

## Referências Bibliográficas

ABEIOM – Associação Européia de Biomassa. Disponível em [www.aebiom.org](http://www.aebiom.org). Acesso em jun/2006.

ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Disponível em [www.abiove.com.br](http://www.abiove.com.br). Acesso em mar/2006.

ABOISSA ÓLEOS VEGETAIS. Disponível em [www.aboissa.com.br](http://www.aboissa.com.br). Acesso em mar/2006.

ABRAGET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GERADORAS TÉRMICAS. Disponível para sócios em [www.abraget.com.br](http://www.abraget.com.br). Acesso em out/2006.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, Brasília, 2002. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br). Acesso em fev/2006.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, **Resolução nº 21**, de 20 de janeiro de 2000.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Disponível em: [www.anfavea.com.br](http://www.anfavea.com.br). Acesso em mar/2008.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br). Acesso em fev/2006.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Basic Research Needs for the Hydrogen Economy**, 2004. Disponível em: [www.sc.doe.gov/bes/hydrogen.pdf](http://www.sc.doe.gov/bes/hydrogen.pdf).

ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Configuration and Technology Implications of Potential Nuclear Hydrogen System Applications**, 2005.

ASSOCIAÇÃO DOS PLANTADORES DE CANA DO OESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. Disponível em: [www.canaoeste.com.br](http://www.canaoeste.com.br).

ASPO – ASSOCIATION FOR THE STUDY OF PEAK OIL. **Third International Workshop on Oil Depletion**, Berlin, 2004.

AUSTRALIAN URANIUM ASSOCIATION. **The Economics of Nuclear Power - Briefing Paper 8**, 2007.

AWERBUCH, S. e BERGER, M. **Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-Making**, IEA – International Energy Agency, Paris, 2003.

AWERBUCH, S., JANSEN J.C. e BEURSKENS, L.W. **Building Capacity for Portfolio-Based Energy Planning in Developing Countries**, United Nations Environment Programme, Paris, 2004.

BALZLI, B., HORNIG, F. *As razões do sobe-e-desce do petróleo*. Artigo publicado no Der Spiegel, 9 de janeiro de 2008.

BIODIESELBR. Portal do Biodiesel. Disponível em: [www.biodieselbr.com](http://www.biodieselbr.com). Acesso em jul/2006.

BORBELY, A. e KREIDER, J. **Distributed Generation – The new power paradigm for the new millennium**, CRC Press, 2001.

BRITISH PETROLEUM. **BP Statistical Review of World Energy**, June 2008. Disponível em: [www.bp.com](http://www.bp.com). Acesso em julho/2008.

CARAJILESCOV, P., MOREIRA J.M.L., YUUITIRO A.A. e FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ E. – **Energia nuclear e os rejeitos radioativos**, Revista Brasil Energia, abril de 2008.

CARAJILESCOV, P., MOREIRA J.M.L. e FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ E. – **O Mercado Nuclear Brasileiro**, Jornal Valor Econômico, 03 de dezembro de 2007.

CARAJILESCOV, P., MOREIRA J.M.L. e FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ E. – **O Futuro Nuclear do Brasil**, Jornal O Globo, 22 de outubro de 2007

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, Esalq/USP. Disponível em: [www.cepea.esalq.usp.br](http://www.cepea.esalq.usp.br). Acesso em jun/2006.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, Esalq/USP. **Biodiesel: Análise de Custos e de Tributos nas Cinco Regiões do Brasil**, 2005.

COGEN-SP – Associação Paulista de Cogeração de Energia. **Resumo Técnico: Avaliação técnica e econômica do mercado potencial de co-geração a Gás Natural no Estado de São Paulo**, 2008.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: [www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br). Acesso em junho/2006.

COPELAND, T.E. **Financial Theory and Corporate Policy**, Boston, 2006.

DEDINI INDÚSTRIAS DE BASE S.A. Disponível em [www.dedini.com.br/](http://www.dedini.com.br/). Acesso em set/2006.

DE GOVELLO, C. e MAIGNE, Y. **Eletrificação Rural Descentralizada**, CRESEB-CEPEL, Rio de Janeiro, 2003.

DEMATTE, J. L. I. **Visão Agrícola, nº 1**, ESALQ, 2004.

DEWI – Deutsches Windenergie-Institut. **Energia Eólica**, 1998.

DEWI – Deutsches Windenergie-Institut. **DEWI Magazine 33**, August 2008.

- EARTH POLICY INSTITUTE. **Eco-Economy Indicators**. Disponível em [www.earth-policy.org/](http://www.earth-policy.org/). Acesso em out/2008.
- ELETROBRÁS. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, 2001.
- ELETROBRÁS. **PROINFA**, 2004. Disponível em: [www.eletronbras.com.br/EM\\_Programas\\_Proinfa/default.asp](http://www.eletronbras.com.br/EM_Programas_Proinfa/default.asp). Acesso em fev/2006.
- 7º ENCONTRO DE ENERGIA. **Painel: Visão Internacional sobre o Cenário Energético** – São Paulo, 2006.
- EIA - ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2008. Disponível em: [www.eia.doe.gov/](http://www.eia.doe.gov/). Acesso em jul/2008.
- ENVIRONMENT CANADA. **Wood-Ethanol Report**, 1999.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão do Setor de Energia Elétrica – PDE 2006 – 2015**, 2006.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia – 2030**, 2006.
- ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. **Estudo Comparativo do Potencial de Produção de Etanol no Maranhão: Suas Vantagens Competitivas e Comparativas**, 2006.
- EWEC – **European Wind Energy Conference**. Atenas, Grécia, 2006.
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Estudo sobre Biodiesel**, São Paulo, 2002.
- GAS RESEARCH INSTITUTE. **Distributed Power Generation: A Strategy for a Competitive Energy Industry**. Gas Research Institute, Chicago, EUA, 1998.
- GRUPO COPERSUCAR UNIÃO. Disponível em: [www.ciauniao.com.br](http://www.ciauniao.com.br). Acesso em out/2006.
- HONDA MOTOR COMPANY. Disponível em: [www.honda.com](http://www.honda.com). Acesso em mar/2006.
- HASSUANI, S.J., LEAL, M.R.L.V., MACEDO, I.C. **“Biomass Power Generation: Sugar Cane Bagasse and Trash”**, Série Caminhos para Sustentabilidade - 01 – Piracicaba, São Paulo, Brazil: PNUD-CTC, 2005.
- IBC – International Business Communications e Consultoria Expetro. **Relatório Setorial: Oportunidades e Desafios para Investimentos em BIODIESEL no Brasil**, 2006.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2006. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em set/2006.

IEA – International Energy Agency. **Energy Technologies for the 21st Century**, Paris, 1997.

IEA – International Energy Agency, OCDE – Organization for Economic Co-operation and Development. **World Energy Outlook**, Paris, 2006.

IEA – International Energy Agency, OCDE – Organization for Economic Co-operation and Development. **World Energy Outlook**, Paris, 2007.

IMF – International Monetary Fund, World Economic Outlook Database, 2008. Disponível em: [www.imf.org](http://www.imf.org). Acesso em out/2008.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. Disponível em: [www.inpe.br](http://www.inpe.br). Acesso em out/2006.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2001: Synthesis Report**, 2001.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Working Group III Report "Mitigation of Climate Change", Chapter 4: Energy Supply**, 2007.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Conservação de energia na Indústria do Açúcar e do Alcool**, São Paulo, 1990.

JACOBY, MITCH. **Fuel Cells move closer to Market**, Chicago, USA. Disponível em: [www.cen.onlina.org](http://www.cen.onlina.org). Acesso em fev/2003.

JORNAL DA CANA. Disponível em: [www.jornaldacana.com.br](http://www.jornaldacana.com.br). Acesso em mar/2008.

KREITH, F. “**Fallacies of a Hydrogen Economy: A Critical Analysis of Hydrogen Production and Utilization**”, Journal of Energy Resources Technology 126: 249–257, 2004.

KWAN, C.C.Y. “**Portfolio Analysis Using Spreadsheet Tools**”, Journal of Applied Finance, Volume 11, no.1, 70-81, 2001.

LEAL, M.R.L.V. **Seminário sobre Alcool promovido pelo BNDES**, Rio de Janeiro, 2003.

MACEDO, I.C., LEAL, M.R.L.V., SILVA J.E.A.R. “**Balanço das Emissões de Gases do Efeito Estufa na Produção e Uso do Etanol no Brasil**”, Governo do Estado de São Paulo, 2004.

MME – Ministério de Minas e Energia. **BEN – Balanço Energético Nacional**, 2007.

OIL WORLD ANNUAL, 2005.

ONS – **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. Disponível em: [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br). Acesso em out/2008.

PETROBRAS, Gás & Energia/Desenvolvimento Energético, **Manual do Álcool**, 2005.

PHYLIPSEN, G.J.M. e ALSEMA, E.A. “**Environmental life-cycle assessment of multicrystalline silicon solar cell modules**”, NOVEM – Netherlands Agency for Energy and the Environment, Utrecht, 1995.

PIRES, A., FERNÁNDEZ Y FERNÁNDEZ, E., BUENO, J. **Política Energética para o Brasil – Propostas para o Crescimento Sustentável**, 2006.

POINTCARBON, 2008. Disponível em: [www.pointcarbon.com](http://www.pointcarbon.com). Acesso em fev/2008.

ROSS, S.A., WESTERFIELD, R. W., JORDAN, B.D. **Princípios de Administração Financeira**, 2007.

PROCANA. **Ethanol Guide: Guia Internacional do Álcool**, Ribeirão Preto: ProCana Informações e Eventos, 2004.

REN21 – RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FOR THE 21st CENTURY, **Renewables 2007 Global Status Report**, Paris, 2008.

REW – RENEWABLE ENERGY WORLD, **Through Thick and Thin**, págs. 113-118, jul-ago/2008.

REW – RENEWABLE ENERGY WORLD, **PV Market Update**, págs. 68-118-80, jul-ago/2006.

SCHOBERT, HAROLD H. **Energy and Society [An Introduction]**, New York, Taylor & Francis, 2002.

4º SEMINÁRIO e EXPOSIÇÃO de VEÍCULOS ELÉTRICOS. INEE – **Instituto Nacional de Eficiência Energética**, São Bernardo do Campo, São Paulo, 2006.

SUANI, T.C. **A Cogeração de Eletricidade a partir de Biomassa no Setor Industrial**, CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2000.

THERMOFLOW INC. **Thermoflex version 16.0**, copyright 1995-2006, licença de uso para Petróleo Brasileiro S.A., 2006.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**, CENERGIA, Brasil, Editora Interciência, 2003.

TORQUATO, S. A., PEREZ, L. H. **Evolução das Exportações Brasileiras de Álcool**, Informações Econômicas, SP, v.36, n.3, mar/2006.

UNIAMERICA. Disponível em [www.uniamericabrasil.com.br](http://www.uniamericabrasil.com.br). Acesso em set/2006.

ÚNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo. Disponível em: [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br). Acesso em jun/2008.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY: EG&G SERVICES PARSONS, INC. Science Applications International Corporation, **Fuel Cell Handbook: Fifth Edition**, 2000.

USINAS E DESTILARIAS DO OESTE PAULISTA. Disponível em: [www.udop.com.br](http://www.udop.com.br).

WAACK, ROBERTO SILVA; NEVES, MARCOS FAVA E MORAES, SILVA. **Proálcool: a necessidade de uma visão sistêmica diante de grandes incertezas e oportunidades**. Estudo de Caso do Programa de Estudos dos Negócios do Sistema Agroindustrial (PENSA). São Paulo: USP, 1997. Disponível em: [www.fundacaofia.com.br/pensa/](http://www.fundacaofia.com.br/pensa/) Acesso em mai/2005.

WINDPOWER, 2006. Disponível em: [www.windpower.com](http://www.windpower.com). Acesso em jan/2006.

WORLDWATCH INSTITUTE. **Biofuels for Transportation Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy in the 21st Century**, 2006

YERGIN, D. **O Petróleo: Uma história de Ganância e Poder**, 1992.

YILDIZ B., PETRI, M., CONZELMANN, G., AND C. FORSBERG. **Configuration and Technology Implications of Potential Nuclear Hydrogen System Applications**, ANL-05/30, Argonne, July 31, 2005.

ZITTEL, W., LUDWIG-BÖLKOW W. R. **Hydrogen in the Energy Sector**, Systemtechnik GmbH, 1996.

# ANEXOS

## A.1 SETOR SUCRO ALCOOLEIRO NO BRASIL

A agroindústria canavieira obteve ganhos tecnológicos e produtivos através do incentivo ao aumento da produção de etanol como substituto da gasolina no Programa Pró-Álcool da década de 80.

Atualmente, prevê-se um forte desenvolvimento do setor, também devido ao aumento da produção de etanol, pela sua inserção no mercado mundial de combustíveis, com o intuito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

Nos últimos 20 anos a atuação do setor agroindustrial da cana-de-açúcar ampliou-se, pois, inicialmente voltado para a indústria alimentícia, com a produção preferencial de açúcar, passou a participar também ativamente do setor de combustíveis e elétrico, com a produção de etanol e exportação de eletricidade.

Alguns aspectos importantes garantem uma vantagem extraordinária do setor sucro-alcooleiro no Brasil, em relação ao resto do mundo, acarretando um custo muito competitivo para o etanol:

- Domínio das tecnologias agrícola e industrial;
- Produção nacional de todos os insumos e equipamentos;
- Área agricultável disponível e clima favorável para plantação.

No Brasil, o sudeste e o nordeste desenvolveram o negócio com características distintas. O sudeste é responsável por 2/3 da produção nacional de cana e seu foco principal é voltado para a produção de etanol, enquanto o foco principal do nordeste é para a produção de açúcar para exportação. Contudo, a liberalização do setor a partir dos anos 90 fez o sudeste ultrapassar o nordeste no volume exportado de açúcar, devido aos ganhos extraordinários de produtividade daquela região.

O setor de produção de cana no Brasil também se distingue de outros países por produzir tanto açúcar como etanol em grandes quantidades. Como todo insumo de origem agrícola, a produção também sofre com condições extraordinárias, que exigem cuidados no planejamento energético para o atendimento da demanda criada nos setores de combustível e elétrico.

A produção da cana está sujeita a riscos climáticos, fitopatológicos e de sazonalidade da produção. As variações não planejadas na produção podem ter impacto na oferta e preço do etanol. No caso de uma redução da oferta interna de açúcar, outros produtores podem garantir a demanda. O mesmo não ocorre com o etanol, pois a demanda brasileira ainda é muito superior à capacidade mundial de atendê-la.

Os produtos da cana são destinados a diferentes setores, fazendo surgir conflitos de interesse de ordem comercial, o que dificulta o atendimento simultâneo dos mercados. Por exemplo, as usinas podem alterar o destino da cana para a produção de etanol ou açúcar, dependendo dos preços alcançados pelos produtos.

As usinas geralmente ficam localizadas no meio de terras agriculturáveis, uma vez que fretes longos inviabilizam as operações de colheita, além do que a cana deve ser esmagada, logo após ser colhida, sob pena de perda da sacarose contida. Tanto a distribuição como a comercialização dos produtos é feita, muitas vezes, por empresas terceirizadas especializadas, pois as usinas, geralmente, não dispõem de canais de distribuição e de áreas comerciais próprias.

### **Agricultura**

A fase agrícola do negócio da cana-de-açúcar é de fundamental importância para o setor e a excelência alcançada na cultura da cana foi crucial para garantir a competitividade brasileira tanto na produção de etanol quanto na de açúcar. Os maiores avanços em desenvolvimento tecnológico e produtividade do setor se deram na parte agrícola da cadeia, e não na industrial.

Na região sudeste o plantio no período de janeiro-março, conhecido como “cana de ano e meio”, é o mais recomendado tecnicamente e permite o melhor aproveitamento do terreno.

Em regiões de clima quente e boa umidade, como o oeste paulista, o plantio pode ser estendido em torno desses meses. A colheita se dá de maio a novembro, período da safra, que coincide com o período seco da região sudeste, o que traz uma vantagem estratégica para o sistema elétrico, como será visto a seguir no item sobre cogeração na indústria sucro-alcooleira.

Já na região nordeste, o plantio é defasado em 3/4 meses, coincidente com o início do período das chuvas, que vai de maio a agosto, na zona da mata.

