

**O aumento da produtividade e a busca pela excelência na produção do etanol brasileiro:
uma história de sucesso**

**The rise in productivity and search for excellence in the Brazilian ethanol production: a
success story**

Andres R. Gimenez

Engenharia Química, Faculdades Oswaldo Cruz, Brasil

E-mail: andresrosellogimenez@gmail.com

Luiz G. Altopiedi

Engenharia Química, Faculdades Oswaldo Cruz, Brasil

E-mail: guilherme.altopiedi@gmail.com

Nicolás V. Carballo

Engenharia Química, Faculdades Oswaldo Cruz, Brasil

E-mail: nicolasvcarballo@gmail.com

Leila C. M. Silva

Engenharia Química, Faculdades Oswaldo Cruz, Brasil

E-mail: leila.magalhaes@oswaldocruz.br

Cleber W. Liria

Engenharia Química, Faculdades Oswaldo Cruz, Brasil

E-mail: cleber.liria@oswaldocruz.br

Recebido: 30/01/2018 – Aceito: 18/02/2018

Resumo

Atualmente, o Brasil é líder quando o assunto é produtividade na obtenção de etanol. Os avanços na tecnologia de produção deste biocombustível foram impulsionados por fatores mundiais e nacionais. Um desses fatores foi a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) pelo governo federal em 1973. A partir daí, os pesquisadores brasileiros começaram os estudos de otimização da cadeia produtiva que levaram o país a se destacar no cenário internacional. Os principais resultados foram: i) aumento, de 73%, na produtividade agrícola; redução, de 77%, no tempo de fermentação; e aumento, de 44 vezes, na produção anual de etanol; ii) autossuficiência e venda da energia elétrica produzida pela queima do bagaço; iii) menor custo de produção de etanol quando comparado com o custo de produção norte americano. A partir de 2010, os ganhos em produtividade foram pequenos, mesmo com a grande produção científica. Para que o Brasil continue ocupando os altos patamares no

ranking mundial de produtores de etanol, será necessário: i) buscar a viabilidade econômica da produção de etanol de segunda geração; ii) transformar as usinas em biorrefinarias para converter o etanol em moléculas de maior valor agregado.

Palavras-chave: cana-de-açúcar; Proálcool; biocombustível; ciência brasileira.

Abstract

Brazil is the leader country in ethanol production. Advances in technology of biofuel production have been driven by worldwide factors. One of the factors was the National Alcohol Program (Proálcool) creation by the federal government in 1973. Since then, Brazilian researchers have begun studies to optimize the production chain which led Brazil to the top in the international panorama. The main results were: i) a 73% increase in agricultural productivity, a 77% reduction in fermentation time and an increase of 44 times in the annual ethanol production; ii) self-sufficiency and selling the electric energy produced by the bagasse burning; iii) Low cost of ethanol production compared to North American production cost. As of 2010, even with intense scientific production, gains in productivity have become reduced. In order for Brazil to continue at the highest levels in the world ranking of ethanol producers, it will be necessary to overcome the following challenges: i) To study the economic viability of second generation ethanol production; and ii) to build up more biorefineries that convert ethanol into higher value-added molecules.

Keywords: Sugarcane; Biofuel; Brazilian Science.

1. Introdução

O Brasil, sob o ponto de vista da maioria dos brasileiros, ocupa posições de pouco destaque quando o assunto é ciência ou desenvolvimento tecnológico. É impossível deixar de comentar que países como os Estados Unidos da América, a Alemanha e, nas últimas décadas, a China e a Índia estejam, na maioria das vezes, na vanguarda da tecnologia e que talvez seja essa a verdade mais conhecida do nosso povo. No entanto, tão importante quanto conhecer a afirmação acima é saber que o Brasil ocupa posição de destaque em avanços tecnológicos de áreas extremamente importantes para o mundo atual, como, por exemplo, a produção de biocombustíveis. Os biocombustíveis ostentam valores que despertam o interesse mundial, pois agregam áreas de extrema importância, como a economia, o meio ambiente, a energia, entre outras. O mundo atual busca fontes energéticas que sejam economicamente viáveis e que não agredam o ambiente – e o Brasil disputa a liderança, junto com EUA, Alemanha e China, no desenvolvimento das tecnologias de produção do bioetanol e do biodiesel (MILANEZ et al., 2015). No geral, o termo bioetanol é usado para designar o etanol

obtido de fontes renováveis; no entanto, neste artigo será usado simplesmente etanol.

Quando o assunto é etanol, o Brasil sempre esteve em posição de liderança tecnológica, ocupando, atualmente, o primeiro lugar em produtividade deste biocombustível. Lideramos também o ranking mundial de produção de etanol a partir de cana-de-açúcar. Brasil e EUA produzem cerca de 90% deste biocombustível; recentemente, foi publicado, na revista Nature Climate Change, que o etanol brasileiro pode substituir 13,7% do petróleo consumido no mundo (JAISWAL et al., 2017).

A tabela 1 relaciona alguns parâmetros que demonstram a maturidade tecnológica brasileira na produção de etanol quando comparados com os parâmetros dos nossos maiores concorrentes (EUA e Alemanha).

