

# Estratégias Tecnológicas para Biorrefinarias da Cana-de-Açúcar

*Sílvio Vaz Júnior<sup>1</sup>*

## Introdução

O desenvolvimento econômico das diferentes cadeias da biomassa fazem parte da agenda de P&D&I da maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, como o Brasil, mobilizando grandes quantias de recursos e esforços públicos e privados voltados para o aproveitamento otimizado da biomassa. Esta é uma tendência que visa agregar valor às cadeias produtivas e reduzir possíveis impactos ambientais destas. No caso do Brasil, que é um dos principais países produtores de biomassa, alimentos e biocombustíveis, estes esforços são de grande relevância para a manutenção de um cenário econômico positivo e menos impactante.

---

1. Químico, M. Sc., D. Sc. e Pesquisador da Embrapa Agroenergia. E-mail: silvio.vaz@embrapa.br

Conceitos como os de biorrefinaria e de química verde enfocam o aproveitamento da biomassa de modo que se tenham cadeias de valor similares às daquelas dos derivados do petróleo, porém com menor impacto ao meio ambiente, de forma a contemplar sistemas integrados (matéria-prima, processo, produto e resíduos) sustentáveis, de acordo com parâmetros técnicos que levam em conta, dentre outros aspectos, os balanços de energia e massa e análise do ciclo de vida.

Vaz-Jr. e Damaso observam a grande sinergia entre as biorrefinarias e a química verde, principalmente no que diz respeito à minimização de resíduos e de impactos ambientais, bem como à criação de uma “economia verde” (VAZ JÚNIOR e DAMASO, 2011). Citando-se como exemplo uma biorrefinaria baseada na cana-de-açúcar como matéria-prima, esta pode integrar em um mesmo espaço físico processos de obtenção de biocombustíveis (etanol), produtos químicos (sucroquímicos), energia elétrica e calor.

Em uma escala de valoração econômica, apresentada na Figura 9.1, os produtos químicos desenvolvidos a partir da biomassa são os que possuem maior potencial em agregar valor a uma cadeia produtiva agroenergética, em função da participação estratégica da indústria química no fornecimento de insumos e produtos finais a diversos setores da economia, como: petroquímico, farmacêutico, automotivo, construção, agronegócio, cosméticos etc. Biocombustíveis e materiais estão em um segundo patamar de valoração, seguidos por energia e insumos químicos, como fertilizantes e defensivos agrícolas.

No Brasil, esforços têm sido feitos de modo a se levantar o potencial econômico da biomassa, segundo a ideia de utilização de fontes renováveis para uso e desenvolvimento de uma química sustentável nacional, bem como sua utilização nas biorrefinarias (Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010). É importante destacar que o aproveitamento da biomassa agroenergética residual é fundamental para viabilizar a produção dos biocombustíveis.

