

Situação atual e perspectivas do etanol

ISAÍAS C. MACEDO

Introdução

NO ANO DE 2006, 425 milhões de toneladas de cana foram processadas em 310 usinas no Brasil, produzindo 30 milhões de toneladas de açúcar e 17 milhões de metros cúbicos de etanol. Estimativas recentes (Carvalho, 2006) indicam que os mercados potenciais (externo e interno) para o etanol e açúcar brasileiros usariam em 2012-2013 cerca de 685 milhões de toneladas de cana, produzidas em 6,4 milhões de hectare; para isso, no Centro-Sul seriam usadas 77 novas unidades de produção, com investimentos de US\$ 14,6 bilhões. Em 2012-2013, cerca de 60% da cana seria destinada ao mercado interno; no total, além do açúcar seriam produzidos 35,7 milhões de metros cúbicos de etanol (7 milhões de metros cúbicos para exportação).

- O Brasil é o maior produtor mundial de cana (33,9%), açúcar (18,5%) e etanol (36,4%); e também o maior exportador de açúcar e etanol (2005).
- Etanol corresponde a 40,6% do combustível para veículos leves (total de 19,2 milhões de veículos) (2005).

Para os países industrializados comprometidos com as metas do Protocolo de Kyoto, o uso de biocombustíveis representa uma das formas mais efetivas de reduzir as emissões líquidas de gases de efeito estufa associadas ao consumo energético no setor de transporte. No entanto, os desenvolvimentos nos últimos anos mostram claramente uma diferença muito grande na capacidade de redução de emissões entre os diversos biocombustíveis, indicando grande vantagem para o etanol de cana produzido no Brasil (Tabela 1) (Macedo, 2006).

Tabela 1 – Balanço de energia na produção de etanol, com diversas matérias-primas

Matérias-primas	Energia renovável / energia fóssil usada
Etanol de milho (USA)	1,3
Etanol de cana (Brasil)	8,9
Etanol de beterraba (Alemanha)	2,0
Etanol de sorgo sacarino (África)	4,0
Etanol de trigo (Europa)	2,0
Etanol de mandioca	1,0

É muito interessante notar como ocorreu a evolução da tecnologia de produção e uso do etanol no Brasil, mesmo porque muitos países estão inician-

do caminhos nessa direção, e, entre nós, o biodiesel pode ser beneficiado com a experiência adquirida.

A trajetória da inovação tecnológica para o etanol no Brasil

A produção e o uso do etanol no Brasil são hoje o melhor exemplo (no mundo) da introdução de energia renovável com uma grande escala de produção. Partindo da produção estabelecida de açúcar, um processo completo de integração das produções foi obtido nas usinas: com grande flexibilidade nas unidades anexas (e com operação de autônomas, por algum tempo), as perdas de processo foram reduzidas e houve melhoria na qualidade do açúcar. Esse processo exigiu extenso desenvolvimento tecnológico (geração, importação, adaptação e transferência de tecnologias) na produção (agrícola e industrial), na logística e nos usos finais, nos últimos trinta anos. Também foi importante uma legislação específica, subsídios iniciais e permanente negociação entre os principais setores envolvidos: os produtores de etanol, os fabricantes de veículos, os setores reguladores governamentais e a indústria do petróleo, em um denso processo de aprendizagem.

É importante destacar alguns dos principais avanços tecnológicos nesse período (1975-2000), mesmo porque em alguns casos devem-se buscar desenvolvimentos análogos para outros biocombustíveis.

Entre 1980 e 1990, destacam-se:

- A introdução em larga escala de variedades de cana desenvolvidas no Brasil (principalmente pelos programas do CTC-Copersucar e do Planalsucar).
- O desenvolvimento do uso integral da vinhaça na ferti-irrigação.
- Controles biológicos na produção da cana.
- Desenvolvimento do sistema de moagem com quatro rolos.
- Tecnologia para operação de fermentações “abertas” de grande porte.
- Aumento na produção de energia elétrica na indústria (auto-suficiência).
- Uso final: especificações do etanol; motores E-100; transporte, mistura e armazenamento do álcool.

