combustíveis renováveis. Entre as vantagens do butanol podemos mencionar o teor energético e as propriedades físico-químicas mais próximas da gasolina, permitindo sua mistura em concentrações mais altas do que o etanol – sem necessidade de alteração dos motores – e a menor pressão de vapor, permitindo maior adição de biocombustíveis à gasolina, fatos estes comprovados em testes comerciais de longa duração já realizados.

Desde 2005, BP e DuPont têm desenvolvido um programa de tecnologia para a criação de um processo exclusivo para produzir biobutanol a partir da fermentação de açúcares,

culminando com a criação da Butamax em 2008. Esta empresa tem a finalidade de disseminar a tecnologia de produção do biobutanol, assim como alavancar a comercialização do produto.

Além das características acima descritas, o biobutanol tem sinergias com a produção de etanol a partir de cana-de-açúcar. Tais sinergias se traduzem num processo produtivo com potencial de implantação nas usinas existentes, utilizando grande parte da estrutura industrial, com necessidades mínimas de adaptação nas áreas de fermentação e separação do biobutanol.

Etanol de segunda geração ou etanol lignocelulósico

A BP investe no desenvolvimento de tecnologias para aumentar a produção de etanol a partir da biomassa. Entre elas destacamos o etanol lignocelulósico, ou etanol de segunda geração. A motivação de mercado para este desenvolvimento é a grande demanda gerada por etanol a partir não só do crescimento dos mercados já estabelecidos, mas também em função dos mandatos governamentais, que elevam no médio prazo a demanda mundial por biocombustíveis a patamares que só podem ser atendidos através de mudanças significativas no processo de produção, levando ao aumento do percentual de biomassa convertida a biocombustíveis.

Neste contexto, a BP tem desenvolvido desde 2006 tecnologias que permitirão converter a celulose e a hemicelulose em etanol. Tais tecnologias permitirão a utilização de biomassas de origens diversas para a produção de etanol de segunda geração e outros biocombustíveis, podendo no médio prazo ser integradas ao processo convencional de produção de etanol de

primeira geração obtido da sacarose da cana-de-açúcar, como para o caso da utilização de bagaço e palha como matérias-primas. Esta também é mais uma alternativa para o uso do bagaço e da palha, que são atualmente utilizados para a produção de eletricidade.

Biodiesel a partir de açúcares

Em agosto de 2009, a BP anunciou um acordo com a Martek Biosciences Corporation para desenvolver uma tecnologia radicalmente nova para a conversão dos açúcares em biodiesel. Esta tecnologia oferece uma alternativa às opções atuais de biodiesel, que são dependentes de óleos vegetais. Acreditamos que a tecnologia de açúcar-para-diesel tem potencial para produzir biodiesel econômico, sustentável e em alta escala visando atender à demanda de diesel para veículos pesados e leves, especialmente nos mercados europeus.

Hoje, o biodiesel é produzido a partir de óleos vegetais como o óleo de palma, óleo de soja e gorduras animais. Estas matérias-primas estão associadas a preocupações sobre sustentabilidade e disponibilidade, e encontrar formas alternativas para produzir biodiesel será crucial para atender a crescente demanda de forma sustentável. A rota escolhida pela BP baseia-se em microrganismos que convertem os açúcares em lipídios através de fermentação (conversão heterotrófica, semelhante à produção de bioetanol convencional, que não exige luz solar ou CO₂). O óleo produzido pode ser extraído e utilizado em motores diesel.

No contexto brasileiro, esta tecnologia tem também o potencial de integração às usinas de cana-de-açúcar, tanto como

uma alternativa ao uso da sacarose, quanto como uma opção para a conversão da celulose e da hemicelulose em moléculas de maior valor agregado, como biodiesel e combustível de aviação.

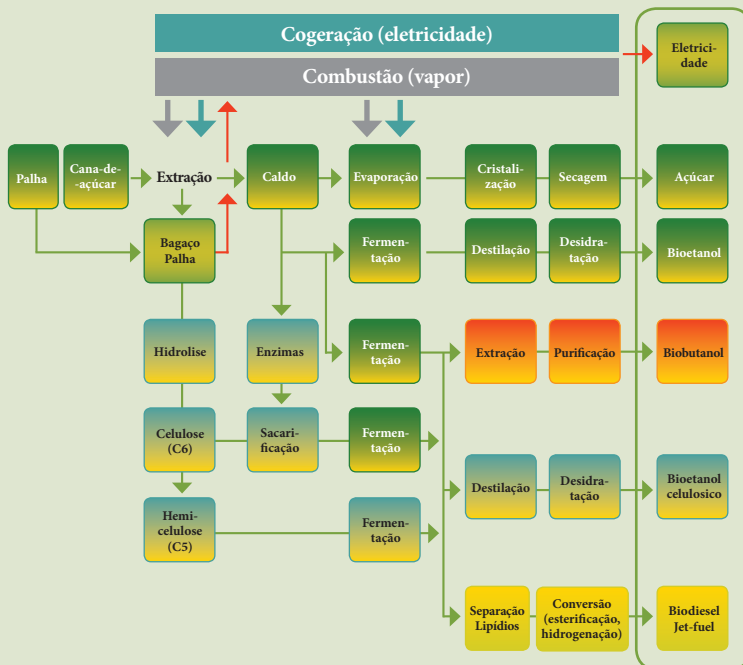
A refinaria de biomassa

O Brasil e a indústria da cana-de-açúcar têm um papel preponderante no mercado mundial de biocombustíveis, dado o porte de sua indústria, os maciços investimentos já realizados e as condições geográficas e climáticas únicas. Com o aumento da demanda por biocombustíveis, a BP acredita que o país tem o potencial de desempenhar um papel ainda mais importante no contexto mundial, através do desenvolvimento e da implementação de tecnologias que permitam elevar a conversão de biomassa, a produção de moléculas de maior valor agregado e que tenham sinergia com a indústria existente.

As tecnologias de segunda geração trarão aos produtores brasileiros maior variedade no portfólio de produtos, agregando biobutanol, biodiesel e etanol de segunda geração aos três principais produtos da indústria atual (etanol, eletricidade e açúcar). As atuais usinas de cana-de-açúcar serão, efetivamente, refinarias de biomassa, ou biorrefinarias (Figura 1), gerenciando este novo portfólio de produtos à luz das oportunidades do mercado mundial de energia.

Os grandes desafios para que ocorra esta transformação da indústria podem ser descritos em alguns grandes blocos, como tecnologias, cadeia agroindustrial e competências, os quais são considerados a seguir.

Integração de Biocombustíveis Avançados à Cadeia de Valor da Cana-de-açúcar: A Refinaria de Biomassa



- ✓ Tecnologias de Segunda Geração criarão novas alternativas para agregação de valor à cadeia de biocombustíveis
- ✓ Integração com cana-de-açúcar permitirá melhor aproveitamento da biomassa (maior rentabilidade do investimento)
- ✓ Maiores desafios são ligados à biotecnologia

Figura 1. Representação do conceito de biorrefinarias, segundo a visão da BP.

Tecnologias

Embora todas as etapas individuais da produção dos combustíveis de segunda geração já estejam demonstradas, ainda existe o desafio de sua integração à indústria existente e a necessidade contínua de redução de custos. Podem ser citadas oportunidades no aumento das taxas de conversão de açúcares a biocombustíveis, no aumento da eficiência na produção e no uso das enzimas e no desenvolvimento de processos que permitam a reciclagem de insumos e microrganismos. A BP investe neste momento no projeto de suas primeiras plantas comerciais de biocombustíveis avançados, como mais um passo na direção de solucionar estes desafios.

Cadeia agroindustrial

A diversificação do portfólio de produtos leva a necessidades de aumento na escala de produção de biomassa. A busca da escala de produção otimizada, levando em conta a cadeia agroindustrial, traz grandes desafios. Na área agrícola podemos citar o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, a recuperação econômica da palha como matéria-prima, a redução dos custos logísticos agrícolas e a busca por variedades de cana e outras matérias-primas que permitam a extensão da safra. Na área industrial, o aumento da eficiência na extração e na conversão dos açúcares e a redução do consumo de água e de energia são fundamentais para elevar a competitividade e a sustentabilidade de toda a cadeia. A BP, em suas operações no Brasil, investe no desenvolvimento de soluções para estes gargalos, que trazem aumento da competitividade de nossas

operações atuais e que certamente trarão vantagens às tecnologias de segunda geração.

Competências

A evolução da indústria de biocombustíveis tem demandado um grande número de profissionais de todas as áreas, especialmente em tecnologia, engenharia, agronomia, gestão e na operação direta dos processos produtivos.

Visando ao desenvolvimento de competências em todas estas áreas para fazer face aos desafios já citados, a BP investe em programas de desenvolvimento tecnológico em parcerias com universidades e instituições de pesquisa no Brasil e no exterior, em programas de capacitação e educação de seus profissionais junto a entidades públicas e privadas e em programas de *trainees*, buscando identificar os futuros líderes da empresa.

Muito ainda está por fazer, mas a boa notícia para nós brasileiros é que o Brasil terá um papel importante neste cenário presente e futuro. E na BP estamos comprometidos a colaborar nesta transição para uma economia de baixo carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **International low-carbon energy technology platform – frequently asked questions**. Disponível em: <http://www.iea.org/Platform/faq_tech_platform.pdf>. Acesso em: out. 2011.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. WBCSD. **Mobility 2030: meeting the challenges to sustainability**. The sustainable mobility Project. Geneva, 2004. 178 p. (Full report 2004).

A Indústria Brasileira de Cana-de-açúcar:

Ambiente Favorável à Introdução de Tecnologias
de Produção de Etanol Lignocelulósico

Marco Aurélio Pinheiro Lima
Antonio Bonomi

O CTBE

O Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bio-etanol (CTBE) tem uma história planejada a partir de um estudo de 2005 do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) que identificou gargalos do ciclo cana-de-açúcar/etanol capazes de impedir um aumento substancial na escala de produção do etanol brasileiro (LEITE, 2005). Este estudo explorou cenários que projetavam a possibilidade de o Brasil substituir 10% da gasolina do mundo, em 2025, por etanol produzido no país. A partir da identificação destes gargalos nasceu a estratégia de criação de um Laboratório Nacional para atuar junto ao setor produtivo e à comunidade científico-tecnológica brasileira. Com uma infraestrutura de excelência internacional, o CTBE visa atrair esta comunidade que, nos últimos 35 anos, contribuiu com muito sucesso para mais que dobrar nossa capacidade de produção de etanol por hectare de cana plantada. A intenção é unir forças

para manter a liderança brasileira na produção de bioetanol de cana-de-açúcar.

A missão do CTBE é a seguinte: *“Contribuir para a liderança brasileira no setor de fontes renováveis de energia e de insumos para a indústria química, em especial, o desenvolvimento da cadeia produtiva do bioetanol de cana-de-açúcar, por meio de pesquisa, desenvolvimento e inovação na fronteira do conhecimento.”* Sua visão: *“Um reconhecido Laboratório Nacional dedicado ao avanço do conhecimento e do estado-da-arte da produção de etanol de cana-de-açúcar.”*

Os gargalos apontados pelo estudo do CGEE motivaram a criação de Programas que constituem os eixos de atuação do CTBE, brevemente descritos a seguir.

Programa agrícola

Este programa almeja viabilizar o plantio direto de cana-de-açúcar, além de explorar os benefícios que a agricultura de precisão pode trazer ao setor.

Quase 70% do custo do etanol estão na agricultura e este programa poderá ter forte impacto no ciclo produtivo como um todo. Para viabilizar o plantio direto, o CTBE iniciou o desenvolvimento de uma Estrutura de Tráfego Controlado (ETC), equipamento responsável por todas as operações do ciclo agrônômico da cana, incluindo a recuperação parcial da palha. Entre outros benefícios, a ETC deve reduzir o tráfego de maquinário sobre o canavial, o gasto com combustíveis no campo e o nível de compactação e erosão do solo. Este projeto conta com apoio do BNDES/FUNTEC (para ser realizado em 4 anos). A empresa interveniente é a Máquinas Agrícolas Jacto

S. A., com matriz situada em Pompéia/SP, de grande reputação. Os testes de campo terão a coordenação da Embrapa, com base em convênio de parceria entre a Embrapa e o CTBE.

Programa industrial

Uma tecnologia comercialmente viável de utilização do bagaço e palha de cana-de-açúcar para produzir etanol poderá aumentar a produtividade em 50%, em termos de litros de etanol por hectare. Um aumento de produtividade deste porte traz consigo uma importante redução da pressão sobre o uso da terra. Porém, para se alcançar uma tecnologia economicamente viável, de produção de etanol celulósico, são necessários estudos profundos relacionados ao desenvolvimento desta tecnologia. Dentro deste panorama, o CTBE contará com uma Planta Piloto para Desenvolvimento de Processos (PPDP). Na PPDP serão realizadas pesquisas ligadas ao ciclo cana-de-açúcar/etanol em escala semi-industrial, onde cientistas de outras instituições poderão atestar se experimentos feitos em laboratório são igualmente eficazes em escalas maiores, que melhor representem as condições operacionais dos processos industriais. Ao mesmo tempo, empresas poderão aprimorar tecnologias, por meio da execução de ensaios em escala inferior à trabalhada comercialmente. Por fim, a Planta Piloto será utilizada para desenvolver novas técnicas de produção de etanol celulósico e de outros produtos de alto valor agregado a partir da cana-de-açúcar. Este é o conceito de biorrefinaria, que considera a cana como fonte de carbono e, portanto, matéria-prima para produtos diversificados. Embora focado no etanol de 2ª geração (2G), o CTBE está capacitado para colaborar em assuntos relevantes relacionados

ao melhoramento do processo industrial de 1ª geração (1G), diretamente, ou integrado com as instituições de P&D que tradicionalmente atuam nessa área.

Programa de avaliação tecnológica

Este programa surgiu da necessidade de se definir uma estratégia de medir o sucesso do CTBE. Para tanto, foi concebida uma Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC), que consiste em uma plataforma de simulação que integrará toda a cadeia produtiva da cana-de-açúcar e que será validada na indústria atual, permitindo avaliar a introdução de novas tecnologias (etanol celulósico e outros produtos da química verde) com as atualmente praticadas na indústria. A Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar, também será utilizada para avaliar o nível de sucesso alcançado pela PPDP no desenvolvimento de novas tecnologias industriais, bem como do Programa Agrícola do CTBE, utilizando as metodologias identificadas em conjunto com o Programa de Sustentabilidade. Ela é um importante instrumento para avaliação e aperfeiçoamento das atividades de pesquisa do CTBE, e será descrita detalhadamente mais à frente.

Programa de sustentabilidade

O programa tem alcance nacional e internacional e visa à produção de dados para tratar o tema sustentabilidade de forma científica. O debate em torno dos chamados “combustíveis verdes” levou algumas nações, principalmente da União Europeia, a estabelecerem critérios de sustentabilidade aos combustíveis oriundos de biomassa por eles consumidos. A partir

desses critérios, é provável que seja criada uma certificação para a produção desses bens. Isso nos indica que a efetiva sustentabilidade da cadeia produtiva do etanol de cana-de-açúcar é um aspecto essencial para a consolidação deste produto no mercado internacional e doméstico. De fato, a produção do bioetanol somente se justifica se impactos econômicos, sociais e ambientais forem favoráveis, comparados a outras fontes energéticas com fins similares, e se existirem benfeitorias reais para todos os segmentos sociais diretamente envolvidos. O Programa possui como foco principal o estudo dos impactos de novas tecnologias sobre a sustentabilidade da cadeia produtiva cana-de-açúcar/bioetanol.

Programa de pesquisa básica

O Programa de Pesquisa Básica tem como foco o desenvolvimento científico necessário para contribuir na solução dos gargalos apontados pelos outros programas do CTBE, além de possuir uma agenda própria ligada ao ciclo cana-de-açúcar/etanol. Esta agenda está centrada na produção científica que permita avançar o conhecimento sobre fenômenos básicos relacionados à produção do etanol celulósico de cana, desde a fotossíntese até a desconstrução da celulose em açúcares fermentescíveis. Estes estudos incluem a estrutura molecular de carboidratos e proteínas, síntese e degradação de polissacarídeos, metabolismo vegetal, nanotecnologia relacionada aos materiais vegetais, além do aprofundamento em assuntos envolvendo a química verde, conversão de energia química em mecânica, combustão do etanol e outros.