Tabela 1: Parâmetros da produção de etanol para diferentes matérias-primas.

		Cana-de-açúcar (Brasil)	Milho (EUA)	Beterraba (Alemanha)
Parâmetro de Produção	Balanco energético*	8,1-10	1,4	2,0
	Custo de produção (Euros/100 litros)	14,5	24,8	52,4
	Redução da emissão de CO ₂ (%)	84	30	40
	Área plantada (milhões de hectares)	3,4	8,1	0,5
	Produtividade (litros/hectares)	6,7	4,2	5,5
	Produção** (milhões de litros)	22,8	34,0	2,8

* Energia renovável produzida/energia fóssil usada na cadeia produtiva, **Valores obtidos por (Área plantada) x (Produtividade).

Fonte: Modificada de MACEDO (2007), CARDOSO e BITTENCOURT (2014).

A tabela 1 ilustra muito bem a nossa liderança tecnológica, já que o etanol a partir da cana-de-açúcar resulta em balanço energético muito mais favorável, pois produz de 8,1 a 10 vezes mais energia renovável do que utiliza em energia fóssil em toda a cadeia produtiva (desde a plantação da cana até a venda de etanol nos postos de combustíveis). O etanol

brasileiro possui o menor custo de produção e a maior redução na emissão de CO₂. Quando se trata de outro assunto bastante polêmico, que é a área plantada para o cultivo da matéria-prima, também ocupamos a liderança, sendo o mais produtivo, pois produzimos o maior volume de etanol por área cultivada (MACEDO, 2007; CARDOSO e BITTENCOURT, 2014).

Graças a este desenvolvimento tecnológico de destaque mundial, que garante competitividade no preço, atualmente, o Brasil exporta etanol para os quatro cantos do planeta como América do Norte, Europa, África e Ásia (BITTENCOURT et al., 2012; ANP, 2018).

De maneira bastante resumida, a cadeia produtiva do etanol brasileiro possui as seguintes etapas: cultivo, colheita, transporte, recepção e moagem da cana-de-açúcar, extração e preparação do mosto (caldo da cana-de-açúcar), inoculação (adição da levedura *Saccharomyces cerevisiae*), fermentação, separação e reutilização da levedura, destilação do mosto fermentado (destilação fracionada e azeotrópica), estocagem do etanol hidratado e anidro, distribuição e venda ao consumidor final.

A variável produtividade é geralmente usada para mensurar o nível tecnológico de um produto ou processo, pois leva em conta parâmetros que estão intrinsecamente relacionados com o valor agregado do produto. De maneira simplista, a sua quantificação relaciona a quantidade de produto formado com outra variável (variável controle) – que pode ser o tempo total de produção, a área de plantação da matéria-prima, entre outras. Desta forma, qualquer produto economicamente viável deve garantir a potencialização da produtividade, ou seja, atender ao seguinte paradoxo: maximização da quantidade de produto e minimização da variável controle. É claro que a produtividade tem maior importância quando está vinculada a rendimento também maximizado (próximo de 100%).

Por conta da importância e da simplicidade destas duas variáveis (produtividade e rendimento), este artigo discutirá os diversos fatores que levam a maximização das mesmas para atingir o alvo. O objetivo deste artigo é traçar as lógicas científica, econômica e política da produção do etanol no Brasil ao longo do tempo e, então, sedimentar, a nós brasileiros, a liderança brasileira neste assunto.

Este texto foi escrito com base na análise da produtividade, porém existem outras formas de relatar a evolução desta tecnologia, como, por exemplo, as análises econômicas feitas, em 1998, por Rosillo-Calle e Cortez e, em 2012, por Cruz e colaboradores. A beleza em relatar a evolução da produção de etanol no Brasil é que ela pode ser feita sobre diversos aspectos (econômicos, políticos, sociais e tecnológicos). Este texto foi organizado de forma a obedecer à ordem cronológica dos fatos, desde o Descobrimento do Brasil até os dias atuais.

VeZ ou outra, contudo, foram necessários rompimentos na cronologia para facilitar a compreensão dos fatos.

2. Avanços tecnológicos na cadeia produtiva do etanol no Brasil até 1980

O etanol faz parte da nossa história por quase 500 anos. São comentados, a seguir, alguns fatores mundiais e nacionais que permearam esta história e contribuíram para o desenvolvimento da produção do etanol brasileiro.

O primeiro evento relevante ocorreu logo após o descobrimento do Brasil (1532), quando chegaram as primeiras mudas de cana-de-açúcar trazidas de Portugal, mais precisamente da Ilha da Madeira. Como se sabe, a cana-de-açúcar é originária de Nova Guiné, na Oceania, e pertence à família Poaceae (antiga Gramínea) e ao gênero Saccharum. Na mesma década de sua introdução por aqui, foi inaugurado o primeiro engenho de açúcar. A chegada das primeiras mudas e a inauguração do primeiro engenho começaram a definir a principal matéria-prima do nosso etanol. Por muito tempo, os principais produtos dessa matéria-prima foram o açúcar e a aguardente (bebida destilada apreciada até hoje, com teor alcoólico médio entre 30 e 40%). Somente no final do século 19, é que o etanol começou a ser produzido no Brasil para fins energéticos, e a sua produção foi impulsionada pelos avanços tecnológicos desenvolvidos na Europa – Alemanha e França, principalmente (NOVA CANA, 2018; UDOP, 2018).