Entre 1990 e 2000, podem ser apontados:

- Otimização do corte, carregamento e transporte da cana.
- Mapeamento do genoma da cana; transformações genéticas.
- Mecanização da colheita.
- Obtenção de excedentes de energia elétrica e venda para a concessionária.
- Avanços em automação industrial.
- Avanços no gerenciamento técnico (agrícola e industrial).
- A introdução dos motores flex-fuel.

Como indicadores desse processo de intensa incorporação de inovações tecnológicas e processos mais efetivos de gestão, podem ser citados os resultados obtidos no período 1975-2000 em São Paulo. Os números de produtividade agrícola indicam aumentos de 33%, em toneladas de cana por hectare; a qualidade da matéria-prima evoluiu 8%, medida em teor de açúcar na cana; observaram-se

ganhos de 14% na conversão dos açúcares na cana para (etanol) e de 130% na produtividade da fermentação, medida em metros cúbicos de etanol por metro cúbico de reator.dia.

Os valores médios de parâmetros de desempenho para a agroindústria no Centro-Sul, em 2003-2004, foram:

- Produtividade da cana: 84,3 t/ha.
- Açúcar % cana: 14,6.
- Conversão industrial: 86%.

A observação da natureza dos avanços tecnológicos ao longo do período mostra que, nos anos iniciais, as preocupações foram centradas em aumentar a produção rapidamente (produtividades de equipamentos e processos), mesmo em detrimento de eficiência de conversão; isso pode ocorrer sempre que a política indutora force metas muito altas de implementação, com garantia de compra. Nos anos seguintes, os aumentos de eficiência passaram a ser mais importantes (mesmo porque as garantias de preços não foram mais observadas); e a terceira dessas “fases” foi o avanço em técnicas gerenciais da produção, que levou a grandes reduções de custo. O resultado global foi uma forte redução nos custos de produção, levando o etanol a uma situação em que praticamente não há necessidade de subsídios para competir com a gasolina, considerando o petróleo a preços acima de US\$ 45 o barril. A forma dessa “curva de aprendizado”, mostrada na Figura 1, tem sido muito estudada.

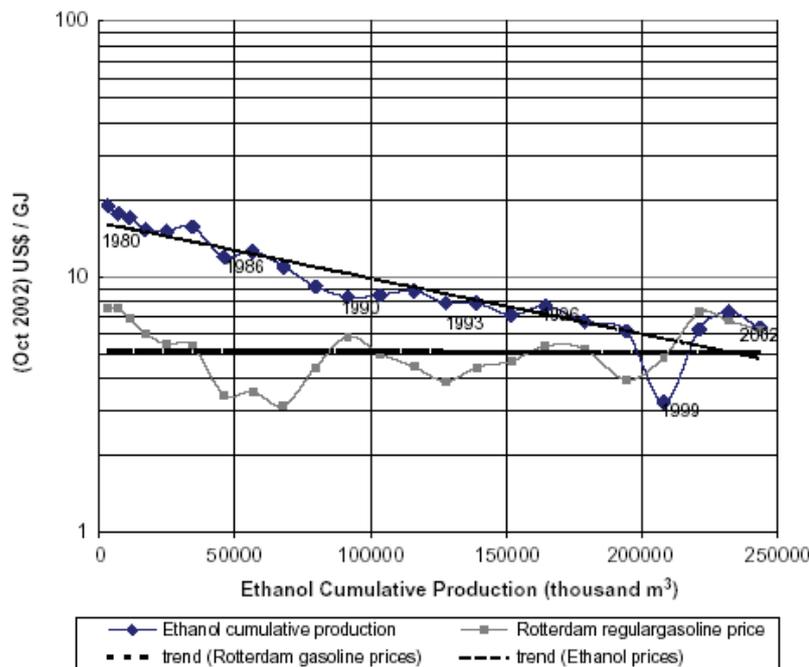


Figura 1 – Valores pagos ao produtor (sem impostos) e custo da gasolina (Goldemberg et al., 2004).