Biorrefinaria virtual de cana-de-açúcar

A Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC) é uma ferramenta em desenvolvimento pelo Programa de Avaliação Tecnológica do CTBE que visa a comparação de aspectos técnicos e impactos econômicos, ambientais e sociais de diferentes tecnologias de processamento de cana-de-açúcar. Nesta ferramenta estão incluídas as operações da fase agrícola,

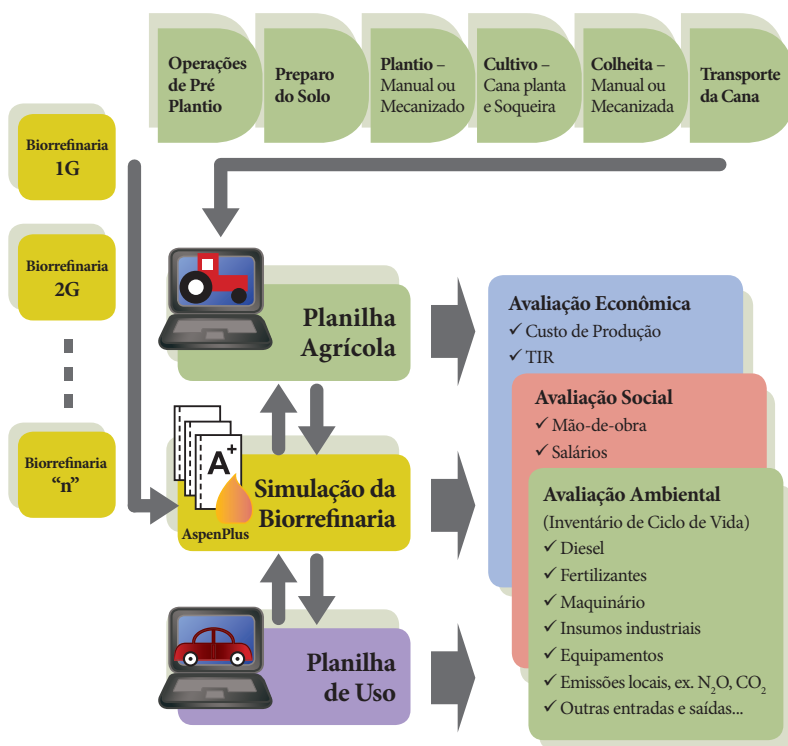


Figura 1. Esquema da Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC).

descritas utilizando-se planilhas eletrônicas, e industrial, utilizando-se simuladores comerciais. A análise econômica e social é conduzida utilizando-se também planilhas eletrônicas, enquanto que a avaliação ambiental (Análise de Ciclo de Vida) é conduzida utilizando-se o software SimaPro. Um esquema da BVC que detalha as diversas integrações de ferramentas computacionais é apresentado na Figura 1.

Processo de produção de etanol 1G

Na Figura 2 é apresentado o diagrama de blocos da biorrefinaria de primeira geração de cana-de-açúcar produzindo açúcar, etanol anidro e bioeletricidade (destilaria anexa).

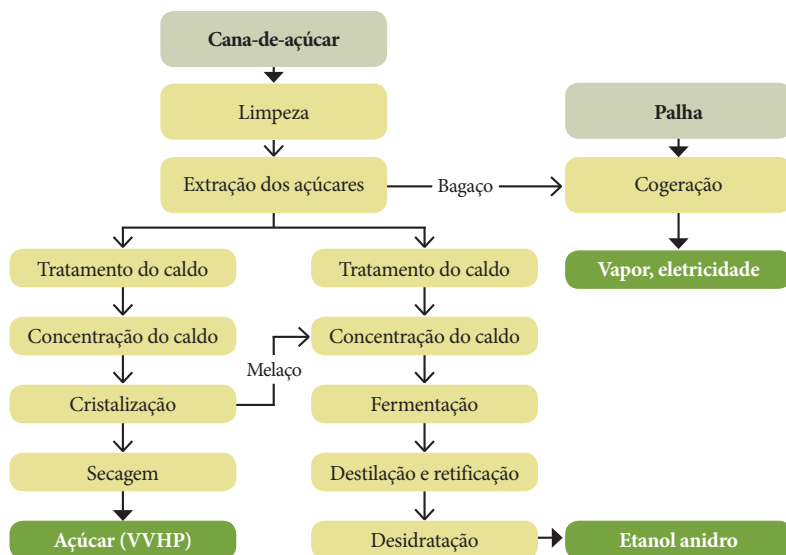


Figura2. Diagrama de blocos da biorrefinaria de cana-de-açúcar produzindo etanol 1G, açúcar e eletricidade.

O processamento da cana-de-açúcar é autossuficiente em energia, produzindo vapor e energia elétrica para atender à demanda do processo em sistemas de cogeração que utilizam o bagaço como combustível. No caso do uso de eficientes sistemas de cogeração, pode ser produzida eletricidade para venda. O uso de parte da palha produzida no campo como combustível em caldeiras também pode aumentar o excedente de eletricidade produzido.

Tabela 1. Principais parâmetros adotados na simulação do processo de produção de açúcar e etanol 1G e preços adotados na análise econômica.

Parâmetro	Valor
Operação da planta – cana processada (TC ha ⁻¹) ^a	500
– dias de safra (dias ano ⁻¹)	167
Qualidade da cana – teor de fibras (%)	13
– teor de açúcares redutores totais (ART) (%)	15,3
– palha produzida no campo(kg TC ⁻¹ , base seca)	140
Pureza do etanol anidro (°INPM)	99,6
Especificação do açúcar VVHP: pureza/umidade (%)	99,6/0,1
Preço da cana-de-açúcar (R\$ TC ⁻¹) ^b	40,91
Preço da palha (R\$ t ⁻¹)	30,00
Preço da eletricidade (R\$ MWh ⁻¹)	149,33
Preço do etanol anidro (R\$ L ⁻¹) ^c	1,05
Preço do etanol hidratado (R\$ L ⁻¹) ^c	0,95
Preço do açúcar (R\$ kg ⁻¹) ^c	0,75

^a TC: toneladas de cana-de-açúcar; ^b Média móvel (6 anos) de janeiro de 2001 a dezembro de 2010 (UDOP, 2011); ^c Média móvel (6 anos) de janeiro de 2001 a dezembro de 2010 (CEPEA, 2011).

Etanol é usualmente produzido no Brasil em destilarias anexas, nas quais parte do caldo é usada para produção de açúcar, e o caldo remanescente junto ao melaço (solução residual de açúcares e outras impurezas obtida após a cristalização do açúcar) é utilizado para produção de etanol (ENSINAS *et al.*, 2007). No entanto, existem também destilarias autônomas, nas quais todo o caldo de cana-de-açúcar é direcionado para produção de etanol.

Os principais parâmetros adotados na simulação do processo de produção de etanol de 1G e na análise econômica são apresentados na Tabela 1.

Dados de investimento para a destilaria autônoma “básica” (processando 2 milhões de toneladas de cana por safra, com caldeiras de 22 bar, destilação azeotrópica para produção de etanol anidro) foram fornecidos pela Dedini - investimento total R\$ 320 milhões (valor em 2010). Para a destilaria anexa foram empregados dados disponíveis em Sousa e Macedo (2010) - a destilaria processando 2 milhões de toneladas de cana por safra tem um investimento de R\$ 360 milhões.

Destilarias “básicas” e “otimizadas”

Grande parte das instalações industriais existentes hoje no Brasil apresenta potencial para aumentar a geração de eletricidade e reduzir o consumo de vapor. Desta forma, foram avaliados o impacto da otimização de destilarias “básicas” nas quantidades de açúcar, etanol, eletricidade e excedente de material lignocelulósico produzido, no investimento, na taxa interna de retorno e no custo de produção do etanol (CAVALETT *et al.*, 2011; JUNQUEIRA *et al.*, 2011). As principais características consideradas na otimização são apresentadas na Tabela 2.

Tabela2. Principais características da destilaria “básica” e “otimizada”.

Parâmetro	Destilaria “básica”	Destilaria “otimizada”
Pressão das caldeiras	22 bar	90 bar
Bagaço excedente	Vendido	Queimado
Venda de energia elétrica	Não	Sim
Acionamentos	Mecânicos	Eletrificados
Uso de 50% da palha	Não	Sim

Na Figura 3 são apresentadas a produção de etanol hidratado, açúcar, eletricidade e bagaço excedente para destilarias anexas e autônomas, básicas e otimizadas, além da taxa interna de retorno (TIR) e custos de produção do etanol obtidos.

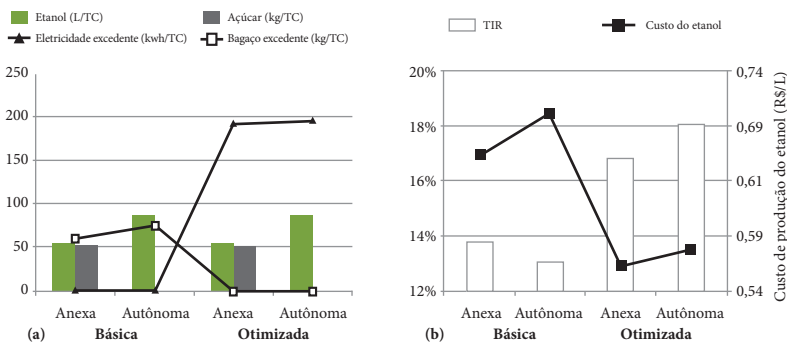


Figura 3. Produção de etanol, açúcar, eletricidade e bagaço excedente (a); taxa interna de retorno (TIR) e custo do etanol (b) para destilarias anexas e autônomas, básicas e otimizadas.

Pode-se observar que a otimização do processo pode aumentar significativamente a produção de eletricidade, levando a grandes aumentos na taxa interna de retorno e redução dos custos de produção do etanol.

Flexibilidade na destilaria anexa

A biorrefinaria de cana-de-açúcar pode direcionar parte da cana-de-açúcar para produção de açúcar e o restante, para etanol. A flexibilidade da planta para aumentar a produção de um produto quando este propiciar maiores receitas, devido ao aumento de preços praticados, pode beneficiar a rentabilidade do processo (JUNQUEIRA *et al.* 2011). Na Figura 4 é apresentado o impacto de aumento nos preços do etanol e do açúcar em destilarias anexas fixas (E50, com 50% do caldo para

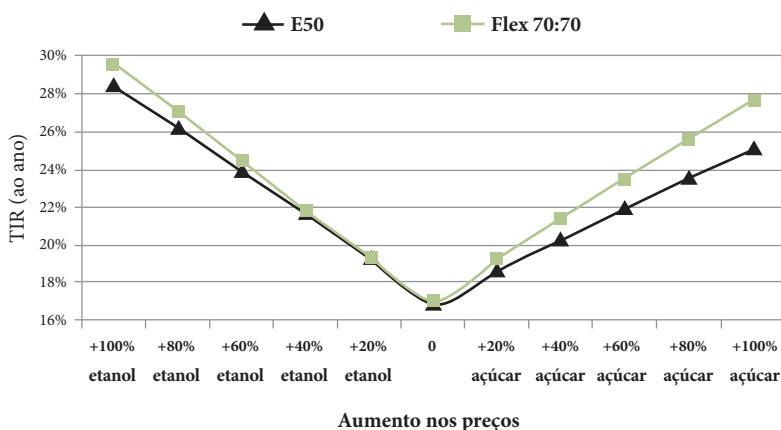


Figura 4. Impacto do aumento nos preços do etanol e do açúcar na taxa interna de retorno (TIR) em destilarias anexas fixas (E50) e flexíveis (*flex 70:70*).

fabricação de açúcar) e flexíveis (*flex* 70:70, na qual a usina tem capacidade para direcionar 70% do caldo para etanol ou para açúcar), na taxa interna de retorno.

Como mostrado na Figura 4, a destilaria flexível apresenta maiores valores de TIR para variações nos preços do etanol e do açúcar do que a destilaria com capacidade fixa, apesar de, com base nos valores médios praticados nos últimos 10 anos, estas duas concepções gerariam a mesma taxa interna de retorno (ponto “0”).

Extensão da safra usando sorgo sacarino

A BVC foi utilizada para avaliar também a extensão de safra utilizando sorgo sacarino em uma destilaria autônoma otimizada, que operaria por 167 dias com cana-de-açúcar e 60 dias com sorgo sacarino. Foram avaliados 3 níveis de qualidade do sorgo e rendimentos do processo com esta segunda matéria-prima, sendo comparados aos resultados obtidos para a destilaria autônoma otimizada produzindo etanol anidro a partir da cana-de-açúcar somente. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Verifica-se, então, que a extensão de safra utilizando-se sorgo sacarino pode aumentar consideravelmente a taxa interna de retorno da destilaria autônoma.

Processo de produção de etanol 2G

O processo de produção de etanol 2G avaliado consiste de uma etapa de pré-tratamento do material lignocelulósico (bagaço e palha excedentes) por explosão a vapor (rendimento

Tabela 3. Resultados obtidos para as análises de extensão de safra usando sorgo sacarino em diferentes níveis tecnológicos.

Parâmetro	1G	Sorgo 1	Sorgo 2	Sorgo 3
ART no sorgo (kg t ⁻¹)	-	125	137	150
Fibra no sorgo (kg t ⁻¹)	-	138	142	145
Rendimento global	83%	78%	81%	83%
Eletricidade (kWh TC ⁻¹)	172	72	94	94
Etanol (L t ⁻¹)	82	63	72	81
TIR (ao ano) ^a	15,0%	17,9%	18,5%	18,9%

^a Resultados para a TIR do processo com sorgo representam os resultados obtidos para a destilaria autônoma (processando cana e sorgo).

de 70%), seguida de deslignificação alcalina e hidrólise enzimática (conversão na hidrólise de 70% com 15% de sólidos). As pentoses obtidas no pré-tratamento podem ser biodigeridas, produzindo biogás para ser utilizado como combustível no sistema de cogeração, ou fermentadas a etanol. Os resíduos da hidrólise e a lignina obtida na deslignificação são utilizados como combustível na cogeração. O processo pode ser independente, recebendo matéria-prima de uma unidade 1G, ou totalmente integrado ao processo de produção de etanol 1G; no processo integrado, o licor hidrolisado é misturado ao caldo de cana-de-açúcar, compartilhando os equipamentos de concentração, fermentação, destilação e cogeração (DIAS *et al.*, 2011a; 2011b; 2011c; 2011d).

Avaliação da integração da produção de etanol 2G

Foi feita uma análise da integração do processo de produção de etanol em uma destilaria autônoma otimizada, comparando biodigestão e fermentação das pentoses. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

A produção de etanol aumenta cerca de 30 e 40% para os processos com biodigestão e fermentação das pentoses, respectivamente; no entanto, a TIR do processo integrado só é maior do que a TIR de 1G otimizada quando é incluída a fermentação das pentoses a etanol. Apesar disso, para o processo integrado com biodigestão das pentoses já ocorre uma redução no custo de produção do etanol, em comparação com o processo 1G otimizado.

Tabela 4. Principais resultados obtidos para a destilaria autônoma otimizada (1G), processo integrado de primeira e segunda geração com biodigestão (1G2G bp) e fermentação (1G2G fp) das pentoses.

Parâmetro	1G	1G2G (bp)	1G2G (fp)
Etanol (L TC ⁻¹)	82	107	116
Eletricidade (kWh TC ⁻¹)	173	77	81
Investimento (mi R\$)	462	608	556
TIR (ao ano)	15,0%	13,4%	16,8%
Custo de produção do etanol (R\$ L ⁻¹)	0,65	0,64	0,57

Comparação do processo independente 2G com o processo integrado

Foi feito um estudo do processo independente de produção de etanol 2G, que recebe matéria-prima de uma unidade 1G otimizada que gera excedente de material lignocelulósico – é queimada apenas a quantidade de bagaço e palha necessária para atender à demanda de energia térmica da unidade. A unidade 2G possui, então, equipamentos totalmente independentes da unidade 1G (DIAS *et al.*, 2011d). Os resultados obtidos para o processo 1G produzindo material lignocelulósico (1G - LM), para a planta independente de 2G e para o processo equivalente às duas plantas (1G + 2G) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados para o processo de produção de etanol 1G produzindo material lignocelulósico excedente (1G - LM), para a planta independente de 2G e para o processo equivalente às duas plantas (1G + 2G).