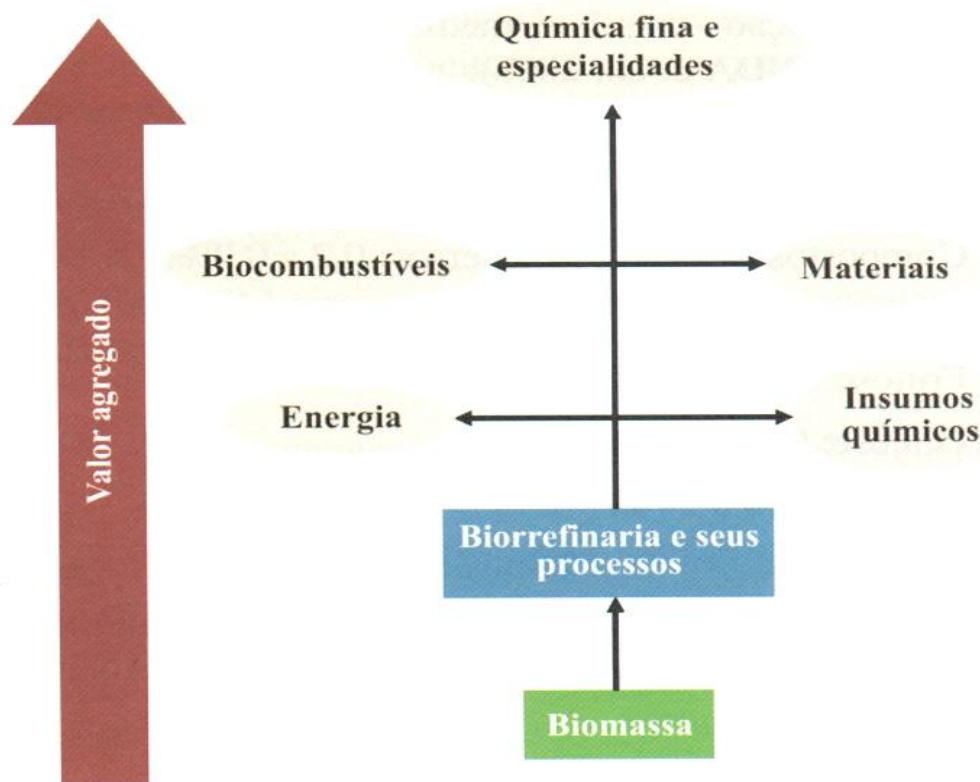


Figura 9.1 – Representação do aproveitamento da biomassa segundo o conceito de biorrefinaria.

Fonte: Sociedade Ibero-americana para o Desenvolvimento das Biorrefinarias, 2012.

## A Cana-de-Açúcar como Matéria-Prima

A utilização da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) como matéria-prima de uma biorrefinaria deve-se à sua capacidade em fornecer os seguintes materiais:

- Açúcares: sacarose (caldo), glicose (constituente da celulose e da inversão da sacarose) e xilose (constituente da hemicelulose);
- Polímeros naturais: celulose, hemicelulose e lignina, presentes no bagaço, na palha e nas ponteiros (biomassa lignocelulósica);
- Vinhaça ou efluente aquoso rico em matéria orgânica; e
- Outros compostos, como etanol, álcoois superiores e gás carbônico (CO<sub>2</sub>).

A composição mássica média da planta é a seguinte (DINARDO-MIRANDA et al., 2008):

- Água: 75 a 82%;
- Compostos orgânicos diversos: 0,8 a 1,8%;
- Compostos inorgânicos diversos: 0,2 a 0,7%.
- Fibra: 8 a 14%;
- Frutose: 0,2 a 1%;
- Glicose: 0,2 a 1%; e
- Sacarose: 14 a 24%.

Já o bagaço, como principal biomassa lignocelulósica, tem a seguinte composição mássica média (DINARDO-MIRANDA et al., 2008):

- Celulose: 41,7%;
- Hemicelulose: 34%; e
- Lignina: 12,6%.

A sacarose, que é um dissacarídeo formado pelos monossacarídeos glicose e frutose, é utilizada para a produção de etanol por fermentação e para a produção do açúcar comercial, por meio da separação e cristalização; porém, a sucroquímica busca a obtenção de outras moléculas de maior valor a partir da sacarose, bem como da glicose e xilose constituintes da celulose e hemicelulose, respectivamente. O bagaço já é frequentemente utilizado na alimentação animal e na produção de bioeletricidade, ou cogeração, de modo que as usinas são autossuficientes quanto ao uso de energia elétrica (União da Indústria de Cana-de-açúcar, 2012). O uso do bagaço e da palha para a produção de etanol de segunda geração (2G) é um tema que possui grande quantidade de trabalhos publicados na literatura, porém ainda não se tem uma produção comercial, além de haver gargalos a serem superados, como a redução do custo de enzimas e desenvolvimento de leveduras que fermentem as pentoses da hemicelulose (SARKAR et al., 2012). Já a vinhaça tem sido

utilizada tanto na geração de biogás quanto na fertirrigação do solo; contudo, é necessário um monitoramento frequente de sua aplicação, devido ao alto conteúdo de íons e matéria orgânica, que podem alterar as propriedades físico-químicas do solo, com as posteriores lixiviação dos íons ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{K}^+$ , etc.) e poluição da água subterrânea (SILVA et al., 2007).

A Tabela 9.1 apresenta os principais componentes e derivados da cana-de-açúcar com uso econômico.

Tabela 9.1 – Componentes e derivados da cana-de-açúcar com uso econômico

Resíduo	Constituição principal	Uso
Sacarose	Glicose e frutose	Açúcar comercial, etanol e sucroquímica.
Bagaço	Lignina, celulose, hemicelulose, inorgânicos e água	Alimentação animal. Bioeletricidade via cogeração Compostos químicos renováveis substitutos dos petroquímicos, a partir da celulose, hemicelulose e lignina. Etanol de segunda geração, a partir da celulose e eventualmente da hemicelulose. Materiais alternativos diversos, como fibras e polímeros, a partir da celulose e lignina.
Palha	Lignina, celulose, hemicelulose, inorgânicos e água	Bioeletricidade via cogeração. Compostos químicos renováveis substitutos dos petroquímicos, a partir da celulose, hemicelulose e lignina.

