



The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
<http://ageconsearch.umn.edu>
aesearch@umn.edu

Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.



EXPANSÃO DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL COMBUSTÍVEL NO BRASIL: UMA ANÁLISE BASEADA NAS CURVAS DE APRENDIZAGEM

MARCO AURÉLIO ALVES DE MENDONÇA; ROGÉRIO EDIVALDO FREITAS; AMARO OLÍMPIO PEREIRA DOS SANTOS; ANDRÉ SANTOS PEREIRA; RICARDO CUNHA DA COSTA;

BNDES

RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL

marco.mendonca@ipea.gov.br

APRESENTAÇÃO ORAL

Ciência, Pesquisa e Transferência de Tecnologia

Expansão da Produção de Álcool Combustível no Brasil: Uma Análise Baseada nas Curvas de Aprendizagem

Grupo de Pesquisa: Ciência, Pesquisa e Transferência de Tecnologia

Resumo

O PROALCOOL é conhecido internacionalmente com o programa mais bem sucedido de promoção de biocombustíveis. A análise da eficácia de tal programa é fundamental para formulação de políticas públicas, não somente na área de energia, mas em todos os setores da economia. Com este objetivo, o artigo utilizou a metodologia das curvas de aprendizagem para avaliar o PROALCOOL e mostrar o esforço necessário, em termos de investimentos, para o seu avanço.

Palavras-chave: Produção de álcool, Promoção de biocombustíveis, Curva de aprendizagem.

Abstract

PROALCOOL is known internationally as the most successful biofuel promotion program. Prior analysis of the effectiveness of such a program is fundamental to formulation of public policy, not only in the area of energy, but in all sectors of the economy. The article applies learning curve methodology to evaluate the ethanol market



in Brazil in order to give an idea about the effort, in terms of investments, required for its advancement.

Key Words: Ethanol production, Promotion of biofuels, Learning curves.

1. INTRODUÇÃO

Com a persistente oscilação dos preços do petróleo e os problemas ambientais crescentes ligados aos combustíveis fósseis, a produção e a utilização dos biocombustíveis retornaram ao debate energético mundial.

As expectativas são de crescimento significativo da produção mundial, sobretudo em países tropicais com experiência consolidada no setor, com altas produtividades agrícolas, disponibilidade de terras agricultáveis, água, e ainda, com a presença de atores prestes a ampliar seu cenário de atuação, como, por exemplo, é o caso evidente do Brasil. Como consequência, espera-se também que haja um aumento da participação desta fonte renovável na matriz energética mundial.

O Brasil é pioneiro na implantação de programas de incentivo a biocombustíveis, com destaque para o PROALCOOL, lançado em 1975. Naquela época, a produtividade agrícola era de cerca de três mil litros de álcool por hectare. As usinas não produziam energia elétrica, tendo que consumir eletricidade da rede. O vinhotto era um problema para o meio ambiente, pois era despejado em cursos de água. O desperdício de energia era significativo, já que era necessário queimar volumosos resíduos de biomassa.

Atualmente, a produtividade agrícola média é da ordem de sete mil litros de álcool por hectare, com diferenças inter-regionais significativas. As usinas utilizam os resíduos de biomassa, sobretudo o bagaço, para produzir energia elétrica, seja para utilização em sistemas de baixa eficiência, seja para exportação de excedente à rede de eletricidade em sistemas mais eficientes de geração. O vinhotto, por sua vez, passou a ser empregado na própria lavoura como adubo e, em algumas regiões, está ocorrendo a substituição da colheita manual, com base na queimada, por colheita mecanizada.

O crescimento do setor sucroalcooleiro foi estimulado pelo forte investimento do governo. De fato, entre os anos 1980 e 2002, mais de cinco bilhões de dólares foram aplicados na agricultura e na indústria para expansão da produção de álcool combustível. Este investimento certamente foi um dos responsáveis pelo sucesso do programa e pelo grau de desenvolvimento do setor. (GOLDEMBERG et al., 2004)

Este artigo focaliza dois objetivos principais, a saber: o primeiro é evidenciar a eficácia do PROALCOOL, por meio de indicador de redução do custo de produção; o segundo, projetar a evolução do custo de produção do etanol em função do progresso técnico, bem como os investimentos necessários para tal redução.

O referencial metodológico utilizado para projetar os custos de produção do etanol é a curva de aprendizagem (*learning curve*), uma metodologia que descreve a evolução e o desempenho histórico das tecnologias e que pode ser usada para avaliar as perspectivas futuras de desenvolvimento tecnológico.

2. O PROALCOOL



O Programa Brasileiro do Álcool (PROALCOOL) foi lançado em 1975 com o objetivo duplo de reduzir o impacto sobre o balanço de pagamentos causados pela elevação dos preços do petróleo e, ao mesmo tempo, mitigar as inquietações do setor sucroalcooleiro face à queda do preço do açúcar no mercado internacional.

O PROALCOOL é considerado o maior programa do mundo de utilização comercial da biomassa para produção e uso de energia, demonstrando a viabilidade técnica da produção em larga escala de etanol¹ a partir da cana-de-açúcar e do seu uso como combustível automotivo² (LA ROVERE, 2000).

No Brasil, o etanol é usado como aditivo à gasolina na forma de álcool anidro³, com o objetivo de aumentar o poder antetonante em motores de Ciclo Otto. A proporção na mistura varia entre 20 a 25% de álcool na gasolina, em termos de volume, e é conhecida também como gasool, ou gasolina C.