Parâmetro	1G - LM	2G	1G + 2G
Etanol (L TC ⁻¹)	82	35	118
Eletricidade (kWh TC ⁻¹)	34	42	76
Investimento (mi R\$)	384	353	736
TIR (ao ano)	15%	10%	13%
Custo do etanol (R\$ L ⁻¹)	0,69	0,61	0,67

Verifica-se, então, que o processo independente de produção de etanol 2G apresenta maior investimento e menor TIR do que o processo integrado 1G + 2G.

Integração do processo 2G no engenho de açúcar

Foi avaliada também a inserção de uma unidade de produção de etanol 2G em um engenho de açúcar, no qual toda a cana-de-açúcar disponível é utilizada para produzir açúcar (Figura 5). Neste caso, etanol é produzido a partir do melaço e do material lignocelulósico (considerou-se fermentação das pentoses).

Desta forma, a integração do processo de produção de etanol 2G em um engenho de açúcar leva ao aumento na produção do etanol sem prejudicar a produção de alimento (açúcar), aumentando também a TIR do empreendimento.

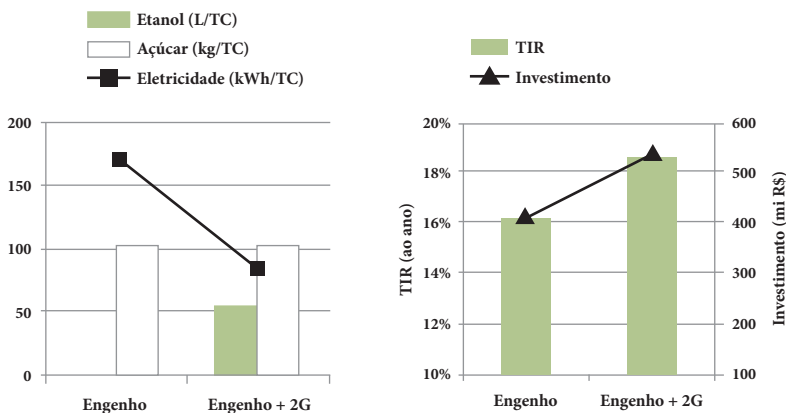


Figura 5. Produção de etanol, açúcar e eletricidade, taxa interna de retorno (TIR) e investimento para o engenho e para o processo integrado Engenho + 2G.

Comentários finais

A Biorrefinaria Virtual de Cana-de-açúcar (BVC) tem se mostrado uma ferramenta muito útil para a comparação de diferentes tecnologias de processamento da cana-de-açúcar. Neste trabalho foram apresentados resultados referentes a diferentes configurações do processo de produção de etanol 1G e 2G, mostrando a versatilidade da ferramenta e seu potencial para aplicação em processos de tomada de decisão e identificação de pontos que merecem maior investigação experimental. Fica claro, também, o potencial do uso da ferramenta para avaliar a produção de produtos químicos a partir das rotas alcoolquímica, sucroquímica e lignoquímica, no âmbito de uma biorrefinaria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVALETT, O.; CUNHA, M. P.; JUNQUEIRA, T. L.; DIAS, M. O. S.; JESUS, C. D. F.; MANTELATTO, P. E.; CARDOSO, T. F.; FRANCO, H. C. J.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Environmental and economic assessment of bioethanol, sugar and bioelectricity production from sugarcane. **Chemical Engineering Transactions**, v. 25, p. 1007-1012, 2011.

CEPEA. **Center for Advanced Studies on Applied Economics**. 2011. Disponível em: <www.cepea.usp.br>. Acesso em: 16 maio 2011.

DIAS, M. O. S.; CUNHA, M. P.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A.; JESUS, C.D. F.; ROSSELL, C.E.V. Simulation of integrated first and second generation bioethanol production from sugarcane: comparison between different biomass pretreatment methods. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 38, p. 955-966, 2011a.

DIAS, M.O. S.; MODESTO, M.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C.E.V. Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems. **Energy**, v. 36, p. 3691-3703, 2011b.

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. Second generation ethanol in Brazil: can it compete with electricity production? **Bioresource Technology**, v. 102, p. 8964-8971, 2011c.

DIAS, M. O. S.; JUNQUEIRA, T. L.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. P.; JESUS, C. D. F.; ROSSELL, C. E. V.; MACIEL FILHO, R.; BONOMI, A. Integrated versus stand-alone second generation ethanol production from sugarcane bagasse and trash. **Bioresource Technology**, 2011d. In press.

ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane. **Energy Conversion and Management**, v. 48, p. 2978-2987, 2007.

JUNQUEIRA, T. L.; DIAS, M. O. S.; JESUS, C. D. F.; MANTELATTO, P. E.; CUNHA, M. P.; CAVALETT, O.; MACIEL FILHO, R.; ROSSELL, C. E. V.; BONOMI, A. Simulation and Evaluation of Autonomous and Annexed Sugarcane Distilleries. **Chemical Engineering Transactions**, v. 25, p. 941-946, 2011.

LEITE, R. C. C. (Coord.). **Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial da gasolina do mundo**. Executores: NIPE / UNICAMP. Agência Financiadora: CGEE. Campinas, 2005. Relatório do Projeto.

SOUSA, E.L. L.; MACEDO, I.C. **Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética.** São Paulo: UNICA, 2010.

UDOP – União dos Produtores de Biocombustíveis, Preços da Cana-de-Açúcar. 2011. Disponível em:<www.udop.com.br/index.php?item=cana>. Acesso em: 16 maio 2011.

Biorrefinarias: Tecnologias e Produtos Segundo a Visão da Braskem

Paulo Coutinho

A preocupação com o meio ambiente vem crescendo junto à sociedade. Este fato vem fazendo com que o tema comece a ser inserido nas políticas e estratégias de países e empresas de todo o mundo. Os países desenvolvidos discutem hoje medidas para controlar e reduzir as emissões dos chamados gases de efeito estufa. Fala-se em taxar as emissões de CO₂. Empresas como BASF, DSM, BAYER, BRASKEM, VALE, assumem, como estratégia, compromissos para a redução do consumo de água e energia e de produção de resíduos. Destacam-se as metas estabelecidas em termos de uso de energia e matérias-primas de fontes renováveis.

Considerando que não há como desvincular o aspecto de resultado econômico na existência destas empresas, apenas as chamadas biorrefinarias encontram eco nesta nova visão. É na conjugação de biocombustíveis, de baixo valor e altos volumes de mercado, com bioprodutos de maior valor, porém menores volumes, que este novo conceito de “negócio” passa a ter chance de se viabilizar economicamente. Estamos, porém, longe de uma definição plena do mesmo. Embora já se vislumbre uma nova cadeia de produção, os atores ainda estão indefinidos. Empresas de diferentes segmentos da indústria,

com tamanhos variados e interesses diversos transitam em um ambiente onde a tecnologia emergente parece ser o fator que definirá o futuro desta nova indústria.

Este trabalho apresenta um postulante a ator relevante neste novo segmento, a BRASKEM, e discute como o mesmo está se desenvolvendo. Discute, ainda, os impactos das tecnologias e produtos que estão surgindo, procurando a partir daí desmistificar a ideia de que teremos uma única plataforma tecnológica vencedora.

A Braskem

A BRASKEM foi formada em 2002 a partir da fusão de seis diferentes empresas. Compreendeu a primeira experiência no país de reunir a primeira e a segunda geração petroquímica em uma única companhia. Ela nasce com três objetivos bem claros: ser líder na América Latina, ser competitiva mundialmente e ter autonomia tecnológica. Todos foram atingidos rapidamente.

Em menos de três anos ela se torna a empresa líder na América Latina. Sua competitividade pode ser explicitada por suas exportações que alcançam hoje mais de setenta países. A busca pela autonomia tecnológica teve início com a instalação de um grande Centro de Pesquisas no sul do país e pode ser comprovada pelo emprego de tecnologia própria na unidade de polipropileno (PP) implantada em Paulínia no estado de São Paulo.

O faturamento da BRASKEM passa de cerca de US\$ 2 bilhões em 2002 para mais de US\$ 19 bilhões em 2010. Esse crescimento deve-se à aquisição de diversas empresas

do setor no país e tem o coroamento em 2010 com a aquisição da QUATTOR e início da internacionalização com a aquisição do negócio de PP da SUNOCO nos Estados Unidos. Ainda em 2011 ela adquire o negócio de PP da DOW, constituído por duas plantas nos Estados Unidos e duas na Europa.

Em 2010 dá partida à planta de eteno de etanol e se torna o maior produtor de biopolímeros do mundo. Com base nesta experiência, e frente a uma consciência sustentável pré-existente, decide estabelecer uma nova visão para 2020: tornar-se a empresa líder em química sustentável.

Neste sentido, inicia esforços buscando aproveitar as vantagens competitivas do país a partir do uso de matérias-primas renováveis. Cria uma Unidade de Negócios em Renováveis e estrutura toda uma área tecnológica em torno do assunto. Existem, hoje, quatro áreas de inovação na empresa: três delas ligadas as unidades de negócio (polímeros, insumos básicos, renováveis e internacional) e uma inovação corporativa a qual compreende uma empresa 100% BRASKEM chamada IDEOM. Enquanto as três primeiras trabalham no dia a dia com projetos de curto e médio prazo em linhas de negócio atuais, a IDEOM trabalha visando garantir o atingimento da visão de longo prazo e na identificação de novos negócios para a empresa.

A estrutura de renováveis compreende, hoje, um grupo voltado para monitoramento, identificação e avaliação de tecnologias e outro para desenvolvimento tecnológico. Para isso, foi montado um laboratório de biotecnologia junto ao Laboratório Nacional de Biotecnologia em Campinas. Vários trabalhos na área já são desenvolvidos pela empresa.

Biorrefinarias: conceitos, atores e uma nova cadeia produtiva

Face ao problema das mudanças climáticas, há um forte apelo pelos biocombustíveis no mundo de hoje. O EIA (Energy Information Administration) estima que a produção de biocombustíveis poderá variar de 3,5 a 6,2 milhões de barris dia⁻¹ em 2035 (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2011). Este crescimento será função da evolução do preço do petróleo e dos custos de produção destes biocombustíveis. A biorrefinaria surge a partir deste ponto. Somente a sinergia entre a produção de bioprodutos e biocombustíveis poderá garantir a viabilidade do atingimento destes números.

Cabe destacar o potencial de liderança do Brasil neste novo setor. Luz, água, terra e domínio da cultura de biomassa com maior potencial, a cana-de-açúcar, são vantagens competitivas que não podem ser desprezadas. No entanto, o país deverá desenvolver esforços de forma a manter esta liderança. O Pacto da Indústria Química (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA, 2011), lançado em 2010, propõe investimentos neste setor da ordem de US\$ 20 bilhões até 2020, não só para manter esta liderança, como também para garantir o equilíbrio das contas do setor químico nacional, hoje deficitário.

Quando olhamos para o mundo verificamos que este é um setor ainda em formação. Nele se apresentam grandes empresas de diversos setores: energia (BP, TOTAL, PETROBRAS, SHELL, EXXON), química (DOW, BAYER, DUPONT, EVONIK, BASF, DSM, BRASKEM), agroquímicas (ROQUETTE, CARGIL, ADM, PURAC) entre outros (NOVOZYMES,

GENENCOR, VALE). Estas empresas atuam de formas diferentes. Algumas possuem suas próprias áreas de pesquisa, outras investem diretamente em empresas *start-up* ou mesmo criaram fundos de *venture capital* para viabilizar novas ideias. Existem, ainda, pequenas empresas nascentes de base tecnológica (COSKATA, LS9, GENOMATICA, VIRENT, VERENIUM, RANGE FUELS, KIOR, MASCOMA, ELEVANCE), grandes fundos de *venture capital* (CLEANTECH, NGEN, KHOSLA VENTURES, EMERALD) e grandes institutos de pesquisa e Universidades no mundo (FRAUNHOFER, NREL, KRICT, BERKELEY, WINSCONSIN, MIT, GHENT, DELFT). Em contrapartida à existência de recursos naturais, aqui parece haver um claro vazio no Brasil. Existem poucas empresas (grandes ou pequenas) investindo e não existe um mecanismo de *venture capital* ou mesmo incentivos governamentais similares àqueles existentes em outros países e que estejam disponíveis no mercado nacional.

O conceito de biorrefinaria ainda não está claro. O *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) do Departamento de Energia dos Estados Unidos a define como: “A *biorrefinaria* é uma instalação que integra os processos e equipamentos de conversão de biomassa para produzir combustíveis, energia e produtos químicos a partir da biomassa, maximizando o valor de biomassa e minimizando os resíduos.” (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2011). Compreende, ainda, um conceito em aberto, que admite muitas visões, seja de matérias-primas, seja de tecnologias. Basicamente, pode-se esperar que a biorrefinaria envolva três grandes áreas: a produção da biomassa propriamente dita (milho, cana-de-açúcar, sorgo, beterraba, capim elefante, etc.), o tratamento desta

biomassa (moagem, pirólise, torrefação, gaseificação, hidrólise enzimática, etc.) com vistas a resolver problemas logísticos e/ou disponibilizar o constituinte básico que será convertido na etapa seguinte, a conversão (fermentação ou processos químicos convencionais: oxidação, redução, etc.) em energia, biocombustíveis e bioprodutos. Estas áreas, por sua vez, envolvem diferentes tecnologias e diferentes atores. Surge, assim, toda uma nova cadeia de produção.

Surgem os produtores de sementes (modificadas geneticamente ou não), os produtores de adubos, produtores de máquinas e implementos, os processadores da biomassa e, por fim, aqueles que produzirão os biocombustíveis e os bioprodutos. A biorrefinaria da DUPONT é um bom exemplo desta nova cadeia. Ela envolve empresas como: PIONEER, JOHN DEERE, MARKET POINT, FERASURE, GENENCOR, TATE & LYLE, VIVERGOFUELS, BUTAMAX, BP, etc.

Tecnologias em competição

Da mesma forma que os atores, as tecnologias para conversão da biomassa em biocombustíveis e bioprodutos também não estão definidas. Pode-se afirmar, hoje, que existem três plataformas distintas: a termoquímica, a bioquímica e a de extração e modificação de óleos (grãos e algas). Cada uma das plataformas envolve grande variedade de tecnologias, as quais podem levar a diferentes produtos.

A plataforma termoquímica envolve basicamente três tecnologias: pirólise, torrefação e gaseificação. As duas primeiras, além de resolverem problemas relacionados à logística com o adensamento da biomassa e a viabilização de seu

transporte por maiores distâncias, geram um produto que pode ser empregado diretamente como combustível. Em alguns casos, dependendo da tecnologia de gaseificação, elas se tornam imprescindíveis, compreendendo a primeira etapa deste processo, seja por logística, seja pela necessária preparação do material para alimentar o equipamento em questão. A gaseificação da biomassa gera o gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$) que pode ser empregado para geração de energia e bioprodutos. Novas tecnologias se agregam, então: Fischer-Tropsch para produção de hidrocarbonetos, reação catalítica ou fermentação para a produção de álcoois, etc.

A tecnologia bioquímica compreende a fermentação dos açúcares contidos nas plantas ou obtidos a partir da lignocelulose. Existem várias alternativas e estratégias para liberação de açúcares da estrutura lignocelulósica. O processo se inicia pelo pré-tratamento, que busca expor a celulose e a hemicelulose ao ataque de enzimas para liberação dos açúcares e posterior fermentação. As estratégias de desenvolvimento podem variar desde a hidrólise dos açúcares C6, e fermentação em separado dos açúcares C5 e C6; hidrólise e fermentação conjunta dos açúcares C6; fermentação conjunta dos açúcares C5 e C6, etc. Os produtos obtidos podem variar de combustíveis (etanol, hidrocarbonetos) a bioprodutos (propanodiol, ácido succínico, ácido láctico, etc.). Estas fermentações podem usar leveduras ou bactérias, modificadas geneticamente ou não.