Continua...

Tabela 9.1 – Cont.

Resíduo	Constituição principal	Uso
Palha		Etanol de segunda geração, a partir da celulose e eventualmente da hemicelulose.
Vinhaça (efluente aquoso)	Matéria orgânica solubilizada, sólidos inorgânicos insolúveis, sais inorgânicos solúveis e água	Biogás via digestão anaeróbica. Fertilizante via digestão anaeróbica.

## Perspectivas de Aproveitamento da Cana-de-Açúcar em uma Biorrefinaria

Como pôde ser observado na Figura 9.1, ao nos referirmos a uma biorrefinaria, estamos nos referindo às tecnologias e processos utilizados para a transformação da biomassa nos cinco tipos de produtos apresentados (energia, insumos químicos, biocombustíveis, materiais e produtos químicos). As tecnologias são compiladas em processos os quais, por sua vez, são divididos em *bioquímicos*, *químicos* e *termoquímicos*.

A Tabela 9.2 apresenta uma descrição de produtos-alvo de alto valor agregado que podem ser obtidos a partir da cana-de-açúcar, utilizando-se diferentes processos. Nesta tabela, podem ser observados somente os *bloco-construtores* e produtos finais para uso, os quais foram definidos segundo as características da biomassa brasileira, dados da literatura científica internacional e nacional, e demanda das indústrias químicas e correlatas nacionais. Os bloco-construtores são compostos químicos a partir dos quais se originam um grande número de outros produtos químicos de interesse econômico, enquanto que os *intermediários de síntese* são aqueles compostos utilizados em pequenas quantidades como reagentes para química fina – produção de fármaco-químicos, agrotóxicos, cosméticos, entre outros.

É possível notar que, mesmo com os esforços louváveis de instituições como o DOE-NREL (*U.S. Department of Energy – National Renewable Energy Laboratory*) em P&D e levantamento de

produtos e rotas potenciais, a maioria dos compostos “verdes” ainda não alcançou a etapa de escalonamento industrial – ao menos é o que pode ser observado na literatura especializada e na mídia. Um bom exemplo é o ácido succínico: tido como uma das principais oportunidades para compostos químicos renováveis, devido à sua grande possibilidade de aplicação como bloco-construtor (United States Department of Energy, 2004), ainda não se tem uma rota de síntese consolidada, mesmo com o grande número de publicações e patentes. Contudo, é necessário avaliar cada molécula segundo o cenário brasileiro e dois dos principais aspectos a serem considerados são: i) a indústria química brasileira importa quase que em sua totalidade compostos de alto valor agregado de uso, principalmente, em química fina, não tendo tecnologia nacional desenvolvida que possa inverter o déficit deste setor (Associação Brasileira da Indústria Química, 2012); ii) a necessidade de *intermediários de síntese*, principalmente para fármaco-químicos (OLIVEIRA, 2005), pode se tornar mais interessante do que a busca por bloco-construtores, normalmente visto no cenário internacional.

Tabela 9.2 – Novos produtos da cana-de-açúcar identificados como de alto potencial

Composto-alvo	Precursor	Tipo de rota	Status	Ref.
Ácido 2,5-furanodicarboxílico	Glicose da celulose	Síntese orgânica Síntese bioquímica via fermentação	Em desenvolvimento: melhoria de catalisadores e otimização de rendimento, entre outros.	Tong et al. (2011)
Ácido succínico	Xilose da hemicelulose	Síntese bioquímica via fermentação	Em desenvolvimento: melhoria de microrganismos e otimização de rendimento.	Gallezot (2012) Bozell; Petersen (2010)
Derivados da celulose (ácidos, ésters, nitratos, éters etc.)	Celulose	Síntese orgânica	Processos industriais estabelecidos.	Ali et al. (2005)

Continua...

Tabela 9.2 – Cont.