Vários acontecimentos do século 20 contribuíram para os avanços na produção do etanol no Brasil e no mundo. Na segunda década do século 20, a Primeira Guerra Mundial (1914 a 1918) contribuiu para os avanços na produção do etanol, que foi utilizado como combustível nos motores usados nas batalhas.

Na sequência, a grande crise econômica internacional de 1929, que abalou os mercados mundiais, não deixou de lado o nosso mercado açucareiro. Com a sobra do açúcar, e na tentativa de minimizar a crise do governo presidencialista brasileiro da época, foi criada a primeira usina de etanol anidro (aproximadamente 99,9% de etanol em volume), com a finalidade de ajudar no abastecimento do mercado de combustíveis no Brasil. Esta tentativa minimizou a crise nos setores agrícola e energético, pois aumentavam-se, naquele momento, as dificuldades de aquisição do petróleo no mercado internacional. É importante esclarecer que as etapas de produção do açúcar e do etanol diferem após a extração do caldo da cana-de-açúcar (garapa) – que pode seguir para a fermentação, na produção do etanol, ou para tratamentos e concentração, na produção do açúcar (RAMOS, 2007).

No ano de 1931, o governo federal iniciou a política de uso do etanol anidro como combustível, obrigando a adição (de 5%) na gasolina. Este incentivo federal foi um dos primeiros passos, ainda que tímidos, para o desenvolvimento da produção brasileira deste biocombustível (BRASIL, 2018a).

No início da década de 1940, os produtores e cientistas brasileiros, atentos aos desenvolvimentos científicos internacionais da área, aplicaram a fermentação Melle-Boinot – o que desencadeou avanços nesta etapa de produção do etanol. O processo Melle-Boinot consiste basicamente em reutilizar a levedura responsável pela fermentação e minimizar sua proliferação durante esta etapa (Valsechi, 1944).

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), aumentou a dificuldade de importação de petróleo e derivados, surgindo a necessidade de substituir a gasolina pelo etanol e, mais uma vez, o Brasil foi exposto a uma situação de instabilidade energética e forte dependência do petróleo internacional. Estes eventos negativos voltavam a sinalizar a necessidade de investimentos no desenvolvimento de um combustível nacional e alternativo ao petróleo importado. Porém, com o término da guerra e a normalização dos mercados internacionais, nem o governo, tampouco os empresários brasileiros investiram no desenvolvimento da produção do etanol (MORAES e BACCHI, 2014).

Foi necessária a crise mundial do petróleo, no início da década de 1970, quando o ponto máximo da crise energética no Brasil foi atingido e, naquele momento, se identificou no etanol um potencial energético para minimizar, em longo prazo, a nossa dependência do petróleo internacional. O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi então criado, pelo governo federal, em 14 de novembro de 1975 (Decreto nº 76.593).

Este foi um dos mais audaciosos projetos e talvez o programa energético brasileiro mais promissor. Ao contrário da realidade científica internacional, foi quase que totalmente financiado com recursos públicos (governos federal e estaduais).

O programa tinha como objetivo principal estimular a produção de etanol para atender o mercado energético global. Para que este objetivo fosse atingido, foram abertas várias frentes de ação criteriosamente estudadas: a) estímulo à agricultura de matérias-primas para a produção do etanol; b) estímulo à modernização das destilarias existentes, ampliação da capacidade de armazenamento e facilitação na criação de novas unidades; c) estímulo à pesquisa científica brasileira nas mais diversas áreas, como a busca de novas matérias-primas e o melhoramento das já existentes, otimização das etapas do processo produtivo e da gestão dos negócios deste setor; d) estímulo às montadoras de carro, para desenvolvimento de veículos movidos a etanol, tendo, como exemplo, a montadora Fiat que lançou, em 1979, o

primeiro carro brasileiro 100% movido a etanol (NOVA CANA, 2018).

O Proálcool desencadeou uma enorme frente pela otimização de toda cadeia de produção de açúcar e etanol no Brasil, buscando, portanto, a maximização da produtividade e do rendimento. Esta evolução só ocorreu graças aos diversos núcleos científicos brasileiros, chefiados por pesquisadores empenhados em buscar a excelência de produção e colocar o país no cenário científico global. Os governos estaduais são os principais financiadores, seguidos por uma pequena parcela da iniciativa privada. Atualmente, no caso do estado de São Paulo, o poder público investe por meio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e da Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios (APTA) (CASTRO, 2010).

3. Avanços tecnológicos na cadeia produtiva do etanol no Brasil de 1980 a 2009

Já no final da década de 1970 e durante a primeira metade da década de 1980, os aumentos significativos na produção de etanol no Brasil se deram graças à junção das destilarias de etanol às usinas de açúcar já existentes. Esta estratégia fortificou a produção de etanol, sem enfraquecer a de açúcar. Com isso, o percentual de cana processada para produção de etanol subiu, em 10 anos (1975-1985), de 10 para 70%. Desde então, a coexistência das duas linhas de produção passou a ser uma realidade cada vez mais comum no país.