A última plataforma diz respeito à utilização de óleos vegetais ou óleos obtidos a partir de algas. Depois de extraídos, a partir de uma transesterificação (diferentes processos e catalisadores) é possível obter glicerina e biodiesel. No entanto,

outras tecnologias são desenvolvidas, tais como metátese, por meio da qual o óleo pode ser convertido a combustíveis de maior valor (gasolina de aviação) e mesmo alfa-olefinas e ácidos graxos.

Verifica-se que todas as possíveis tecnologias já em uso, ou a serem desenvolvidas, devem ser consideradas quando da definição de uma biorrefinaria. Alguns produtos chegam a transitar por mais de uma plataforma tecnológica. Alguns exemplos podem ser dados: o eteno verde produzido pela BRASKEM (inicia na fermentação do açúcar a etanol, que a partir daí é desidratado cataliticamente a eteno); o etanol produzido pelos processos da COSKATA e INEOS (a biomassa é gaseificada e a seguir o gás de síntese obtido segue para um reator biológico para a produção do etanol); ácido acrílico verde em desenvolvimento pela OPXBIO e a NOVOZYMES (fermentação do açúcar a ácido hidroxipropiônico e sua posterior desidratação catalítica). Estes exemplos tendem a demonstrar que todas as tecnologias devem ser consideradas e não pode haver uma prevalência de uma plataforma sobre a outra. No mercado, em diferentes estágios de desenvolvimento e escalonamento, já podem ser encontradas biorrefinarias contemplando exemplos das três plataformas citadas.

A biomassa constitui também um ponto a ser considerado na definição da tecnologia a ser empregada. Passa a ser um elemento de estudo e desenvolvimento por países e empresas. Novas plantas são identificadas para uso comercial e melhorias por seleção ou genética são feitas para aumentar sua produtividade. Cada biomassa possui composição e estrutura próprias, o que pode determinar qual a tecnologia a ser utilizada para o seu completo aproveitamento.

Tecnologias *versus* produtos

No início da década passada vários países europeus e os Estados Unidos iniciaram estudos visando encontrar moléculas provenientes de biomassa que pudessem vir a se tornar os novos blocos de construção para esta nova indústria. Deveriam ser moléculas com potencial para alto volume e baixo custo de obtenção. A partir delas, toda a árvore de produtos renováveis seria construída. Dois trabalhos se destacam: *The BREW Project* (European Commission's Growth Programme) (PATEL *et al.*, 2006) e o *Top Value Added Chemical from Biomass, vol. 1 e 2* (U.S. Department of Energy) (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2004; UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2007). Com a participação de governo, academia e empresas, ambos buscavam encontrar estas moléculas. O primeiro chegou a selecionar 30 possíveis candidatas. O segundo chega a uma lista de 12 blocos de construção.

Alguns pesquisadores começam a questionar estas listas. À medida que as tecnologias se desenvolvem, algumas destas moléculas vão caindo enquanto outras vão crescendo em termos de potencial. No entanto, talvez o mais importante no momento, uma vez que não há ainda uma definição de tecnologias vencedoras e que os recursos se tornam cada vez mais escassos devido a fatores econômicos, seja definir os critérios para uma nova seleção e novas apostas. Neste sentido, o trabalho de Bozell e Petersen parece se tornar importante. Estes pesquisadores propõe uma série de critérios para a escolha, e a partir daí, um esforço integrado para a viabilização, no curto prazo, desta nova cadeia (BOZELL; PETERSEN, 2010). Estes critérios são:

- *Volume e nível de trabalho em literatura recente (comprovação de interesse e conhecimento já acumulado);*
- *Potencial de geração de produtos a partir da molécula (geração de uma cadeia);*
- *Tecnologia empregada aplicável a produtos de alto volume e exibindo forte potencial para servir como plataforma;*
- *Viabilidade do escalonamento da tecnologia e do produto;*
- *O bioproduto é um produto comercial já existente (pode compreender intermediário de várias cadeias, substituto direto de petroquímico ou uma commodity convencional);*
- *Deve ser passível de utilização como bloco principal de uma biorrefinaria;*
- *Produção comercial a partir de matéria-prima renovável já estabelecida.*

Com base nestes critérios eles avaliam as principais moléculas que são trabalhadas por empresas e pesquisadores. Além de selecionar aquelas com maior potencial, procura estabelecer, ainda, um tempo para que os resultados estejam no mercado. Eles dividem, então, por grupos no curto, médio e longo prazo.

No curto prazo são listados o etanol, glicerol e seus derivados, sorbitol e possivelmente furfural e ácido levulínico. Neste caso, as tecnologias já existem e estas moléculas compreendem, em alguns casos, a própria base da biorrefinaria

(etanol como produto e glicerina como subproduto). As outras três moléculas têm um grande potencial para gerar toda uma gama de derivados que já existem no mercado.

No médio prazo são listados ácido láctico, ácido succínico, xilitol e possivelmente FDCA (ácido furanodicarboxílico) e isopreno. Ácido láctico e succínico se destacam pelo elevado rendimento a partir do açúcar, faltando a consolidação dos possíveis derivados. Xilitol e isopreno dependem do desenvolvimento de tecnologias que tornem os produtos e seus derivados competitivos no mercado. Já o desafio para o FDCA se torna mais complexo, pois o emprego desse ácido, em substituição ao PTA (ácido tereftálico purificado) na produção de poliésteres, pressupõe a competição de um produto novo em um mercado com uma estrutura já estabelecida. Os polímeros do FDCA encontram moldes, equipamentos, regulamentações estabelecidas e, caso não tragam vantagens em custo ou desempenho superior, dificilmente se colocarão no mercado.

Para longo prazo são citados o hidroximetilfurfural, o ácido hidroxipropiônico e os biohidrocarbonetos. Em todos os casos, a grande incógnita é se a tecnologia será capaz de chegar a processos que façam com que estas moléculas sejam competitivas no mercado.

Outro ponto que poderá impactar a biorrefinaria compreende a definição de seus limites. A Figura 1 procura buscar as similaridades da cadeia de produção de petróleo com a cadeia de produção de renováveis que deve vir a se formar.

Na cadeia do petróleo observa-se uma sequência: exploração, refino, central petroquímica. É no refino, ou seja, na refinaria que são preparados e separados os combustíveis e a matéria-prima que dará origem aos produtos petroquímicos básicos.

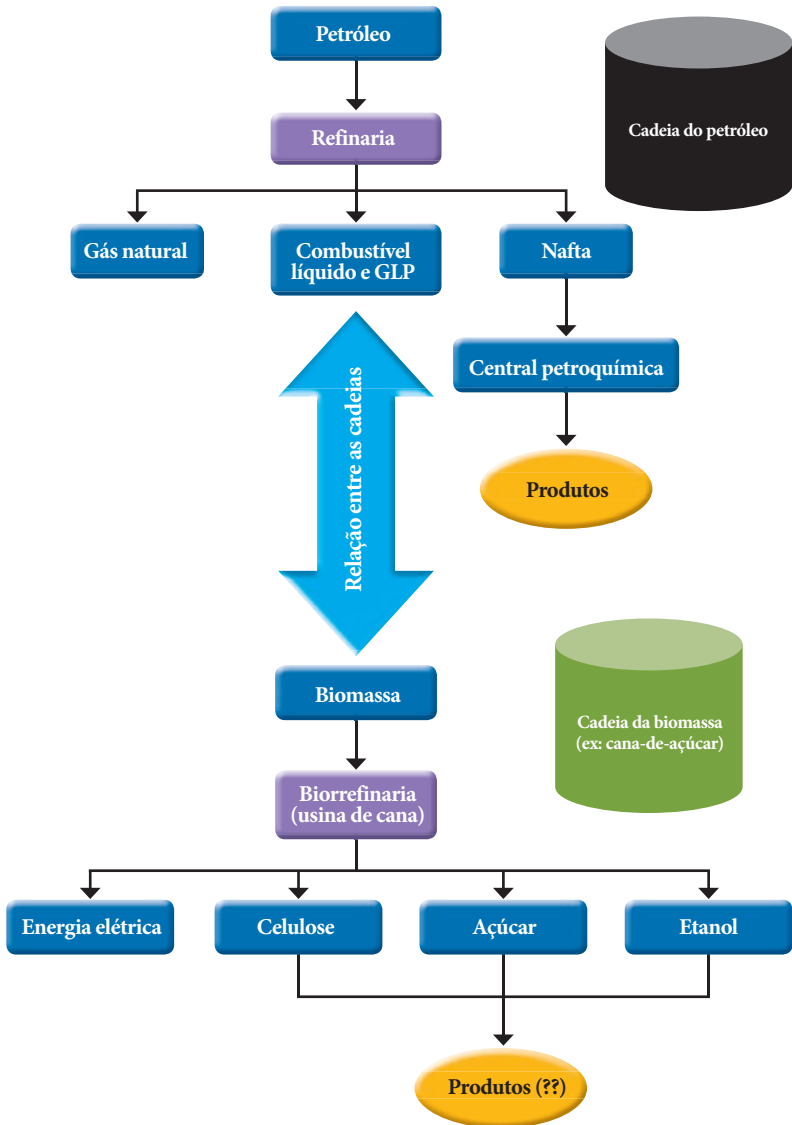


Figura 1. Pensando a cadeia de renováveis. Existem produtos derivados da biomassa que ainda não têm definidas suas rotas de obtenção.

A cadeia de renováveis se inicia na produção da biomassa e seu processamento disponibilizando, de imediato, açúcares, álcool, lignocelulose e resíduos. Este processamento pode ser comparado à atuação da refinaria na cadeia do petróleo. O ponto que se coloca é, onde estará o limite da biorrefinaria do futuro, considerando que ela busca a maior rentabilidade possível (máximo de resultado com um mínimo de investimento). Convém notar que os processadores normalmente já existem no mercado. Isso, no entanto, pode mudar. Normalmente constituíam empresas pequenas, de baixa diversificação. Com a entrada de grandes grupos espera-se uma concentração do setor, o que deixa em aberto o modelo a ser adotado nesta nova cadeia produtiva.

Existem, ainda, outros pontos que devem ser levados em consideração na escolha dos produtos. Eles afetam a indústria brasileira em particular. Por cultura e baixa preocupação com aspectos de saúde, segurança e meio ambiente é difícil acreditar que produtos que envolvam processos “perigosos” ou produtos tóxicos possam ser incorporados às biorrefinarias. O próprio conceito de utilização de organismos geneticamente modificados em processos de fermentação deverá criar uma discussão que se não for bem conduzida poderá resultar em restrições para este setor no país. O segundo ponto está relacionado à busca por sinergias. A indústria nacional de etanol combustível produz apenas sete a oito meses por ano. O uso de biomassas complementares ou de novas fontes de biomassa pode significar um salto de competitividade. Isso deve estar alinhado com a disponibilidade de terra e com os custos de logística de transporte da biomassa. Estes custos hoje já limitam as capacidades das usinas instaladas no país.

Conclusões

Ainda não é possível definir tecnologias ou produtos vencedores para a nova cadeia de biomassa que está se formando. Além disso, deve ser levado em conta que mesmo aqueles produtos mais promissores estão demandando plataformas tecnológicas bastante diversas. Neste sentido, não há como desconsiderar qualquer das alternativas hoje em estudo no mundo. Países e empresas devem investir em ambas as plataformas que deverão ser dominantes neste setor: a bioquímica e a termoquímica.

Serão os aspectos econômicos que definirão as tecnologias e os produtos vencedores. No entanto, deve-se destacar que esta análise não será fácil. Alguns aspectos terão que ser incorporados a ela, tais como: integração de tecnologias com a produção de bioprodutos e de biocombustível; disponibilidade da biomassa, a cultura do setor, a escala de produção *versus* a logística da biomassa, os ativos e as competências pré-existentes e a forma como elas serão incorporadas ao negócio.

Atualmente, o Brasil ainda está em uma posição confortável devido às vantagens competitivas naturais, como disponibilidade de luz, água e terra, associado ao conhecimento acumulado na exploração da cana-de-açúcar. Convém ressaltar, no entanto, que outros países estão investindo no desenvolvimento e no aprimoramento de novas fontes de biomassas e que novas fronteiras agrícolas se abrem na África, México, entre outros, o que pode enfraquecer e reduzir a posição brasileira neste setor.

Cabe, então, um alerta sobre a necessidade de juntar esforços do governo, da academia e das empresas no sentido de preservar e ampliar as vantagens que já possuímos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. ABIQUIM. **Pacto nacional da indústria química**. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/pacto/>>. Acesso em: nov. 2011.

BOZELL, J.J.; PETERSEN, G.R. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates – the US Department of Energy’s “Top 10” revisited. **Green Chemistry**, v. 12, p. 539 – 554, 2010.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. NREL. Biomass research. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>>. Acesso em: nov. 2011.

PATEL, M.; CRANK, M.; DORNBURG, V.; HERMANN, B.; ROES, L.; HÜSING, B.; OVERBEEK, L.; TERRAGNI, F.; RECCHIA, E. **Medium and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources – the potential of white technology**. The BREW project. Utrecht University: Utrecht, 2006. 452 p. Final report.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. EIA. **International energy outlook 2010**. Washington, 2011. 292 p. (DOE/EIA-0484 2011).

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Top value added chemicals from biomass. Volume I – results of**

screening for potential candidates from sugars and synthesis gas. Oak Ridge, 2004. 67 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Top value added chemicals from biomass. Volume II – results of screening for potential candidates from biorefinery lignin.** Oak Ridge, 2007. 79 p.

A Importância da Química Verde para as Biorrefinarias

Rafal Bogel-Lukasik

A Declaração do Rio de Janeiro sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992 indica claramente o papel de sustentabilidade para o futuro da humanidade. O primeiro princípio desta declaração afirma que os seres humanos estão no centro das preocupações com o desenvolvimento sustentável, tendo direito a uma vida saudável e produtiva em harmonia com a natureza (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 1992). Em um documento de 19 páginas, sustentabilidade é mencionada 66 vezes. Isso destaca o desafio para todos nós de determinar os objetivos do desenvolvimento sustentável e de oferecer instrumentos tecnológicos, científicos e sociais para cumprir estes objetivos. Seis anos após as declarações das Nações Unidas, Anastas e Warner apresentaram os 12 princípios da Química Verde (ANASTAS; WARNER, 1998):

1. *Prevenção* - é melhor prevenir a geração do que tratar ou eliminar os resíduos depois de terem sido criados;
2. *Economia atômica* - métodos sintéticos devem ser projetados para maximizar a incorporação de todos os materiais utilizados no processo ao produto final;

3. *Sínteses químicas menos perigosas* - sempre que possível, os métodos sintéticos devem ser projetados para utilizar e gerar substâncias que possuam pouca ou nenhuma toxicidade para a saúde humana e o meio ambiente;
4. *Projeto de produtos químicos mais seguros* - produtos químicos devem ser projetados para exercer a função desejada, minimizando a sua toxicidade;
5. *Solventes e compostos auxiliares mais seguros* - o uso de substâncias auxiliares (ex.: solventes, agentes de separação, etc.) deve ser tornado desnecessário sempre que possível e inócuo quando utilizado;
6. *Projeto para a eficiência energética* - as necessidades energéticas de processos químicos devem ser reconhecidas por seus impactos ambientais e econômicos e devem ser minimizadas. Se possível, métodos sintéticos devem ser conduzidos à temperatura e pressão ambientes;
7. *Uso de matérias-primas renováveis* - as matérias-primas ou insumos devem ser renováveis, ao invés de esgotáveis, sempre que técnica e economicamente viável;
8. *Redução de derivatizados* - a derivatização desnecessária (uso de grupos bloqueadores, proteção e desproteção, modificação temporária de processos físicos e químicos) deve ser minimizada ou evitada, se

possível, porque tais etapas requerem reagentes adicionais e podem gerar resíduos;

9. *Catálise* - reagentes catalíticos (tão seletivos quanto possível) são superiores aos reagentes estequiométricos;

10. *Planejamento para degradação* - os produtos químicos devem ser desenvolvidos de modo que, completada sua função, decomponham-se em produtos de degradação inócuos e não permaneçam no meio ambiente;

11. *Análises em tempo real para prevenção da poluição* - metodologias analíticas precisam ser aperfeiçoadas para permitir o monitoramento e controle de processos e produtos em tempo real, antes da formação de substâncias perigosas;

12. *Química mais segura para prevenção de acidentes* – as substâncias e a forma de cada substância a ser utilizada em um processo químico devem ser escolhidas para minimizar o potencial de acidentes químicos, como vazamentos, explosões e incêndios.