Composto-alvo	Precursor	Tipo de rota	Status	Ref.
Etanol de segunda geração	Glicose da celulose Xilose da hemicelulose	Síntese bioquímica via fermentação	Em desenvolvimento: melhoria de enzimas e microrganismos, otimização de rendimento e redução de custo.	Nakashima et al. (2011)
Fenóis	Lignina	<i>Cracking</i> catalítico	Em desenvolvimento: melhoria de catalisadores e otimização de rendimento, entre outros.	Horáček et al. (2012)
Furfural	Xilose da hemicelulose	Síntese orgânica	Processo industrial estabelecido: com necessidade de melhoria de catalisadores e otimização de rendimento, entre outros.	Gallezot (2012)
Gás de síntese (CO + H <sub>2</sub> )	Biomassa lignocelulósica	Gaseificação	Processo industrial estabelecido: com necessidade de otimização de rendimento, entre outros.	Akay; Jordan (2011)
5-Hidroxiacetilfurfural	Celulose	Síntese orgânica	Em desenvolvimento: melhoria de catalisadores e otimização de rendimento, entre outros.	Tong et al. (2011)
Ligninas sulfonatadas	Lignina	Síntese orgânica	Processos industriais estabelecidos.	Hocking (2005)
Xilitol	Xilose da hemicelulose	Síntese orgânica	Em desenvolvimento: melhoria de catalisadores e otimização de rendimento, entre outros.	Climent et al. (2011)



O cenário tecnológico atual, considerado a partir das informações apresentadas nas Tabelas 9.1 e 9.2, sugere a obtenção de uma larga gama de produtos, os quais são ilustrados na Figura 9.2, a seguir.