A safra vai de setembro a fevereiro, o que poderia estender a produção brasileira ao longo de quase todo o ano, caso, como já foi dito, o nordeste tivesse produtividade semelhante à da região sudeste (vide tabela A-1).

Tabela A-1—Períodos de safra e entressafra no nordeste e sudeste

05	06	07	08	09	10	11	12	01	02	03	04
Safrs sudeste								Plantio			
				Safrs nordeste							

A aquisição da matéria-prima para as usinas pode ser feita com cana de plantações da própria usina, de arrendamentos ou de fornecedores que a vendem para usina. Em média, no estado de São Paulo, a cana de produção própria responde por aproximadamente 70% do fornecimento das usinas.

### Solos

Os atributos do solo a serem avaliados para a determinação de suas limitações para determinada cultura são: a profundidade efetiva, a capacidade de retenção de água, a permeabilidade e drenagem interna, a fertilidade e a possibilidade de moto-mecanização [ESALQ, 2006].

Embora a cana-de-açúcar possa ser produzida em condições de solo mais adversas, observa-se que a economicidade dos empreendimentos agrícolas decresce à medida que as características do solo se afastam dos padrões ideais. Dentre os atributos físicos de maior relevância para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, destacam-se a profundidade efetiva e a textura dos solos.

Quanto maior a profundidade efetiva do solo, isto é, a profundidade de solo disponível para o desenvolvimento do sistema radicular, mais apta será aquela região ao cultivo da cana-de-açúcar. Por outro lado, a textura influencia a velocidade de infiltração e a capacidade de retenção de água, sendo este parâmetro importante para regiões que apresentem deficiência hídrica acentuada. A textura do solo também influencia as condições de tráfego de máquinas agrícolas, utilizadas em larga escala na maioria dos sistemas produtivos.

### Adbos e Fertilizantes

Atributos químicos dos solos também devem ser considerados na avaliação da aptidão agrícola da cultura da cana-de-açúcar, embora possam ser

alterados pelo manejo do solo e pela aplicação da vinhaça e de torta de filtro, subprodutos do processamento da cana. A tabela A-2 indica valores usuais [Macedo et al., 2004].

Tabela A-2 – Adubos, corretivos de solo e controle de pragas<sup>29</sup> - kg/ hectare

N	30 a 90	CaO	2.200 (a cada 6 anos)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120 a zero	Adubo	500 a 200
K <sub>2</sub> O	120 a zero	Herbicidas e Inseticidas	1 a 3

### Uso da Palha

As restrições ambientais recentes impostas à queima da palha e a disposição desta sobre a superfície podem alterar o solo e o ambiente e obriga que todas as práticas agrícolas sejam revistas. O corte de cana produz de 12 a 20 t/ha de palha seca e, se deixada toda no campo, pode trazer problemas para a plantação, como indicado na tabela A-3. Em média, admite-se que 30% da palha, o que inclui basicamente a ponteira do colmo e folhagem agregada, possa ficar no campo, sem ser necessário queimá-la [Demattê, 2004].

Tabela A-3 – Vantagens e desvantagens do uso da palha na cultura da cana-de-açúcar

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<i>Aumenta a infiltração da água</i>	<i>Menor temperatura do solo (de 0,4 a 1°C)</i>
<i>Aumenta o teor de matéria orgânica</i>	<i>Maiores danos ocasionados pelas geadas</i>
<i>Favorece a proliferação de organismos no solo</i>	<i>Aumento de cupim</i>
<i>Recicla nutrientes</i>	<i>Maior possibilidade de ataque de lagarta e cigarrinha</i>
<i>Aumenta o aporte de N no solo</i>	<i>Maior demora na brotação da soqueira</i>
<i>Atenua a compactação</i>	<i>Maior demanda de N (elevada relação C/N da palha)</i>
<i>Mantém o solo mais úmido, por mais tempo</i>	<i>Possível decomposição anaeróbia da palha</i>

### Transporte da Cana-de-açúcar

O transporte da cana ocorre em distâncias pequenas, não superiores a 50 km entre a plantação e a usina, pois o transporte representa aproximadamente 12% do custo total da produção, podendo inviabilizar o negócio, caso aquelas distâncias sejam maiores. O sincronismo entre a atividade do campo e da indústria é fundamental para o rendimento da usina e redução do custo de produção. O ideal, do ponto de vista da usina, é que o fornecimento de matéria-prima seja constante durante toda a safra.

<sup>29</sup> Essa área tem evoluído para controles biológicos e uma redução sensível do uso

Assim, o planejamento prévio das operações de transporte é essencial para a operação da usina. No Brasil ocorre apenas pelo sistema rodoviário, geralmente consumindo óleo diesel e, dependendo do conjunto utilizado, pode transportar de 25 a 60 toneladas por viagem.

### A.1.1 Processamento da cana-de-açúcar

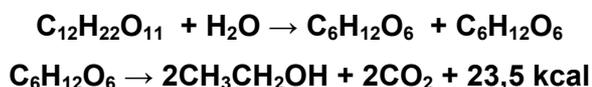
No Brasil, o caldo da cana é utilizado diretamente na produção de etanol, além do melaço ou mel, que é um subproduto da produção do açúcar. O etanol é obtido após a fermentação do caldo ou da mistura de melaço e caldo, por meio de um processo bioquímico. Antes de ser enviado ao processo fermentativo, este caldo recebe um tratamento de purificação. As fases do processo são descritas sucintamente a seguir:

**Tratamento do caldo para destilaria:** o caldo sofre um processo de pasteurização: aquecimento e resfriamento imediato.

**Preparação do mosto e do fermento:** o mosto nada mais é do que uma solução de açúcar cuja concentração foi ajustada de forma a facilitar a sua fermentação. Basicamente é constituído pela mistura de méis e caldo.

**Preparo do fermento:** o processo de fermentação mais comumente utilizado nas destilarias do Brasil é o Melle-Boinot, cuja característica principal é a recuperação de leveduras por meio da centrifugação do vinho, que é a mistura do mel e caldo de cana já fermentado.

**Fermentação propriamente dita:** é nesta fase que os açúcares são transformados em etanol, por ação de leveduras. As reações ocorrem em tanques, denominadas dornas de fermentação. O mosto é alimentado nas dornas em um tempo que varia entre 4 e 10 horas. Os açúcares (sacarose) são transformados em etanol, segundo a reação simplificada de Gay Lussac:



**Centrifugação do vinho:** após a fermentação, o vinho é enviado às separadoras centrífugas para recuperação do fermento. O fermento recuperado, denominado leite de levedura, retorna às cubas para fermentarem nova carga de mosto. Este processo pode ser feito em batelada ou de forma contínua.

**Destilação:** o vinho que vem da fermentação possui, em sua composição, de 7 a 10° GL (% em volume) de álcool, além de outros componentes de natureza líquida, sólida e gasosa. O álcool presente neste vinho é recuperado por

destilação, processo que se aproveita dos diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias voláteis presentes, separando-as nos mesmos moldes de uma destilação de petróleo.

**Retificação:** a finalidade deste sistema é concentrar o álcool a uma graduação de aproximadamente 96° GL e proceder a sua purificação com a retirada das impurezas que o acompanham.

**Desidratação:** o álcool hidratado, produto final dos processos de destilação e retificação, é uma mistura binária álcool-água que atinge um teor da ordem de 96° GL.

Este etanol hidratado pode ser comercializado desta forma ou pode sofrer um processo de desidratação por benzeno ou por peneira molecular<sup>30</sup>, produzindo etanol anidro.

**Armazenamento do etanol:** os volumes de alcoóis produzidos, hidratado e anidro, são medidos e enviados para armazenagem em tanques.

As usinas em operação no País estão indicadas na tabela A-4, classificadas por tipo de produção – açúcar, açúcar e etanol ou apenas etanol – e por sua localização [ÚNICA, 2008].

Tabela A-4 – Usinas na safra 2006-2007, por estado e tipo

Estados/ Regiões	Açúcar	Açúcar/ Etanol	Etanol	Total
<b>Centro-Sul</b>	<b>6</b>	<b>185</b>	<b>90</b>	<b>281</b>
Espírito Santo	0	2	4	6
Goiás	0	8	11	19
Mato Grosso	1	4	6	11
Mato Grosso do Sul	0	7	4	11
Minas Gerais	1	17	12	30
Paraná	0	19	10	29
Rio de Janeiro	0	5	2	7
Rio Grande do Sul	0	0	1	1
São Paulo	4	123	40	167
<b>Norte-Nordeste</b>	<b>10</b>	<b>47</b>	<b>23</b>	<b>80</b>
Amazonas / Pará	0	1	1	2
Maranhão	0	1	2	3
Ceará / Piauí	0	1	1	2
Rio Grande do Norte	0	2	1	3
Paraíba	1	2	7	10
Pernambuco	4	18	5	27
Alagoas	5	19	2	26
Sergipe	0	1	2	3
Bahia	0	2	2	4
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>232</b>	<b>113</b>	<b>361</b>

<sup>30</sup> Etanol anidro exportado não pode conter traços de hidrocarbonetos, razão pela qual a desidratação por peneira molecular tem se expandido rapidamente

## Aplicações nos Setores de Combustível e Químico

Os produtos do etanol podem ter uma gama variada de aplicações, desde os subprodutos da sua produção até suas diferentes formas de apresentação.

### Etanol carburante

No Brasil o etanol pode ser usado diretamente como combustível ou como aditivo para aumento de octanagem. O etanol hidratado é usado diretamente no abastecimento da frota nacional de carros a álcool, enquanto o etanol anidro é adicionado à gasolina em proporções que hoje, por força de lei, variam de 20 a 25%.

Duas desvantagens do etanol com relação à gasolina dizem respeito ao poder calorífico,  $\frac{3}{4}$  do da gasolina, e sua solubilidade em água, que trazem como conseqüências o aumento de consumo e da corrosão dos componentes do sistema de combustível, que, por isso, devem ser especificadas com material resistente.

A mistura álcool-gasolina não é recente, nem tampouco apenas brasileira, como a tabela A-5 permite observar. Contudo, no final da década de 30, as adições do etanol à gasolina foram suspensas em função da instabilidade da oferta, associado a preços baixos do petróleo devido à expansão da produção petrolífera [Yergin, 1992].

Tabela A-5 – Políticas de mistura do etanol na gasolina no século XX

País	Ano	Mistura usada (etanol)
EUA	1920	20-25%
França	1923	25%
Itália	1926	30%
Alemanha	1930	25%
Itália	1931	20%
Hungria	1929	20%
Argentina	1931	30%
Austrália	1930	15-35%
Áustria	1931	25%
Brasil	1931	10-25%
Letônia	1931	25%
Tchecoslováquia	1932	20%
Reino Unido	1932	10% + 15% (benzeno)
Iugoslávia	1932	20%

A partir de 2003, o Brasil passou a contar também com motores ciclo Otto com tecnologia flex-fuel, que permite a mistura de etanol hidratado e gasolina

aditivada com etanol anidro em qualquer proporção de cada um dos combustíveis.

### Alcoolquímica

A utilização de etanol como matéria-prima substitutiva na fabricação de produtos petroquímicos já foi feita durante a II Guerra Mundial, na Europa e nos EUA. Eteno e butadieno foram produzidos a partir do etanol para obtenção de borracha sintética, utilizado nos pneus para veículos bélicos. No Brasil, a indústria alcoolquímica complementa a oferta de derivados petroquímicos, mas a expansão da indústria petrolífera e a queda dos preços do petróleo inviabilizaram o seu desenvolvimento.

Estima-se que, com a elevação dos preços do petróleo, a alcoolquímica possa tornar-se viável. Uma linha de pesquisa nesta área que parece ter obtido sucesso foi o desenvolvimento do plástico biodegradável - Biocycle - a partir da cana<sup>31</sup>, cujo processo demanda 3 quilos de açúcar por quilo de plástico, utilizado para sacos descartáveis. Seu custo de produção é cerca de 30% superior ao convencional. Os usineiros paulistas Biagi (Serrana) e Balbo (Sertãozinho) construíram uma fábrica piloto – PHB Industrial – com capacidade de produção de 50-60 t/ano.

### Subprodutos do Processamento da Cana-de-açúcar

**Vinhaça e água de lavagem:** efluentes da produção do etanol e do açúcar. As alternativas para dar destino a estes resíduos da produção são as seguintes:

- Podem ser processados em biodigestores anaeróbicos, produzindo biogás.
- Podem ser utilizados nos processos de fertirrigação dos canaviais.
- Também já é usada no Brasil a tecnologia de desidratação da vinhaça, que permite a recuperação de 80% de água própria para consumo ou irrigação e 20% de um adubo organo-mineral, aplicado nas próprias plantações de cana.

**Bagaço:** é o subproduto com mais aplicações, a saber:

- a) queima em caldeiras para produção de vapor e energia elétrica;
- b) vendido como combustível, depois de acondicionado (briquetado, peletizado, enfardado) ou não;

---

<sup>31</sup> Fruto da parceria entre a Usina da Pedra (Serrana, SP), Centro de Tecnologia Canavieiro, Instituto de Pesquisas Tecnológicas e Universidade de São Paulo

- c) submetido à hidrólise, obtendo-se rações, furfural e lignina (combustível derivado da celulose que não fermenta);
- d) utilizado como polpa para papel ou como material para a produção de celulose e na fabricação de aglomerados.

**Folhas e pontas:** podem ser utilizadas para constituição de forragem e, além disso, podem ter as mesmas destinações do bagaço.

### A.1.2 Produção, Preços e Mercados para o Etanol

O mercado mundial de etanol gira em torno de 42 bilhões de litros por ano e aproximadamente 70% deste volume são provenientes da cana-de-açúcar (Brasil, Tailândia, Índia). Outras matérias-primas utilizadas são: milho (EUA), beterraba (França), trigo (Alemanha) e, até, subprodutos da celulose (Rússia). O Brasil é o maior produtor mundial, como mostrado na figura A-1 [Worldwatch Institute, 2006].

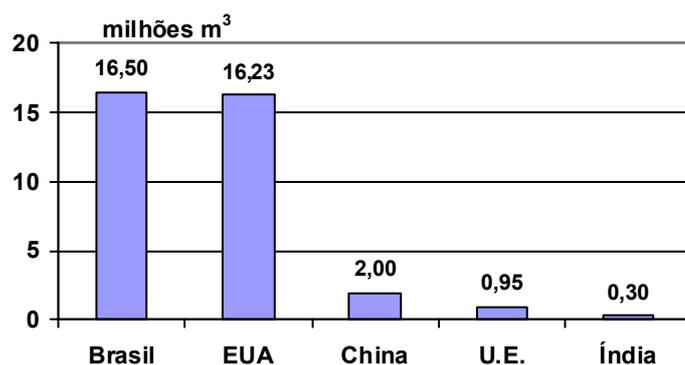


Figura A-1– Maiores produtores mundiais de etanol - 2005

Grande parte do sucesso da produção de etanol no Brasil está na sua produção consorciada com o açúcar, o que permite flexibilidade para a usina e sustentabilidade para a atividade em momentos de crise no mercado de etanol ou de açúcar. Outro elemento que garante o sucesso desta indústria é o custo de produção inferior ao de outras fontes, como o milho (EUA) e beterraba ou trigo (UE).

A figura A-2 mostra o diferencial competitivo do etanol de cana-de-açúcar em relação a estas alternativas [DOE, 2006].

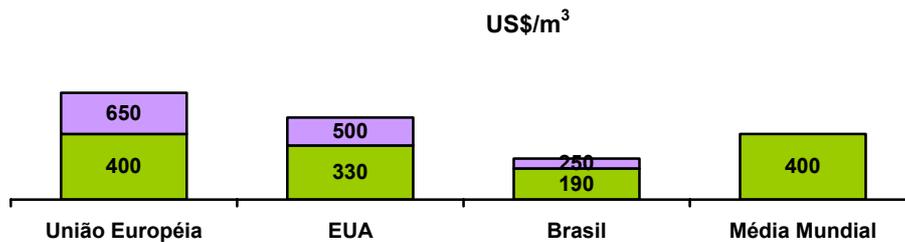


Figura A-2 – Faixas de custo para produção de etanol - 2006

Esta diferença de custos deriva da maior produtividade da cana na produção de etanol em relação às opções milho, beterraba ou trigo, conforme mostrado na figura A-3 [ÚNICA, 2008].