O arsenal científico daquela época também contribuiu no controle dos processos e da qualidade da matéria-prima e dos produtos (açúcar e etanol). As usinas passaram a equipar seus laboratórios de análises químicas, bioquímicas e microbiológicas. Desta forma, foi possível melhorar, por exemplo, o controle da quantidade de sacarose que entrava na usina com a matéria-prima e não apenas a quantidade de cana-de-açúcar. Na sequência, sucedeu uma série de padronizações nas operações de recepção, preparo da cana e extração da garapa.

Estas etapas são responsáveis por intenso dispêndio energético, com enorme impacto na eficiência do processo global. As principais discussões para estas etapas foram: a) rapidez de descarga; b) recepção da cana picada ou não; c) preparo da cana com o uso de picadores e desfibradores; e d) extração do caldo. Devido à grande importância dessa última etapa, a extração da sacarose da cana passou por diversas inovações tecnológicas visando à otimização e à automação do processo. É possível citar a alimentação por gravidade, a pressão dos rolos das moendas, a embebição do bagaço, as esteiras transportadoras, dentre outras (MACEDO, 2007; RAMOS, 2007; LEAL, 2010).

Ainda na década de 1980, as pesquisas objetivaram o uso eficiente da vinhaça, que, a partir de 1967, já havia sido proibida de ser despejada nos rios. A vinhaça é o resíduo líquido

da destilação do fermentado alcoólico (em cada litro do etanol produzido são gerados de 12 a 15 litros desse efluente) que, além de poder ser usada como fertilizante, poderia ser usada também para a reposição de água para o solo. Embora rica em nutrientes orgânicos e inorgânicos (principalmente potássio), a vinhaça não fornece todas as necessidades da cana-de-açúcar; portanto, precisa ser misturada com fertilizantes inorgânicos (principalmente nitrogenados). Ademais, o uso da vinhaça na fertirrigação deve ser controlado para evitar impactos negativos no solo, nas nascentes e nos lençóis freáticos (MUTTON, 2010).

Na década seguinte (1990), os estudos estavam focados no tratamento do caldo que seguiria para a fermentação – que antes era apenas desviado da produção de açúcar. Surgem, com isso, questionamentos sobre a quantidade de sólidos em suspensão no mosto e a qualidade da levedura usada. Os cuidados com a preparação do mosto resultaram em diminuição considerável do tempo de fermentação, de aproximadamente 14 para 8 horas, e no aumento do rendimento fermentativo, de 86% para 91% (LEAL, 2010).

Desde sua criação, o Proálcool passou por várias provas de eficácia. A maior delas foi enfrentada durante o período de 1986 a 1995, quando o preço do petróleo caiu; a produção nacional de petróleo aumentou consideravelmente (diminuindo a necessidade de importação); a produção nacional dos carros movidos a etanol se expandiu (~95% dos carros produzidos na época); e a oferta de etanol aos consumidores caiu. Somado a este descompasso econômico e tecnológico, as montadoras de carro não demonstravam interesse em resolver os problemas técnicos dos automóveis movidos a etanol (OHASHI e RAMOS, 2008). Vale completar que o então pequeno interesse mundial por alternativas aos combustíveis fósseis também contribuiu para a crise do Proálcool naquele período.

Mais precisamente em 1988, iniciou-se um novo período na economia do etanol, marcado pelo distanciamento do governo das atividades econômicas deste biocombustível. A iniciativa governamental, ao contrário do que parece, evoluiu para um mercado bastante independente e sólido, capaz de gerir seus momentos de crise e, também, colher frutos em momentos de bonança. Em 1996, o preço desse combustível já não tinha mais controle governamental; podemos dizer que o etanol adquiriu maturidade e se tornou independente e sujeito apenas à lei da oferta e da procura (MORAES e BACCHI, 2014).

Embora o governo não controle mais o preço do etanol brasileiro (CRUZ et al., 2012; COSTA e BURNQUIST, 2016), ele contribui para que a sua produção aumente por meio de decretos que estipulam os percentuais deste biocombustível (anidro) na gasolina. Desde 1931 até os dias de hoje, a percentagem do etanol anidro misturado à gasolina aumentou de 5 até 27%. É possível verificar, na Tabela 2, que, durante mais de 8 décadas, ocorreram várias

oscilações no percentual de etanol anidro na gasolina – que está se firmando entre 20 e 30% e, atualmente, é o maior do mundo (CANALBIOENERGIA, 2018).

Tabela 2: Cronologia do percentual de etanol anidro adicionado à gasolina brasileira.

Ano	%
1931	5
1993	22
1998	24
2000	20
2001	22
2006	20
2007	25
2011	20
2013	25
2015	27

Fonte: Adaptada de CANALBIOENERGIA (2018), BRASIL (2018b), NOVACANA (2018), PETROBRAS (2018).