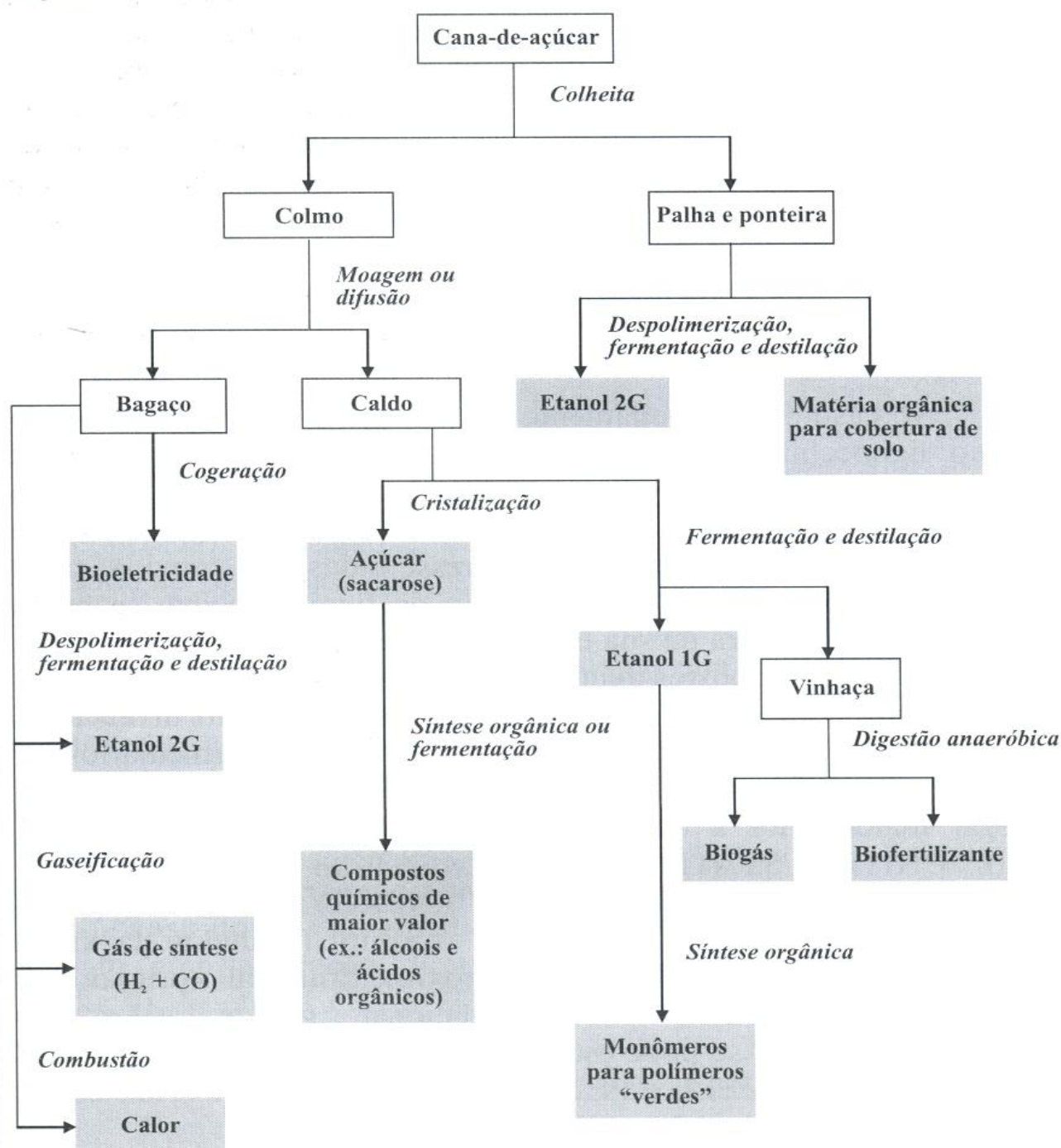


Figura 9.2 – Fluxograma simplificado dos produtos (caixas em cinza) de uma biorrefinaria de cana-de-açúcar.

Fonte: Sílvio Vaz Jr. (10/2012).

## Processos Químicos

Os processos químicos são aqueles baseados exclusivamente em reações químicas (formação ou rompimento). A partir da Figura 9.2, é possível observar que o principal processo químico envolvido é a síntese orgânica. Na maioria das vezes, um componente da biomassa é extraído e purificado, sendo posteriormente utilizado como reagente de partida em uma rota sintética, que frequentemente utiliza-se de catalisadores para o aumento do rendimento do produto de interesse e para a diminuição dos tempos de reação. Assim, é possível notar que vários aspectos da química verde, como o uso de catalisadores e a redução da geração de resíduos, podem ser aqui aplicados, sendo que o primeiro aspecto pode se tornar um item extremamente estratégico para os processos químicos de síntese.

No caso do aproveitamento da celulose e da hemicelulose do resíduo lignocelulósico (bagaço, palha e ponteiros), deve-se antes obter estes polímeros e os seus açúcares constituintes, destacando-se a glucose (hexose) e a xilose (pentose), respectivamente, para a posterior obtenção de produtos de interesse industrial, como o etanol 2G (KAMM et al., 2006). Para o caso da lignina, o que se busca inicialmente é a quebra de sua estrutura molecular, de modo a liberar, principalmente, compostos fenólicos, os quais poderão ser testados, por exemplo, como monômeros em rotas de preparação diversas. A obtenção de compostos bloco-construtores e de intermediários de síntese é a abordagem usual utilizada em projetos de P&D que visam agregar maior valor à cadeia produtiva (BOZELL e PETERSEN, 2010; UNITED STATES DEPARTMENT of ENERGY, 2007; UNITED STATES DEPARTMENT of ENERGY, 2004). Compostos bloco-construtores, como o furfural e o xilitol (oriundos da xilose constituinte da hemicelulose) e hidroximetilfurfural (oriundo da glucose), entre outros, podem adicionar grande valor aos carboidratos, o que se pode estender aos derivados da lignina (VAZ JÚNIOR, 2011; BOZELL e PETERSEN, 2010; KAMM et al., 2006), como citado na Tabela 9.2.

Cabe comentar o desenvolvimento e uso de catalisadores para esses processos, dada a importância deles para melhoria de rendimentos e seletividades (enantioseletividade, regioseletividade e estereoseletividade). As zeólitas têm sido utilizadas no *cracking* de

ligninas (ZAKZESKI et al., 2010). Os metais (sais solúveis e insolúveis, e complexos) têm sido aplicados em catálise heterogênea (Ni, Pd/C, Ru/C, Co-Mo, Ni-Mo, Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc.) para a redução de ligninas (BOZELL e PETERSEN, 2010; ZAKZESKI et al., 2010); complexos metálicos de V, Mn, Co, Pd, Fe, Re e Cu, como catalisadores homogêneos e heterogêneos para a oxidação de celulose, entre outras reações (COLLINSON e THIELEMANS, 2010). Já as enzimas, como celulase,  $\beta$ -glucosidase e xilanase, são largamente utilizadas na hidrólise da celulose e da hemicelulose para a liberação da glicose e da xilose, respectivamente (SARKAR et al., 2012).

## Processos Bioquímicos

Os processos bioquímicos observados na Figura 9.2 são a fermentação, para a produção do etanol 1G e outros produtos químicos, como outros álcoois e ácidos orgânicos, e a digestão anaeróbica, para a produção de biogás e o biofertilizante (fração mineralizada). A catálise enzimática também contribui para ao aumento da velocidade das reações metabólicas.