As perspectivas para os próximos anos

Uma questão que se coloca no momento é: quais são as possibilidades de ainda se obterem grandes avanços tecnológicos na produção e nos usos do etanol nos próximos anos? Colocado de outra forma, pode-se dizer que a produção de etanol no Brasil atingiu um estágio “maduro”, com os menores custos do mundo e boa qualidade do produto, podendo-se esperar apenas avanços incrementais, ou existem ainda áreas a explorar com grandes margens de aperfeiçoamento para saltos importantes na competitividade?

Hoje está claro que essas alternativas não são excludentes, e será possível não só continuar com os avanços graduais sobre as tecnologias em uso, como também atingir grandes ganhos com o advento de algumas tecnologias em desenvolvimento. Inicialmente, é preciso considerar que a produção conjugada de açúcar e etanol deve continuar, entre outros fatores, pela posição atual do Brasil como o maior (e crescente) exportador mundial de açúcar, pela sinergia positiva nessa produção, e porque o etanol tem sido o grande agente na elevação do patamar de preços internacionais do açúcar, na medida em que proporciona uma alternativa competitiva para a industrialização da cana-de-açúcar. As opções tecnológicas para os produtos da cana-de-açúcar devem considerá-los em conjunto, porque os efeitos nos custos finais de cada um (incluindo o etanol) são relacionados.

Dessa forma, as possibilidades de incremento de produtividade e redução de custos na cadeia bioenergética a partir da cana-de-açúcar podem ser consideradas em contextos complementares, como sintetizado a seguir:

- Nos próximos anos, é desejável e possível fazer a implementação completa das tecnologias já disponíveis e atualmente ainda em uso parcial, generalizando as melhores práticas agronômicas, industriais e de gestão. Isso poderá ocorrer em razão da forte competição interna, e com mecanismos adequados de transferência de tecnologia (hoje representados pelos próprios fabricantes de equipamentos e insumos, institutos, empresas de tecnologia e especialmente pelo Centro de Tecnologia Canavieira).
- A evolução tecnológica “contínua” dos processos em uso poderá levar também nos próximos anos a ganhos relevantes de produtividade, mediante: agricultura “de precisão”, desenvolvimento de melhores variedades (particularmente para as novas áreas), maior integração da colheita/carregamento/transporte, novos processos de separação do etanol, automação industrial, entre outros.
- Em médio prazo (de cinco a dez anos), deverá ocorrer o desenvolvimento de diversos co-produtos derivados da sacarose (alguns já em exploração) e novos subprodutos, principalmente do bagaço e palha, como a energia elétrica excedente (já iniciado) e etanol de bagaço e palha.
- Em médio e longo prazos, devem ser consideradas as perspectivas favoráveis para o desenvolvimento e difusão de variedades geneticamente modificadas de cana-de-açúcar, mais produtivas e resistentes.

Os ganhos com os primeiros itens poderão ser muito expressivos (por exemplo, para um grupo de usinas no Centro-Sul apenas para o primeiro item, maior difusão de tecnologias já praticadas, poderia levar a cerca de 12% de redução de custos, conforme estimativa em 2000). As perspectivas para variedades transgênicas são muito grandes; hoje há no Brasil diversos grupos trabalhando em dezenas de variedades transformadas (ainda em escala de laboratório e algumas em estufas) e considerando ganhos em várias características (resistência a doenças, precocidade, sacarose, biomassa total etc.). É difícil estimar o tempo necessário para implementação, mesmo porque não se trata apenas de um problema técnico, pois a eventual liberação dessas variedades depende de muitos outros fatores, incluindo políticos.