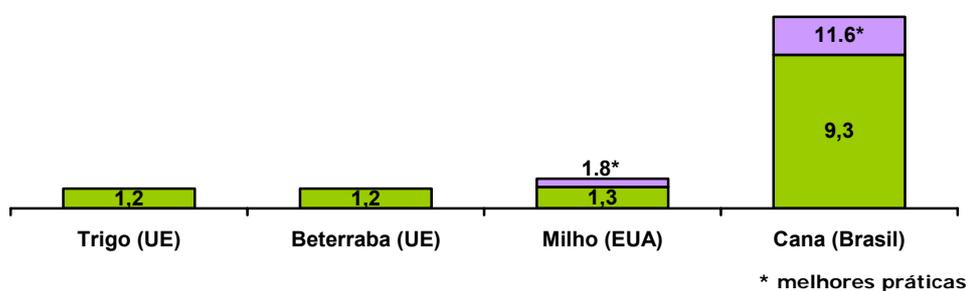


Figura A-3 – Energia renovável útil entregue / energia fóssil total consumida no processo

As recentes projeções de expansão do mercado internacional de etanol podem favorecer em muito a produção nacional, uma vez que, embora o país seja o maior produtor mundial, apenas cerca de 5% da produção era exportada.

Este percentual era relativamente constante até 2003. Porém, com a expansão do mercado internacional, o percentual da produção nacional exportado já se elevou para 15%. Analistas esperam um grande crescimento do mercado internacional, fundamentados no interesse de muitos países em adicionar etanol à gasolina, para controle de emissões e redução de despesas com derivados de petróleo.

Nos Estados Unidos, por exemplo, apenas em 1998 foi iniciada a produção de carros a etanol e a produção americana a partir do milho tem aumentado significativamente, com incentivos do governo americano.

Dentro desse quadro, o uso do etanol anidro como aditivo pode consolidar-se como alternativa mundial, dada as suas vantagens ambientais em relação ao chumbo tetraetila e aos oxigenados derivados de petróleo, como o MTBE.

No mercado interno, cerca de 90% do volume consumido tem finalidade combustível, como anidro, adicionado à gasolina, ou hidratado, usado em carros a etanol e, mais recentemente, nos modelos flex-fuel.

O mercado de etanol hidratado vinha retraindo-se desde o final dos anos 80, mas agora apresenta uma forte recuperação com a introdução dos modelos flexíveis. No entanto, apenas o etanol anidro tem grande potencial de exportação.

Lançados há cinco anos, os veículos flex-fuel já representam mais de 75% das vendas de automóveis e comerciais leves no País. As vendas acumuladas de veículos flex-fuel evoluíram de 48,2 mil unidades em 2003 para atingir quase 2 milhões em 2007 [ANFAVEA, 2008].

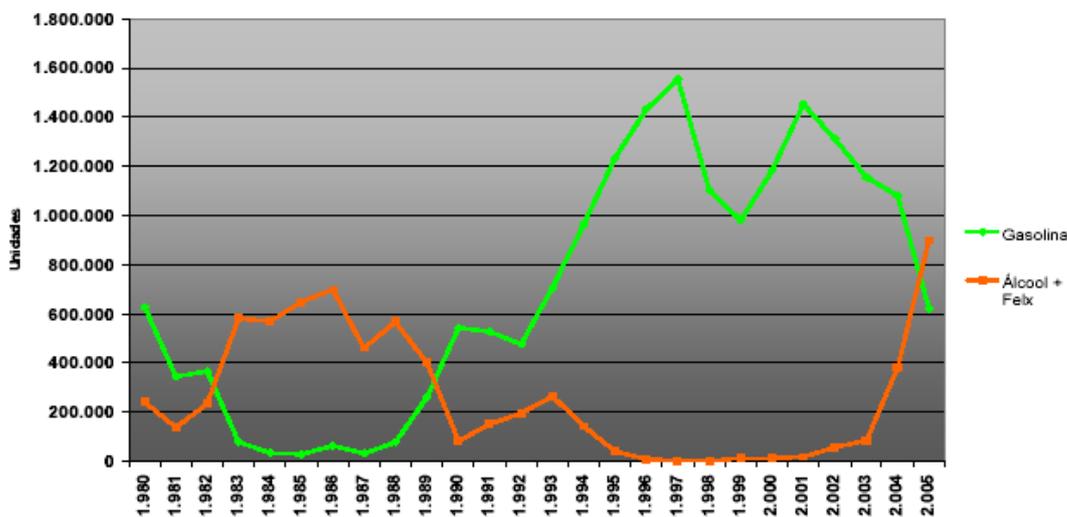
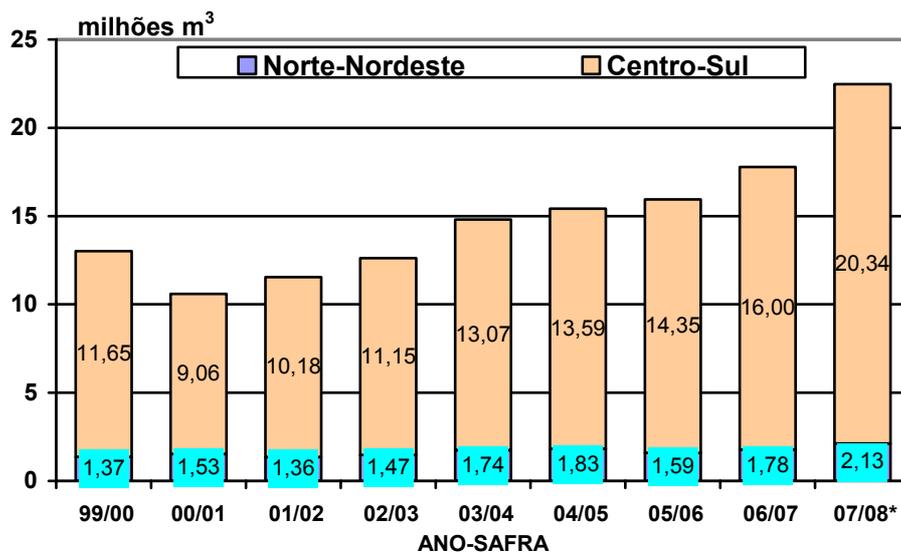


Figura A-4 – Venda de veículos no Brasil – 1980 a 2005

Como a produção de cana concentra-se na região sudeste, a produção de etanol, evidentemente, também se concentra nesta região, responsável por aproximadamente 90% da produção nacional, como mostrado na figura A-5 [ÚNICA, 2008].



\* estimativa

Figura A-5 – Produção brasileira de etanol

São Paulo continua sendo o principal estado de origem deste etanol, contribuindo com aproximadamente 60% da produção nacional, conforme pode ser observado na figura A-6 [ÚNICA, 2008].

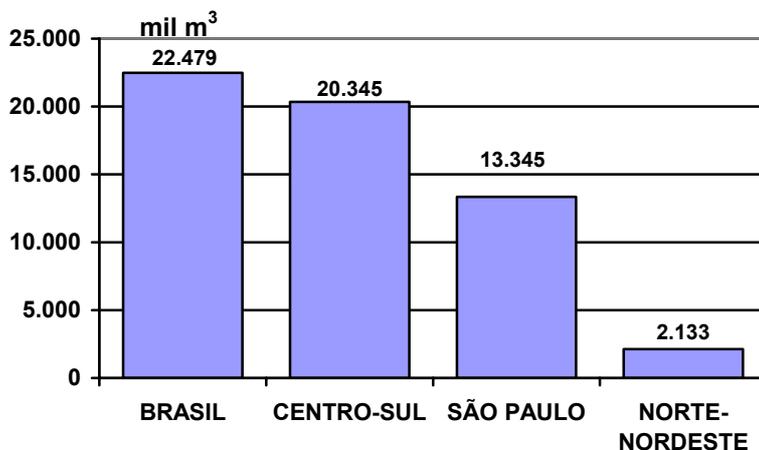


Figura A-6- Distribuição da produção de etanol por região – safra 07/08

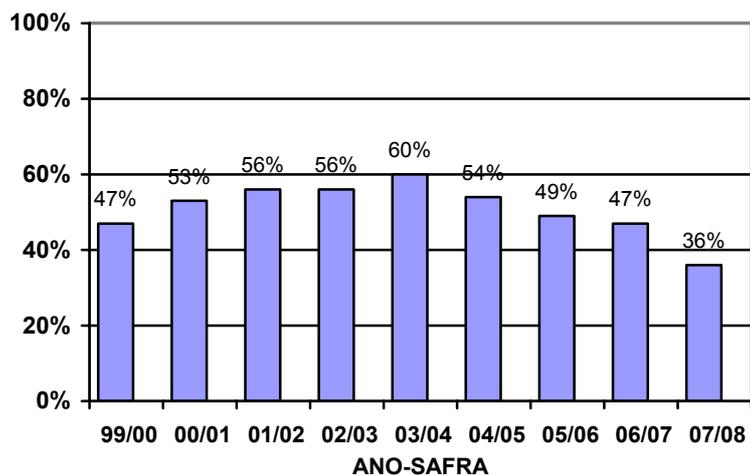


Figura A-7 – Participação do etanol anidro na produção total

A participação atual do etanol anidro na produção total é de 36%, mas já chegou a 60% em 2003/2004, conforme mostra a figura A-7.

A demanda por etanol hidratado aumentou substancialmente após a introdução do motor flex-fuel em 2003, influenciando até mesmo os preços deste produto, os quais são, historicamente, inferiores aos do anidro, pela necessidade de uma desidratação adicional no seu processo produtivo.

A figura A-8 mostra os preços médios mensais do etanol anidro e hidratado, sem impostos, desde junho de 2003 até junho de 2008 [CEPEA, 2008].

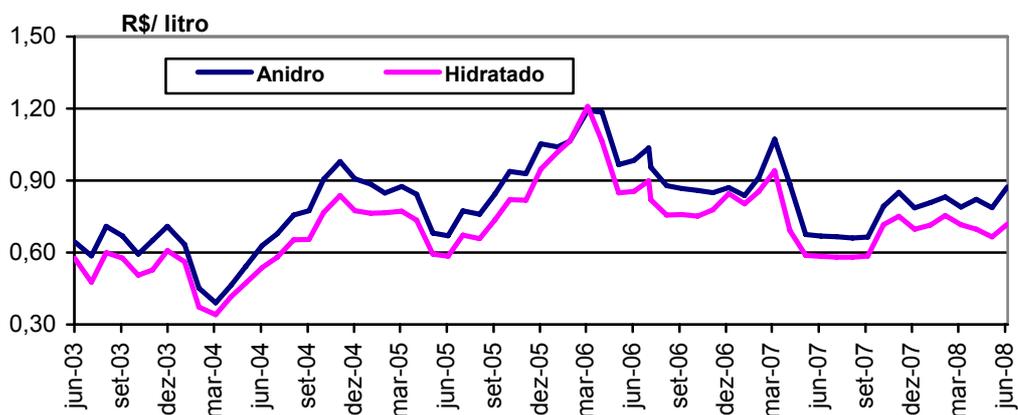


Figura A-8 – Preços de etanol anidro e hidratado no Estado de São Paulo sem impostos e frete

Uma possível expansão do mercado internacional de etanol representaria uma mudança importante para o setor. O melhor indicador da importância deste mercado é o avanço das exportações brasileiras de etanol. Estas exportações são destinadas tanto para uso combustível como industrial, incluindo a produção de bebidas.

O Japão, por exemplo, é um relevante importador de etanol para fins industriais. Contudo, a regulamentação de uma lei, em outubro de 2003, que permite a adição de até 3% de etanol à gasolina, pode fazer com que o país torne-se um importante importador de etanol anidro em pouco tempo.

Iniciativas desta natureza têm sido feitas por vários países, inclusive com incentivos fiscais para o uso do etanol combustível. Assim, a expansão do mercado de etanol surge como uma importante alternativa a ser explorada pelo setor. A figura A-9 mostra o avanço das exportações brasileiras neste mercado.

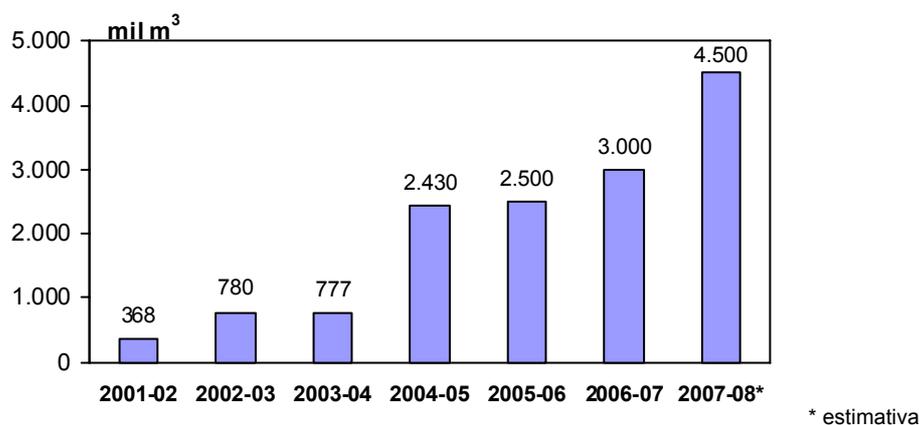


Figura A-9 – Exportações brasileiras de etanol

As exportações na safra de 2004-05 triplicaram em relação ao ano anterior. Os Estados Unidos são os maiores importadores (592,7 mil m<sup>3</sup> em 2004), apesar da taxa sobre o etanol importado. Algumas usinas utilizam-se da estratégia de enviar etanol hidratado para usinas do Caribe, onde, após uma desidratação para obter-se o anidro, podem ser exportados para os EUA, em condição mais vantajosa. Contudo, algo perto de 70% da exportação é feita por venda direta, o que comprova o grande potencial competitivo do etanol brasileiro. Outros importadores importantes são Suécia, Japão, Nigéria, Coréia e Índia [Torquato e Perez, 2006].

Por fim, vale ressaltar que o mercado de etanol depende dos mercados de açúcar, pois um aumento de preço do açúcar desestimula a produção do álcool e de combustíveis automotivos, notadamente com o aumento da flexibilidade de substituição em motores a gasolina. O mercado interno é muito sensível a diferenças de preço entre gasolina e etanol. Quando o preço do etanol fica inferior a 70% do preço da gasolina, sua demanda tende a aumentar.

### Expansão do Consumo Mundial

As perspectivas de expansão do consumo mundial estão relacionadas, basicamente, às restrições ambientais compactuadas no Protocolo de Quioto e à procura de alternativas mais econômicas ao uso dos derivados de petróleo. A mistura do etanol anidro na gasolina atende muito bem a estas duas questões e o etanol carburante tem sido objeto de interesse de vários países, como a tabela A-6 permite observar, mostrando aqueles que já usam o combustível, bem como aqueles que o vem estudando ou em teste.

Tabela A-6 – Países com experiência na utilização de etanol na gasolina com percentuais das misturas

<i>Uso</i>	<i>TESTE</i>	<i>ESTUDO</i>	
Brasil – 25%	Canadá – 10%	México – 10%	Suíça
Estados Unidos – 10%	Colômbia – 10%	Cuba – 10%	Rússia
Suécia – >10%	Peru – >10%	Uruguai – 10%	China
Índia – 5%	Paraguai – 10%	Argentina – 10%	Japão – 3%
Tailândia – 10%	África do Sul – 10%	Inglaterra – 5%	Filipinas
	Austrália – 10%	Alemanha – 5%	Nova Zelândia
		França – 5%	

A adição do etanol à gasolina representará um enorme aumento na demanda pelo produto, a qual dependerá, evidentemente, dos níveis de mistura adotados em cada país.