Os processos bioquímicos têm grande similaridade operacional com os processos químicos no que diz respeito às etapas de análise composicional e caracterização da matéria-prima, pré-tratamento (quando necessário), identificação estrutural e estudo do potencial industrial. Contudo, as principais particularidades desses processos dizem respeito ao uso de microrganismos (fungos, bactérias, leveduras e microalgas), os quais possuem mecanismos bioquímicos que permitem a síntese de produtos químicos orgânicos, sejam eles bloco-construtores, intermediários de síntese ou compostos que tenham uma aplicação direta, como o etanol. Por exemplo, na produção do etanol (1G e 2G) utiliza-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae* para a fermentação da sacarose, gerando etanol, gás carbônico e calor (SARKAR et al., 2012).

Na fermentação anaeróbica da matéria orgânica presentes na vinhaça são produzidos, majoritariamente, o metano (biogás) e o gás carbônico, além de um resíduo mineral rico em sais inorgânicos de nitrogênio, enxofre e carbono (biofertilizante). Utilizam-se, neste caso, consórcios de bactérias, formados por *Acinetobacter*,

*Arthrobacter*, *Bacillus*, *Brevbacterium*, entre outras (CUTRIGHT, 2002).

As bactérias *Escherichia coli* podem ser utilizadas para a metabolização da glicose e produção do 1, 3-propanodiol; *Lactobacillus delbrueckii*, para a produção de ácido láctico via fermentação da glicose; e *Anaerobiospirillum succiniciproducens* para a produção de ácido succínico por meio da fermentação de pentoses e hexoses (BOZELL e PETERSEN, 2010). Contudo, apesar do alto potencial de produção de uma grande quantidade de produtos químicos, a lenta cinética de reação e a dificuldade de separação dos produtos finais, ou *downstream*, em alguns casos podem limitar o uso dos bioprocessos nas biorrefinarias.

## Processos Termoquímicos

Assim como para os processos químicos e bioquímicos, as etapas de análise composicional e caracterização da matéria-prima, a identificação estrutural e o estudo do potencial industrial são comuns. Contudo, as principais particularidades destes processos dizem respeito ao uso da energia térmica que leva à combustão e à gaseificação. Por meio da combustão, gera-se energia térmica (calor) (NUSSBAUMER, 2003); já por meio da gaseificação produz-se o gás de síntese (*syngas*), que é majoritariamente composto por monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H<sub>2</sub>), a ser utilizado em síntese orgânica de várias moléculas de uso na indústria química (AKAY e JORDAN, 2011), por meio da reação de Fisher-Tropsch (GÖKALP e LEBAS, 2004). A cogeração é um processo térmico combinado, por meio do qual se produz energia elétrica; nele, a combustão da biomassa gera calor, que aquece a água, gerando vapor, que move as turbinas para a produção da bioeletricidade – esta pode tanto ser utilizada pela própria biorrefinaria ou ser vendida para a rede elétrica.

Como visto na Tabela 9.2, a gaseificação é o processo que pode adicionar valor ao resíduo da biomassa, já que a partir do gás de síntese (*syngas*) obtêm-se diversos compostos químicos de origem renovável que podem substituir os petroquímicos.

## Desafios Envolvidos

Como já comentado, muitos dos produtos-alvo aqui apresentados são objeto de extensa produção literária, principalmente nas áreas de Química Orgânica, Biotecnologia e Engenharia Química. Porém, na maioria das vezes não se têm processos estabelecidos para a produção industrial destes produtos, o que aponta para a existência de desafios de caráter científico, técnico e econômico, em separado ou concomitantes. Deve-se considerar, contudo, que o mercado mundial de produtos químicos envolve valores em torno de USD 100 bilhões ao ano, dos quais cerca de 3% diz respeito aos bioprodutos, ou derivados da biomassa, havendo uma estimativa de aumento dessa participação total para 25% até o ano 2025 (VIJAYENDRAN, 2010). Esses valores dão uma ideia das possibilidades e dos riscos envolvidos. Para o caso das especialidades químicas e da química fina, a atual participação de renováveis de cerca de 25% para ambos os seguimentos poderá chegar a 50%, enquanto que para os polímeros os atuais 10% poderão chegar a 20%, também em 2025 (BIOTECHNOLOGY INDUSTRY ORGANIZATION, 2012).

### Desafios científicos

Os desafios científicos envolvem a criação de ambientes acadêmicos e industriais propícios para o desenvolvimento de mão-de-obra especializada, o que envolve formação e qualificação em nível técnico, de graduação, de especialização, de mestrado, de doutorado e de pós-doutorado. Isso demanda uma visão estratégica do governo federal e da iniciativa privada, com uma parceria constante entre ambos estes atores.