Os 12 princípios definem os limites em que os trabalhos científicos e industriais devem ser realizados. Eles devem ser realizados em indústrias químicas pela introdução de processos químicos que não produzem contaminantes, mas produtos não tóxicos e materiais recicláveis ou facilmente degradáveis. As indústrias devem estar baseadas em processos ideais, que começam com materiais de partida não poluentes, que não dão

origem a produtos secundários e que não necessitam de solventes para realizar qualquer conversão química ou para isolar e purificar o produto. Tais processos intrinsecamente limpos parecem, atualmente, inatingíveis. Entretanto, espera-se que o talento e a desenvoltura dos químicos permitam à indústria química substituir muitos processos existentes com novas tecnologias visando uma pegada ambiental próxima a zero. Isto é especialmente importante para as indústrias farmacêutica e de química fina que usam muita energia (WORCELL *et al.*, 2000) e geram uma grande quantidade de resíduos químicos. O fator E é um parâmetro que descreve a quantidade de resíduos químicos determinada como resíduos produzidos em quilogramas por quilograma de produto (Tabela 1).

Os problemas de resíduos e energia devem ser resolvidos no futuro próximo porque a geração de resíduos e o consumo de energia estão aumentando fortemente devido ao crescimento da população mundial e também devido ao aumento do padrão de vida nas economias emergentes (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2011). Os

Tabela 1. Produção mundial e geração de resíduos (fator E) por segmentos da indústria química. Fontes: Wocell *et al.* (2000); Sheldon (1994).

Segmento da indústria	Produção (ton ano ⁻¹)	E (kg _{resíduos} kg _{produto} ⁻¹)
Refino de óleo	10 ⁶ -10 ⁸	ca. 0,1
Insumos químicos	10 ⁴ -10 ⁶	< 5
Química fina	10 ² -10 ⁴	5-50
Produtos farmacêuticos	10-10 ³	25-100

12 princípios da química verde, mencionados anteriormente, mostraram que o mais importante é a minimização da geração de resíduos e do consumo de energia. Isso irá conduzir a um meio ambiente mais limpo e também a um melhor custo-benefício no uso de recursos.

A ciência vem desenvolvendo muitas tecnologias que demandam menos energia e que geram menos resíduos. No entanto, as exigências de novos investimentos e a percepção de risco elevado na adoção de novas tecnologias estão desacelerando a implantação de novos processos. A solução deste problema é o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis que aumentam significativamente a eficiência de recursos de processos químicos e reduzam o tempo de operação de tais tecnologias.

Consumo de energia e geração de resíduos

De 50 a 80% do consumo total de energia dos processos químicos é usada para purificação e separação de compostos químicos (MOULIJN *et al.*, 2001). As últimas décadas trouxeram algum desenvolvimento nesta área, devido aos métodos de intensificação de processo. Estes métodos são baseados na integração de diferentes operações unitárias, ou seja, reação e separação em uma única etapa. Isso leva a um menor consumo de energia devido à maior eficiência energética e menor geração de resíduos que tornam os processos mais sustentáveis. Evidentemente, muitos processos químicos ainda são realizados sem a intensificação adequada e, por isso, é desejável um trabalho contínuo no desenvolvimento de novas tecnologias.

Como exemplo, todos os anos a indústria química na União Européia gera centenas de milhões de toneladas de resíduos. A

maneira de evitar este efeito insustentável é substituindo as tecnologias existentes por novas tecnologias baseadas na eficiência atômica. Sheldon demonstrou que utilizando condições estequiométricas a eficiência atômica é de 82% para a redução e de 44% para a oxidação, enquanto que os mesmos processos realizados com um catalisador resultam em aproximadamente 100% de conversão para a redução e 87% para a oxidação (SHELDON, 1997).

Outra forma de contaminação do meio ambiente é a perda de solventes por evaporação. O uso de grandes quantidades de solventes orgânicos voláteis, como meio líquido para a reação química e extração, é uma grande preocupação para a indústria química contemporânea. Todos os anos as indústrias químicas européias usam solventes que custam 6 bilhões de euros (REICHART, 2003). Estes solventes voláteis e inflamáveis são perigosos e, portanto, potenciais contaminantes para o meio ambiente. Por estas razões, a minimização da emissão de solventes e o desenvolvimento de estratégias para processos sem solventes ou solventes ambientalmente benignos são questões chave.

Processos livres de solvente

Processos livres de solvente constituem uma opção ideal para evitar a emissão de efluentes residuais líquidos e gasosos. Muitas reações podem ser realizadas sem solventes quando um dos reagentes dissolve o outro, ou ambos são líquidos, ou quando a mistura de reação pode ser fundida para produzir um líquido. Entretanto, nem sempre é possível trabalhar sem solventes. Algumas vezes os solventes são necessários para

reduzir a viscosidade, ou para dissolver sólidos, ou para recuperar os compostos por meio de cristalização ou extração, ou para propósitos de limpeza (MATLAK, 2001). Nestas situações, solventes menos nocivos que podem ser facilmente recuperados são obrigatórios.

Processos aquosos

O solvente menos perigoso para o meio ambiente é a água. Por exemplo, em reações bifásicas catalisadas por metais de transição, reagentes e produtos formam uma fase orgânica e o catalisador e ligantes são dissolvidos em uma fase aquosa. Os reagentes formam complexos com o sistema catalisador-ligantes. Os produtos formados não são solúveis em água e permanecem na fase orgânica. Além disso, a baixa solubilidade mútua de água e produtos orgânicos permite uma separação fácil e uma contaminação mínima do produto. Também, a água é ainda muito mais barata que outros solventes, o que a torna mais atraente. Entretanto, a água não é uma solução para todos os problemas, porque a solubilidade de compostos orgânicos nela é limitada, o que afeta as velocidades de reação. Mais ainda, a água é um composto muito polar e coordenador de prótons, o que leva a algumas limitações da química organometálica (OLIVIER-BOURBIGOU; MAGNA, 2002).

Processos com solventes fluorados

Solventes fluorados demonstraram a sua utilidade para muitas reações catalíticas. Uma das propriedades únicas de solventes fluorados é a dependência da temperatura de sua

miscibilidade com solventes orgânicos (HORVÁTH; RÁBAI, 1994). No entanto, o problema é a necessidade de projetar ligantes fluorosos para dissolver o catalisador. No entanto, deve-se levar em conta o fato dos solventes fluorosos serem gases de efeito estufa e sua decomposição térmica produzir o tóxico fluoreto de hidrogênio (MATLAK, 2001; OLIVIER-BOURBIGOU; MAGNA, 2002).

Fluidos supercríticos

Fluido supercrítico é um composto acima de sua temperatura crítica (T_c) e pressão crítica (P_c), mas abaixo da pressão necessária para condensá-lo em um sólido (JESSOP; LEITNER, 1999). (Figura 1).

Com o aumento da temperatura, o líquido torna-se menos denso devido à expansão térmica, e com o aumento da pressão, o gás se torna mais denso. Assim que as densidades tornam-se iguais, a distinção entre as fases líquida e gasosa desaparecem, e o ponto crítico é atingido. Acima do ponto crítico há apenas uma única fase gasosa. Tais propriedades assumem valores que estão mais ou menos entre os valores geralmente exibidos por líquidos e gases, levando muitos pesquisadores a apontarem vantagens importantes para o uso de fluidos supercríticos em processos químicos. Além disso, fluidos supercríticos têm propriedades ajustáveis, tais como coeficientes de partição e solubilidade. É importante ressaltar que pequenas mudanças de temperatura a pressões próximas do ponto crítico podem resultar em mudanças de até 100 vezes na solubilidade de compostos de característica não polar acentuada, o que simplifica a separação.

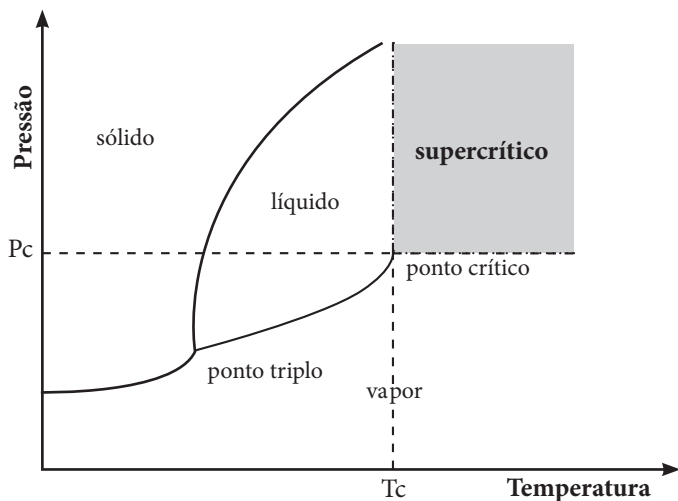


Figura 1. Diagrama de fases de um fluido supercrítico. O ponto crítico é o ponto em que as densidades do líquido e do vapor tornam-se idênticas e o fluido é denominado supercrítico. Note que neste diagrama a escala de pressão não é linear.

Líquidos iônicos

Líquidos iônicos (LI) são substâncias formadas por íons (ânions e cátions) e são líquidos à temperatura ambiente ou na proximidade desta. O interesse nesta classe de compostos, anunciados como verdes, é crescente (DEETLEFS; SEDDON, 2006). LI são caracterizados pela pressão de vapor quase nula (EARLE *et al.*, 2006), estabilidade térmica (DOMANSKA; BOGEL-LUKASIK, 2005) e propriedades amplamente ajustáveis no que diz respeito à polaridade, hidrofobicidade e miscibilidade com outros solventes, por meio de modificação

adequada do cátion e do ânion. Sua pressão de vapor desprezível é uma característica interessante e, por causa disso, os LI são facilmente recicláveis e reutilizáveis. Além disso, oferecem uma solução para problemas como a emissão de efluentes dos solventes e a reciclagem de catalisadores que ocorrem durante reações químicas (BOGEL-LUKASIK *et al.*, 2010).

Além disso, os LI podem ser modificados para exibir propriedades desejáveis pela alteração do cátion ou do ânion. LI, como meios combinados de reação e separação, levam a um aumento da eficiência dos recursos. Isto é possível porque as reações têm eficiência atômica devido à alta seletividade e insignificante volatilidade dos LI e, portanto, a processos de separação e purificação mais eficientes (WASSERSCHIED; WELTON, 2003).

Um dos campos que se enquadra nos princípios da química verde é a abordagem da biorrefinaria. Há um grande número de pontos comuns potenciais entre a química verde e biorrefinarias. Por exemplo, o uso de coprodutos e resíduos de biomassa para a produção de produtos de maior valor cumpre um dos princípios da química verde (GÍRIO *et al.*, 2010). A aplicação generalizada de solventes não perigosos (água) no pré-tratamento da biomassa é uma das principais vantagens destacadas sob o ponto de vista da química verde (GÍRIO *et al.*, 2010). Além disso, os processos catalíticos da biomassa, caracterizados pela elevada eficiência atômica, cumprem um dos objetivos da química verde (ZAKRZEWSKA *et al.*, 2011).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. (Ed.) **Green chemistry: theory and practice**. New York: Oxford University Press, 1998.
- BOGEL-ŁUKASIK, E; SANTOS, S.; BOGEL-ŁUKASIK, R.; NUNES DA PONTE, M. Selectivity enhancement in the catalytic heterogeneous hydrogenation of limonene in supercritical carbon dioxide by an ionic liquid. **Journal of Supercritical Fluids**, v. 54, p. 210 - 217, 2010.
- DEETLEFS, M.; SEDDON, K. R. IONIC LIQUIDS: FACT AND FICTION. **Chimica Oggi**, v. 24, p. 16, 2006.
- DOMANSKA, U.; BOGEL-ŁUKASIK, R. *Physicochemical properties and solubility of alkyl-(2-hydroxyethyl)-dimethylammonium bromide*. *Journal of Physical Chemistry B*, v. 109, p. 12124-12132, 2005.
- EARLE, M. J.; ESPERANÇA, J. M. S. S.; GILEA, M. A.; CANONGIA LOPES, J. N.; REBELO, L. P. N.; MAGEE, J. W.; SEDDON, K. R.; WIDEGREN, J. A. *The distillation and volatility of ionic liquids*. *Nature*, v. 439, p. 831 - 834, 2006.
- GÍRIO, F. M.; FONSECA, C.; CARVALHEIRO, F.; DUARTE, L. C.; MARQUES, S.; BOGEL-ŁUKASIK, R. Hemicelluloses for fuel ethanol: a review. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 4775-4800, 2010.

HORVÁTH, I. T.; RÁBAL, J. **Facile catalyst separation without water: fluorous biphasic hydroformylation of olefins.** *Science*, v. 266, p. 72-75, 1994.

JESSOP, P. G.; LEITNER, W. E. (Ed.) **Chemical synthesis using supercritical fluids.** Weinheim: Wiley-VCH, 1999.

MATLAK, A. S. (Ed.) **Introduction to green chemistry.** New York: Marcel Dekker, 2001.

MOULIJN, J. A.; MAKKEE, M.; VAN DIEPEN, A. E. (Ed.) **Chemical process technology.** Chichester: John Wiley & Sons, 2001.

OLIVIER-BOURBIGOU, H.; MAGNA, L. Ionic liquids: perspectives for organic and catalytic reactions. **Journal of Molecular Catalysis A**, v. 182-183, p. 419 - 437, 2002.

REICHARDT, C. (Ed.) **Solvents and solvent effects in organic chemistry.** 3rd Ed. Weinheim:Wiley-VCH Verlag, 2003.

SHELDON, R. A. Consider the environmental quotient. **ChemTec**, v. 24, p. 38-47, 1994.

SHELDON, R. A. Catalysis: the key to waste minimization. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 68, p. 381-388,1997.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Rio Declaration on Environment and Development**. Rio de Janeiro, 1992.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. EIA. **International energy outlook 2010**. Washington, 2011. 292 p. (DOE/EIA-0484 2011).

WASSERSCHEID, P.; WELTON, T. (Ed.) **Ionic liquids in synthesis**. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2003.

WORCELL, E.; PHYLIPSEN, D.; EINSTEIN, D.; MARTIN, N. **Energy use and energy intensity of the US chemical industry**. Berkeley: University of Berkeley, 2000.

ZAKRZEWSKA, M. E.; BOGEL-ŁUKASIK, E.; BOGEL-ŁUKASIK, R. Ionic liquid-mediated formation of 5-hydroxymethylfurfural — a promising biomass-derived building block. **Chemical Reviews**, v. 111, p. 397-417, 2011.

Química Verde com Potencial Econômico

James Clark

Todos os produtos consumidos pela sociedade nos dias de hoje, incluindo eletrônicos, tintas, produtos farmacêuticos, móveis, meios de transporte e alimentos, contam com os produtos químicos. Mas a maioria dos produtos químicos utilizados hoje é derivada do petróleo, uma matéria-prima não renovável e cada vez mais cara e inconstante, o que leva a uma forte pressão sobre a indústria química. Ou seja, é preciso afastar-se de matérias-primas não renováveis, mudar de processos químicos perigosos e poluidores, e tornar os produtos químicos mais seguros. Uma sociedade sustentável deve usar artigos sustentáveis, que são seguros para o meio ambiente, provenientes de recursos renováveis e processados usando tecnologias de baixo impacto ambiental (Figura 1).

Ao longo de cerca dos últimos 100 anos, temos transformado recursos naturais, como petróleo e minerais, em artigos manufaturados para nosso uso e, posteriormente, descartados na forma de lixo. Devemos não somente fazer uso da enorme quantidade de resíduos que acumulamos ao longo dos anos, como desenvolver novas soluções de longo prazo com base em fontes renováveis. Estas soluções deverão reduzir os problemas decorrentes dos aterros lotados e da lixiviação de substâncias químicas tóxicas nesses locais. Resíduos que podem ser reutilizados incluem sucata de equipamentos elétricos e

eletrônicos (uma enorme fonte de metais preciosos e não preciosos, bem como de plásticos), resíduos florestais (uma fonte de grande volume de carbono renovável), papel e outros restos domésticos que são facilmente convertidos em combustíveis ou produtos químicos, e resíduos da cadeia de suprimento de alimentos, que estão se tornando progressivamente reconhecidos como uma das fontes futuras mais atraentes de bio-combustíveis, biomateriais e produtos químicos derivados da biomassa.