Apenas como exercício para dimensionar o que pode representar este mercado, a tabela A-7 mostra os volumes de etanol necessários para diferentes índices de mistura em um grupo de países selecionados. Apenas os EUA exigiriam uma oferta maior do que a capacidade atual de produção brasileira para um índice de mistura de 3% [Petrobras, 2005]

Tabela A-7 – Estimativa de demanda potencial de etanol para adição à gasolina

mil m <sup>3</sup> por ano	Índice de mistura			
	3%	5%	10%	20%
Japão	1.781	2.969	5.937	11.874
China	1.551	2.585	5.170	10.340
Alemanha	1.000	1.667	3.334	6.668
Itália	632	1.053	2.107	4.214
França	483	805	1.610	3.220
Espanha	327	546	1.092	2.184
Holanda	166	277	553	1.106
<b>Total</b>	<b>5.940</b>	<b>9.902</b>	<b>19.803</b>	<b>39.606</b>
USA	16.192	26.986	<b>53.972</b>	107.944

## Novos Investimentos de Usinas de Etanol no Brasil

A expansão do consumo de etanol projetada para os próximos anos aponta a necessidade de dobrar a capacidade de produção até 2010, com mais 15 bilhões de litros anuais e investimentos da ordem de R\$ 50 bilhões. Este acréscimo atenderia à expansão do mercado interno e às novas exportações.

O avanço dos carros flex-fuel, o interesse dos estrangeiros pelo etanol brasileiro e a disparada nos preços internacionais do açúcar levaram à multiplicação dos investimentos em usinas no Brasil. Levantamento da União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (Única) mostra que pelo menos 89 novas fábricas devem entrar em operação nos próximos cinco anos, num investimento total de US\$ 10 bilhões.

Esse mercado tem despertado o interesse de investidores estrangeiros. Analistas do setor dizem que grandes empresas do agronegócio mundial, como a americana Cargill e as alemãs Nordzucker e Sudzucker, já demonstraram interesse em investir na produção de açúcar e etanol no Brasil, assim como grupos de “private equity” (investidores de longo prazo), sobretudo europeu.

Desde 2000, grupos franceses como Tereos e Dreyfus/Coimbra adquiriram participações em empresas brasileiras, mas, nos últimos anos, o ritmo de compras diminuiu porque os preços do açúcar e do etanol subiram muito. De acordo com informações dos próprios usineiros, os valores negociados variam de 60 até 100 US\$/tonelada de capacidade instalada de moagem de cana. O valor final depende das facilidades disponíveis na usina e fora dela, como centrais de geração de energia elétrica para exportação e terminais para armazenamento e transferência de açúcar e/ou etanol.

### A.1.3 Novas Tecnologias – Etanol Celulósico

Etanol pode ser produzido de material celulósico, além dos processos tradicionais de fermentação de açúcares da cana ou de amidos contidos em grãos como o milho [Environment Canada, 1999].

A celulose é o principal componente presente em todas as plantas, sendo o composto orgânico mais comum existente na terra. Etanol produzido a partir da celulose aumentaria substancialmente os tipos e quantidades de matérias-primas disponíveis. O rol inclui o bagaço e palha de cana, como também diversos outros como, por exemplo, cavaco de madeira, casca de arroz, sabugo

de milho, ou, então, qualquer plantação de crescimento rápido voltada para produção de energia, como florestas plantadas de pinheiros e gramíneas específicas.

No entanto, quebrar as moléculas destes materiais e convertê-las em açúcar é onde reside a grande dificuldade de todo o processo. A principal rota tecnológica atual para se ter sucesso na empreitada é o da hidrólise, onde as cadeias de celulose são quebradas em moléculas de açúcar que, por sua vez, são fermentadas e destiladas. . O processo é composto por cinco etapas, descritas sucintamente a seguir:

1. **Pré-tratamento:** etapa opcional, quando o material é pré-aquecido e misturado a um ácido para torná-lo acessível à hidrólise;
2. **Hidrólise:** etapa que dá nome ao processo, durante a qual a celulose é decomposta em moléculas menores de açúcares;
3. **Separação:** a solução rica em açúcares é separada dos resíduos do processo, lignina, em especial;
4. **Fermentação:** por meio da ação de leveduras, os açúcares são transformados em etanol.
5. **Destilação:** separa-se o álcool dos demais componentes do vinho, principalmente água.

A hidrólise propriamente dita pode ser obtida através de duas formas: reação química utilizando soluções ácidas ou reação enzimática.

A hidrólise química existe desde o final do século XIX, sendo efetuada pelo ataque da celulose com um ácido a temperaturas e pressões elevadas. Variações modernas do processo são exploradas até os dias de hoje, inclusive pelo Grupo Dedini de Piracicaba, que em 2003 lançou o processo DHR de hidrólise rápida que permite a utilização do bagaço e da palha da cana para a produção de etanol. No atual estágio de desenvolvimento, a produtividade é de 50 a 60 litros de álcool desidratado por tonelada de bagaço in natura (50% umidade). O custo de produção é equivalente ao método tradicional, podendo reduzir-se futuramente, segundo os detentores da tecnologia.

Já no processo enzimático a reação tenta reproduzir em laboratório o mesmo que animais ruminantes, como caprinos e gado, fazem com materiais

celulósicos por meio de enzimas produzidas por bactérias presentes em seus estômagos: extrair energia para a sua sobrevivência.

A reação ocorre a temperaturas ambientes e as cadeias celulósicas são reduzidas a açúcares sob a ação de enzimas chamadas genericamente do tipo celulase. Três variedades desta enzima são utilizadas nos vários estágios de conversão e, logicamente, todo o processo depende de um suprimento contínuo das enzimas.

As pesquisas atuais concentram-se principalmente na redução do custo de produção dessas enzimas. A canadense IOGEN é uma das empresas líder mundial no assunto, mas diversas outras corporações, inclusive a Petrobras, no Brasil, mantêm linhas de pesquisa nesta área. A meta de produção de etanol por tonelada de bagaço seco desta rota é da ordem de 300 litros, o equivalente a 150 litros de etanol anidro por tonelada de bagaço in natura (50% umidade).

Caso a introdução deste processo seja bem sucedida, abre-se uma perspectiva inigualável para a cana-de-açúcar, pois a produção de bagaço é da ordem de 100 milhões de toneladas com 50% de umidade, por safra. A produção de palha gira em torno de 65% da do bagaço, já considerando que a umidade retida, depois da colheita, tende a cair para valores muito inferiores, da ordem de 25%.

Se, por exemplo, todo esse material fosse convertido em etanol através da hidrólise rápida da Dedini, o potencial de produção seria de 50 litros x 100 milhões, ou 5 bilhões de litros de etanol disponibilizados para o mercado por ano, sem o aumento de um hectare sequer de cana-de-açúcar nova plantada. Isto representa um aumento da oferta de etanol em mais de 35%. Nesse caso, a palha deveria substituir o bagaço como combustível primordial das usinas, tornando o balanço energético das usinas ainda mais competitivo.

#### **A.1.4 Logística para escoamento da produção de etanol**

A produção de etanol a partir da cana-de-açúcar limita sua área de abrangência à região tropical. No Brasil as plantações não são feitas abaixo do paralelo 24°, pois elas ficam sujeitas à ação de geadas durante o inverno, fator limitante à sobrevivência da planta. Como apenas uma parte da região sul do país encontra-se localizado abaixo dessa linha (Rio Grande do Sul, Santa Catarina e parte sul/sudoeste do Paraná), existe o potencial de distribuir-se a

produção ao longo do país, evitando-se o deslocamento de grandes quantidades de combustível.

No entanto, a produção de etanol encontra-se muito concentrada na região noroeste de São Paulo, que é também o estado brasileiro maior consumidor de etanol e gasolina. O atendimento de mercados mais longínquos, como o norte do Brasil, por exemplo, exige modal diferente do transporte rodoviário, reduzindo o custo final de logística e o tráfego de caminhões nas rodovias.

Os vários terminais marítimos para operação de navios de grande porte para exportação da produção de etanol das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, proporcionaram grande competitividade ao Brasil e essa estratégia deverá ser ampliada no caso de desejarmos atender à demanda do mercado externo.

A capacidade estática atual de movimentação de etanol é da ordem de 1.240 m<sup>3</sup>/mês e já está atingindo o seu limite. Por porto, os volumes estão indicados a seguir [Petrobras, 2005]:

- Cabedelo – PB: 38 mil m<sup>3</sup>/mês
- Suape – PE: 700 mil m<sup>3</sup>/mês
- Maceió – AL: 29 mil m<sup>3</sup>/mês
- Vitória – ES: 40 mil m<sup>3</sup>/mês
- Rio de Janeiro – RJ: 40 mil m<sup>3</sup>/mês
- Santos – SP: 295 mil m<sup>3</sup>/mês
- Paranaguá – PR: 100 mil m<sup>3</sup>/mês

Também a capacidade de armazenamento disponibilizada pela Petrobras permitiu a regularização do mercado interno durante o Pró-álcool e a sua ampliação provavelmente permitirá fazê-la operar intensamente no mercado externo de etanol.

A infra-estrutura de transporte compõe-se do conjunto das instalações que vão desde o produtor até os tanques nas bases das companhias distribuidoras. Por sua vez, a infra-estrutura de distribuição contempla os ativos destas bases até os postos de abastecimento e, por fim, o consumidor final [Petrobras, 2005].

A Petrobras e sua subsidiária, Petrobras Distribuidora, contam com uma extensa e bem ramificada rede logística para captação, armazenamento,

transporte e distribuição de etanol no país, o que foi fator fundamental para o sucesso da implantação do Pró-Álcool. A tabela A-8 relaciona os terminais marítimos, fluviais e lacustres de propriedade da Petrobras, que movimentam etanol, indicando a capacidade de armazenamento.

Tabela A-8 - Terminais marítimos e fluviais da Petrobras para etanol

Terminal	Localidade	Armazenagem para etanol (m <sup>3</sup> )
Alm. Tamandaré	Ilha d'Água (RJ)	0*
Cabedelo	Cabedelo (PB)	5.372
Dunas	Natal (RN)	19.798
Maceió	Maceió (AL)	31.855
Madre de Deus	Ilha Madre Deus (BA)	20.833
Miramar	Belém (PA)	23.900
REMAN	Manaus (AM)	9.000
Suape	Ipojuca (PE)	31.396
Vitória	Vitória (ES)	12.400
Total		154.554

\* Somente para recebimento e transferência, sem armazenagem própria.

A tabela A-9 relaciona, por sua vez, os terminais terrestres de propriedade da Petrobras, que movimentam etanol. O número de terminais terrestres é muito maior do que o de terminais marítimos, em função da concentração da produção de etanol no estado de São Paulo o que demanda o seu transporte para outras regiões.

Tabela A-9 - Terminais terrestres da Petrobras para etanol

Terminal	UF	Armazenagem para etanol (m <sup>3</sup> )
Barueri	SP	44.751
Candeias	BA	21.480
Cubatão	SP	6.252
Florianópolis	SC	12.294
Guararema	SP	505.302
Guarulhos	SP	47.385
Itabuna	BA	4.520
Itajaí	SC	12.187
Jequié	BA	4.533
Joinville	SC	5.325
Juiz de Fora	MG	1.080
São Gonçalo	RJ	2.430
Uberaba	MG	11.340
Uberlândia	MG	4.200
Utinga	SP	59.121
Volta Redonda	RJ	5.183
Total		747.383

Os centros coletores de etanol são terminais para armazenamento exclusivo de etanol, geralmente localizados em importantes regiões de produção. Estes centros coletores podem, durante a entressafra, servir para a formação de

estoques estratégicos e eles voltaram a operar em virtude do aquecimento do mercado de etanol no Brasil visando à exportação.

No Estado de São Paulo, por exemplo, recebem o etanol dos produtores pelo modal rodoviário e, através da malha ferroviária ou meio de dutos, podem atingir os portos de Paranaguá e Santos (trem) e Rio de Janeiro (por duto), reduzindo o custo de logística e tornando a operação mais competitiva. A relação dos centros coletores de propriedade da Petrobras Distribuidora é apresentada na tabela A-10.

Tabela A-10 - Centros coletores de etanol

Centro Coletor	UF	Modalidade *						Capacidade Etanol (m <sup>3</sup> )	
		rodoviário		ferroviário		dutoviário		tanques	Volume
		R	C	R	C	R	C		
Aracajú	SE							2	10.753
Araraquara	SP							2	10.000
Bauru	SP							2	10.000
Betim	MG							nd **	Nd
Brasília	DF							3	15.000
Campos	RJ							5	10.023
Londrina	PR							2	10.000
Ourinhos	SP							4	20.000
Santa Adélia	SP							2	10.000
Sertãozinho	SP							2	10.000
TOTAL									105.776

\* Para modalidade: R, recebimento; C, carregamento

\*\* Este terminal utiliza a tancagem da Refinaria Gabriel Passos - REGAP

A capacidade total de armazenamento de etanol de todos estes terminais e centros de coleta supera 1 milhão de m<sup>3</sup>, suficiente para estocar quase um mês da quantidade que é consumida por ano no país.

Finalmente, no sentido de atender o mercado exportador de etanol, algumas empresas planejam construir dutos entre as zonas produtoras e os portos marítimos.

A Transpetro<sup>32</sup>, em associação com a Hidrovia Tietê-Paraná, elaborou um plano de ampliação da malha de dutos para escoar a produção excedente das regiões produtoras do Centro-Sul através dos portos do Rio de Janeiro e São Sebastião. A capacidade total de transferência para os dois portos atingiria 8 milhões m<sup>3</sup>/ano, conforme detalhado na figura A-10 e tabela A-11.

<sup>32</sup> Subsidiária da Petrobras



Figura A-10 – Programa corredor de exportação de etanol da TRANSPETRO

Tabela A-11 – Projetos para escoamento da produo de etanol do Centro-Sul

Projeto	Duto de Etanol	Capacidade
A	REPLAN* - Terminal Guararema – Ilha D’gua	4 milhões m <sup>3</sup> /ano
B	REPLAN - Hidrovia Tietê – Paraná	4 milhões m <sup>3</sup> /ano
C	Uberaba - Ribeirão Preto - REPLAN	6 milhões m <sup>3</sup> /ano
D	Senador Canedo - São Sebastião	4 milhões m <sup>3</sup> /ano

\* Refinaria do Planalto Paulista em Paulínia, São Paulo

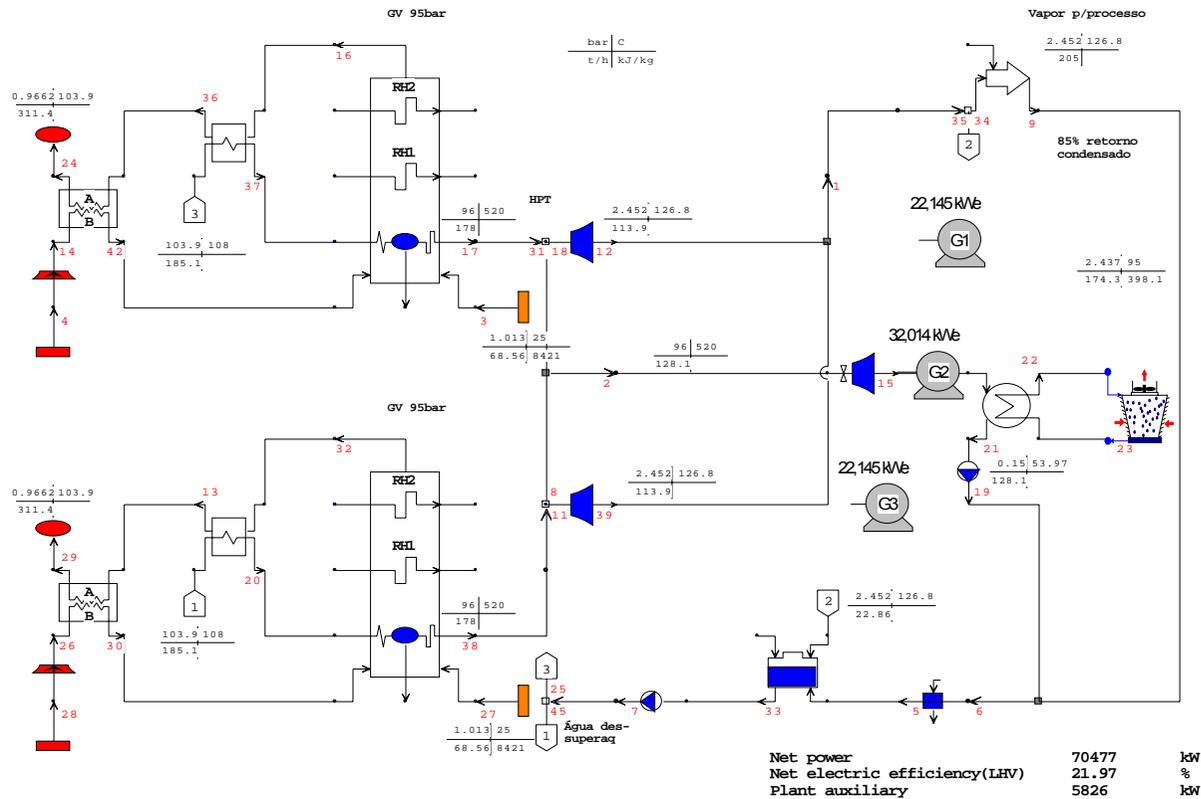
Esses projetos estão condicionados ao desenvolvimento da produo de etanol e do mercado externo, devendo haver uma sincronia de implantao do corredor de exporto com essas duas evoluções. O investimento total previsto será de US\$ 660 milhões com previsão para ser implantado até 2011.