O etanol também é utilizado diretamente nos carros a álcool e nos *flex-fuel* na forma de álcool hidratado⁴, que é o combustível usado diretamente no tanque do automóvel e é vendido aos consumidores nos postos⁵.

Sobretudo em seu início, o PROALCOOL foi fortemente calcado em políticas públicas que tinham como objetivo fomentar a produção e o uso de etanol no Brasil. O investimento público chegou a 90% do necessário para se construir uma nova destilaria e 100% do necessário para aumentar a área cultivada de cana-de-açúcar.

Dentre as condições, extremamente favoráveis para o produtor, pode-se destacar: taxas de juros negativas; três anos de carência para o pagamento dos empréstimos; e doze anos para o pagamento dos empréstimos.

Além disso, o governo estabeleceu preços mínimos para o etanol, mais atrativos em relação ao preço do açúcar. Essa política representou um alto subsídio para a produção de cana-de-açúcar e de álcool.

Do lado do consumidor, a redução da tributação permitiu que o preço do álcool nas bombas, em termos de combustível por quilômetro rodado, ficasse sempre menor que o da gasolina (LA ROVERE, 1981).

Nesta ocasião, o preço dos combustíveis no Brasil era regulado pelo governo, que tinha a Petrobras como principal agente do setor. Apenas em maio de 1997, os preços do álcool anidro deixaram de ser controlados e, em fevereiro de 1999, o mesmo aconteceu com os preços do álcool hidratado (GOLDEMBERG et al., 2004).

Há que se ressaltar que, no começo do programa, o custo de produção do álcool era de aproximadamente 100 US\$/barril de etanol. O progresso técnico e as economias de escala reduziram este custo para 50 US\$/barril nos anos 1990 (MOREIRA; GOLDEMBERG, 1999).

¹ O termo etanol é mais empregado em nível mundial, mas no Brasil utilizam-se os termos álcool (etílico) hidratado e álcool (etílico) anidro.

² É importante destacar, no entanto, que as primeiras experiências com álcool em automóveis no Brasil datam o período das grandes guerras mundiais na primeira metade do século XX.

³ Teor de 99,5% de álcool etílico.

⁴ Teor de 92% a 94,5% de álcool etílico.

⁵ O gasool com 22,4% de etanol era meta da primeira fase do PROALCOOL. A segunda fase do programa consistia na produção de novos veículos que utilizavam o álcool hidratado como combustível.



Mas, em 1999, o custo de produção do álcool ainda era superior ao da gasolina derivada do petróleo, que era importado a um preço um pouco abaixo de 20 US\$/barril, menos da metade da cotação do óleo bruto no mercado internacional em 1980, quando o PROALCOOL foi lançado.

A comparação ilustra a principal causa das dificuldades financeiras que o programa enfrentou: o preço do petróleo. De maneira que, mesmo as destilarias paulistas, as mais eficientes, necessitam de que o preço do petróleo esteja acima de 30 US\$/barril para que o etanol seja competitivo frente à gasolina (MACEDO; NOGUEIRA, 2004).

Assim, quando o preço do petróleo no mercado internacional atingiu novamente este patamar no ano de 2000, a competitividade do álcool frente a gasolina foi restabelecida. O governo aproveitou esta situação para aumentar o conteúdo de etanol na gasolina, permitindo uma redução no excedente no estoque do álcool.

3. EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR E DERIVADOS

A produção total de cana-de-açúcar divide-se em três partes, a saber: palha, bagaço e caldo, sendo este usado para produzir açúcar ou álcool.

A evolução da produção de cana e de álcool no Brasil é mostrada na Figura 1. A produção de álcool teve crescimento notável entre 1976 e 1984. Após este período, houve uma estagnação que durou 10 anos, seguida de uma retração no período entre 1997 e 2000. Recentemente, no entanto, verifica-se que houve uma retomada na produção brasileira.

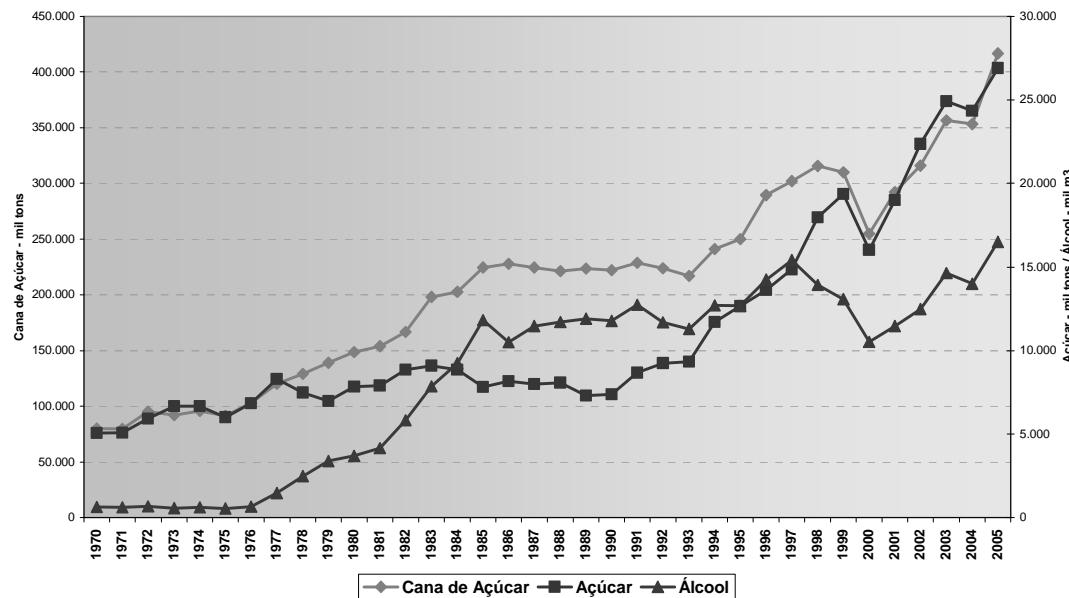
Em 2005, devido a condições favoráveis nos planos interno e externo, a produção de etanol atingiu 16 bilhões de litros, dos quais 2,6 bilhões foram exportados (EPE, 2006).