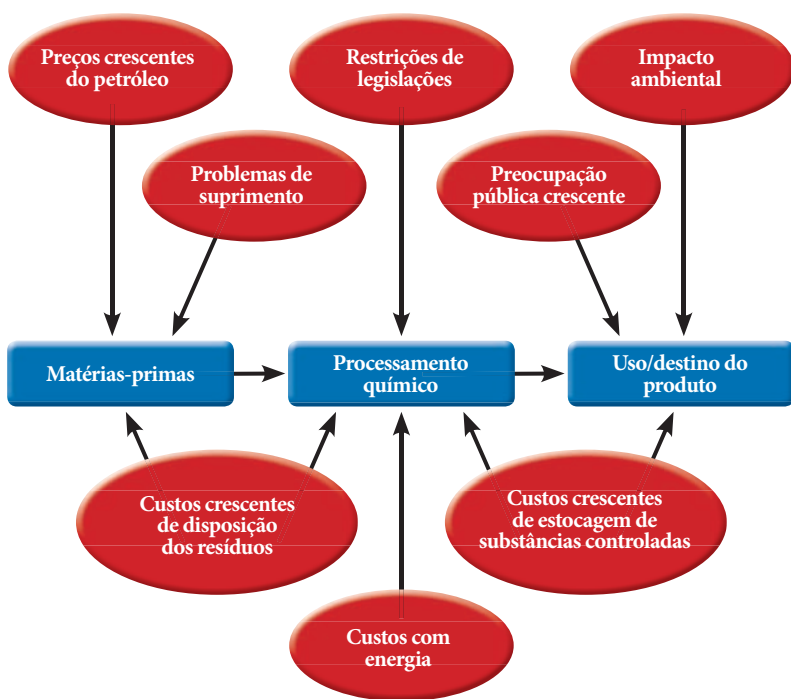


Figura 1. Pressões sobre a indústria química.

Da fazenda até a fábrica processadora de alimentos, os resíduos da cadeia de suprimento de alimentos (RCSA) podem ser gerados na escala de milhões de toneladas, tornando-a ao mesmo tempo de difícil gestão e uma oportunidade valiosa de recursos. A cada ano, o Reino Unido, por exemplo, produz cerca de 11,8 Mton (milhões de ton) de resíduos de alimentos urbanos, comerciais e industriais. A maior parte é descartada em aterros, o que representa um enorme problema ambiental, econômico e social. A diretiva de aterros irá reduzir o espaço para aterros sanitários em regiões como a União Européia. Os formuladores de políticas, portanto, apoiam alternativas a aterros (por exemplo, recuperação de valor a partir de resíduos), especialmente no contexto de se alcançar uma economia de desperdício zero e os objetivos do livro branco da *European Bio Economy 2030*. A reciclagem convencional de 1ª geração de resíduos de alimentos (RA) (por exemplo: digestão anaeróbica, compostagem, ração animal) só tem valor econômico marginal. Neste contexto, a valorização mais avançada (2ª geração) de resíduos de alimentos em matérias-primas concentradas e valiosas para a produção de produtos químicos a partir de biomassa (bioquímicos), biomateriais e bioenergia (combustível, calor, energia), representa uma estratégia mais valiosa. Dentro destas aplicações avançadas, os RA devem ser valorizados de forma sustentável e integrada usando a abordagem de biorrefino.

O grupo UE-27 importou 332 milhões de toneladas de petróleo bruto em 2008. Cerca de 10% foi usado na manufatura química e, portanto, a quantidade de carbono utilizada para a produção de produtos químicos é de cerca de 29 Mton. Na UE-27 cerca de 90 Mton (50%) de RA são gerados a cada ano.

Cerca de um terço é carbono, correspondendo a aproximadamente a mesma quantidade de carbono usado para produzir todos os produtos químicos utilizados na UE. Além disso, o uso dos RA deveria reduzir a necessidade de funcionalizar hidrocarbonetos derivados de petróleo usando rotas químicas poluidoras e perigosas com altas demandas de energia.

Portanto, podemos aspirar que os futuros produtos químicos gerados a partir de fontes renováveis sejam verdes e sustentáveis, com valor de mercado aumentado para clientes cada vez mais preocupados com questões ambientais. O tema está ganhando uma atenção cada vez maior em todo o mundo: o projeto NAMASTE (UE-Índia) está direcionado para a valorização de subprodutos selecionados. Ou seja, resíduos do processamento de frutas ou cereais para a indústria global de alimentos e bebidas. No Japão, a empresa NEC teve sucesso na produção de biopolímeros a partir da casca de castanha de caju, que é altamente termoestável, impermeável e durável, com potencial para uso em dispositivos eletrônicos. Em todo o mundo, os governos estão reconhecendo cada vez mais que, para atender as demandas de energia, produtos químicos e alimentos, ao mesmo tempo em que endereçamos as questões ambientais, será preciso reduzir substancialmente a nossa dependência do petróleo por meio do estabelecimento de uma economia de base biológica. A valorização dos RA tem muitas vantagens. É uma rica fonte de moléculas funcionalizadas, como, biopolímeros, proteínas e carboidratos, e contém extratos valiosos para várias aplicações (por exemplo, resinas a partir do líquido da casca da castanha de caju), evitando o uso de novas áreas cultiváveis e de recursos hídricos. Além disso, resolve um

Extrativos	Materiais	Tecnologias químicas aplicadas
<i>Cêras, ácidos graxos, terpenos, etc.</i>	<i>Amido, celulose, etc.</i>	<i>Processamento (bio) químico de materiais/resíduos</i>
<i>Métodos de extração benignos</i>	<i>Métodos de expansão</i>	<i>Fermentação seletiva</i>
<i>Separação/purificação</i>	<i>Modificação química verde</i>	<i>Pirólise controlada</i>
<i>Transformação química verde</i>	<i>Compósitos</i>	<i>Tecnologia de extração</i>
		<i>Moléculas para plataformas tecnológicas</i>

Figura 2. Resíduos da cadeia de suprimento de alimentos (RCSA).

problema de gerenciamento de resíduos e representa um recurso sustentável renovável, tornando a valorização dos RCSA duplamente verde (Figura 2).

A combinação de uma abordagem interdisciplinar para valorização de resíduos com novas tecnologias tem potencial para provocar um impacto global sobre a gestão de resíduos e indústrias de biotecnologia, alimentos e química. Neste sentido, é exigida uma combinação extraordinária de habilidades e conhecimentos que cruzam as fronteiras científicas e não científicas, abrangendo fatores econômicos, sociais e legais juntamente com a biologia, química, engenharia, ciência e tecnologia de alimentos e ciências ambientais.

Deve-se trabalhar com as indústrias que são chaves para a futura valorização de 2ª geração de RA e que não têm experiência de trabalhar com empresas de produtos químicos, como gestão de resíduos e varejo. Os principais motores para este mote incluem a natureza altamente poluente dos RA, devido às suas elevadas demandas química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), as futuras normas relativas ao conteúdo “bio” encorajando uma maior utilização de matérias-primas de origem biológica, custos de conformidade para atender às regulamentações para as substâncias existentes (por exemplo, REACH e legislação química semelhante) favorecendo os investimentos em matérias-primas alternativas econômica e ambientalmente sólidas. Do ponto de vista da indústria, as credenciais verdes de uma empresa são importantes com a crescente conscientização pública em relação às questões ambientais e preocupações relacionadas ao ciclo de vida (*cradle-to-grave*).

O *York Green Chemistry Centre* (www.greenchemistry.net) é a maior organização de ensino e pesquisa do mundo centrada na aplicação das tecnologias mais modernas da química verde para a conversão de RCSA e outros resíduos em valiosos combustíveis, produtos químicos e materiais. Seu escopo varia da pesquisa básica, orientada para a descoberta, à pesquisa tecnológica para a aplicação pontual. Os principais projetos atualmente em desenvolvimento incluem:

- *Adesivos resistentes à chama derivados de amidos residuais e aplicáveis a carpetes e outros produtos domésticos;*

- *Mobiliário verde e sustentável utilizando resíduos agrícolas para o substrato, aglutinante, retardador de chama e endurecedor;*
- *Eco-ceras derivadas de biomassa (tais como palha, bagaço, cascas de frutas), para uso em áreas como cosméticos e inseticidas;*
- *A pirólise por micro-ondas a baixa temperatura de RCSA para produzir produtos químicos, combustíveis e materiais;*
- *Moléculas plataforma de biomassa e as rotas sintéticas decorrentes;*
- *Novos materiais carbonáceos mesoporosos derivados de biomassa, para usos que incluem tratamento de água, separações, sequestro de compostos metálicos e orgânicos e catálise.*

Biomassas brasileiras, incluindo os RCSA, representam um dos maiores e quimicamente mais interessantes recursos futuros do mundo. Existem muitos tipos que satisfazem os critérios básicos de grande volume, já centralizada, quimicamente interessante e passível de extração e processamento pelos métodos de química verde. Tais recursos provavelmente incluirão frutas cítricas (principalmente laranja), caju, coco, banana e cana-de-açúcar. Em um exemplo de como um deles poderá se tornar a base de uma biorrefinaria multi-produto baseada numa única matéria-prima, nós começamos a olhar as cascas de laranja como fonte de produtos químicos,

combustíveis e materiais, com algum notável sucesso inicial que atraiu enorme atenção da mídia e da indústria. Este projeto está sendo realizado em colaboração com grupos do Brasil, Espanha e Reino Unido.

Para ajudar a realizar o potencial de empreendimentos como a biorrefinaria de cascas de laranja, está em fase de construção em York o “Biorenewables Development Center (BDC)”, que a partir de 2012 permitirá demonstrar o uso de novas tecnologias de química verde, tais como o processamento de biomassa por micro-ondas a baixa temperatura, em escalas de dezenas de quilogramas por hora. O BDC é projetado para envolvimento industrial direto e deve acelerar a geração de novos negócios e postos de trabalho, muitas vezes em áreas onde eles são extremamente necessários.

Este é um conceito que podemos aplicar em muitas regiões do mundo e especialmente no Brasil, onde já existem áreas com grande volume de biomassa adequada, como por exemplo, processadores de suco de laranja em São Carlos/SP e produtores de castanha de caju de Fortaleza/CE.

4

ESTRATÉGIAS PÚBLICO-PRIVADAS

Biorrefinarias: a Visão de Futuro da UNICA

Alfred Szwarc

Diversos especialistas definem biorrefinarias como sendo instalações que integram processos de conversão de biomassa em vários produtos (alimentos, biocombustíveis insumos químicos e biológicos, materiais etc.) e em energia, minimizam ineficiências e a geração de poluentes e maximizam o uso dos recursos utilizados e os benefícios sociais, ambientais e econômicos da atividade. Portanto, considerando a estrutura de produção existente, a gama de produtos obtida da cana-de-açúcar e o aproveitamento em larga escala de vários subprodutos de processo, pode-se afirmar que o setor sucroenergético já pratica esse conceito há vários anos.

Como se sabe, embora os principais produtos primários desse setor sejam o açúcar e o etanol, outros produtos importantes também são obtidos em maior ou menor escala. As diversas aplicações do etanol, seja na forma de combustível ou insumo em diversos setores, como a indústria química, farmacêutica, de cosméticos, de produtos de higiene e de alimentos, são um bom exemplo. Outro importante exemplo que envolve o aproveitamento de subprodutos de processo é o uso do bagaço de cana para diversas aplicações, como geração de energia térmica e elétrica, alimentação do gado e matéria-prima na produção de papel e celulose, placas de aglomerado e peças de artesanato. É oportuno lembrar a possibilidade

do aproveitamento do bagaço para a produção de etanol de segunda geração e de outras substâncias químicas em futuro próximo. Outros exemplos relacionados com o aproveitamento dos subprodutos são a utilização da vinhaça como fertilizante orgânico, o aproveitamento das cinzas e fuligem da queima do bagaço em caldeiras e o uso da torta de filtro para produção de composto agrícola.

A busca por maior produtividade na utilização da matéria-prima, insumos e subprodutos, e por aumento da competitividade comercial, requer contínua evolução tecnológica e eliminação de ineficiências, e esta tem sido uma tendência no setor. O avanço na eficácia operacional e na integração de processos das biorrefinarias de cana-de-açúcar abre novas oportunidades para inovação, diversificação do portfólio de produtos, acesso a novos mercados e visibilidade institucional, tudo dentro de um contexto de sustentabilidade social, ambiental e econômica.

As possibilidades de inovação tecnológica são imensas no setor sucroenergético. Pelo lado dos processos produtivos, temos várias rotas tecnológicas que vem sendo desenvolvidas para a produção de etanol de segunda geração, de biobutanol, de biohidrocarbonetos e de redução da geração de vinhaça, dentre diversas possibilidades. Pelo lado do desenvolvimento das novas aplicações e usos, seja para os produtos já existentes ou para os novos produtos que estão chegando ao mercado, abrem-se perspectivas interessantes nos setores automobilístico, de aviação, de bioplásticos e de química fina, somente para citar os de maior potencial.

Entretanto, existem desafios a ser vencidos. Comparar e selecionar novas tecnologias e investir em novos produtos e mercados são processos complexos, que exigem informações,

conhecimento, capital e grande dose de senso de oportunidade e de risco, e que requerem respostas consistentes a perguntas fundamentais. Algumas das principais perguntas são formuladas a seguir:

- *Qual o mix de produtos que a empresa poderá vir a produzir?*
- *Em quais mercados a empresa passará a atuar?*
- *Qual é a melhor tecnologia para que a empresa atinja as metas estabelecidas?*
- *Qual a disponibilidade de matéria-prima?*
- *Qual é a viabilidade de integração da nova tecnologia com os processos existentes?*
- *Qual é o capital necessário para o investimento?*
- *Quais são os riscos do investimento e as perspectivas de seu retorno?*
- *Qual é o modelo de negócio a ser adotado?*
- *Quais são as demandas de capacitação de recursos humanos para a nova estrutura operacional?*
- *Quais são as demandas e custos previstos de operação e manutenção das novas tecnologias?*

Ao analisar o estágio de desenvolvimento das novas

tecnologias voltadas para biorrefinarias de cana-de-açúcar, observa-se uma corrida tecnológica que envolve inúmeros *stakeholders* – universidades e instituições de pesquisa, órgãos de governo e agências de fomento científico, investidores e empresas de diversos setores (cana-de-açúcar, petróleo, petroquímica, química, biotecnologia, indústria automobilística, engenharia, etc.). Todavia, essa corrida ainda não tem ganhadores. O que aparece com frequência nesse cenário é uma abundância de informações vagas e de promessas pouco realistas, destinadas a conquistar a atenção da mídia, de formadores de opinião e de potenciais clientes. Falta atenção ao fato de que em época de informação instantânea, como a que vivemos, a disponibilização de informações insuficientes e/ou inadequadas referentes a uma dada tecnologia é um fator que impacta negativamente a sua inserção no mercado.

O fato é que o cenário ainda apresenta muitas incertezas com relação à viabilidade técnica e econômica das novas tecnologias para operação em grande escala. Contudo, essa situação tende a mudar com o tempo à medida que essas tecnologias atinjam o estágio comercial. De todo modo, é imperativo que sejam compatíveis com os processos atualmente em uso, pois o que se necessita no momento são simbioses e sinergias para o aprimoramento das biorrefinarias existentes.