A Brenco – Companhia Brasileira de Energia Renovável elegeu o sistema dutoviário como sua alternativa preferencial de transporte para o escoamento do etanol produzido em suas unidades. A rota traçada de 1.120 km conecta Alto Taquari (MT) ao Porto de Santos (SP), passando pelos Estados de Mato Grosso do Sul e São Paulo, com investimento previsto de US\$ 1 bilhão e capacidade de transporte de aproximadamente 7 milhões de m<sup>3</sup> por ano. O projeto está previsto para entrar em operao em julho de 2011.

### A.1.5 Fluxograma de Processo - geração máxima de energia elétrica em usina de álcool durante a safra

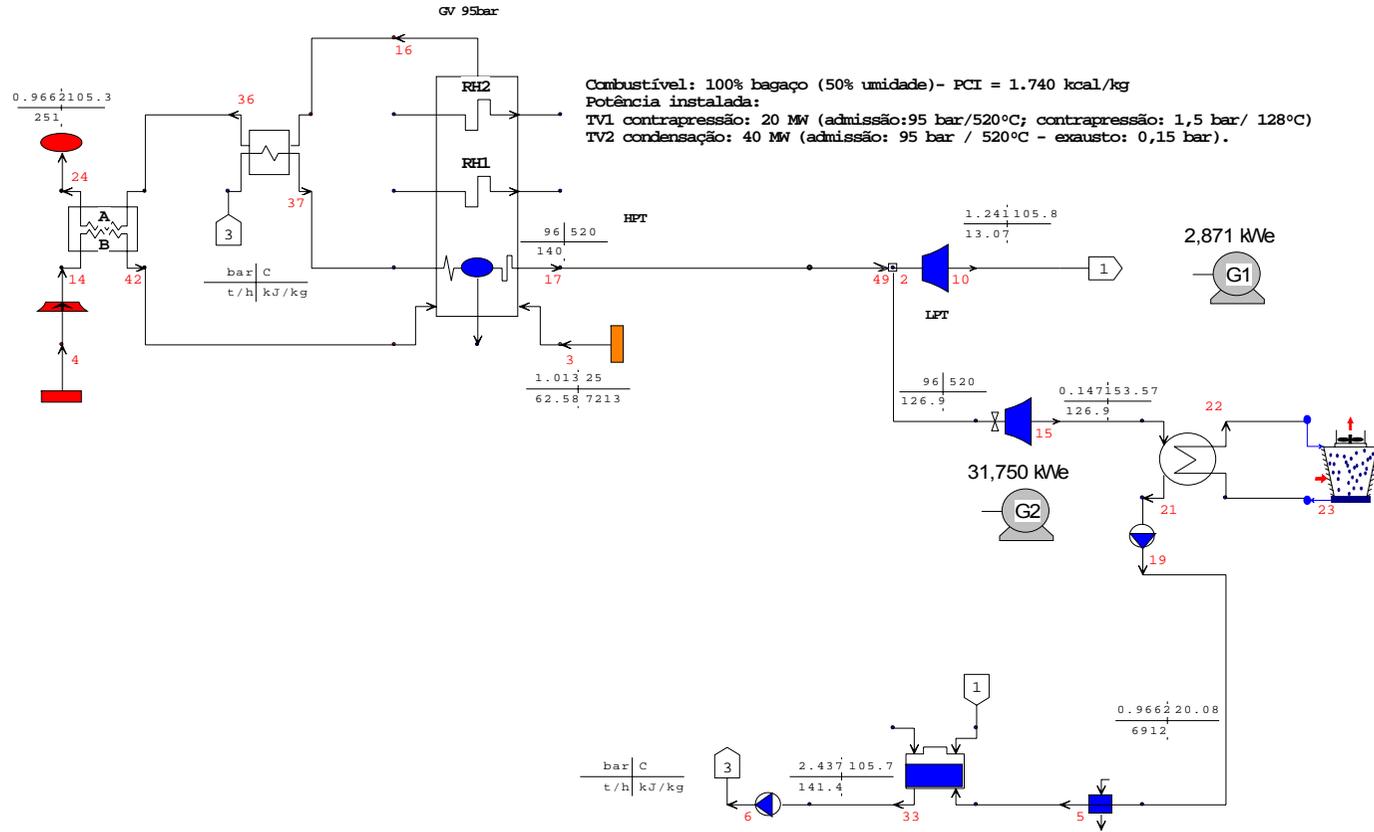
USINA MÁXIMA GERAÇÃO - BALANÇO SAFRA - CALDEIRA 95bar/520°C

Moagem: 2.100.000 t cana/ano; consumo vapor: 408 kg vapor/t cana moída;  
 Combustível: 75% bagaço (50% umidade)- PCI = 1.740 kcal/kg + 25% palha (25% umidade)- PCI = 3.020 kcal/kg;  
 Potência mecânica consumida nas moendas: 0 kW; consumo próprio E.E. da usina: 15.000 kW;  
 Potência instalada:  
 TV1 contrapressão: 2 x 20 MW (admissão: 95 bar/490°C; contrapressão: 1,5 bar/ 128°C)  
 TV2 condensação: 20 MW (admissão: 95 bar / 490°C - exausto: 0,15 bar).



**A.1.6 Fluxograma de Processo - geração máxima de energia elétrica em usina de álcool durante a entressafra**

USINA MÁXIMA GERAÇÃO - BALANÇO ENTRESSAFRA - CALDEIRA 95bar/520°C



## A.2 CARACTERÍSTICAS DAS PRINCIPAIS OLEAGINOSAS NO BRASIL

### A.2.1 Soja

A produção de óleo de soja é a mais desenvolvida do país, representando em torno de 90% do total do óleo produzido no Brasil, o que se traduz em diversos ganhos de logística e redução de custos no uso desta matéria prima. O teor de óleo no grão está na faixa de 18 a 20%. O óleo utilizado serve, principalmente, para a alimentação humana. Aproximadamente 45 % da produção de óleo de soja são exportados. O farelo é composto de proteína e serve, principalmente, para a alimentação animal [ABIOVE, 2006].

O óleo de soja é o único que tem disponibilidade imediata para produção de biodiesel no moldes do que pretende o governo federal.

Por exemplo, em 2004 houve uma exportação de 2.400 mil t de óleo e de 19.000 mil t de grãos. Caso esses grãos tivessem sido esmagados no país, gerariam mais 3.400 mil t de óleo e 15.600 mil t de farelo, com grande potencial de exportação como ração animal, devido ao desenvolvimento do mal da vaca-louca na Europa. Da tabela A-12, percebe-se que este padrão tem até mesmo se ampliado

Tabela A-12 – Disponibilidade de matéria-prima por safra – mil t

	2003/2004	2004/2005	2005/2006
Produção de soja em grão	51.600	50.085	52.600
Produção de óleo de soja	5.350	5.550	5.650

Essa produção adicional de óleo bruto poderia ter sido transformada em biodiesel, o que representaria 10% do volume consumido de óleo diesel em 2004, igual a 34.000 toneladas. Além disso, mais de 45% da produção de soja no Brasil se dá na região Centro-Oeste, que não tem produção própria de óleo diesel. Ou seja, uma alternativa para produção in loco do combustível evitaria o frete para levá-lo dos centros produtores do sudeste.

### A.2.2 Palma

A palma, conhecida no Brasil como palmeira de óleo de dendê, é a oleaginosa mais produtiva do mundo, chegando a atingir 5000 kg de óleo/ha plantado. Devido às plantações realizadas em larga escala no sudoeste asiático, na Malásia e Indonésia, os preços vinham decrescendo, mas, assim como

ocorreu com todas as oleaginosas, eles aumentaram substancialmente em 2006 e 2007 (vide figura A-15).

No Brasil, a palmeira de dendê, originária da África, foi introduzida pelos escravos, que utilizavam o óleo de palma para fabricar azeite, ficando este conhecido como azeite de dendê. É no fruto da palmeira que se encontra o interesse comercial da planta. De sua polpa se extrai o óleo de palma e, da amêndoa, o óleo de palmiste. Desde a semente até a produção de óleo refinado e gordura orgânica, não se utiliza qualquer tipo de fertilizante, herbicida ou reagente químico e, ao contrário da soja e algumas outras oleaginosas, a palma é uma cultura perene.

A plantação começa a produzir a partir do terceiro ano de vida, atingindo o rendimento máximo na idade de 7 a 12 anos e fica produtiva por até 25 anos. Essa é uma das culturas mais adequadas para a região amazônica. Uma vantagem adicional da sua adoção consiste nos resultados ambientais e sociais obtidos com o reflorestamento de áreas desmatadas da Amazônia, já que seu plantio não necessita de uma preparação do solo com remoção da floresta, como a soja. Além disso, o clima da Amazônia, com até 3,5 mil milímetros de chuvas anuais, é extremamente propício para o desenvolvimento de palmáceas [ABOISSA, 2006].

O Estado do Pará possui 5 milhões de hectares de terras aptas para o cultivo de dendê, o dobro do espaço utilizado hoje pela Malásia. Entretanto, atualmente, a área cultivada é de 45.000 ha, com uma produção de 118 mil t de óleo.

Enquanto o cultivo da soja gera um emprego para cada 120 ha plantados, o dendê emprega uma pessoa a cada 10 ha, o que o classifica como uma cultura intensiva em mão-de-obra. A limitação de tempo inerente às culturas permanentes dificulta a escolha definitiva dessa oleaginosa como matéria-prima de biodiesel, pois os investimentos somente começam a retornar 5 anos após o plantio.

### **A.2.3 Mamona**

A mamona também é uma planta originária da África, possui espécies diferentes e suas sementes têm alto teor de óleo. Sua produtividade em condições adequadas alcança valores em torno de 1.500 kg/ha, embora a média

de produtividade nacional situe-se abaixo de 900 kg/ha. Sob irrigação, ainda não se dispõe de informações confiáveis de pesquisa de campo, mas estima-se que a produtividade possa atingir entre 2.500 a 3.500 kg/ha. O plantio de 1 hectare consome aproximadamente 10 kg de semente [ABOISSA, 2006].

Da industrialização da mamona obtém-se, como produto principal, o óleo, o mais importante constituinte da semente de mamona, sendo o ácido ricinoléico o seu maior componente. Além disso, é um óleo bastante estável em variadas condições de pressão e temperatura. Devido a este fato é um produto altamente valorizado no mercado mundial, cujo preço está em torno de US\$ 2.000/t. Sua utilização se dá principalmente na produção de lubrificantes para motores de alta rotação, bastante utilizado na indústria aeronáutica, como também para produção de nylon, tintas e cosméticos. Os principais produtores mundiais são Índia, China e Brasil. O Brasil já foi o maior produtor mundial de óleo de mamona.

Praticamente toda a produção da mamona é industrializada. Além do óleo, a torta de mamona tem grande capacidade de restauração de terras esgotadas. A principal aplicação da torta ainda é como fertilizante, constituindo-se num adubo orgânico nitrogenado de primeira categoria, sendo usada na base de duas a três toneladas por hectare.

A torta da mamona, por ser muito venenosa devido à ricina presente, só pode ser utilizada como ração animal depois de desintoxicada, em um processo complexo e caro. Devido a este fato, as usinas de óleo vendem a torta apenas como fertilizante.

O teor de óleo nas sementes das variedades comerciais da mamona pode variar entre 40 a 60%, sendo bastante freqüente a oferta comercial de sementes com teores de 48 % de óleo e mais recentemente com 54 % (cultivar Mirante 10)<sup>33</sup>.

A capacidade de resistência à seca é uma das principais características da mamoneira e razão para seu cultivo ser viável na região semi-árida do Nordeste. No entanto, a cultura exige pelo menos 500mm de chuva nas fases de crescimento e floração para que ela atinja uma produtividade satisfatória.

---

<sup>33</sup> Variedade híbrida de vegetal obtida mediante cultivo. [termo criado para estabelecer a distinção entre o híbrido cultivado e o híbrido silvestre]

No Brasil, a produção está concentrada principalmente na região semi-árida da Bahia, que responde por mais 80% do total produzido no país (202.000 t em 2004). A produção mundial é de 1,15 milhões de toneladas. A grande maioria das lavouras de mamona no Nordeste é conduzida por agricultores familiares, que costumam consorciar a lavoura com culturas alimentares - principalmente o feijão, aumentando a segurança alimentar do produtor e diversificando sua renda. A rotação e sucessão de culturas em uma mesma área evitam as pragas, como o percevejo verde, e doenças específicas da mamona, que se acumulam a cada ciclo, assim como a exaustão dos nutrientes do solo que a mamona extrai em maior quantidade.

#### **A.2.4 Girassol**

O girassol é uma planta originária das Américas, que foi utilizada como alimento, pelos índios americanos, em mistura com outros vegetais. No século XVI, o girassol foi levado para a Europa e Ásia, onde era utilizado como uma planta ornamental e como uma hortaliça.

Na antiga União Soviética iniciou-se o melhoramento do cultivo com enfoque dado à seleção de plantas com sementes e capítulos grandes, para produzir genótipos com altos teores de óleo. Desde então, com o crescimento do consumo de óleo comestível, a produção mundial de girassol tem evoluído, sendo liderada pela Rússia, Ucrânia, Estados Unidos, Argentina e China. Atualmente, o girassol ocupa o quarto lugar como fonte de óleo comestível, seguido da soja, palma e canola. Como fonte protéica, o girassol também é classificado como a quarta opção, para a ração animal e uso humano [ABOISSA, 2006].

A produção brasileira na safra 2004/05 foi de 62.500 t, plantados em 44 mil hectares. Os estados que mais se destacam são Mato Grosso e Goiás, seguido do Mato Grosso do Sul, Paraná e Rio Grande do Sul. O predomínio das plantações tanto na região Centro-Oeste como na região Sul se deve ao fato de que o girassol é uma planta versátil, tolerante tanto a baixas como a altas temperaturas.

A cultura do girassol se dá ao longo de todo o ano, reduzindo os custos de produção ao permitir um aproveitamento contínuo das unidades de transesterificação, sem a necessidade de formar, no momento da safra,

estoques de grão. Além disso, o girassol produz grãos com teores de óleo mais elevados do que o da soja.

### A.3 BIODIESEL

O uso direto de óleos vegetais em motores a ciclo Diesel comuns apresenta alguns inconvenientes, sendo o principal deles os resíduos de carbono que se depositam, provocando entupimento nos bicos injetores, conforme detalhado na tabela A-13 [FGV, 2002].

Tabela A-13 – Problemas observados na utilização de óleos vegetais in natura em motores

Problemas	Causas prováveis
<b>Curto prazo</b>	
Partida a frio	Alta viscosidade, baixo número de cetano, baixo ponto de fulgor
Entupimento de filtros, linhas e bicos injetores	Gomas naturais presentes nos óleos vegetais
Batida de motor	Baixo número de cetano
<b>Longo prazo</b>	
Formação de coque no pistão e cabeçote do motor	Alta viscosidade, combustão incompleta
Depósitos de carbono no pistão e cabeçote do motor	Alta viscosidade, combustão incompleta
Desgaste excessivo do motor	Alta viscosidade, combustão incompleta, ácidos graxos livres
Falhas na lubrificação do motor	Polimerização dos compostos poliinsaturados do óleo vegetal

Biodiesel é o nome genérico dado ao produto da reação de transesterificação de óleos vegetais, reação do óleo vegetal cru com álcool de cadeia curta – metanol ou etanol - na presença de um catalisador, que pode ser ácido ou básico, resultando em metil-éster (ou etil-éster) e glicerina, como subproduto. Nesta reação, 1 tonelada de óleo vegetal, resulta em 1 tonelada de biodiesel e 0,1 t de glicerina (vide figura III-11 – capítulo III-3.2, p.56).