Na tentativa de minimizar os gastos com a energia elétrica demandada pelas usinas, em meados de 1990, iniciaram-se os projetos para geração dessa energia a partir da queima do bagaço (resíduo celulósico da extração do caldo de cana-de-açúcar). Nessa década, ocorreram investimentos na tecnologia das caldeiras para possibilitar a obtenção da energia elétrica necessária para as usinas e, com isso, garantir a autossuficiência energética (ROSILLO-CALLE e CORTEZ, 1998; WALTER, 2010).

No início do século 21, mais precisamente em 2001, o Brasil passou pela primeira crise de energia elétrica, mostrando a deficiência nesta área, uma vez que 90% da demanda nacional eram supridos por usinas hidrelétricas, que sofriam com a falta de chuvas e a conseqüente baixa nos níveis dos reservatórios (TOLMASQUIM, 2000). A crise levou os governos a repensarem a nossa matriz energética, colocando as usinas de etanol como possíveis produtoras de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana. A partir de então, as usinas passaram a gerar energia excedente e a se beneficiarem daquelas circunstâncias, uma vez que ofereceriam um novo produto ao mercado além do açúcar e etanol: a energia elétrica (JANUZZI, 2001; MACEDO, 2001).

Um novo incentivo para o uso do etanol como combustível ocorreu com a implantação do carro bicomustível, que se estabeleceu a partir de 2003, e permitiu que o consumidor tivesse a liberdade de fazer contas e escolher o combustível na hora de abastecer. A partir de então, as montadoras brasileiras de carros se adequaram a este mercado – cada vez mais promissor e também cada vez mais sólido. Os apelos deste mercado podem ser resumidos em dois pontos: i) possibilidade de escolha do combustível mais barato (preocupação econômica); ii) possibilidade de minimização da emissão de poluentes (preocupação ambiental) (LIMA, 2009).

Outro marco de extrema importância, também ocorrido no início deste século, foi a implantação do Protocolo de Kyoto (que foi redigido em 1997, no Japão, e entrou em vigor no início de 2005). Este evento escancarou para o mundo os principais países poluidores e a preocupação da maioria com a qualidade de vida futura do nosso planeta. Neste tratado, os países signatários se comprometeram a reduzir as suas respectivas emissões de gases causadores do efeito estufa na atmosfera e muito se falou das alternativas modernas de energia que moverão o mundo do futuro.

Neste contexto, a bioenergia se destacou e, sem dúvida, o etanol também foi colocado no centro da discussão como uma das soluções viáveis. O Brasil se tornou um dos pivôs nesta nova fase da humanidade, que abriu as portas do mercado mundial para o nosso etanol.

Embora a maior potência econômica do mundo, os Estados Unidos da América, não tenha se comprometido com este Protocolo, a humanidade começou a pensar em aspectos ambientais com muito mais relevância, mudando o paradigma que sempre manteve o desenvolvimento tecnológico em lado oposto ao da sustentabilidade e colocando a economia do mesmo lado da preservação do meio ambiente (UNITED NATION, 2018).

Os avanços na cadeia produtiva do etanol no Brasil, durante estes mais de 30 anos (1975-2010), contaram com a contribuição da ciência brasileira – que foi decisiva para posicionar o país em condição de destaque no cenário internacional. A tabela 3 permite comparar parâmetros indicativos desta evolução.

Tabela 3: Parâmetros da cadeia produtiva do etanol no Brasil nos anos de 1975 e 2009-2010

	1975	2009-2010
Teor de açúcar na cana (%)	13,5	14,6
Produtividade agrícola (toneladas de cana/hectares)	46,8	81,2
Extração de caldo (%)	93,0	97,0

Tempo de fermentação (h)	16,0	8-9
Rendimento de fermentação (%)	82,0	91,0
Rendimento de destilação (%)	98,0	99,5
Rendimento total (%)	66,0	86,0
Preço (R\$/L)	2,052	1,752
Produção de etanol (m ³ /ano)	580	25.866

Fonte: Adaptada de MACEDO (2007), LEAL (2010), KOHLHEPP (2010), RODRIGUES (2011), CRUZ e colaboradores (2012).

Os números mais expressivos que representam estes avanços durante este período são: i) aumento de 73% na produtividade agrícola; ii) redução de 77% no tempo de fermentação; e ii) aumento de 44 vezes na produção anual de etanol. Além desses números, é possível citar a autossuficiência energética das usinas graças à energia elétrica produzida pela queima do bagaço; a possibilidade de vender energia elétrica excedente; e a manutenção do menor custo de produção de etanol (US\$ 0,22/L) quando comparado com o nosso principal concorrente (EUA US\$ 0,35/L). É importante completar que, neste período, foi introduzido o carro flex-fuel – que representa mais de 90% dos carros leves vendidos no Brasil (KOHLHEPP, 2010).

A intensa produção científica em busca da supremacia nos números resultou em patamares de excelência tais que, a partir de então, os ganhos em produtividade passaram a ser tímidos para alguns pontos da cadeia produtiva. Como exemplo, é possível citar a evolução do rendimento fermentativo e do tempo de fermentação – que não se alterou muito, desde a década de 1990, mesmo com o trabalho intenso da ciência (LEAL, 2010). Esta condição demonstrou a maturidade científica brasileira nesta área e, ao mesmo tempo, indicou que novos desafios eram necessários para que o Brasil continuasse em destaque no âmbito mundial.