Outro desafio científico a ser superado diz respeito ao desenvolvimento de conhecimento nacional e não à importação de *know-how* estrangeiro, como é frequente no Brasil. Essa é uma questão que define um país como um *player* efetivo no cenário global, ou como um país secundário do ponto de vista de conhecimento de alto valor, que é aquele que somente produz ou exporta matérias-primas e *commodities*.

## Desafios técnicos

Os desafios tecnológicos envolvem o desenvolvimento ou a melhoria de tecnologias que permitam o escalonamento dos processos desenvolvidos em laboratório, como métodos de separação, otimização de processos, eficiência energética, entre outros – um claro exemplo para essas observações é o etanol 2G.

A não superação deste tipo de desafio pode inviabilizar a produção de determinado produto, como uma molécula, que possa apresentar grande potencial de mercado em sua etapa de P&D. Portanto, uma etapa bem planejada de P&D deve ter um apoio tecnológico à devida altura, de modo a poder tornar a escala laboratorial possível de alcançar escala industrial.

## Desafios econômicos

Um dos principais desafios econômicos diz respeito à captação e ao aporte de recursos nos projetos de P&D&I e, posteriormente, nos projetos de demonstração de tecnologias. Ascensão e o possível declínio dos produtos químicos ditos “verdes” também é algo a ser considerado no planejamento orçamentário de projetos de desenvolvimento ou de produção de compostos renováveis, já que cenários internacionais anteriores relacionados à indústria química apontam para o cuidado em relação a fatores externos de mercado (Biotechnology Industry Organization, 2012).

Contudo, a demanda existente pelo etanol 1G e o início da produção do etanol 2G propiciarão um ambiente econômico favorável para a biorrefinaria de cana-de-açúcar.

## Conclusão

Buscou-se mostrar o grande potencial econômico de uma biorrefinaria que utiliza a cana-de-açúcar como matéria-prima. Este potencial em grande parte é atribuído à possibilidade de desenvolvimento de moléculas de compostos para a química fina e química convencional, por exemplo, como os bloco-construtores e os

intermediários de síntese. Porém, materiais e produtos energéticos também têm destaque na exploração industrial que tem como modelo conceitual a refinaria petroquímica.

Quando são avaliados produtos apontados como potenciais em outras regiões do mundo, nota-se que nem sempre eles refletem as necessidades brasileiras, justificando a utilização de informações próprias obtidas em estudos realizados no Brasil, de forma a melhor direcionar, para o cenário nacional, o planejamento técnico-científico e os recursos de investimento.

Os processos químicos, bioquímicos e termoquímicos são fundamentais para a exploração de todo o potencial acima comentado. Porém, ainda são necessárias fortes ações visando ao desenvolvimento de tecnologias nacionais, que compreendem, principalmente, pré-tratamentos, rotas de síntese, catalisadores e microrganismos.

Desafios científicos, técnicos e econômicos deverão ser superados em conjunto entre governo e iniciativa privada, o que permitirá que as biorrefinarias se tornem uma alternativa viável para a substituição de uma economia baseada no petróleo, que é uma matéria-prima não renovável e de alto impacto ambiental, pela bioeconomia baseada na biomassa renovável.

## Referências

ALI, M.F.; EL ALI, B.M.; SPEIGHT, J.G. **Handbook of industrial chemistry – organic chemistry**. New York: McGraw-Hill, 2005. 661p.

AKAY, G.; JORDAN, C.A. Gasification of fuel cane bagasse in a downdraft gasifier: influence of lignocellulosic composition and fuel particle size on syngas composition and yield. **Energy and Fuels**, v. 25, p. 2274-2283, 2011.

ASSOCIAÇÃO Brasileira da Indústria Química. **A indústria química em 2011**.

Disponível em:

<[http://www.abiquim.org.br/enaiq2011/apr/A\\_industriaquimica\\_2011\\_ff.pdf](http://www.abiquim.org.br/enaiq2011/apr/A_industriaquimica_2011_ff.pdf)>.

Acesso em: set. 2012.

BIOTECHNOLOGY Industry Organization. **Biobased chemicals and products: a new driver for green jobs**. Disponível em: <<http://www.bio.org/articles/biobased-chemicals-and-products-new-driver-green-jobs>>. Acesso em: set. 2012.

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.