O biodiesel é um óleo combustível totalmente compatível com o diesel, com algumas vantagens e desvantagens ao substituí-lo, tais como:

- Boa lubricidade, servindo como substituto do aditivo que deverá ser misturado ao óleo diesel mineral, quando o teor de enxofre, que tem características lubrificantes, baixar a concentração para atender às novas especificações restritivas de emissões;
- Bons índices de cetano e pontos de fulgor altos, mas pode apresentar problemas de desempenho a baixas temperaturas, caso a mistura com diesel exceda 30%;

- Apresenta problemas de biodegradabilidade e instabilidade, na presença de calor e umidade, que podem provocar a formação de ácidos e de outras substâncias prejudiciais ao funcionamento dos motores e
- Produz maior emissão de NO<sub>x</sub> em relação ao diesel mineral, pela maior presença de oxigênio.

A primeira especificação provisória da ASTM para biodiesel puro foi criada em 1996 e está em constante evolução. A especificação atualmente em vigor é a D-6751/2002, apresentada na tabela A-14, em comparação ao do diesel mineral [ANP, 2002]:

Tabela A-14 – Biodiesel - ASTM D-6751/2002 x diesel mineral

Propriedade	Biodiesel	Diesel Mineral
Ponto de fulgor	130 °C mín	60 °C mín
Água e sedimentos	0,050 % vol máx	0,10 % vol máx
Viscosidade cinemática, 40°C	1,9-6,0 mm <sup>2</sup> /s	1,6-6,0 mm <sup>2</sup> /s
Cinzas sulfatadas	0,02% peso máx	0,02% peso máx
Enxofre	0,05% peso Max	1,3% peso Max
Corrosividade ao cobre	3 h @ 50° C, máx	
Número de cetano	47 mín	45 mín
Ponto de névoa	-15 a 5 °C	-3 a 12 °C
Resíduo de carbono	0,05% peso máx	0,30% peso máx

A produção de biodiesel pode ser efetuada por batelada ou por método contínuo. Muitas usinas existentes hoje no país são plantas-piloto, com pequenos volumes de biodiesel obtidos por batelada. A mistura B2 (2% em volume misturado ao diesel mineral) exigiu que usinas de transesterificação por processo contínuo e com capacidades bem maiores fossem instaladas.

No entanto, ainda não existe consenso com respeito à disponibilidade de matéria-prima: quais óleos vegetais proporcionarão os melhores resultados relacionados à qualidade do combustível, produtividade e ganhos sociais na cadeia agroindustrial? O governo federal deu incentivos fiscais apenas à mamona e à palma, mesmo assim, se plantadas nas regiões norte e nordeste, preferencialmente por pequenos agricultores. Também a correta especificação do biodiesel da mamona não é tão simples de atingir. O óleo oriundo da mamona tem como característica básica uma alta viscosidade, que se mantém mesmo sob altas temperaturas, aspecto este mais adequado para aplicações de óleos lubrificantes, onde, não por acaso, este óleo atinge valores extremamente elevados no mercado internacional (vide Figura A-15).

As usinas de transesterificação têm uma capacidade instalada de, no mínimo, 40.000 t/ano, podendo atingir valores maiores, de até 200.000 t/ano. Isto porque os volumes para mistura de biodiesel alcançaram valores da ordem de 1 milhão de tonelada por ano em um prazo curto. Usinas menores não são viáveis e, para sua localização, há de se levar em conta questões estratégicas de abastecimento de grãos e distribuição do óleo produzido, sob pena desse projeto nunca atingir uma sustentabilidade econômica, mesmo com o aumento substancial da oferta de matéria-prima, conforme prevêem seus idealizadores.

O mercado de biodiesel no Brasil ainda é incipiente. Entretanto, existe uma forte vontade política para que, nos próximos anos, ocorra um grande crescimento da utilização do biodiesel no Brasil, nos moldes do que aconteceu com o álcool na década de 80, dado aos possíveis retornos na geração de empregos e renda em áreas rurais, além de benefícios ambientais.

Dois segmentos de mercado podem ser atingidos, o de aditivos, com misturas de até 30% de biodiesel ao diesel mineral, como é feito na Europa, para comercialização em postos de distribuição, atendendo às normas e especificações da ANP. O outro seria para frotas cativas, onde o total atendimento às especificações não é obrigatório, embora os fabricantes de motores tendam a não manter a garantia dos veículos.

Em função do volume adicionado de biodiesel ao óleo diesel mineral, convencionou-se uma nomenclatura da mistura resultante de **Bn**, sendo **n** o percentual em volume de biodiesel. Por exemplo, **B5** é a mistura de 5% em volume de biodiesel com 95% de óleo diesel mineral.

A disponibilidade de áreas no Brasil para plantação extensiva de novas culturas é inegável. A ocupação do território nacional por tipo de uso da terra, segundo o IBGE, está mostrada na tabela A-15 [IBGE, 2006].

Tabela A-15 – Uso da terra no Brasil

	10 <sup>6</sup> ha	mil km <sup>2</sup>	%
Floresta Amazônica	350	3.500	41,1
Pastagens	215	2.150	25,3
Áreas de proteção	55	550	6,5
Culturas anuais	47	470	5,5
Culturas permanentes	15	150	1,8
Cidades, lagos, autopistas e pântanos	20	200	2,3
Florestas cultivadas	5	50	0,6
Outros usos	54	540	6,3
Áreas cultiváveis e livres da fronteira agrícola	90	900	10,6
Total	851	8.510	100,0

Por outro lado, apesar desta disponibilidade, o desmatamento da floresta amazônica ainda apresenta volumes anuais surpreendentes, penalizando o Brasil no cenário mundial de emissão de gases de efeito estufa.

O Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), monitora por satélite o desmatamento na Amazônia Legal desde 1988. A área média de floresta queimada por ano durante esse período foi da ordem de 20.000 km<sup>2</sup>, conforme mostrado na figura A-11, suficiente para plantar metade da soja ou de mamona necessária para produção do B5, considerando um consumo aproximado de 40.000 mil m<sup>3</sup>/ano de óleo diesel (vide figura A-12) [INPE, 2006].



Figura A-11 – Desmatamento anual na Amazônia Legal

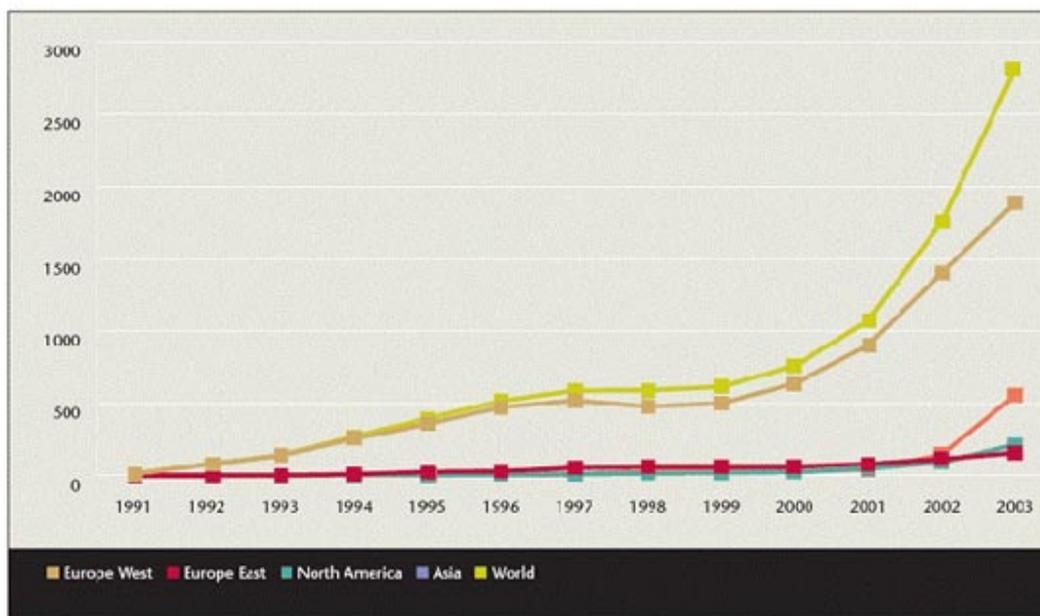


Figura A-12 – Áreas de soja e mamona necessárias para suprir o atual mercado B5

**SUBPRODUTOS DO PROCESSAMENTO DAS OLEAGINOSAS**

**Glicerina:** subproduto de maior valor agregado, resultante da produção de biodiesel por transesterificação, cuja comercialização pode ser decisiva para a sua viabilização econômica. Para cada 100 kg de biodiesel produzidos, são gerados, aproximadamente, 10 kg de glicerina, cujos principais usos estão na produção de cosméticos, sabão e fármacos (~30%), poligliceróis (~15%), resinas (~8%), produtos de alimentação (8%), cigarros (5%), filmes de celulose (5%), outros (explosivos, ésteres etc.), totalizando um consumo mundial de, aproximadamente, 750.000 t/ano [BiodieselBR, 2006].

Cabe ressaltar que essas são as aplicações para um mercado onde o valor da glicerina atinja muitas vezes valores superiores a 1.000 US\$/t. Informações recentes revelam uma forte tendência de queda, devido ao aumento da produção de biodiesel na Europa, atingindo valores abaixo de 400 US\$/t, para glicerina bruta (vide figuras A-13 e A-14) [BiodieselBR, 2006].



World biodiesel production. Copyright: Austrian Biofuels Institute.

Figura A-13 - Evolução da produção mundial de biodiesel - mil m³ /ano

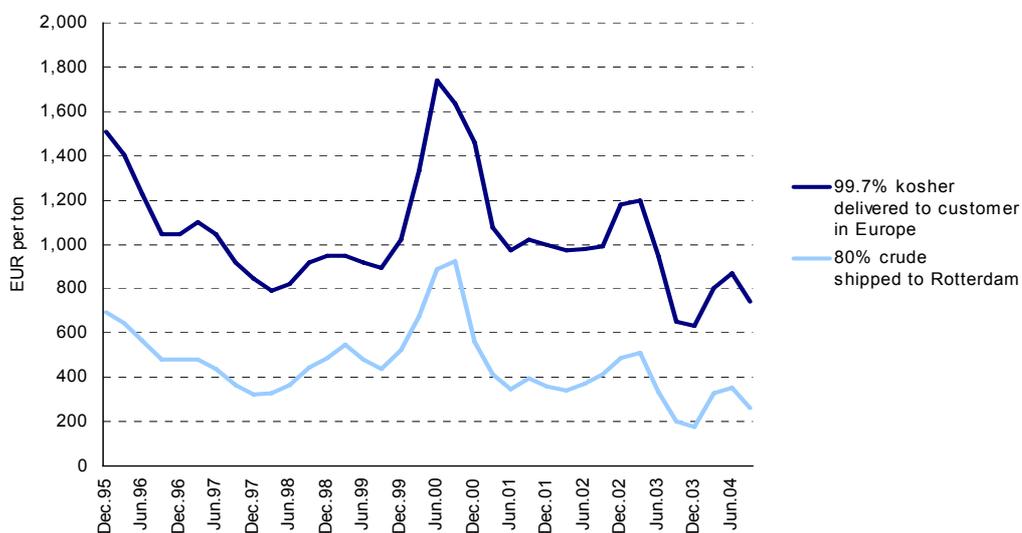


Figura A-14 – Preços de glicerina pura e bruta

Uma grande redução do preço da glicerina poderá criar novas oportunidades de aplicação, dado que, a simples implantação da mistura B5 no Brasil implicará em um aumento da produção de cerca de 200.000 t/ano, o que representaria aproximadamente 27% do consumo mundial atual.

Novas rotas de aproveitamento da glicerina estão sendo pesquisadas, entre as quais se destacam:

- Neutralização da acidez de petróleo
- Hidrogenação do glicerol para produção de propanodiol
- Condensação para produção de poligliceróis
- Desidratação para produção de acroleína/ácido acrílico
- Hidrogenólise para produção de metanol e etileno-glicol
- Esterificação com alcoóis para produção de aditivos para o diesel
- Produção de carbonato de glicerol e
- Esterificação com ácidos graxos para produção de emulsificantes.

### **Co-produtos do biodiesel produzido a partir do grão de soja**

O Brasil é o maior exportador mundial de farelo de soja e o segundo maior exportador de óleo de soja. União Européia, Rússia, Leste Europeu e Japão são os maiores importadores de farelo. Devido à “doença da vaca louca” houve um aumento do consumo do farelo na Europa, como ingrediente de rações animais e, com isso, uma tendência do óleo se tornar um subproduto que viabilizaria a produção de biodiesel.

### **Co-produtos do biodiesel produzido a partir da semente de mamona**

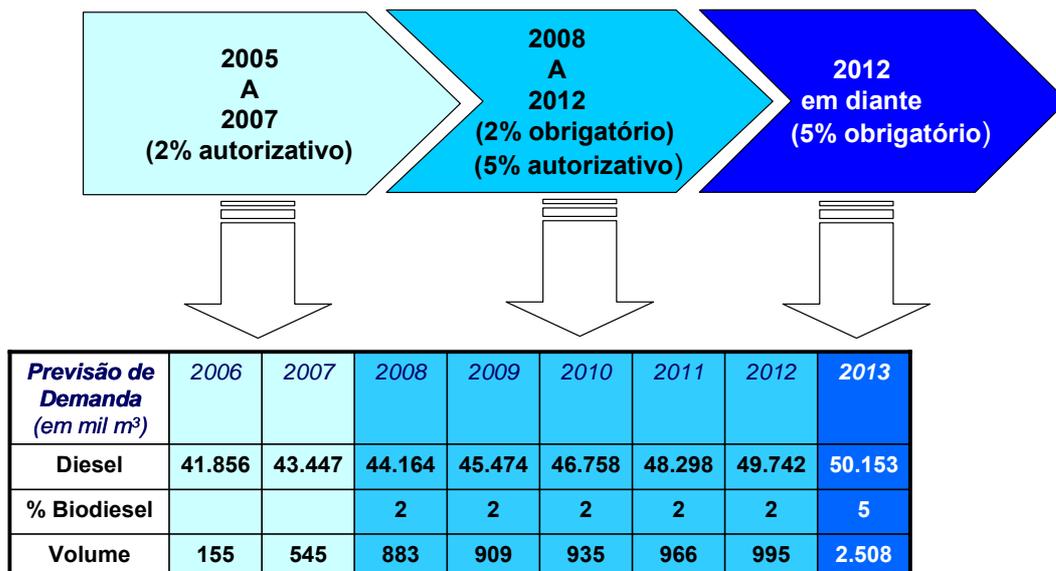
O principal subproduto resultante da extração do óleo da semente de mamona é a torta, composta pela casca e pela polpa. A casca serve como fertilizante para a agricultura por sua riqueza em nitrogênio e a polpa é conhecida por sua propriedade de controlar nematóides do solo, isto é, pequenos organismos que atacam raízes e plantas.

Atualmente, a polpa da mamona não pode ser utilizada em ração para animais devido à presença de substâncias tóxicas - a proteína ricina, o alcalóide ricinina e uma proteína alergênica. Acredita-se que seja possível desintoxicar a polpa e torná-la um produto de alto valor comercial. Enquanto a torta de mamona está sendo vendida atualmente por R\$ 300,00/t, a torta de algodão atinge valores de até R\$ 700,00/t. Uma alternativa de aumentar o valor agregado seria o de aprofundar o conhecimento da capacidade da polpa de controlar nematóides e outras pragas, e vendê-la como produto destinado à agricultura orgânica.

### A.3.1 Produção, Preços e Mercados para Óleos Vegetais

O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel, pela Lei 11.097 de 13/01/2005, prevê a obrigatoriedade da mistura de biodiesel ao óleo diesel segundo uma curva ascendente ao longo dos anos, até se chegar ao B5, em 2013, conforme mostrado na tabela A-16, com estimativas dos volumes que deverão ser produzidos [Petrobras, 2006].

Tabela A-16 – Volumes estimados de biodiesel até 2010



O mercado estabelecido para o biodiesel no Brasil ainda é incipiente, mas os preços de diversos óleos vegetais, mostrados na figura A-15, já indicam que eles são historicamente altos, o que tornará o custo de produção de biodiesel muito mais alto se comparado ao valor do diesel mineral [Uniamérica, 2006].