Em médio e longo prazos, os avanços em co-produtos deverão levar à implementação de “biorrefinarias” com utilização mais eficiente da sacarose e dos resíduos da cana (bagaço e palha), representando importantes “saltos” tecnológicos. As perspectivas de utilização eficiente dos resíduos lignocelulósicos da cana devem considerar seu enorme potencial para produzir energia ou materiais. Por exemplo, a cana-de-açúcar no Brasil correspondeu, em 2006, a cerca de 60 milhões de toneladas de sacarose (usadas para açúcar e etanol, em porções aproximadamente iguais) e a 120 milhões de toneladas de material lignocelulósico, bagaço e palha da cana. Assumindo que 30% do bagaço produzido estejam disponíveis como excedente (o restante corresponderia ao consumo da agroindústria, com alguma geração de excedentes de eletricidade, dependendo da tecnologia adotada) e recuperando 50% da palha da cana, poderiam ser disponibilizados 48 milhões de toneladas de material lignocelulósico (em base seca), já coletado e com certo preparo, com custo aproximado de 1 €/GJ. Custos médios de biomassa nessas condições para os países industrializados¹ situam-se entre 2 e 3 €/GJ, com planos para atingir 1,5 €/GJ, no futuro. Claramente, a agroindústria da cana, processando um recurso altamente competitivo, em razão de seu elevado desempenho fotossintético, poderá promover uma grande diversificação com o uso eficiente desses dois terços de sua matéria-prima.

Dois processos e suas muitas variantes são considerados “chave” para a promoção dessas “biorrefinarias” do futuro, particularmente para a valorização energética dos materiais lignocelulósicos; ambos estão ainda em desenvolvimento, com perspectivas de atingir viabilidade nos próximos anos, dependendo de tecnologias mais eficientes e biomassa barata:

- Hidrólise da biomassa: permite a conversão da celulose em açúcares e a partir daí a produção de etanol e outros produtos. Espera-se que as primeiras unidades estejam operando comercialmente entre 2010 e 2020.
- Gasificação da biomassa: permite obter combustíveis adequados para a geração eficiente de energia elétrica e a síntese de combustíveis líquidos. As expectativas para viabilidade comercial situam-se entre 2015 e 2025.

A gasificação da biomassa tem sido desenvolvida em duas direções: a geração de energia elétrica mediante ciclos integrados de elevada eficiência (gasi-

ficação e ciclos combinados com turbinas a gás) ou, alternativamente, a síntese de diversos combustíveis a partir desse gás (etanol, DME, gasolina, diesel). Para ambas as rotas, a pesquisa e o desenvolvimento necessários envolvem: sistemas de alimentação da biomassa; gasificação para gás de poder calorífico médio, com ar; e reatores de síntese avançados (por exemplo, reatores em fase líquida para síntese de DME, éter dimetílico).

A hidrólise de celulose, levando a açúcares do material celulósico, passa por grandes esforços de pesquisa em fase piloto (alguns já pré-comerciais) para reduzir custos e aumentar rendimentos (Oliverio, 2005). Prevê-se hoje que os pré-tratamentos no futuro serão principalmente físicos (explosão com vapor, uso de água supercrítica); os processos de hidrólise e fermentação para etanol poderão ser conjugados, assim como a fermentação incluiria os açúcares de cinco e seis átomos de carbono.² Esses processos poderiam recuperar 52% da energia da biomassa, contra os 35% de hoje. Os programas em execução incluem a demonstração dos pré-tratamentos físicos, a alimentação de biomassa e a seleção de microorganismos e enzimas adequados para os processos combinados (CBP) ou simplificações.