O açúcar havia retomado a sua posição de destaque já no início dos anos 1990. O crescimento da produção de açúcar tem sido expressivo, mas as perspectivas futuras para o mercado de álcool combustível são mais promissoras do que as para o açúcar.

Figura 1 - Evolução da produção de cana, açúcar e álcool



Cana de Açúcar, Açúcar e Álcool



Fonte: Elaboração dos autores a partir de dados Conab e ÚNICA.

Um terceiro produto do setor é a geração de eletricidade, obtida com a queima de bagaço em caldeiras. Ao longo do tempo, o bagaço passou a ser valorizado pelo setor sucroalcooleiro como insumo energético. No entanto, a energia elétrica não constitui o centro das atenções para os agentes desta indústria, sendo, portanto gerada com eficiências baixas, e com objetivo principal de consumo próprio das destilarias.

Ainda que o volume de investimentos no setor, com fins de aumento de eficiência energética – como, por exemplo, a substituição de caldeiras antigas por plantas de co-geração⁶ –, tenha aumentado nos últimos anos, as caldeiras de baixa pressão ainda são predominantes, revelando uma margem importante para o aumento da eficácia energética média no setor.

4. A RETOMADA DO ÁLCOOL

Em 2003, um fato marcou o surgimento de um novo impulso para o setor sucroalcooleiro. O ano marcou a primeira fase da consolidação de um grande salto tecnológico: o advento dos veículos bicompostível, também conhecidos como *flex-fuel*, os quais podem usar indiscriminadamente álcool ou gasoil, sem a necessidade de nenhuma adaptação ou ajuste.

O desenvolvimento desta tecnologia se deu graças ao investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) pelos fabricantes de sistemas de injeção direta na produção

⁶ A co-geração consiste na produção simultânea de energia térmica e energia elétrica



de sistemas que ajustam automaticamente a combustão em função do tipo de combustível.

Em 2004, a venda de veículos *flex-fuel* aumentou em mais de cinco vezes, atingindo 328 mil unidades, o que representou 26% da venda de novos automóveis no Brasil. No ano seguinte, as vendas de *flex-fuel* ultrapassaram as dos carros a gasolina, chegando a representar mais de 70% das vendas de carros novos.

Em setembro de 2006, as vendas já eram superiores a 84. Por isso, o mercado de álcool, que já não vinha mais sendo regulado pelo governo desde 1999, ficará ainda mais suscetível às forças do mercado. A partir deste momento, o consumidor, proprietário de veículo *flex-fuel*, se vira obrigado a ponderar o preço relativo na bomba entre o álcool hidratado e a gasolina C, determinando assim o tipo de combustível a ser utilizado em seu carro.

Fatores como safra de cana de açúcar, estocagem de etanol, preço do açúcar no mercado internacional, preço petróleo e da gasolina, estão entre aqueles que influenciam o mercado de etanol. No entanto, os estados da federação ainda podem influenciar os preços por meio da alteração nas alíquotas de ICMS e do percentual de álcool anidro a ser misturado à gasolina A.

Além da elevação dos preços do petróleo, os problemas ambientais ligados ao consumo de energia fóssil e os compromissos adotados no âmbito do Protocolo de Quioto têm dado ao setor um novo impulso e uma nova dinâmica.

A substituição parcial da gasolina por álcool etílico proveniente da cana de açúcar é uma forma relativamente rápida e fácil de se reduzir emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor de transportes e, desta forma, ajudar os países integrantes do Anexo I do Protocolo de Quioto a atingirem suas metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE)⁷.

Ademais, o etanol vem sendo procurado também como aditivo à gasolina, seja diretamente, seja indiretamente, através da sua transformação em ETBE. Estes são os principais fatores de aumento da demanda mundial de etanol.

As perspectivas de aumento potencial das demandas interna e externa de etanol, bem como os potenciais ganhos de produtividade, dão, ao mercado de álcool, um impulso importante e que dependerá de variáveis ligadas ao mercado internacional de petróleo e de açúcar.

O novo mercado de certificados de redução de gases do efeito estufa e o aumento de eficiência energética na produção de álcool, intimamente ligados, irão influenciar nas decisões dos investidores do setor.

Além dos benefícios financeiros proporcionados pela exportação do excedente de eletricidade à rede, o aumento da eficiência energética proporciona também uma

⁷ Estas metas (cerca de 5,2% de redução de emissões de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990) terão de ser cumpridas no período 2008-2012 pelos países do Anexo I que ratificaram o Protocolo. Metade dessas emissões terá de ser realizada dentro de seus territórios ou ser negociada entre países do Anexo I. A substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, é uma ótima alternativa para a parcela de redução de emissão de gases de efeito estufa que tem que ser realizada dentro dos territórios destes países. A outra parte das reduções poderá ser considerada como realizada através de aquisição de CERs equivalentes, estimulando o mercado de certificados de redução de emissões de gases de efeito estufa, também conhecido como mercado do carbono.



redução da emissão de GEE, que, se certificada, pode gerar outros benefícios financeiros.