Devido a este fato o governo criou incentivos fiscais para viabilização da produção (vide tabela A-17). Os incentivos estão direcionados principalmente para a mamona e para a palma, plantados nas regiões norte e nordeste, por pequenos produtores rurais. Quanto ao ICMS, espera-se que, provavelmente, os estados decidam por uma isenção para o biodiesel. Mesmo assim, eles não são suficientes, por si só, para tornar o biodiesel competitivo frente ao óleo diesel mineral.

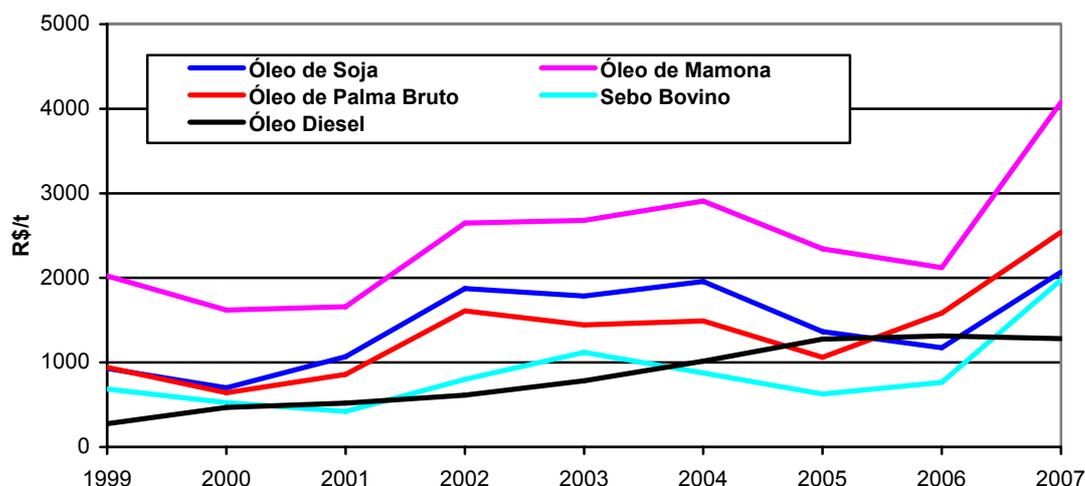
Figura A-15 – Preço médio de óleos vegetais<sup>34</sup>

Tabela A-17 – Impostos federais para biodiesel – R\$/ tonelada

		Mamona / Palma		Outras Oleaginosas	
		Norte / NE ou semi-árido	Outras regiões	Norte / NE ou semi-árido	Outras regiões
Agricultura Comercial	PIS/PASEP	27,03	39,65	39,65	39,65
	COFINS	124,47	182,55	182,55	182,55
Agricultura Familiar	PIS/PASEP	0	12,49	12,49	12,49
	COFINS	0	57,53	57,53	57,53

Tabela A-18 – Preço do biodiesel em R\$/t x preço do óleo diesel<sup>35</sup>

Oleaginosa	R\$/ t óleo veg. *	PIS/COFINS	R\$/ t B100**	Total	
Soja	1.500	222	1.750	1.972	
Girassol	2.000	222	2.250	2.472	
Mamona	3.500	151	3.750	3.901	
%óleo	R\$/ t óleo veg. a partir do grão	R\$/ t grão*	R\$/ t B100***		
Soja 19	2.947 = 560 / 0,19	560	3.297	3.519	
Girassol 42	3.095 = 1.300 / 0,42	1.300	3.445	3.667	
Mamona 49	1.837 = 900 / 0,49	900	2.187****	2.338	
%farelo	R\$/ t óleo veg. a partir do grão	R\$/ t grão c/venda farelo	R\$/ t farelo*	R\$/ t B100***	
Soja 81	722 = 137 / 0,19	137 = 560 - 522 * 0,81	522	1.072	1.294
Girassol 58	2.764 = 1.161 / 0,42	1.161 = 1.300 - 240 * 0,58	240	3.114	3.336
Mamona 51	1.733 = 849 / 0,49	849 = 900 - 100 * 0,51	100	2.083	2.234

Notas: \*Preços para óleos vegetais, grãos e farelos - CONAB (jan/2005) \*\*Custo para processamento considerado igual a R\$250/t, independente do óleo \*\*\*Para o esmagamento do grão foi considerado custo adicional de R\$100/t. \*\*\*\*Preço do biodiesel de mamona produzido no norte/nordeste por agricultura familiar

<sup>34</sup> Base de referência São Paulo. Fonte: Datamark, 2008

<sup>35</sup> Preço Petrobras + PIS/COFINS + CIDE + ICMS = - R\$ 1.632/t

A produção do biodiesel pode ser economicamente mais vantajosa a partir das sementes das oleaginosas, se a torta produzida com o farelo for comercializada de forma simultânea e compensatória, de tal forma a produzir o óleo a preço de custo. Os cálculos desenvolvidos na tabela A-18 tentam demonstrar esse fato, onde se percebe claramente que as oleaginosas que têm condições para reduzir custos são aquelas com maior valor agregado do farelo, ou seja, a própria soja.

Esta análise, associada à lógica comercial do negócio agrícola, permite fazer algumas previsões sobre quais tipos de oleaginosas serão as mais promissoras para atenderem o mercado de biodiesel.

O óleo de mamona, com o valor de mercado muito superior ao do óleo diesel mineral, não parece ser a melhor aposta, pois a tendência esperada na reação dos agricultores é a de limitar a sua produção, caso os preços de venda comecem a diminuir.

A produção do óleo de soja está limitada pela colocação do farelo no mercado, pois também a tendência natural do negócio agrícola é a de limitar a sua produção no sentido de impedir quedas acentuadas de preços.

Mesmo assim, o potencial de penetração do biodiesel a partir da soja é muito favorável no Brasil, como observado nos dados de produção no País, com espaço para atender até 10% do consumo de óleo diesel mineral (vide item A.2.1 – Soja) com margem de preço favorável, como permitem concluir os resultados da tabela A-18, onde o preço de custo do B100 – R\$ 1,14/litro – ficou abaixo do preço comercializado do diesel – R\$ 1,37/litro, pelo menos para as condições vigentes em janeiro de 2005.

Outras opções seriam:

- O desenvolvimento da produção de sementes oleaginosas que não tenham preços já estabelecidos, como a semente do pinhão manso, motivo de pesquisas na Índia e na África do Sul, mas ainda sem resultados positivos;
- O aproveitamento de correntes alternativas de matérias-primas, como o sebo de carne de animais e óleo de cozinha já utilizado, mas que trazem consigo problemas de qualidade intrínsecos do biodiesel produzido, assim como questões relacionadas à logística de coleta e distribuição.

### A.3.2 H-Bio

A Petrobras desenvolveu o processo H-Bio para produção de diesel a partir de óleos vegetais, complementar à vertente tecnológica da transesterificação. Em síntese, H-Bio é um processo, enquanto o biodiesel é um produto.

Nos testes do processo H-Bio realizados na Refinaria Gabriel Passos, Minas Gerais, uma fração de 10% óleo de soja foi adicionada às correntes oriundas dos processos de destilação direta (diesel DD), coqueamento (diesel Coque) e craqueamento catalítico (diesel FCC). Essas correntes são tratadas na Unidade de Hidrotratamento (HDT), especialmente para a redução do teor de enxofre.

Neste processo, o óleo vegetal refinado, em contato com o catalisador usualmente utilizado no HDT convencional de óleo diesel, sofre hidrogenação e craqueamento em condições controladas de temperatura e pressão. Desta forma, o óleo vegetal é transformado em hidrocarbonetos parafínicos lineares na faixa do óleo diesel, propano e água. Os compostos parafínicos formados contribuem para a melhoria da qualidade do óleo diesel final, destacando-se o aumento da qualidade de ignição (número de cetano), a redução da densidade e do teor de enxofre, conforme mostrado na tabela A-19.

Tabela A-19 – H-Bio x biodiesel x diesel mineral processado no HDT

Propriedade	Diesel	Biodiesel	H-Bio
Teor Oxigênio, %	0	11	0
Densidade	0,84	0,88	0,78
Teor de Enxofre, PPM	<10	<1	<1
Emissões de NOx (base 100)	100	+10%	-10%
Poder Calorífico (MJ/kg)	43	38	44
Ponto de Névoa, °C	-5	-5 a +15	-10 a +20
Destilação, °C	200 a 350	340 a 335	265 a 320
Número Cetano	40	50-65	70-90

Segundo a Petrobras, no desenvolvimento desta tecnologia foram testados outros óleos vegetais além da soja, como óleo de mamona e girassol, em diferentes condições operacionais, demonstrando a flexibilidade do processo e a possibilidade de sua aplicação nas refinarias da Petrobras que possuem unidades de HDT para tratamento de óleo diesel.

Também segundo a Petrobras, para cada 100 litros de óleo vegetal processados, são produzidos 96 litros de óleo diesel e 2,2 Nm<sup>3</sup> de propano, sendo consumidos 35 Nm<sup>3</sup> de hidrogênio.

O processo de hidrotratamento de diesel consiste fundamentalmente em uma reação catalítica entre o hidrogênio (produzido nas refinarias nas unidades de reforma a vapor) e frações de diesel geradas nas colunas de destilação, no coqueamento retardado e no craqueamento catalítico do gasóleo. Estas frações de diesel contêm em sua estrutura teores excessivos de enxofre, nitrogênio, oxigênio e aromáticos, os quais são removidos no processo.

Os óleos vegetais não possuem nitrogênio, enxofre ou aromáticos, mas possuem 6 átomos de oxigênio em cada molécula. Os óleos vegetais mais hidrogênio, na presença de um catalisador, em um reator mantido a uma pressão de 70 atm e temperatura superior a 300°C arranca os átomos de oxigênio sob a forma de água, produzindo hidrocarbonetos na faixa do diesel, além de propano, gerado a partir da glicerina dos óleos vegetais. Para cada tonelada de óleo vegetal obtém-se, no máximo, 850 kg de H-Bio (rendimento de 85%). Para cada tonelada de H-Bio, 27 kg de hidrogênio são consumidos, ao custo de US\$ 2,5/kg [IBC&Expetro, 2006].

A Petrobrás inaugurou sua primeira unidade de HDT em 1989, na Refinaria Duque de Caxias, REDUC-RJ. Posteriormente outras unidades foram construídas na RPBC-SP (1998), REPLAN-SP (2000), HDT II REDUC (2003), HDT II REPLAN (2003), REGAP-MG (2003), REPAR-PR (2004) e REFAP-RS (2006).

A atual capacidade instalada de HDT no Brasil corresponde a 36% do diesel consumido no país, pois a mistura das correntes tratadas com os 64% restantes produzidos é suficiente para atender à legislação mínima de teor de enxofre vigente.

Nem todo óleo diesel passa pelas unidades de HDT por uma questão econômica, devido aos custos altos de investimento e operacionais. Contudo, na medida em que a legislação ambiental fique mais restritiva quanto aos teores máximos de enxofre no combustível, novas unidades serão construídas (vide figura A-16).

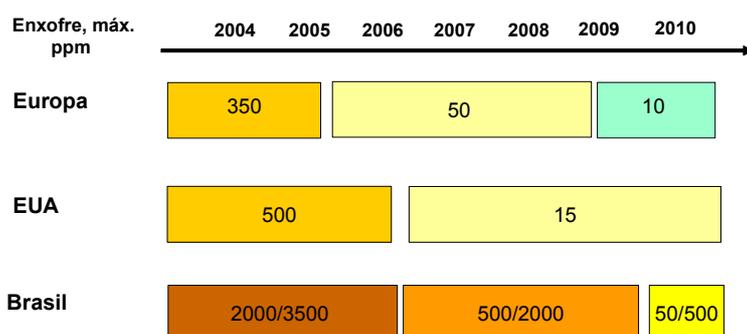


Figura A-16 - Evolução da qualidade do diesel

Nos EUA, com menores teores de enxofre permitidos do que no Brasil, 73% do diesel produzido são tratados em unidades HDT. Uma unidade completa de HDT, processando de 3.000 a 5.000 m<sup>3</sup> de diesel/dia, custa entre US\$ 200 e 250 milhões.

Em termos ambientais, apesar da utilização de fontes renováveis como matéria-prima, o H-Bio não contribui, por si só, para a redução das emissões de monóxido de carbono ou material particulado, causadores da chamada “fumaça negra” dos veículos a diesel.

Da mesma maneira que o álcool combustível, o biodiesel promove a redução dessas emissões por conter oxigênio em sua estrutura molecular. Esse oxigênio intra-molecular ajuda a promover a combustão completa do combustível, pois tanto o CO quanto os particulados são causados por combustão incompleta (falta de oxigênio). Isso não ocorre com o H-Bio, pois ele não possui oxigênio em sua estrutura. Contudo, o número de cetano superior pode compensar essa desvantagem, se o combustível for utilizado em um motor mais eficiente.

Também do ponto de vista mecânico, os átomos de oxigênio do biodiesel promovem um aumento de lubricidade e, conseqüentemente, da vida útil de peças do motor diesel. Por não possuir nem enxofre nem oxigênio em sua molécula, o H-Bio tem uma lubricidade menor do que o óleo diesel mineral.

O H-Bio só é viável para grandes refinarias de petróleo que já possuem unidades de HDT com capacidade ociosa e que tenham acesso a óleos e gorduras mais baratas do que o petróleo. Para produtores de óleos vegetais é inviável a instalação de plantas de HDT para produção de H-Bio [IBC&Expetro, 2006].

Um dos atrativos desta tecnologia reside no fato de que não são necessários investimentos significativos no parque de refino para sua instalação, concretizável em um curto prazo de tempo.

Até 2010 o plano estratégico da Petrobras prevê a implantação deste processo em 8 refinarias, com um consumo total de 1.200 mil m<sup>3</sup>/ano para um teor de 5% de óleo vegetal na mistura das correntes de óleo diesel para tratamento, consumo este equivalente a 44% do volume de óleo de soja exportado em 2005, caso o preço esteja favorável.

#### **A.4 ECONOMIA DE HIDROGÊNIO**

A economia de hidrogênio consiste em uma previsão futura na qual ele se transformaria no grande vetor para armazenamento de energia. Sua aplicação iria desde fontes consumidoras móveis, especificamente substituindo gasolina e diesel em veículos, até o atendimento de demandas de energia elétrica em sistemas estacionários distribuídos junto às fontes consumidoras.

No final do século XIX e início do século XX houve uma intensa competição tecnológica a respeito de qual força motriz seria a mais competitiva para movimentar os recém inventados automóveis [Schobert, 2002].

As alternativas que se apresentavam na época, carros a vapor, movidos a ar comprimido ou baterias elétricas foram suplantadas pelos motores de combustão interna queimando hidrocarbonetos, devido à maior autonomia proporcionada, fruto da maior eficiência rapidamente alcançada pelo desenvolvimento dos motores, associado à alta densidade energética dos hidrocarbonetos. Posteriormente, a baixa relação peso potência dos motores também tornou possível a sua aplicação em aviões.

As atuais questões relacionadas à disponibilidade dos combustíveis e ao aquecimento global da atmosfera devido às emissões de CO<sub>2</sub> presentes nos gases de descarga dos motores de combustão deram margem a pesquisas de alternativas de combustíveis que não apresentem esses problemas.

Algumas correntes de opinião elegeram as células a combustível, usando hidrogênio como combustível, como sendo a versão futura do que foram no passado os motores de combustão interna.

Hidrogênio é o elemento mais abundante no universo. Ele também tem uma excelente relação de energia por peso, o que levou a sua utilização para abastecer motores de foguetes espaciais. As emissões de uma célula de hidrogênio consistem basicamente de água destilada, além do que elas são, em teoria, mais eficientes do que os motores de combustão interna.

A aplicação da eletricidade como vetor para o aproveitamento das fontes primárias de energia foi contemporânea ao advento do automóvel, porém com uma influência muito maior na melhora da qualidade de vida da humanidade.

O equilíbrio da oferta - demanda dos sistemas elétricos atuais é obtido variando-se a potência de saída dos geradores que suprem a rede interligada.