4. Desafios para atingir patamares superiores de produtividade na indústria do etanol

Os dois grandes desafios para a tecnologia de produção do etanol são a produção do etanol celulósico e a criação de biorrefinarias (RODRIGUES, 2011).

Etanol celulósico: Com os avanços tecnológicos na produção de etanol obtido da sacarose da cana-de-açúcar (etanol de 1ª. geração) já em seus limites de excelência, um dos principais desafios científicos passou a ser a produção do etanol a partir da fibra da cana (etanol de 2ª geração ou etanol celulósico) com viabilidade econômica comparável ao de 1ª

geração. Esta tecnologia possibilita obter etanol não só da sacarose (1/3 da cana-de-açúcar), mas também da fibra (2/3 da cana-de-açúcar) e, conseqüentemente, o aumento de aproximadamente 40% na produção de energia a partir da mesma quantidade de matéria-prima (SANTOS et al., 2012).

Sabe-se que 1 tonelada de cana-de-açúcar (7400 MJ), em média, contém 150 kg de açúcares e 275 kg de fibras ricas em celulose (135 kg de fibras do colmo e 140 kg de fibras das folhas). Atualmente, são produzidos 86 L de etanol (2.216 MJ) a partir dos 150 kg de açúcares (etanol de 1ª geração); energia elétrica para autossuficiência das usinas; e aproximadamente 216 MJ de eletricidade excedente – que é vendida para as concessionárias de eletricidade. A tecnologia de produção de etanol de 2ª geração possibilitará obter etanol também a partir dos 275 kg de fibras – que produzirão mais 79 L de etanol (1632 MJ), além dos 86 L já produzidos do açúcar. Embora os 79 L obtidos dos 275 kg de fibras sejam prospectivos, é inegável o enorme aumento na produção de etanol – que é de aproximadamente 92% – sem precisar aumentar a área de plantação de cana-de-açúcar (RODRIGUES, 2011).

Atualmente, a energia recuperada, de 1 tonelada de cana-de-açúcar, é de 30% para o etanol de 1ª geração e passará para 52% com etanol de 1ª e 2ª gerações (MACEDO, 2007; LEAL, 2010; RODRIGUES, 2011; SANTOS et al., 2012). Conhecendo todo esse enorme potencial do etanol de 2ª geração, o planeta inteiro busca tornar esta tecnologia cada vez mais competitiva.

De forma resumida, as etapas da produção do etanol celulósico são: o material lignocelulósico (palha e colmo da cana-de-açúcar), formado por celulose (homopolissacarídeo de glicose), hemicelulose (heteropolissacarídeo de glicose, galactose, manose, xilose, arabinose, ácido glicurônico e ácido 4-O-metil-glicurônico) e lignina (heteropolímero de álcool p-cumarílico, álcool coferílico e álcool sinapílico), passa por um pré-tratamento com a finalidade de liberar/separar estas três macromoléculas. A celulose separada necessita ser hidrolisada enzimaticamente, produzindo glicose que, na sequência, deve ser fermentada pela levedura *S. cerevisiae* para a produção do etanol (SANTOS et al., 2012).

Embora o Brasil e outros países já produzam etanol de 2ª geração em escala industrial, esta tecnologia ainda tem vários obstáculos tecnológicos a serem transpostos. Por exemplo: os polissacarídeos presentes na palha e no colmo da cana-de-açúcar estão recobertos pela lignina, formando a microfibrila celulósica. Estas macromoléculas interagem entre si (ligações de hidrogênio entre os grupos hidroxilas) e garantem a completa ausência de água, dificultando seu “desmonte” e hidrólise, caracterizando um dos principais gargalos desta tecnologia

(SANTOS et al., 2012).

Esse gargalo é um dos mais importantes e urgentes focos de pesquisa e desenvolvimento do etanol de 2ª geração e a indústria brasileira deve ficar atenta a isso. Atualmente, muitos grupos de pesquisa do mundo, incluindo grupos brasileiros, estão empenhados em resolver esse problema – cujas soluções estão sendo buscadas em diversas frentes de pesquisas. É possível citar pelo menos duas destas frentes: i) busca pelo melhoramento genético da cana-de-açúcar, visando obter variedades mais produtivas e contendo material celulósico de maior facilidade para sacarificação (SOUZA e SLUYS, 2010; FERREIRA et al., 2016; SALVATO et al., 2017); e ii) busca por enzimas que acelerem a etapa de sacarificação do material celulósico (TAMAKI et al., 2016).

Embora a tecnologia de produção de etanol de 2ª geração ainda não esteja totalmente otimizada, o Brasil já produz etanol celulósico desde setembro de 2014, possuindo capacidade instalada para produzir 140 milhões de litros/ano (MILANEZ et al., 2015). A primeira usina brasileira, chamada Granbio, também foi a primeira do hemisfério sul e está localizada em São Miguel dos Campos, no interior de Alagoas.