Por sua vez, essas biorrefinarias poderão incorporar vários outros co-produtos dos açúcares. Tem ocorrido uma significativa expansão no mundo, nos últimos quinze anos, na demanda de produtos da sacarose (que poderão também ser produzidos a partir dos açúcares da hidrólise); alguns já passam de um milhão de toneladas anuais. Os mais significativos são, considerando valores observados no início desta década:

- Adoçantes (23% do mercado, em 2002: frutose, glucose, polióis).
- Ácidos orgânicos (cítrico, glucônico, láctico, ascórbico): empregados na indústria alimentar e farmacêutica, com uma demanda de 0,7 milhão de toneladas anuais.
- Aminoácidos (MSG, lisina, treonina): utilizados basicamente para alimentação animal, com uma demanda de 1,5 milhão de toneladas anuais.
- Polióis: compostos utilizados principalmente na indústria de alimentos e química, com uma demanda de 1,4 milhão de toneladas anuais, principalmente como sorbitol e glicerol.

Além desses produtos, há as enzimas, com um mercado de alto valor e expectativas de dobrar até 2008, e os plásticos especiais, ainda uma promessa (PLA, PHAs, 3-GT), mas com mercados potencial muito grandes.

Atualmente, a indústria da cana no Brasil já produz regularmente L-lisina, MSG, extratos de levedura, ácido cítrico e sorbitol; e em fase pré-comercial, o PHB. Vem sendo avaliada por muitas usinas a possibilidade de se introduzirem altas capacidades de produção (superiores a milhão de toneladas anuais) e processos específicos de alto valor agregado (entre 10 e 50 mil toneladas anuais). Também produtos derivados de alcoolquímica (mais de 30 tipos diferentes foram produzidos no início dos anos 1990, incluindo borracha sintética) estão

sendo reavaliados nas condições de hoje; em particular, polietileno (utilizando eteno resultante da desidratação do etanol). A introdução desses novos produtos nas usinas passa por processos cuidadosos de avaliação, que envolvem:

- Disponibilidade do processo: patentes, aquisição da tecnologia ou desenvolvimento interno.
- Qualidade requerida do açúcar (caldo, açúcar bruto ou refinado, HTM); relação custo açúcar/custo total.
- Investimento e necessidade de operação anual.
- Natureza do processo (complexidade, custos associados, efluentes, proteção ambiental).
- Escala de produção e adequação à usina.
- Economia; os mercados de exportação (quase sempre necessários) e as taxas de câmbio.
- O arranjo comercial: parcerias?

A cana-de-açúcar aparece como uma matéria-prima ideal para essas futuras “biorrefinarias”, pelo seu custo relativamente baixo de biomassa, sua alta disponibilidade no mundo, e pelo *mix* interessante de um terço de sacarose, dois terços de material lignocelulósico pré-processado. Esses desenvolvimentos integrados poderão ajudar muito a trazer ainda maior competitividade ao etanol brasileiro.

Os ganhos de produtividade industrial (l/t cana) e agroindustrial (l/ha) associados aos desenvolvimentos tecnológicos comentados poderiam levar, nas melhores condições, a grandes aumentos na produção de etanol por hectare.

No âmbito do uso final, deve-se esperar um maior desenvolvimento dos motores flex-fuel, com maior desempenho e redução das emissões. Essa evolução é esperada, como já indicado em estudo preparatório do Plano Nacional de Energia 2030, mencionando estimativas do governo americano de que o consumo específico (veículos leves flex-fuel) passaria de 14,4 quilômetros por litro em 2015 para 15,3 quilômetros por litro em 2030 (MME, 2006).

Conclusões

A tecnologia de produção de etanol de cana-de-açúcar no Brasil avançou de modo importante nos últimos trinta anos. Nos próximos dez a vinte anos, o uso mais eficiente da biomassa da cana (e possivelmente de variedades modificadas geneticamente) poderá aumentar significativamente a gama de produtos e seu valor.