Para que o setor produtivo possa avançar com confiança nesse campo, é fundamental que se criem eventos técnico-científicos que ofereçam oportunidades para o acompanhamento e análise crítica da evolução tecnológica, como o I Simpósio Nacional de Biorrefinarias. Também é necessário que os responsáveis pelo desenvolvimento de tecnologias que se encontram em estágio avançado construam no país

unidades de demonstração, de modo que seja possível constatar em condições reais de operação as suas características. O desenvolvimento de ferramentas de tomada de decisão, que possibilitam análise realista de vários cenários, envolvendo novas tecnologias e novos produtos, como é o caso do trabalho que vem sendo desenvolvido pelo Centro de Tecnologia do Bioetanol (CTBE), é de grande importância, pois facilita o desenvolvimento de novos projetos. Finalmente, deve-se destacar a necessidade de estruturação e adoção de políticas públicas e de incentivos destinados a promover um salto na evolução tecnológica no setor sucroenergético.

Considerações sobre as Estratégias Público-Privadas para o Desenvolvimento de Biorrefinarias

Luiz Fernando Leite

Cenário sócio-econômico-ambiental

Para o estabelecimento de estratégias é essencial que se olhe o cenário sócio-econômico-ambiental e geopolítico, no âmbito mundial e nacional. As Nações Unidas no seu recente “Relatório de Metas de Desenvolvimento para o Milênio 2011” (UNITED NATIONS, 2011) elenca como principais metas:

- *Reduzir a pobreza extrema e a fome;*
- *Alcançar o ensino primário universal;*
- *Promover a igualdade de gêneros e a inserção das mulheres no mercado de trabalho;*
- *Reduzir a mortalidade infantil;*
- *Melhorar a saúde materna;*
- *Combater a AIDS, a malária e outras doenças;*
- *Garantir a sustentabilidade ambiental;*
- *Promover parcerias mundiais para o desenvolvimento.*

Dentre estas há duas que estão diretamente relacionadas ao nosso tema: redução da pobreza e fome, e sustentabilidade ambiental.

O panorama econômico atual revela tendências inusitadas e difusas, tais como:

- *Os países europeus vivenciando grandes dificuldades econômicas, com recessão e governos endividados, estando o Euro ameaçado;*
- *EUA com dificuldades de articulação política, como recentemente ocorreu no episódio de aprovação do aumento de nível de endividamento do governo americano, proposto pelo Presidente Obama;*
- *O Real se fortaleceu a ponto de preocupar o governo brasileiro;*
- *A China é o motor de desenvolvimento do mundo.*

O que se pode esperar deste cenário é uma maior dificuldade futura dos governos dos países desenvolvidos de liderar, induzir e fomentar financeiramente os projetos “verdes”. Ficará mais difícil, também, exigir mais do contribuinte, pois as medidas de ajuste econômico já os onerarão pesadamente.

Em relação ao meio ambiente o cenário clama por mudanças radicais urgentes, devido as seguintes previsões da ONU: a temperatura média da Terra aumentará de 1,8 a 4 °C até o ano de 2100; haverá uma aceleração do derretimento de geleiras, elevação do nível dos oceanos e aumento da intensidade

de furacões; e o balanço hídrico do planeta deve ser alterado, paralelamente ao índice pluviométrico em várias regiões. Por conseguinte, estes estudos prospectivos sobre mudanças climáticas indicam a necessidade de prioridade imediata à implantação dos projetos de redução de emissão de gases do efeito estufa (GEE) e preservação ambiental.

Em 2002, um estudo patrocinado pelo governo americano, que foi executado por 22 especialistas de renome da academia, gerou o documento *Roadmap for Biomass Technologies*. Este predizia a mudança gradual de uma economia baseada no petróleo para uma futura, na qual os carboidratos teriam um papel importante na economia, resultando que 20% dos combustíveis de transporte e 25% dos produtos químicos serão produzidos a partir de biomassa, em 2030 (ESTADOS UNIDOS, 2002). Isso também estava aderente à política de busca por segurança energética e a diminuição da dependência do petróleo, que é majoritariamente suprido por regiões de grande instabilidade política e por países muitas vezes não alinhados à esfera de influência americana. Os EUA nestes últimos anos têm investido fortemente na expansão da capacidade produtiva de etanol, superando, inclusive, a capacidade produtiva do Brasil.

Focando agora no cenário brasileiro, como mostra “O Observador Brasil 2011” editado pela CETELEM/IPSOS, o período de 2005 a 2010 apresentou uma profunda transformação social, em que: 45 milhões de brasileiros saíram da pobreza, 39 milhões de brasileiros ingressaram na classe média C, 16 milhões de brasileiros ascenderam às classes A e B, e houve aumento substancial de renda em todas as classes (CETELEM BGN, 2010).

Este aumento de renda incitou aumento significativo na demanda de combustíveis, que em 2010 teve um incremento de 8,4 %:

- *Gasolina: 17,5% - mais 3,5 milhões de veículos se incorporaram à frota;*
- *Querosene de aviação: 15,3% - o número de pessoas que viajaram de avião superou o de transporte rodoviário em trajetos interestaduais;*
- *Diesel: 11,2%.*

Fica claro que precisamos expandir rapidamente a oferta de combustíveis e as biorrefinarias produtoras de biocombustíveis têm um papel importante na busca de equilíbrio deste mercado.

É possível observar em relação à sociedade brasileira:

- *Os brasileiros estão consumindo mais;*
- *O consumidor conversa mais sobre os produtos, influenciando outros consumidores, além de valorizar a informação;*
- *Para 89%, reciclar é um dever de todos;*
- *63% dos consumidores estão dispostos a mudar seu estilo de vida para beneficiar o meio ambiente;*
- *71% estão dispostos a pagar mais por um produto ambientalmente saudável.*

O fato recente da escassez de etanol na última entressafra, o que causou um aumento significativo de preço, mostra que o consumidor não partiu ainda para a ação, pois o que houve foi um grande aumento do consumo de gasolina que se tornou uma opção mais barata. Na prática, o consumidor é sensível aos preços e está disposto a deixar de adquirir o etanol à medida que o preço desse biocombustível aumenta.

O desafio das biorrefinarias

Quem acompanha os artigos técnicos, notícias e especulações sobre as futuras biorrefinarias sente-se um tanto perdido, pois há um elenco enorme de possíveis matérias-primas, produtos e rotas de produção. Neste cenário, a pergunta que vem a mente é “*qual ou quais serão as biorrefinarias do futuro?*”. Esta pergunta está longe de ser respondida, mas há alguns desafios para este novo segmento econômico que parecem bem nítidos, tais como:

- *Desenvolver as melhores práticas de aproveitamento da energia química contida na biomassa, através de técnicas de conversão de alta eficiência;*
- *Uma biorrefinaria eficiente deve focar na minimização de custos e em custos competitivos de seus produtos finais;*
- *Os processos de conversão e sua combinação têm impacto significativo na sustentabilidade dos produtos de-*

rivados da biomassa, devendo impactar de modo significativo a análise de ciclo de vida dos mesmos.

Há um grande número de estudos explorando rotas químicas, bioquímicas e termoquímicas. Não desmerecendo o valor acadêmico desses estudos, há uma série de propostas que apresentam um elevado número de etapas de processo, além de opções de difícil escalamento. Por conseguinte, necessitamos fazer escolhas criteriosas de quais as rotas deverão evoluir neste processo de inovação, através de uma análise de portfólio de projetos de P&D eficiente e consistente. A construção em curso da indústria de biorrefinarias deve ser vista como um processo em que múltiplas alternativas se colocam e serão testadas pelos competidores. Algumas destas alternativas irão sobreviver como inovações que se difundirão no mercado, enquanto outras não passarão no teste de aceitação e difusão.

Integração refino-biorrefinaria

O cenário aponta que precisaremos tanto dos combustíveis fósseis como dos renováveis para atender a demanda em forte expansão. Uma das possibilidades que precisamos explorar é a integração do refino convencional às novas biorrefinarias. Até então esta integração tem se dado via combustíveis *drop-in* que são adicionados ao *pool* dos combustíveis fósseis, como no caso do etanol à gasolina e do biodiesel à mistura B5, diesel com 5% de biodiesel renovável. Há outros modos de integrar estes dois modelos, tais como: o coprocessamento de frações intermediárias e o coprocessamento de bio-óleo com o petróleo cru. Pode-se considerar, também, o caso do eteno “verde” para a produção

de resinas termoplásticas, pois este era antes obtido do petróleo.

As operações clássicas do refino e petroquímica, como a destilação, o craqueamento térmico e catalítico, a gaseificação, etc., não apresentam bons resultados para as cargas renováveis. O alto grau de oxigenação dos compostos derivados da biomassa associado a substratos complexos prejudicam muito os processos convencionais. Isto resulta em: altos custos de energia, necessidade de insumos caros (hidrogênio, gás natural), perda de carbono como CO₂ e formação de resíduos sólidos de difícil descarte.

As rotas de produção bioquímica clássicas, como as fermentações, baseiam-se em conversões que utilizam microorganismos e enzimas. Estas rotas são desafiadoras, apresentando vantagens e desvantagens, pois tendem a ter uma cinética mais lenta que os processos químicos, requerem meios aquosos diluídos e frequentemente sofrem inibição pelo produto. Recuperar produtos como álcoois e ácidos de soluções diluídas demanda muita energia e frequentemente ocorrem dificuldades de separação por formação de azeótropos.

Outro aspecto que dificulta a integração é a sazonalidade de algumas fontes de biomassa. De um lado temos uma indústria consolidada com tecnologias bem dominadas e economicamente otimizadas que opera o ano todo. A ela desejamos conjugar uma indústria que explora tecnologias emergentes, em busca de sua viabilidade econômica e que, em muitos casos, tem período de operação de seis a oito meses.

É um grande desafio, mas devemos envidar esforços no sentido de obter êxito nesta empreitada. Como **estratégia para o desenvolvimento desta integração**, podem-se considerar as seguintes diretrizes:

- *Não se restringir às receitas de sucesso do refino e da indústria bioquímica - a solução deve ser inovadora ou pelo menos híbrida;*
- *P&D de longo prazo: fase divergente e convergente;*
- *Busca de alianças e construção de equipes multidisciplinares sinérgicas;*
- *Acompanhamento e análise eficiente do portfólio de projetos, sendo adotados e acompanhados os seguintes critérios: sustentabilidade sócio-ambiental, grau de maturidade tecnológica, probabilidade de sucesso e viabilidade técnico-econômica.*

Os biocombustíveis no Brasil

O etanol

Os EUA e Brasil são os grandes produtores mundiais de etanol detendo mais de 80% da produção. O Brasil, além de produzir grande volume, dispõe de vantagens competitivas significativas em relação aos EUA, como é apresentado na Tabela 1. A produtividade do etanol brasileiro por hectare plantado é quase o dobro da americana, a produtividade energética (energia gerada/energia consumida) é de 9 vezes, no caso brasileiro, enquanto que é de 1,5 vez, no caso americano. A redução de emissões de GEE é muito maior que a americana e o produto brasileiro tem menor custo de produção que o etanol de milho dos EUA, que a mandioca da Tailândia, que a beterraba na Europa e que o melão da Índia (DINIZ, 2007).

Um aspecto que é discutido em fóruns internacionais são as emissões causadas pela mudança do uso direto da terra. Um estudo do *World Economic Forum* mostra o número de anos necessários para a redução dos GEE, pelo uso dos biocombustíveis de distintas origens agrícolas. Neste trabalho o etanol de cana-de-açúcar mais uma vez se apresenta como o biocombustível convencional de menor impacto (WORLD ECONOMIC FORUM, 2010).

O etanol de 1ª geração (1G) brasileiro é o biocombustível convencional mais competitivo e ambientalmente mais amigável. Além disso, não temos o problema de competição com alimentos e ração animal. Por conseguinte, as usinas de açúcar e álcool brasileiras são economicamente viáveis e sustentáveis.

Quando temos um bom negócio, precisamos cuidar bem deste negócio. Peter Drucker afirma que “*As empresas perdem muito tempo tentando melhorar sua atuação em áreas que são carentes, em lugar de reforçar suas áreas de excelência*”. A estratégia que deve ser adotada no caso brasileiro é de transformar as usinas de álcool existentes em biorrefinarias integradas, como conceito de exploração e aproveitamento eficiente de biomassa, em lugar de produção única de combustíveis.

Por outro lado, convive-se atualmente com ineficiências na produção de etanol. Se considerarmos que o rendimento em massa do etanol por tonelada de cana-de-açúcar é de aproximadamente 6,5%. Mesmo considerando que 70% do peso da cana é água, o aproveitamento da biomassa poderia ser maior, mesmo considerando-se a cogeração de energia elétrica. Neste sentido, o etanol de 2ª geração (2G)

se apresenta como uma opção interessante que poderá dar maior robustez à indústria alcooleira brasileira. Porém, é possível que em determinados períodos seja economicamente mais interessante produzir bioeletricidade ao invés do etanol 2G, ou vice-versa.

Tabela 1. Dados comparativos da produção de etanol. Fonte: World Economic Forum (2010).

Característica	Brasil	USA
Matéria-prima	Sacarose da cana-de-açúcar	Amido do milho
Produção em 2008 (MMgalões)	6.472	9.000
Terras aráveis (MMha)	~ 550	~ 350
Área plantada/produção (%)	1	3,7
Produtividade (L ha⁻¹)	7.400	3.900
Produtividade energética	~ 9 vezes	~ 1,5 vez
Redução de emissões (%)	80 - 90	10 - 30
Participação no mercado de combustíveis fósseis (%)	~ 50	~ 5
Postos de venda	33.070 (100%)	1.963 (1%)
Custo de produção (USD galão⁻¹)	0,83	1,14
Subsídio agrícola (USD galão⁻¹)	0	0,45

Os países desenvolvidos estão investindo pesadamente em inovações com vistas a explorar fontes lignocelulósicas para a produção de etanol. Clayton Christensen, autor do livro “O Dilema da Inovação”, na busca do entendimento da dinâmica de novos processos de inovação, define o conceito de inovação de ruptura. Este conceito releva a vulnerabilidade, não percebida pelos líderes de um mercado, frente a inovações nitidamente inferiores e menos competitivas. Essas inovações de ruptura, por se focarem em nichos não atendidos pela oferta atual e por explorarem conceitos com grande possibilidade de evolução, são uma ameaça para os *players* bem estabelecidos (CHRISTENSEN, 1997). A posição do etanol 1G brasileiro, com a sua atual superioridade competitiva, torna-se um alvo possível para inovações de ruptura. Um bom negócio também requer atenção e cuidados para a sua sobrevivência.

As estratégias de agregação de valor aplicadas ao etanol devem levar em conta que:

- *A melhoria da competitividade do etanol 1G deve permanecer como um tema central, buscando-se: maior produção de cana por hectare, melhoria da resistência às pragas, maior teor de açúcar na cana, maior rendimento na extração e na fermentação, etc. – este é o P&D de maior probabilidade de sucesso, menor tempo de lançamento e retorno mais rápido;*
- *Desenvolvimento do etanol 2G, buscando-se melhorar o aproveitamento do material lignocelulósico existente na cana-de-açúcar e a redução de resíduos agrícolas;*

- *Obtenção de produtos de maior valor agregado, por meio do desenvolvimento de bioprodutos;*
- *Integração com outras culturas agrícolas, como o sorgo sacarino, para mitigar problemas de sazonalidade e dar maior continuidade à produção das atuais usinas de álcool.*

O biodiesel

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de biodiesel, com uma produção próxima a 2,5 milhões de m³ano⁻¹, em 2010. O país é o segundo maior produtor mundial de soja e esta é a principal matéria-prima para a produção de biodiesel por ter uma agroindústria já estabelecida e madura. Atualmente, 86,3% do biodiesel produzido no Brasil provem de óleo de soja, 9% de sebo de boi, 2,8% de óleo de algodão e os 1,9% finais são completados por gordura de porco, óleo de fritura usado e outros materiais graxos (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2011).

Por outro lado, por ser um país de dimensões continentais, o Brasil dispõe de clima variado, ocorrendo uma gama grande de culturas de oleaginosas, como a mamona que ocorre no semiárido nordestino e o dendê que se desenvolve em áreas úmidas com chuvas regulares. O óleo de palma e o de pinhão-mansão apresentam produtividades por hectare plantado de 4.000 kg ha⁻¹ e 1.250 kg ha⁻¹ respectivamente, muito maior que a soja que é de 540 kg ha⁻¹ (VAZ-JR., 2011), sendo duas boas oportunidades a explorar. A Petrobras e a Vale estão

investindo em plantio intensivo desta cultura no estado do Pará. Além disto, o óleo de palma tem uma composição mais rica em ácidos graxos saturados que o óleo de soja, requerendo menor hidrogenação, se for considerado como um bloco construtor para obtenção de hidrocarbonetos lineares.