O principal processo de certificação se dá no âmbito do MDL, Artigo 12 do Protocolo de Quioto, e regulamentado pelos Acordos de Marraqueche.

As perspectivas de obtenção de Reduções Certificadas de Emissão (CER) no campo do MDL têm estimulado os produtores de etanol a ampliarem o uso do bagaço como uma fonte de energia, a aumentar a eficiência energética deste processo, e a procurar outras formas de redução de emissão de GEE.

De fato, o Brasil já era um dos mais ativos países hospedeiros de MDL, com mais de cem projetos no *pipeline* do processo de certificação, dos quais a maior parte em processo de validação, cinco já validados pela autoridade brasileira designada e quatro registrados no conselho executivo do MDL⁸.

5. COMPETITIVIDADE BRASILEIRA PARA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL

O Brasil foi o principal produtor mundial de álcool até 2005. Em 2006, os EUA, cuja produção tem crescido rapidamente, atingiram a dianteira da produção mundial, com 18,5 bilhões de litros contra os 17,4 bilhões de litros nacionais. O desempenho americano foi fortemente influenciado pela concessão de subsídios governamentais. (DESAFIOS, 2007).

O etanol americano, entretanto, é produzido principalmente do milho, com produtividade menor, custos maiores e com maior consumo de energia fóssil no processo de produção.

Nos EUA, a produção média anual de etanol alcança 3,2 mil litros por hectare, enquanto a produtividade brasileira ultrapassa o dobro do montante, atingindo 6,8 mil litros por hectare. (FINAGRO, 2006).

A elevada capacidade produtiva nacional reflete-se no custo da produção, que varia entre 0,20 e 0,28 dólares por litro contra o intervalo de 0,30 a 0,35 US\$/litro nos EUA, país que ainda subsidia fortemente a produção de um etanol produzido do milho e menos favorável à redução da emissão de gases de efeito estufa se comparado ao produto brasileiro⁹. (HENNIGES; ZEDDIES, 2003; EPE, 2006a).

Por isso, a exportação de álcool é também uma grande oportunidade para o Brasil. O mercado internacional, entretanto, ainda é embrionário e grande parte do volume exportado destina-se ao setor industrial.

Apesar desse potencial mercado consumidor, é importante ressaltar que há um forte lobby dos agricultores europeus para impedir a importação de etanol de outros países. Algumas Organizações Não-Governamentais européias de cunho ecológico também têm feito lobby contra o uso de biocombustíveis devido a outros impactos ambientais potenciais do aumento da escala de produção de monoculturas energéticas.

⁸ É importante destacar que entre todos os projetos, vinte e sete são de bagaço para co-geração, dos quais um já foi validado.

⁹ Segundo a EPE (2006a), o custo de produção na União Europeia varia entre 0,45 e 0,55 dólares por litro.



O Japão também é um potencial consumidor de etanol brasileiro. Já é permitido misturar até 3% de etanol na gasolina japonesa e há uma perspectiva de que sejam misturados até 10% deste combustível à gasolina.

Por enquanto, empresas japonesas têm negociado com Petrobras e Vale do Rio Doce para montar uma estrutura de produção e de logística para a exportação do álcool. De fato, recentemente a Petrobrás anunciou investimentos da ordem de US\$ 600 milhões com este objetivo.

Uma estimativa com base nas projeções de consumo de gasolina no EUA, Japão e UE com misturas de 5% de etanol (E5) e de 10% (E10) mostram que esses mercados poderiam consumir de 45 a 89 bilhões de litros de etanol em 2030.

Além desses mercados, países asiáticos estão procurando viabilizar a adição de álcool à gasolina. Em alguns estados na China e Índia, já são realizadas misturas de 5% de etanol à gasolina e na Tailândia, esse percentual pode chegar a 10%.

Há, portanto, um grande potencial para aumento das exportações brasileiras de álcool, uma vez que o país produz álcool e açúcar a preços bastante competitivos, além do fato de haver terras disponíveis no país¹⁰. Para se ter uma idéia, países eficientes na produção de álcool como a Austrália e a Tailândia, não possuem terras disponíveis para expandir a produção de cana.

6. O PROGRESSO TECNOLÓGICO NA PRODUÇÃO DO ÁLCOOL

O lançamento do PROÁLCOOL, em 1975, lançou as bases para a significativa elevação da produtividade agrícola e do progresso técnico ligado ao setor. Na década de 80, apenas dois tipos de cana-de-açúcar eram responsáveis por quase 60% de toda a área plantada com cana no país. Atualmente, há maior diversificação de variedades, nenhuma respondendo por mais de 15% da área. As vinte principais respondem por 80% da área plantada. (CTC, 2005).

A produtividade média evoluiu de cerca de 50 ton/ha, na safra 77/78, para 81,5 ton/ha, na safra 05/06, o que representa uma taxa anual de 1,8%.

É importante registrar, todavia, que o desenvolvimento de variedades está direcionado para a região Centro-Sul, a qual responde por 85% da área plantada, com foco especial para o estado de São Paulo. O estado contribuiu com 60% da produção nacional, apresentando produtividade de 81,5 t/ha, 46% superior à média nordestina e 11,6% superior à média nacional¹¹.