Biorrefinarias de etanol (alcooolquímica): Graças ao posicionamento tecnológico brasileiro na produção, o nosso etanol é o mais barato do mundo. Esta realidade faz com que haja interesse crescente no seu uso como precursor para as sínteses de moléculas maiores. Atualmente, o conceito de usina de açúcar e álcool (originário na década de 1930), de caráter familiar, está mudando para grandes sociedades em poder de conglomerados e, no futuro, será ainda mais abrangente com o conceito de biorrefinarias.

O termo biorrefinaria é uma alusão às refinarias de petróleo, que são complexos industriais capazes de transformar o petróleo (matéria-prima rica em carbono) em grande número de produtos ou de intermediários de elevado valor agregado.

O objetivo de uma biorrefinaria é transformar a cana-de-açúcar (matéria-prima rica em carbono) em vários produtos de elevado valor agregado. Atualmente, a usina já é responsável pela produção de etanol combustível (anidro e hidratado), etanol não combustível (bebidas e cosméticos), açúcar, fertilizante (vinhaça e o decantado da clarificação), bioeletricidade, levedura (ração animal), crédito de carbono e, no futuro, também poderá produzir adoçantes (polióis diferenciados), etileno, propileno, 1,3-butanodieno, 1-butanol, acetato de etila, acetaldeído, ácido acético, além de hidrocarbonetos maiores (MACEDO, 2007; FRANCO e GARZÓN, 2010; GALLO et al., 2014).

As biorrefinarias ainda não são uma realidade, mas seguem nos projetos dos grandes centros de pesquisas mundiais – incluindo os brasileiros. Já são conhecidos vários processos

(termoquímico, bioquímico, químico e físico) que utilizam a biomassa como matéria-prima para diversos produtos de interesse industrial; no entanto, ainda não são economicamente viáveis e este é o principal obstáculo desta área (RODRIGUES, 2011; GALLO et al., 2014).

5. Considerações finais

Este trabalho mostrou como um objetivo puramente econômico e extrativista se desenrolou numa história de sucesso para a tecnologia brasileira de produção de etanol. Uma história construída ao longo de décadas, com o auxílio de centenas de pessoas e com o foco em dezenas de objetivos. Contudo, somente sob a perspectiva de novas pesquisas para a otimização da produção de etanol de 2ª geração – e de tornar real o conceito de biorrefinarias – é que o Brasil continuará liderando a tecnologia do etanol no ranking mundial de produtores de biocombustíveis.

Espera-se que este texto tenha contribuído para o crescimento do nosso sentimento nacionalista – tão pequeno em nosso povo, porém tão importante para o crescimento da nação.

Referências

ANP, Anuário estatístico 2017: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/3819-anuario-estatistico-2017>. Acessado em 16 de janeiro de 2018.

BITTENCOURT, G.M.; FONTES, R.M.O.; CAMPOS, A.C. Determinantes das exportações brasileiras de etanol. **Revista de política agrícola**, 4, 4-19, 2012.

BRASIL, Decreto No. 19717: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-19717-20-fevereiro-1931-518991-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acessado em 13 de fevereiro de 2018a.

BRASIL, Governo do Brasil: www.brasil.gov.br. Acessado em 13 de fevereiro de 2018b.

CANALBIOENERGIA, O continente do etanol: <http://www.canalbioenergia.com.br/o-continente-do-etanol/>. Acessado em 25 de janeiro de 2018.

CARDOSO, L.C.B.; BITTENCOURT, M.V.L. Mensuração das elasticidades-preço da demanda, cruzada e renda no mercado de etanol brasileiro: um estudo usando painéis cointegrados. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 51, 765-784, 2014.

CASTRO, O.M. O papel dos centros de pesquisas estaduais de São Paulo na inovação tecnológica em bioenergia. In **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. Cortez, L. A. B. (Coordenador). São Paulo: Blucher, 63-71, 2010.

COSTA, C.C.; BURNQUIST, H.L. Impactos do controle do preço da gasolina sobre o etanol biocombustível no Brasil, **Estudos Econômicos**, 46, 1003-10028, 2016.

CRUZ, M.G.; GUERREIRO, E.; RAIHER, A.P. A evolução da produção de etanol no Brasil no período de 1975 a 2009. **Documentos técnico-científicos**, 43, 141-159, 2012.

FERREIRA, S.S.; HOTTA, C.T.; POELKING, V.G.C.; LEITE, D.C.C.; BUCKERIDGE, M.S.; LOUREIRO, M.E.; BARBOSA, M.H.P.; CARNEIRO, M.S.; SOUZA, G.M. Co-expression network analysis reveals transcription factors associated to cell wall biosynthesis in sugarcane. **Plant Molecular Biology**, 91, 15–35, 2016.

FRANCO, T.T.; GARZÓN, C.S.L. Novas possibilidades de negócios do setor sucroalcooleiro: Alcooquímica e Biorrefinaria. In **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. CORTEZ, L. A. B. (Coordenador). São Paulo: Blucher, 761-772, 2010.

GALLO, J.M.R.; BUENO, J.M.C.; SCHUCHARDT, U. Catalytic transformations of ethanol for biorefineries. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, 25, 2229-2243, 2014.