- CENTRO de Gestão e Estudos Estratégicos. **Química verde no Brasil: 2010 – 2030, 2010**. Brasília, DF: CGEE, 2010. 438p.
- CLIMENT, M.J.; CORMA, A.; IBORRA, S. Heterogeneous catalysts for the one-pot synthesis of chemicals and fine chemicals. **Chemical Reviews**, v. 111, p. 1072-1133, 2011.
- COLLINSON, S. R.; THIELEMANS, W. New materials focusing on starch, cellulose and lignin. **Coordination Chemistry Reviews**, v. 254, p. 1854-1870, 2010.
- CUTRIGHT, T.J. Biotechnology principles. In: GHASSEMI, A. (Ed.). **Handbook of pollution and waste minimization**. Marcel Dekker, 2002. p. 189-232.
- SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, p. 108-114, 2007.
- OLIVEIRA, N.B. Inovação e produção na química fina. **Química Nova**, v. 28, p. S79-S85, 2005.
- DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M.; LANDELL, M.G.A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. 882p.
- GALLEZOT, P. Conversion of biomass to selected chemical products. **Chemical Society Reviews**, v. 41, p. 1538-1558, 2012.
- GÖKALP, I.; LEBAS, E. Alternative fuels for industrial gas turbines (AFTUR). **Applied Thermal Engineering**, v. 24, p. 1655-1663, 2004.
- HOCKING, M.B. **Handbook of chemical technology and pollution control**. 3.ed. San Diego: Academic Press, 2005. 801p.
- HORÁČEK, J.; HOMOLA, F.; KUBIČKOVÁ, I.; KUBIČKA, D. Lignin to liquids over sulfided catalysts. **Catalysis Today**, v.179, p.191-198, 2012.
- KAMM, B.; GRUBER, P.R.; KAMM, M. Biorefineries: industrial processes and products: status quo and future directions. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. v. 1, p. 406.
- NAKASHIMA, K.; YAMAGUSHI, K.; TANIGUSHI, N.; ARAI, S.; UAMADA, R.; KATAHIRA, S.; IASHIDA, N.; TAKAHASHI, H.; OGINO, C.; KINDO, A. Direct bioethanol production from cellulose by the combination of cellulase-displaying yeast and ionic liquid pretreatment. **Green Chemistry**, v. 13, p. 2948-2953, 2011.
- NUSSBAUMER, T. Combustion and co-combustion of biomass: fundamentals, technologies, and primary measures for emission reduction. **Energy and Fuels**, v. 17, p. 1510-1521, 2003.
- SARKAR, N.; GHOSH, S.K.; BANNERJEE, S.; AIKAT, K. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. **Renewable Energy**, v. 37, p. 19-27, 2012.
- SOCIEDADE IBERO-AMERICANA para o Desenvolvimento das Biorrefinarias. Brochura. Disponível em: <<http://www.siadeb.org/pt/BrochuraSIADEB-PT.pdf>>. Acesso em: set. 2012.
- TONG, X.; MA, Y.; LI, Y. Biomass into chemicals: conversion of sugars to furan derivatives by catalytic processes. **Applied Catalysis A: General**. v. 385, p. 1- 13, 2011.



UNIÃO DA INDÚSTRIA de Cana-de-açúcar. **O bagaço de cana como alternativa energética.** Disponível em:

<<http://www.unica.com.br/opiniao/show.asp?msgCode={46B20D1D-D55C-4E4B-8D13-4919D0FB6F67}>>. Acesso em: set. 2012.

UNITED STATES Department of Energy. **Top value added chemicals from biomass: results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas.** Springfield: US-DOE, 2004. p. 76.

UNITED STATES Department of Energy. **Top value added chemicals from biomass: results of screening for potential candidates from biorefinery lignin.** Springfield: US-DOE, 2007. p. 79.

VAZ JÚNIOR, S. (Ed.). **Biorrefinarias: cenários e perspectivas.** Brasília: Embrapa Agroenergia, 2011. 175p.

VAZ JÚNIOR, S.; DAMASO, M.C.S. Conclusões do simpósio e perspectivas para as biorrefinarias no Brasil. In: VAZ JÚNIOR, S. (Ed.). **Biorrefinarias: cenários e perspectivas.** Embrapa Agroenergia, 2011. p. 169-175.

VIJAYENDRAN, B.J. Bio products from bio refineries – trends, challenges and opportunities. **Business Chemistry**, v. 7, p. 109-115, 2010.

ZAKZESKI, J.; BRUIJNINCX, P.C.A.; JONGERIUS, A.L.; WECKHUYSEN, B.M. The catalytic valorization of lignin for the production of renewable chemicals. **Chemical and Reviews**, v. 110, p. 3552-3599, 2010.