A reengenharia genética e a transgenia, contudo, podem reduzir o ciclo de vida atual da cana-de-açúcar de 12 anos para até oito anos.

¹⁰ Segundo a Embrapa, o país utiliza 50 milhões hectares (ha) em atividades agropecuárias, mas ainda dispõe de cerca de 90 milhões ha de terras próprias para cultivo, de baixo impacto ambiental. Ademais, há a possibilidade de uso de parte de áreas utilizadas para agropecuária para o plantio da cana de açúcar, seja através da conversão direta, como já vem ocorrendo em pequena escala, devido a queda no preço da carne às perspectivas mais atraentes do mercado de etanol, seja através da mudança da agropecuária extensiva para a intensiva.

¹¹ Essas diferenças são indicativas de potencial de ganho de produtividade, com o desenvolvimento de variedades melhor adaptadas às diversas regiões.



O país já possui variedades que apresentam boa produtividade, em escala laboratorial, até 40% superior às existentes, mas o plantio de transgênicos não é permitido no Brasil em escala comercial.

Na área industrial, a tecnologia tradicional apresenta níveis de eficiência elevados em diversas etapas do processo de produção. É bem verdade que há ainda alguma margem de melhoria de eficiência como, por exemplo, na automação dos acionamentos das máquinas, na utilização de dornas fechadas e de desfibradores, ou no emprego de caldeiras de alta pressão para geração de energia elétrica. Esses ganhos podem ser classificados como de primeira geração, pois estas tecnologias já se encontram disponíveis para comercialização.

Na Tabela 1, são apresentados indicadores de evolução tecnológica do setor sucroalcooleiro. De 1975 a 2005, a capacidade de moagem das empresas de médias e grandes firmas, medida em tonelada por dia, elevou-se em 136%. O tempo de fermentação reduziu-se em 83%, enquanto a eficiência de fermentação elevou-se em 12,3%, e a das caldeiras, em 31%, no mesmo intervalo. Com relação à sobra de bagaço, importante insumo energético, houve aumento de 875%, no período.

Tabela 1 - Indicadores tecnológicos no setor fabril da agroindústria sucroalcooleira

Etapas do processo	1975	2005
Capacidade de Moagem – t/cana/dia (*)	5.500	13.000
Extração (%)	93	97
Tempo de Fermentação em Bateladas (horas x dornas)	24	4 - 6
Eficiência de Fermentação (%)	80	91
Teor Alcoólico do vinho para destilação (GL)	7,5	10
Eficiência da Destilação (%)	98	99,5
Recuperação geral na produção de álcool (litro/t/cana)	66	86
Consumo de Vapor na Destilação (kg/l)	3,4	2,0
Eficiência das Caldeiras (%)	66	87
Sobra de Bagaço (%)	Até 8	Até 78

Fonte: DEDINI Indústrias de Base, 2005.

Além do desenvolvimento tecnológico incremental, há tecnologias que estão sendo desenvolvidas que visam saltos tecnológicos importantes.

Aquelas em estágio mais avançado são denominadas de segunda geração, como a gaseificação dos resíduos da biomassa, para produção de eletricidade ou gás de síntese (processo Fischer-Tropsch), ou a hidrólise de resíduos celulósicos para produção de etanol. Essas tecnologias devem estar disponíveis em poucos anos. Tecnologias mais avançadas, as ditas de terceira geração, como as células a combustíveis, deverão estar disponíveis em um prazo mais longo.

O processo de hidrólise (ácida ou enzimática), por exemplo, permite que seja produzido álcool a partir de resíduos de biomassa¹². Isso quer dizer que o álcool pode ser produzido não somente a partir do caldo (no processo atual, o caldo representado cerca de 1/3 da cana processada), mas também do bagaço e da palha (outros 2/3 da

¹² Atualmente é possível extrair 6,4 mil litros de álcool para cada 80 toneladas de cana limpas produzidas por hectare. Com o processo de hidrólise, o bagaço resultante da moagem – hoje usado para abastecer as caldeiras e gerar energia elétrica – poderia garantir uma produção adicional de 5,6 mil litros de álcool por hectare. (DESAFIOS, 2007).



cana). Com isso, seria possível quase que dobrar a produtividade atual em litros de álcool por hectare.

Vários países estão investindo pesadamente em hidrólise, pois, dessa forma, entendem que poderiam utilizar diversos resíduos agrícolas que são descartados na produção de alimentos.

A utilização de resíduos para a produção de energia é muito mais aceitável pelo fato de não competir com a produção de alimento, de forma que o que antes era jogado no lixo poderia constituir um subproduto capaz de gerar receitas adicionais para os produtores rurais.

No caso dos EUA, dentre as três promissoras rotas tecnológicas para produção de combustíveis para veículos, o Departamento de Energia destinou maior volume de recursos para as pesquisas em produção de etanol a partir de celulose.

Para 2007, serão destinados US\$ 150 milhões para tornar o etanol celulósico do milho competitivo até 2012. Apenas as pesquisas em baterias avançadas para veículos elétricos híbridos irão absorver US\$ 31 milhões, enquanto as pesquisas na tecnologia do hidrogênio irão receber US\$ 46 milhões.¹³

No Brasil, alguns estudos neste campo já foram iniciados. Os principais atores que investiram ou estão investindo na rota ácida com pré-tratamento são as empresas Dedini e Oxiteno. O Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) participou do desenvolvimento da planta piloto da Dedini, mas hoje aposta na rota enzimática. Investem também na rota enzimática a Petrobras e a Escola de Química da UFRJ.