Há outras rotas para produção de biodiesel além da transesterificação, como o do HVO (óleo vegetal hidrogenado). A resolução ANP n.º 7, de 19.03.2008, define o biodiesel como “*combustível composto de alquil-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou gorduras animais*”. Esta resolução restringe a atuação da Petrobras, que desenvolveu tecnologia de hidrogenação de óleos vegetais coprocessados com correntes de destilados médios do refino, que chamou de HBio, o qual apresentou rendimentos muito interessantes com a vantagem de não produzir glicerina e sim propeno, um produto que pode ser adicionado ao nosso demandado *pool* de GLP.

Assim como para o etanol, as estratégias de agregação de valor ao biodiesel deverão considerar:

- *Evitar regulações restritivas desnecessárias que possam impedir negócios promissores;*
- *Analisar e selecionar as possibilidades mais promissoras, com relação às matérias-primas oleaginosas, aquelas em que dispomos de vantagens competitivas reais;*
- *Para a viabilidade econômica das biorrefinarias é preciso volume de produto competitivo -pensar os biocombustíveis como agentes de viabilização desta indústria;*

- *É importante fazer escolhas e priorizar ao longo do tempo, pois existe uma trajetória de viabilização para um novo segmento econômico – deve-se, primeiro, viabilizar as commodities e blocos construtores, para dispormos de um ambiente de negócio mais favorável, antes de focar nas especialidades e seus pequenos negócios.*

Os bio-produtos ou “produtos verdes”

A Braskem liderou a produção de plásticos verdes e a Dow associada à Mitsui a estão seguindo, tendo como estratégia a segmentação de mercado para o polietileno (PE) verde: embalagens especiais, pois usam menos peso de produto, que é mais caro, e são aplicadas em mercados de produtos de alto valor em que o custo da embalagem é pouco significativo.

A própria Braskem anunciou a obtenção de valores-prêmio de até 30% em contratos de suprimento de PE verde. Entretanto, não tem planos agressivos de aumento significativo de sua capacidade para não perder esta vantagem. Recentemente, anunciou a futura instalação de uma unidade de 50 kton ano⁻¹ de polipropileno a partir de etanol, no Rio Grande do Sul. A rota tecnologia já foi escolhida.

A Dow está investindo na rota *glycerin-to-epichlorohydrin* e a Solvay no processo *Epicerol* para a produção de epicloridrina a partir da glicerina, pois estas rotas apresentam vantagens sobre a rota convencional que reage propeno com cloro, tais como: menos operações unitárias, menos subprodutos, produto mais puro, menor consumo de água

e energia, matéria-prima mais barata e não fóssil. A Dow instala planta comercial na China e a Solvay na Tailândia.

A Dupont Tate & Lyle Bio Products está investindo na produção de 1,3-propanodiol (PDO) a partir de açúcar de milho, via fermentação, expandindo a planta de produção no Tennessee, EUA. A Metex e o IFP investem em PDO a partir de glicerina, via fermentação. Esse produto tem como mercado de aplicação: polímeros, cosméticos, detergentes líquidos, anti-congelante e fluido de transferência de calor.

Atualmente, o movimento que se presencia de substituição de petroquímicos de elevada escala de produção por bioprodutos ainda é bem tímido. Há muita especulação, mas poucos produtos disponíveis para comercialização. O que ocorre são companhias aproveitando o fomento do governo americano para construir várias unidades de demonstração em pequena escala. As empresas estão muito cautelosas, pois não há negócio que se sustente só por externalidades – tem que ser bom para o meio ambiente e economicamente viável.

Conclusões

O Brasil tem presença relevante na produção mundial de biomassa – solo, água, sol e natureza compõem a base de um grande potencial para a produção de bioenergia e bioprodutos, que ganham importância no cenário descrito.

Como **estratégia geral** de negócios deve-se levar em conta:

- *Continuar a melhorar a competitividade do etanol 1G;*

- *Desenvolver o etanol 2G, com o objetivo de aproveitar melhor o material lignocelulósico existente na cana-de-açúcar e buscar produtos de maior valor agregado;*
- *Escolher matérias-primas e rotas de produção para o biodiesel mais promissoras para as condições brasileiras;*
- *Unir competências: processos bioquímicos e processos químicos tradicionais - fóssil e renovável, e não fóssil versus renovável;*
- *Priorizar o investimento ao longo do tempo, de modo a estabelecer uma estratégia consistente com o acúmulo de conhecimento e a infraestrutura existente. Como estratégia macro, buscar uma trajetória de viabilização evolutiva: biocombustíveis → blocos construtores → especialidades.*

Como **estratégia tecnológica**:

- *Construção de redes de inteligência tecnológica, ou de gestão do conhecimento;*
- *Seleção de ideias: é da quantidade que se extrai a qualidade;*
- *P&D divergente: somente na fase embrionária ou de prospecção;*
- *Análise de portfólio de projetos, visando o balanceamento entre longo e curto prazo, e a priorização das opções mais promissoras para etapas subsequentes;*

- *P&D&D (Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração), com fomento para a etapa de demonstração;*
- *Fomento para a primeira planta comercial (flag-ship) de cada tecnologia.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Boletim Mensal de Biodiesel**, agosto de 2011. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 07 out. 2011.

CETELEM BGN. Ipsos Public Affairs. **O Observador Brasil 2011**. Disponível em: <http://www.cetelem.com.br/portal/Sobre_Cetelem/Observador.shtml>. Acesso em: 05 out. 2011.

CHRISTENSEN, C. **The innovator's dilemma**: when new technologies cause great firms to fail. Massachusetts: Harvard Business School Press, 1997.

DINIZ, P. **Renewable energy for a better world, 14.11.2007**. Disponível em: <www.gsb.stanford.edu/gpm/events/documents/COSAN_diniz_pp.pdf>. Acesso em: 03 dez. 2008.

ESTADOS UNIDOS. Biomass R&D Technical Advisory Committee. **Roadmap for Biomass technologies in the US**. [Washington, D.C.]: U.S. Government, 2002.

UNITED NATIONS. **The Millennium Development Goals Report 2011**. New York, 2011. General Assembly, 64th Session, Report of Secretary-General, 12.02.2010.

VAZ JUNIOR, S. Overview of the Brazilian biofuels sector and Embrapa's R&D program in bioenergy. In:

SIMPÓSIO NACIONAL DE BIOCOMBUSTÍVEIS, 4., Rio de Janeiro, 2011. **Palestras e Apresentações**. Rio de Janeiro: ABQ, 2011. Palestra. Disponível em: < <http://www.abq.org.br/biocom/2011/palestras-apresentacoes.html> >. Acesso em: dez. 2011.

WORLD ECONOMIC FORUM. The Future of Industrial Biorefineries. Geneva, 2010.

5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Conclusões do Simpósio e Perspectivas para as Biorrefinarias no Brasil

Sílvio Vaz Jr.

Mônica Caraméz Triches Damaso

Após analisar os pontos de vista de diferentes expositores oriundos de instituições de pesquisa, indústrias e associações que participaram do **I Simpósio Nacional de Biorrefinarias** pôde-se chegar a conclusões relevantes, baseadas nos cenários nacionais e internacionais e também apontar perspectivas que venham a contribuir para o sucesso das biorrefinarias.

Conclusões

- *No Brasil, existem cerca de 200 espécies vegetais produtoras de óleo em frutos e grãos que podem ser usadas para obtenção de biocombustíveis ou para outros fins de maior valor agregado. A soja, apesar de ter baixa densidade energética, é a oleaginosa mais utilizada para produção de biodiesel no Brasil (mais de 80%), em virtude de já possuir domínio tecnológico, escala de produção e logística. Embora não haja uma forte tendência na modificação deste perfil para os próximos anos, fazem-se necessários a busca e o desenvolvimento contínuo de outras oleaginosas com maior adensamen-*

to energético para produção de biodiesel, considerando questões relacionadas à diversificação e regionalização das matérias-primas.

- *Os principais produtos do setor sucroenergético ainda são o etanol, o açúcar e a cogeração de energia. No entanto, a diversificação estratégica para o agronegócio da cana-de-açúcar consiste na utilização da biomassa lignocelulósica (bagaço e/ou palha e ponteira) para produção de etanol 2G, biobutanol e para a obtenção de outros bioprodutos de maior valor agregado, dentro do conceito de biorrefinaria.*
- *Para que as biorrefinarias se tornem economicamente viáveis, é necessário que suas plantas sejam versáteis a ponto de direcionarem a produção para a obtenção de produtos que apresentem maior rentabilidade nos diferentes momentos da situação comercial e econômica dos mercados interno e externo.*
- *Ainda não é possível definir as melhores tecnologias e produtos para a nova cadeia da biomassa que se encontra em formação. Há, na atualidade, uma demanda por tecnologias diversas, devendo todas elas ser consideradas e desenvolvidas para que possam ser avaliadas do ponto de vista econômico, social e ambiental.*
- *Existe uma forte sinergia entre a química verde e as biorrefinarias, destacando-se o aproveitamento de coprodutos e resíduos da biomassa, o que atende a princí-*

pios de química verde, como a minimização de resíduos e dos impactos ao meio ambiente.

- *É de fundamental importância a mudança de matérias-primas industriais não renováveis, como petróleo e minérios, para matérias-primas renováveis e de menor impacto ao meio ambiente, de modo que a sociedade atual possa tornar-se sustentável em médio e em longo prazo.*
- *Do ponto de vista da indústria da cana-de-açúcar, é necessário que haja compatibilidade entre os processos a ser desenvolvidos para as biorrefinarias e aqueles já existentes nas usinas. Outra questão relevante é a necessidade de políticas públicas de incentivo para a evolução tecnológica das biorrefinarias sucroenergéticas e sucroquímicas.*
- *A melhoria contínua dos processos de produção do etanol 1G deve ser estimulada, bem como o desenvolvimento do etanol 2G. Devem ser priorizados, ainda, investimentos para o estabelecimento de estratégias robustas para a integração entre processos bioquímicos e petroquímicos, partindo de biocombustíveis, passando por compostos bloco-construtores, até alcançar as especialidades químicas.*

Perspectivas para as biorrefinarias

- *A diversificação das biomassas utilizadas para geração de diversos produtos agroenergéticos é essencial para ampliar a oferta de energia. Fatores como a grande*

extensão territorial brasileira e condições climáticas favoráveis possibilitam planejar o uso agrícola em bases sustentáveis, sem comprometer os grandes biomas terrestres e ampliam ainda mais a possibilidade do uso de diversas matérias-primas renováveis.

- *Dentre as oleaginosas potenciais, destacam-se o pinhão-manso, as palmeiras nativas, como a macaúba, o tucumã, o inajá e o babaçu. Este uso, em potencial, decorre do fato de possuírem maiores produtividades previstas de óleo e maior aptidão agroclimática que a maioria das oleaginosas tradicionais, o que aponta para a possibilidade de expansão dos plantios sem comprometer as áreas atualmente cultivadas com culturas tradicionais e/ou alimentícias. Porém, para que possam ser utilizadas existe a necessidade de pesquisas em melhoramento genético, sistemas de produção sustentáveis, processos agroindustriais e arranjos produtivos locais.*
- *A partir da cana-de-açúcar, o Brasil produz o etanol mais competitivo do mundo (US\$ 35/barril) e com um balanço energético 7 vezes superior ao etanol de milho. Porém o maior problema desta cultura é a falta desta matéria-prima nos períodos de entressafra. Portanto, a tendência é a utilização de outras fontes de matérias-primas de ciclo curto, como o sorgo sacarino e gramíneas perenes que apresentam alto rendimento de produção de biomassa e alto conteúdo de lignina e celulose, possibilitando utilização ininterrupta da estrutura da usina e complementando a produção a partir de cana-de-açúcar.*

- *As tecnologias e os produtos renováveis devem ser desenvolvidos e aproveitados em parceria com aqueles oriundos de fontes não renováveis, como os petroquímicos e suas tecnologias de refino, de forma a se ter a união entre “produtos verdes” e petroquímicos, tanto para combustíveis, quanto para compostos de largo uso na indústria química (insumos). Ou seja, a solução energética conjuga a integração fóssil/renovável.*
- *As duas plataformas de maior destaque para as biorrefinarias, aparentemente, serão a plataforma bioquímica e a plataforma termoquímica. Na primeira, haverá a utilização de micro-organismos que metabolizem açúcares, por exemplo, e produzam compostos químicos estratégicos, como ácido succínico; enquanto que no segundo caso, poderá ser utilizada a gaseificação para a obtenção de gás de síntese ($H_2 + CO$) e a partir deste, sintetizar uma grande variedade de compostos químicos de interesse industrial (combustíveis, polímeros, etc.). No entanto, em ambos os casos serão necessárias etapas posteriores de síntese química envolvendo, principalmente, catalisadores inorgânicos. Assim, ambas as plataformas “iniciais” serão dependentes de uma subseqüente plataforma química.*
- *Procedimentos como reações em ausência de solventes ou em meio aquoso, ao invés de meio orgânico, aliados a novas tecnologias baseadas em líquidos iônicos e fluidos supercríticos, poderão contribuir para o desenvolvimento de produtos e processos ambientalmente ami-*

gáveis nas biorrefinarias, principalmente para aquelas que visam à obtenção de compostos químicos de alto valor para aplicação em química fina.

- A valorização de resíduos da biomassa, como fibras e restos de alimentos, e de suas tecnologias de aproveitamento, segundo uma abordagem interdisciplinar que abranja a química, biologia, engenharias, ciência de alimentos e ciências ambientais, provocará um impacto positivo sobre a gestão de resíduos das indústrias químicas, de alimentos e biotecnológicas. Nisto, a química verde poderá contribuir substancialmente para tal valorização, por meio da obtenção de moléculas, materiais e rotas sintéticas, entre outras potencialidades da biomassa.*
- O uso de ferramentas de tomada de decisão a partir da simulação de cenários baseados em novos produtos e tecnologias facilitará a implantação de novas biorrefinarias, as quais poderão ter a usina de cana-de-açúcar como plataforma-modelo.*
- A construção de redes de cooperação tecnológica aliada à correta gestão do conhecimento, além da disponibilização de subsídios a projetos que contemplem desde a etapa de P&D até a etapa comercial, poderão contribuir para o desenvolvimento das biorrefinarias no território nacional*

Deste modo, as biorrefinarias apresentam-se como a forma mais adequada de substituição de produtos e processos

baseados em matérias-primas não renováveis por aqueles oriundos de matéria-prima renovável – a biomassa.

A versatilidade das biorrefinarias, quanto aos produtos que podem ser obtidos e aos diferentes valores agregados, as tornarão economicamente atraentes. Contudo, ainda existe um considerável número de gargalos que deverão ser superados, os quais abrangem questões técnicas, científicas, econômicas e políticas, de forma a que se desenvolva todo esse potencial. Tais questões devem ser trabalhadas com todo o rigor científico que exige o tema e com um esforço em conjunto entre os setores públicos e privados.

ISBN 978-85-63276-02-5



9 788563 276025

Embrapa

Agroenergia

Os leitores constatarão, à medida que forem lendo os capítulos que compõem esse livro, que biorrefinaria é um tema complexo. Há desafios na organização da produção da matéria-prima para uma indústria que pode ser tanto baseada em uma única como em diversas matérias-primas. A logística da oferta dessa matéria-prima para a indústria, que precisa ser otimizada, tanto do ponto de vista temporal quanto territorial, é também complexa. Os desafios tecnológicos nas biorrefinarias encontram eco na química verde, e, sem sombra de dúvida, demandam uma ação organizada de caracterização e uso da grande biodiversidade brasileira ainda não explorada. Por fim, essa complexidade chega às estratégias de desenvolvimento de biorrefinarias no Brasil, onde as parcerias público-privada (seja em PD&I, TT ou em produção e comercialização) precisam encontrar ambiente propício para ser erguidas.

Apoio:



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

GOVERNO FEDERAL
BRASIL
PAÍS RICO É PAÍS SEM POBREZA