JAISSWAL, D.; DE SOUZA, A.P.; LARSEN, S.; LEBAUER, D.S.; MIGUEZ, F.E.; SPAROVEK, G.; BOLLERO, G.; BUCKERIDGE, M.S.; LONG, S.P. Brazilian sugarcane ethanol as an expandable green alternative to crude oil use. **Nature Climate Change**, 7, 788–792, 2017.

JANUZZI, G.M. Desperdício fica evidente já no começo do racionamento. **Jornal da Unicamp**, 169, 7, 2001.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, 24, 223-252, 2010.

LEAL, M.R.L.V. Evolução tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. CORTEZ, L.A.B. (Coordenador). São Paulo: Blucher, 561-575, 2010.

LIMA, U.A.; Aquarone, E.; Borzani, W.; Schmidel; W. Biotecnologia industrial. V3 **Processos fermentativos e enzimático**, São Paulo, Blucher, 2001.

LIMA, P.C.R. Os carros flex fuel no Brasil. **Nota Técnica**, Brasília, Consultoria Legislativa da Câmara dos Deputados, 2009.

MACEDO, I.C. Usinas vendem excedentes. **Jornal da Unicamp**, 169, 17, 2001.

MACEDO, I.C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Estudos Avançados**, 21, 157-165, 2007.

MILANEZ, A.Y.; NYKO, D.; VALENTE, M.S.; SOUSA, L.C.; BONOMI, A.; JESUS, C.D.F.; WATANABE, M.D.B.; CHAGAS, M.F.; REZENDE, M.C.A.F.; COVALETT, O.;

JUNQUEIRA, T.L.; GOUVÊIA, V.L.R. De promessa à realidade: como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria de cana-de-açúcar – uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. **Biocombustíveis BNDES Setorial**, 41, 237-294, 2015.

MORAES, M.L.; BACCHI, M.R.P. Etanol, do início às fases atuais de produção. **Revista de Política Agrícola**, XXIII, 5-22, 2014.

MUTTON, M. A.; ROSSETO, R.; MUTTON, M. J. R. Utilização agrícola da vinhaça. In **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. CORTEZ, L. A. B. (Coordenador). São Paulo: Blucher, 423-440, 2010.

NOVA CANA. História da legislação sobre o etanol: www.novacana.com/etanol/historia-legislacao. Acessado em 18 de janeiro de 2018.

OHASHI, F.H.; RAMOS, P. O advento, crescimento, crise e abandono do Proálcool. **Monografia apresentada na UNICAMP**, 46p., 2008.

PETROBRAS. 10 Respostas para as suas dúvidas sobre a gasolina: <https://gasolina.hotsitespetrobras.com.br/10-respostas-para-suas-duvidas/>. Acessado em 13 de fevereiro de 2018.

RAMOS, P. Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno. **Economia Aplicada**, 11, 559-585, 2007.

RODRIGUES, J.A.R. Do engenho à biorrefinaria, a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, 34, 1242-1254, 2011.

ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L. A. B. Towards proalcohol II – A review of the Brazilian bioethanol programme. **Biomass and Bioenergy**, 12, 115-124, 1998.

SALVATO, F.; WILSON, R.; LLERENA, J.P.P.; KIYOTA, E.; REIS, K.L.; BOARETTO, L.F.; BALBUENA, T.S.; AZEVEDO, R.A.; THELEN, J.J.; MAZZAFERA, P. Luxurious Nitrogen Fertilization of Two Sugar Cane Genotypes Contrasting for Lignin Composition Causes Changes in the Stem Proteome Related to Carbon, Nitrogen, and Oxidant Metabolism but Does Not Alter Lignin Content. **Journal of Proteome Research**, 16, 3688-3703, 2017.

SANTOS, F.A.; QUEIRÓZ, J.H.; COLODETTE, J.L.; FERNANDES, S.A.; GUIMARÃES, V.M.; REZENDE, S.T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Química Nova**, 35, 1004-1010, 2012.

SOUZA, G.M.; SLUYS, M.A.V. Genômica e biotecnologia da cana-de-açúcar: estado da arte, desafios e ações. In **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. Cortez, L. A. B. (Coordenador). São Paulo: Blucher, 325-332, 2010.

TAMAKI, F.K.; ARAUJO, E.M.; ROZENBERG, R.; MARANA, S.R. A mutant β -glucosidase increases the rate of the cellulose enzymatic hydrolysis. **Biochemistry and Biophysics Reports**, 7, 52-55, 2016.

TOLMASQUIM, M. As origens da crise energética brasileira. **Ambiente & Sociedade**, 6/7, 179-183, 2000.

UDOP. A história da cana-de-açúcar – da antiguidade aos dias atuais: <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>. Acessado em 13 de fevereiro de 2018.

UNITED NATION. Kyoto protocol: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php. Acessado em 13 de fevereiro de 2018.

VALSECHI, O. O processo Melle-Boinot de fermentação na sociedade de usinas de açúcar brasileira, de Piracicaba. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, 1, 139-156, 1944.

WALTER, A. Workshop potencial de geração de eletricidade a partir da biomassa residual da cana: oportunidades, desafios e ações necessárias – relatório final. In **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. CORTEZ, L. A. B. (Coordenador). São Paulo: Blucher, 577-582, 2010.