A rota ácida parece estar mais avançada, mas há muitos atores optando pela rota enzimática no longo prazo. A grande dificuldade estaria em produzir enzimas que produzam álcool em grande quantidade de forma estável.

A cana de açúcar tem grande potencial de produção de álcool celulósico, uma vez que há um grande volume de biomassa produzido por hectare em relação às demais culturas. A Tabela 2 mostra que são produzidas 74,3 toneladas de biomassa de cana por hectare ao passo que são produzidas apenas 3,6 t/ha, 3,4 t/ha e 2,3 t/ha de arroz, milho e soja, respectivamente.

Tabela 2 - Área Ocupada e Produção de culturas

Cultura	Área cultivada (10^6 ha)	Produção (10^6 ton)	Produção (ton/ha)
Soja	21,5	49,5	2,3
Milho	12,3	41,8	3,4
Cana de Açúcar	5,6	416,3	74,3
Feijão	4,0	3,0	0,8
Arroz	3,7	13,3	3,6
Trigo	2,8	5,7	2,0
Café	2,4	2,5	1,0
Outros	5,7	-	-
Total	58,0	-	-

¹³ The White House National Economic Council, 2006



Fonte: IBGE (2004)

7. PROJEÇÃO DO CUSTO DE PRODUÇÃO DO ETANOL A PARTIR DAS CURVAS DE APRENDIZAGEM

A representação do progresso tecnológico da produção de etanol pode ser feita por meio das curvas de aprendizagem¹⁴ (*learning curves*). Este conceito denota a relação entre custo unitário e produção cumulativa em processos estáveis, sugerindo que o custo dos insumos, ou tempo, por unidade produzida, decresce a uma taxa fixa sempre que o nível de produção dobra.

As raízes desta concepção remontam há mais de um século a estudos que mostraram que a *performance* individual aumenta com a experiência adquirida (THORNDIKE, 1898; THURSTONE, 1919 apud VAN DER MERWE (2006)).

As curvas de aprendizagem possibilitam a descrição de padrões de melhoria no longo prazo e ajudam a responder perguntas relacionadas à melhoria da produtividade e suas limitações.

Segundo a IEA (2000), a equação que descreve a curva é a seguinte:

$$C(X) = a \cdot X^{-E}$$

onde, $C(X)$ é o custo unitário que varia em função da produção acumulada X . O parâmetro a é uma constante, que pode ser determinada pelo custo e pela produção inicial. O termo E , conhecido como parâmetro de experiência, caracteriza a inclinação da curva e representa o progresso tecnológico, possibilitado pelo ganho de experiência no processo produtivo. A relação entre a taxa de progresso técnico (TP) e o parâmetro de experiência é dada por;

$$TP = 2^{-E}$$

A definição de uma taxa de progresso técnico não pode ser feita de forma arbitrária, mas decorrente de uma função do próprio processo de produção. Afinal, é razoável afirmar que a melhoria de um processo decorre de sua paulatina modificação, a qual visa eliminar as limitações existentes.

Neste sentido, freqüentemente essas iniciativas requerem investimentos capazes de elevar a capacidade produtiva e habilidades dos trabalhadores por meio de treinamento; e a atualização de ferramentas e infra-estrutura, com objetivo de elevar a produtividade da mão-de-obra. Tais gastos devem ser, obviamente, genuinamente voltados para o melhoramento dos processos.

A evolução dos custos do etanol no Brasil tem se caracterizado por significativo declínio nos últimos anos. Goldemberg et alii. (2004) apontaram que a queda nos preços do combustível é decorrente de progresso técnico, economias de escala e aprendizado organizacional, os quais foram mensurados a partir de curvas de aprendizado, que registraram taxa de progresso técnico (TP) de 93%, entre 1980 e 1985, e 71% entre 1986 e 2002.

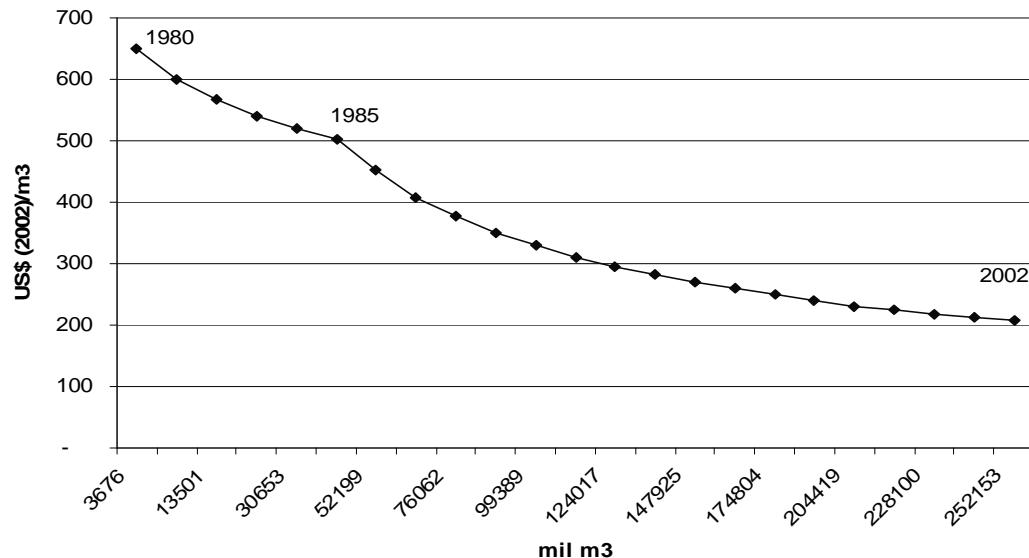
Baseado nos parâmetros obtidos pelo autor, foi reproduzida a curva de aprendizagem partindo de um custo de produção de 650 US\$ /m³ em 1980 e de uma