Energia (eletricidade e combustíveis líquidos) poderá ser uma fração ainda maior desses produtos

Algumas tecnologias em desenvolvimento avançado (principalmente no exterior) podem ser chaves para essa transformação: a hidrólise de biomassa (com as diversas fermentações para outros produtos) e a gasificação de biomassa, para energia elétrica ou combustíveis.

A cana-de-açúcar aparece como a matéria-prima ideal para essas futuras “biorrefinarias” pelo seu custo relativamente baixo, grande disponibilidade e pelo *mix* de um terço de sacarose com dois terços de material lignocelulósico pré-processado.

Notas

- 1 Valores atuais estimados para as “fazendas energéticas” no Hemisfério Norte.
- 2 A hidrólise da celulose produz hexoses, açúcares com seis carbonos, e a hidrólise da hemicelulose produz pentoses, açúcares com cinco carbonos. Apenas as hexoses são utilizadas hoje para a produção de etanol.

Referências bibliográficas

- CARVALHO, E. P. Formulação de uma estratégia para garantir o aumento da produção. In: Seminário “Uma estratégia para o etanol brasileiro”. Rio de Janeiro: Casa do Brasil, nov. 2006.
- GOLDEMBERG, J. et al. Ethanol learning curve – the Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy*, Elsevier Press, v.26, 2004.
- MACEDO, I. C. Feasibility of Biomass-Derived Ethanol as a Fuel for Transportation. (Project ME-T1007 - ATN/DO-9375-ME), Activity 6: Potentials in Relation to Sustainability Criteria, SENER/BID, México, 2006.
- MME – Política Nacional de Biocombustíveis, por Souto, J. J. N. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: outubro de 2006.
- OLIVERIO, L. Processo DHR – Dedini Hidrólise Rápida. Piracicba: Dedini Indústrias de Base, 2005.

RESUMO – Nos últimos trinta anos, a produção de etanol da cana-de-açúcar no Brasil avançou para 17 milhões de metros cúbicos, com perspectivas de atingir 35,7 milhões de metros cúbicos em 2012-2013. Esse crescimento ocorreu com grande aporte de tecnologia, por meio de geração, importação, adaptação e transferência interna. Uma análise das diferentes fases desse desenvolvimento é apresentada, com a evolução dos parâmetros tecnológicos e a grande competitividade atingida. A visão atual é que o setor poderá continuar a evoluir com melhorias contínuas ainda de modo importante, mas grandes “saltos” tecnológicos são possíveis mediante o desenvolvimento de tecnologias para o melhor uso da biomassa residual da cana (cerca de dois terços da biomassa total). Os estudos em curso indicam que a contribuição da cana para o suprimento de energia poderá ser muito superior (e diversificada) que a atual, e poderá ocorrer em paralelo com o desenvolvimento de biorrefinarias, levando a produtos de maior valor agregado.

PALAVRAS-CHAVE: Etanol, Biocombustível, Desenvolvimento de tecnologia, Biorrefinarias.

ABSTRACT – In the last 30 years, the production of ethanol from sugar cane in Brazil reached 17 million cubic meters and it is expected to achieve 35.7 million cubic meters

by 2012-2013. This growth has taken place due to great technological support by means of production, imports, adaptations and internal transferences. An analysis of the different phases of this development, with the evolution of its technological parameters and the great competition of the sector, is presented in the article. Nowadays, foresights state that the sector may keep evolving with continuous improvements, but sudden technological boosts are also possible through the development of technologies directed towards a better use of the residual biomass of sugar cane (which represents about two thirds of the total biomass). Studies in progress indicate that the sugar cane contribution to energy supply may be superior and more diversified than the current one. They also affirm that this may happen together with bio-refinery development, which will result in products of higher aggregate values.

KEYWORDS: Ethanol, Biofuel, Technological development, Bio-refinery.

Isaias C. Macedo é pesquisador do Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp, Campinas (SP). @ – isaiasmacedo22@terra.com.br

Recebido em 22.1.2007 e aceito em 29.1.2007.