¹⁴ A literatura acerca do fenômeno também utiliza outras denominações, a saber: curva de experiência; *learning by doing*; e *learning by use*.



produção inicial de 3,7 milhões de m³, como mostra o Gráfico 3. Aplicando-se as TP acima se obtém a um custo de produção de aproximadamente 500 US\$/m³, em 1985, e 200 US\$/m³, em 2003.

Figura 2 - Curva de Aprendizagem



Fonte: Goldemberg et alii, 2004; Balanço Energético Nacional (BEN) 2006

De acordo com IEA (2000), o investimento necessário para essa redução no custo de produção pode ser dado pela área da curva de aprendizagem, que pode ser calculada, de maneira simplificada, tomando-se a metade da diferença entre o custo de produção de 1980 e 2002, multiplicando pela diferença da produção acumulada no período.

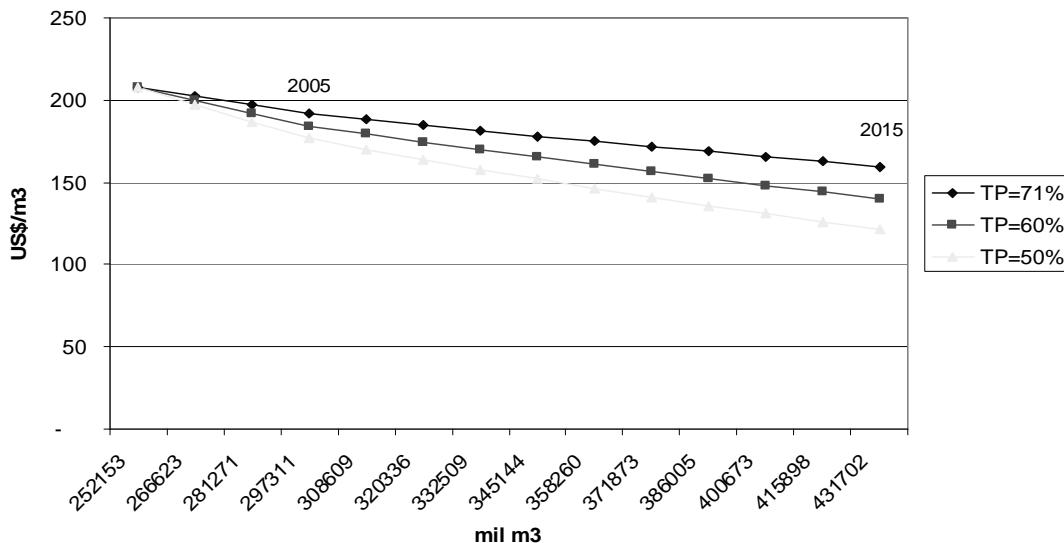
Os dados indicaram que foram necessários investimentos de US\$ 5,48 bilhões de na produção de álcool, no período considerado.

Como se sabe, a obtenção de ganhos de produtividade no setor sucroalcooleiro ainda pode avançar bastante com a introdução das tecnologias de segunda e terceira geração.

Por isso, foram realizadas simulações com objetivo de determinar o grau de investimento necessário para alcançar, em 2015, metas de produtividade que possibilitessem três diferentes cenários, a saber: o primeiro, com taxa de progresso técnico (TP) mantida em 71%; o segundo, mais otimista, com TP = 60%; e o último, com TP = 50%.

Para todos os casos, considerou-se uma taxa de crescimento médio anual da produção de etanol de 3,8% ao ano, valor obtido do cenário de referência da matriz energética nacional 2023.

Figura 3 - Projeção do custo do etanol



Fonte: Elaboração própria

Para o primeiro caso, para $TP = 71\%$, o custo de produção baixaria para $160 \text{ US\$/m}^3$, ou $25 \text{ US\$/barril}$, que é bem abaixo dos preços atualmente praticados no mercado internacional de petróleo. Isso exigiria um investimento total de $\text{US\$ } 2,2$ bilhões.

No segundo caso, com $TP = 60\%$, o custo de produção seria de $140 \text{ US\$/m}^3$, ou $22 \text{ US\$/barril}$. O investimento necessário seria na ordem de $\text{US\$ } 3$ bilhões para tal redução de custo.

Finalmente, no último caso, onde é simulada a taxa de progresso técnico de 50% , o custo de produção seria de $122 \text{ US\$/m}^3$, ou $19 \text{ US\$/barril}$, caso o investimento totalizasse $\text{US\$ } 3,7$ bilhões.

Esses resultados mostram que a produção de etanol pode continuar bastante competitiva frente ao petróleo com um volume de investimento Brasil não muito significativo.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo procurou elucidar panorama geral acerca da produção de etanol e algumas perspectivas e oportunidades para o setor.

Foram evidenciados os ganhos de produtividade resultantes do PROALCOOL e o montante de investimento necessário para alcançar tal resultado, utilizando-se curvas de aprendizagem, metodologia que permite projetar a evolução do custo de produção.

Com isso, foi possível estimar o investimento necessário para três cenários diferentes de progresso tecnológico.

Este tipo de exercício possibilita a projeção do esforço necessário para que o custo de produção do álcool brasileiro mantenha o país competitivo no mercado internacional.

Sabe-se que, para o Brasil ocupar uma posição perene e de destaque no mercado internacional de etanol, deve também investir de forma coordenada, principalmente, em



tecnologias de segunda geração como a gaseificação e a hidrólise. Há várias instituições nacionais e no exterior investindo de forma significativa nessas tecnologias.

Países industrializados têm alocado muitos recursos nessas tecnologias, mas certamente estão direcionando seus esforços para culturas empregadas em seus territórios. A cana de açúcar, que gera um volume de biomassa por hectare plantado muito superior às demais culturas, deveria receber uma atenção especial.

Os potenciais impactos ambientais e sobre o preço da terra e, por conseguinte, da produção de alimentos, decorrentes de uma ampliação em larga escala de monoculturas deve ser estudado através de modelos macroeconômicos integrados a módulos energéticos e agronômicos. Existem, de fato, restrições aos biocombustíveis por parte de agentes que temem estes impactos.

É importante ressaltar que o emprego as tecnologias de segunda geração, como por exemplo, a hidrólise, e outras tecnologias que permitem um melhor aproveitamento energético dos resíduos de biomassa, podem implicar o aumento significativo da produtividade energética desta cultura.

O aumento, em escala mundial, da produção e uso de biocombustíveis em níveis importantes só será possível, ou desejável, após um salto tecnológico. No entanto, boa parte das tecnologias que irão permitir este salto ainda está em fase de desenvolvimento e/ou são custosas.

Por isso, são extremamente desejáveis o incentivo e o fomento ao desenvolvimento destas tecnologias, seja por meio de políticas públicas, seja via investimentos privados, ou ainda, das chamadas parcerias público-privada, de sorte a tornar economicamente viáveis estas tecnologias.

O Brasil possui condições favoráveis para exercer um papel de liderança no mercado de biocombustível devido ao avanço tecnológico no setor, e à *expertise* e *know-how* de seus agentes; à disponibilidade de áreas agriculturáveis e de água; aos elevados níveis de insolação e de produtividade agrícola, entre outros fatores.

Ao Estado cabe ainda importante papel. É necessário, no entanto, que os investimentos públicos e privados, tanto em pesquisa e desenvolvimento quanto em infra-estrutura de logística e de transporte sejam mantidos e até mesmo incrementados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Balanço Energético Nacional (BEN) 2006. Disponível em <http://www.mme.gov.br>. Acessado em dezembro de 2006.

CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA – CTC. Disponível em www.ctc.com.br. Acessado em dezembro de 2006.

DEDINI Indústrias de Base. *Etanol Combustível: Balanço e Perspectivas 1975-2005*. Campinas, 17 de novembro de 2005.

DESAFIOS do Desenvolvimento. PNUD/IPEA. Abril de 2007, Ano 4, nº33.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. *Balanço Energético Nacional 2006 – Ano Base 2005*. EPE. Rio de Janeiro: 2006.

_____. *Plano Nacional de Energia 2030*. Disponível em www.mme.gov.br. Acessado em 03/05/2007.



- FINAGRO. Projeto Integrado de Produção Alcooleira, in: *Eanol: Como e Por Que Investir em Álcool Combustível?*, Esalq, São Paulo, 27 de junho de 2006.
- GOLDEMBERG, J; COELHO, S; NASTARI, P; and LUCON, O. Ethanol learning curve: the Brazilian experience. *Biomass and Bioenergy*, 2004; 26(3): 301-04.
- HENNIGES, O.; ZEDDIES, J. *Fuel Ethanol Production in the USA and Germany – a cost comparison*. F.O. Lichts World Ethanol and Biofuels Report, Vol. 1, Nº11, 11/02/2003.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Experience Curves for Energy Technology Policy. Paris: IEA, 2000.
- LA ROVERE, E. Brazil. In: BIAGINI, B.(ed.), *Confronting Climate Change, a Climate of Trust Report*, National Environmental Trust, Washington DC, 2000, p.209-222.
- LA ROVERE, E. Les Impacts Sociaux et Écologiques du Plan Alcool Brésilien. In: *Économie et Humanisme*, n° 260, Paris, July/August 1981, p. 36-47
- MACEDO, I.; NOGUEIRA, L. *Biocombustíveis*. Cadernos NAE, 02/2004. Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Brasília, 2004. Disponível em <http://www.biodiesel.gov.br>. Acessado em dezembro de 2006.
- MOREIRA, J, GOLDEMBERG J. The Alcohol Program. *Energy Policy*. 1999; 27(4): 229–45.
- PARLAMENTO EUROPEU. Diretiva 2003/30/CE.
- THE WHITE HOUSE NATIONAL ECONOMIC COUNCIL. Advanced Energy Initiative, Washington, fevereiro de 2006.
- VAN DER MERWE, E. (2006) Institute for Manufacturing, Department of Engineering, University of Cambridge Website. Disponível em www.ifm.eng.cam.ac.uk, em setembro de 2006. Acessado em dezembro de 2006.
- UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO - ÚNICA <http://www.portalunica.com.br>. Acessado em dezembro de 2006.