Geradores de hidrogênio de alta eficiência combinados a um sistema de distribuição, nos moldes dos sistemas atuais de distribuição de gás natural, e células de hidrogênio poderiam também substituir os sistemas de geração e distribuição e energia elétrica atuais. Sistemas similares com gás natural já são comuns para produção descentralizada de energia elétrica, geralmente associada a uma cogeração, em instalações industriais ou comerciais.

A eletrônica de potência permite controlar o despacho destas pequenas fontes a um custo competitivo, o que era inimaginável poucos anos atrás, de tal forma que uma grande rede de fornecedores e consumidores de energia elétrica poderia ser formada nos moldes do que existe hoje na disponibilização de dados pela internet.

A premissa por detrás da economia baseada no hidrogênio vem da idéia de que células a combustível irão substituir os motores de combustão e turbinas a gás como os conversores primordiais de energia química em potência motriz e elétrica. A razão para isso advém do fato de que as células não estariam limitadas pela eficiência máxima termodinâmica, dos ciclos de potência Otto, Diesel, Rankine ou Brayton, as quais os motores e turbinas se sujeitam.

As células a combustível podem trabalhar tanto com hidrocarbonetos quanto com hidrogênio puro. Se e quando as células ficarem competitivas com motores de combustão e turbinas a gás, muito provavelmente elas serão primeiramente aplicadas em instalações estacionárias.

Atualmente a geração de energia elétrica a partir de grandes centrais térmicas a gás natural tem aumentado no mundo e, especialmente, no Brasil. Também as instalações pequenas de geração distribuída, com motores a gás natural ou a óleo diesel – neste caso, geralmente para atender cargas de ponta ou de emergência – experimentam uma forte expansão.

Caso a reforma de gás natural em hidrogênio e sua posterior utilização em células a combustível forem mais eficientes do que a queima direta de gás natural, poder-se-ia analisar o custo benefício de tal mudança de tecnologia. Neste caso, a relação peso-potência não é um fator limitante como nos veículos e ganhos mínimos de eficiência significam muito no resultado final da operação da usina, devido aos grandes volumes de combustível envolvidos.

Porém, o maior apelo para a aplicação de hidrogênio na atualidade ainda é a sua utilização em veículos equipados com células a combustível. Elas apresentam uma boa relação peso-potência, podem ser mais eficientes do que os motores de combustão interna e não emitem gases poluentes.

A fonte de energia primária para a produção em massa de hidrogênio poderia ser a hídrica, a nuclear ou de combustíveis fósseis. Grandes plantas de geração de hidrogênio a partir de fontes fósseis também geram CO<sub>2</sub>, como veremos a seguir, mas como ela é centralizada, essas emissões poderiam ser mais bem administradas e minimizadas do que a provocada por milhões de pequenos emissores, como são os veículos, por exemplo.

No entanto, existem várias barreiras, algumas bem difíceis de serem superadas, para toda essa engenharia sair do papel.

### **Projetos Demonstrativos da Economia do Hidrogênio**

Diversos fabricantes de automóveis americanos se comprometeram a desenvolver veículos utilizando hidrogênio, como já haviam se comprometido a desenvolver veículos elétricos, em um programa extinto por eles mesmos. Alguns críticos argumentam que estes programas servem de desculpa para postergar a exigência de fabricação de veículos a diesel e gasolina que consomem e poluem muito menos do que os modelos atuais. A distribuição de hidrogênio com a finalidade de uso em transporte está em teste em alguns nichos de mercado, especificamente na Islândia, Alemanha, Califórnia, Japão e Canadá.

Alguns hospitais norte-americanos instalaram sistemas de eletrolizadores – estocagem de hidrogênio – pilha de células para atenderem cargas em situação de emergência.

A Islândia estabeleceu como meta se tornar a primeira economia do mundo baseada em hidrogênio por volta do ano 2050. Atualmente ela importa todos os derivados de petróleo necessários para mover sua frota de automóveis e barcos de pesca, mas ela também possui condições únicas para atingir esse objetivo, com grandes reservas hídricas e geotérmicas em um país pequeno com uma população ínfima.

#### A.4.1 Produção de Hidrogênio

A produção de hidrogênio é uma indústria de porte e em fase de expansão, apresentando taxas de crescimento da ordem de 10% ao ano. Em 2004, 50 milhões de toneladas de hidrogênio foram produzidos no mundo, a valores atualizados da ordem de US\$ 135 bilhões. Essa energia corresponde a aproximadamente 200 GW médios de potência [Argonne National Laboratory, 2005]. Nos Estados Unidos a produção foi de aproximadamente 11 milhões de toneladas ou 48 GW médios equivalentes, o que corresponde a pouco mais de 10% da demanda elétrica americana atual.

Como armazenar e transportar hidrogênio custa muito caro, a produção e consumo são, geralmente, efetuados de forma contínua e realizados por uma mesma empresa no local onde está instalada.

A distribuição da produção de hidrogênio por fonte está mostrada na figura A-17 [Argonne National Laboratory, 2005]:

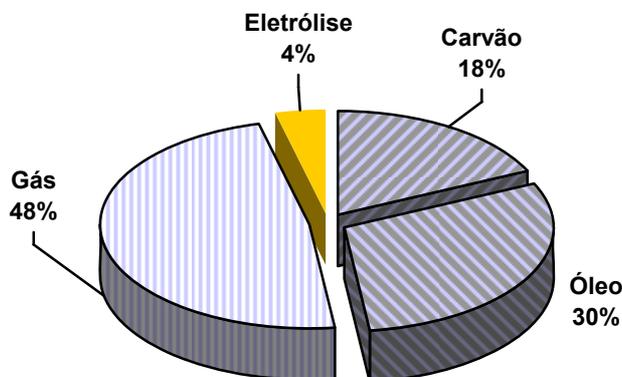


Figura A-17 – Distribuição da produção de hidrogênio por fonte

O Hidrogênio produzido na atualidade é utilizado para duas finalidades básicas: produção de amônia ( $\text{NH}_3$ ), aplicada como fertilizante, e na indústria do petróleo, em unidades de hidrocraqueamento.

Unidades de hidrocraqueamento convertem frações pesadas de hidrocarbonetos em derivados mais leves ou, então, são utilizadas para tratamentos de correntes de derivados ricos em enxofre, como óleo diesel, para enquadrá-lo em especificações ambientais mais rigorosas. A diferença entre esses dois processos são os níveis maiores de pressão e temperatura nas plantas em que a molécula do hidrocarboneto deve ser quebrada.

A divisão dessas aplicações é aproximadamente meio a meio e ambas têm perspectivas de crescimento muito favoráveis:

- As áreas agriculturáveis crescem, acompanhando o aumento da população mundial. Com isso, a demanda por fertilizantes e, conseqüentemente, por amônia e uréia também tem aumentado;
- A implantação de processos de hidrocraqueamento em refinarias tem sido incrementada em níveis até mesmo superiores ao da produção de amônia, pois os preços altos do óleo convencional estimulam as companhias de petróleo a extrair e processar óleos menos nobres ou, até mesmo, areias e xistos betuminosos.

Como o hidrogênio não é encontrado livre na natureza, se gasta energia para produzi-lo. Duas rotas clássicas para produção de hidrogênio estão disponíveis na atualidade: a partir de fontes fósseis, principalmente gás natural, e a partir de eletricidade.

A produção de hidrogênio a partir de fontes fósseis de energia consiste na reforma a vapor de gás natural ou na oxidação parcial de óleo diesel, óleos pesados ou, até mesmo, carvão. Existem outros processos em fase de pesquisa e desenvolvimento como, por exemplo, a gaseificação de biomassa e, o mais interessante deles, a produção direta de hidrogênio a partir de algas submetidas à radiação solar.

Eletricidade é a fonte secundária de energia utilizada para produzir hidrogênio, a partir da eletrólise da água ou como subproduto resultante da eletrólise de cloro alcalino.

A reforma de metanol ou etanol, em células de combustível diretas, seria a outra forma de produção através de uma fonte secundária, bastante promissora, como vimos anteriormente, no item sobre células a combustível.

### **Produção de Hidrogênio a partir de fontes fósseis**

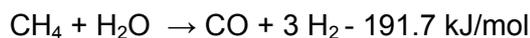
A maior parte do hidrogênio comercializado hoje no mundo vem de fontes fósseis, produzido em processos de refino de petróleo ou como subproduto da indústria química. A produção de hidrogênio por eletricidade provém principalmente da eletrólise de cloro alcalino e responde por apenas 4% do total.

Os valores de produção variam de US\$ 0,24 a 0,36/Nm<sup>3</sup> (US\$ 2,67 a 4,00/kg)<sup>36</sup> considerando custos de capital, matéria-prima e de operação e manutenção. Quase metade dessa produção é feita pela reforma a vapor de gás natural.

Desta maneira, para que a médio e longo prazo o hidrogênio participe de forma significativa do mercado de energia, considerando os objetivos de redução de emissão de CO<sub>2</sub>, outros processos deverão ser considerados.

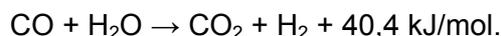
### **Reforma a vapor de gás natural**

A reforma a vapor consiste da conversão catalítica e endotérmica de gás natural com vapor de água. A reação básica se passa a temperaturas e pressões da ordem de 700 a 1100°C e 25 bar, nos processos industriais, produzindo um gás sintético de acordo com a fórmula abaixo:



O calor necessário para o processo é normalmente obtido queimando parte do gás natural suprido.

Hidrogênio adicional é recuperado do monóxido de carbono pela conversão a temperaturas mais baixas, da ordem de 130°C, segundo a reação indicada abaixo, onde essencialmente o átomo de oxigênio é retirado do vapor e oxida o monóxido, liberando mais hidrogênio:



---

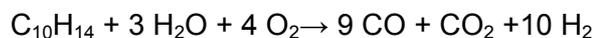
<sup>36</sup> Nm<sup>3</sup> corresponde ao volume de gás @ 20° C e 1 atm

Por intermédio de processo de absorção ou por uma membrana de separação, o CO<sub>2</sub> é removido da mistura, assim como outros componentes inconvenientes. Plantas industriais com capacidade para 800 milhões Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/ano consomem 340 milhões Nm<sup>3</sup> de gás natural [Zittel, 1996].

### **Oxidação Parcial de Hidrocarbonetos Pesados**

A oxidação parcial consiste da conversão exotérmica ou auto-térmica de hidrocarbonetos pesados com oxigênio e vapor. As quantidades de oxigênio e vapor são controladas de tal forma que a gaseificação continua sem a necessidade de fonte de calor externa, daí o nome auto-térmica.

A reação global do processo pode ser representada pela fórmula a seguir:



Este processo para produção de H<sub>2</sub> também é totalmente dominado e as plantas industriais com capacidade para 800 milhões Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/ano consomem 280 mil t de óleo. [Zittel, 1996].

### **Oxidação Parcial de Carvão**

Processo idêntico ao de gaseificação de óleo, exceto pelo acréscimo da preparação inicial do carvão, que é moído em um pó fino e misturado com água até formar uma suspensão que pode ser bombeada, com 50 a 70% de sólidos.

Este processo só é encontrado em escala comercial em países ricos em carvão, como China e África do Sul. Uma planta com capacidade anual de produção de 800 milhões Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/ano consumiria 500 mil t/ano de carvão [Zittel, 1996].

### **Processos em desenvolvimento**

**Processo KVAERNER a arco de plasma** – produção de hidrogênio e carbono puro, livre de CO<sub>2</sub>, utilizando gás natural ou óleo combustível pesado e eletricidade. Este processo vem sendo desenvolvido pela empresa norueguesa KVAERNER ENGINEERING desde os anos 80 [Zittel, 1996].

Um arco de plasma formado a temperaturas próximas a 1600°C separa os hidrocarbonetos em carbono puro e hidrogênio. Este processo requer, além da fonte fóssil de energia, água de refrigeração e eletricidade. A grande vantagem é que dele não há emissão significativa de outro tipo de gases.

Uma planta piloto operando desde 1992 produz em torno de 500 kg/h de carbono puro e 2000 Nm<sup>3</sup>/h de H<sub>2</sub> a partir de 1000 Nm<sup>3</sup>/h de gás natural e 2100 kW<sub>e</sub>, além de produzir 1000 kW térmicos de vapor a alta temperatura.

Desta forma, a transformação das utilidades é quase 100% aproveitável em forma de hidrogênio, 48%, vapor, 10%, e carbono puro, 40%. Contudo, a estimativa de preço de uma planta modular com capacidade para produzir 120 milhões Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/ano custa 10 vezes mais, por capacidade de hidrogênio produzido, do que a reforma a vapor de gás natural.

**Reformadores pequenos com oxidadores parciais** - reformadores de hidrocarbonetos leves e de etanol estão sendo desenvolvidos com o objetivo de serem aplicados em sistemas de pilha de células de hidrogênio. Estes sistemas visam aplicações móveis, em veículos, e, principalmente, para geração distribuída de energia.

Reformadores podem ser classificados em 3 tipos:

*A vapor* – vapor d'água é utilizado na reação, requerendo que calor externo seja provido ao processo.

*Por Oxidação Parcial* – oxigênio puro ou ar é utilizado para queimar parte do combustível, liberando calor para o processo.

*Auto-térmico* – uma combinação dos dois processos anteriores, ele opera com vapor de água e oxigênio (ou ar) em um ponto neutro quanto à demanda de calor para o processo.

### **Produção de Hidrogênio a partir eletrólise da água**

A água é a melhor fonte de matéria-prima para produção de hidrogênio. A eletrólise alcalina é o meio mais prático para separá-lo do oxigênio, processo esse em uso comercial há mais de 90 anos. A produção de hidrogênio pela eletrólise de cloro alcalino é, na verdade, um subproduto da produção de cloro, sendo especificamente direcionada para tal.

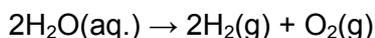
De forma geral, em um processo de eletrólise, um composto iônico é dissolvido em um solvente ou fundido com calor de tal forma que os íons ficam livres em um meio aquoso. Uma corrente elétrica contínua é aplicada entre um par de eletrodos de metal imersos nesta solução. Os eletrodos atraem cargas opostas às suas, de tal forma que para o negativo – catodo - se dirigem os cátions e para o positivo – anodo - os ânions. A energia requerida para separar

os íons e mantê-los atraídos aos respectivos eletrodos é fornecida por uma fonte externa. Os elétrons são absorvidos ou liberados pelos íons, formando os compostos desejados.

A quantidade de energia elétrica que deve ser fornecida é igual à variação da energia livre de Gibbs da reação mais as perdas no sistema. Essas perdas podem ser teoricamente próximas a zero, de tal forma que a eficiência termodinâmica máxima é igual à variação da energia livre da reação dividida pela variação de entalpia dos reagentes.

Normalmente o consumo de eletricidade é maior do que a variação de entalpia da reação, de tal sorte que alguma energia é perdida na forma de calor. Em alguns casos particulares, como na eletrólise de vapor de água, gerando hidrogênio e oxigênio em alta temperatura, o oposto acontece, ou seja, calor é absorvido do meio e o poder calorífico do hidrogênio produzido é superior ao consumo de energia elétrica no processo.

Células eletroquímicas, como as células de hidrogênio, utilizam o processo inverso ao da eletrólise da água, que é um processo utilizado para produção de hidrogênio pela reação:



Eletrólise da água pode ser obtida de forma muito simples, passando corrente elétrica de uma bateria ou qualquer fonte de corrente contínua de baixa voltagem por um recipiente de água com sal ou qualquer outro eletrólito dissolvido para que a reação ocorra. Utilizando eletrodos de platina, gás hidrogênio borbulhará no catodo, assim como oxigênio surgirá no anodo.

O hidrogênio é produzido eletroliticamente consumindo eletricidade e como, geralmente, a eletricidade consumida tem valor maior do que o hidrogênio produzido, apenas uma pequena fração de hidrogênio é produzida desta forma.

Esse processo só é viável onde a energia elétrica possa ser gerada a preços muito baixos. Esse é o caso dos países com grandes sistemas de geração hidrelétricos, como o Brasil, Canadá, Noruega, Egito, Zaire e Islândia, ou onde exista eventual sobra de energia em sistemas com forte penetração nuclear, caso da França, Bélgica, Suíça e em certas áreas da Alemanha [Zittel, 1996].

Apenas uma pequena parte do hidrogênio produzido no mundo – 4% – é resultado de eletrólise, geralmente associada a uma sobra de potência hidroelétrica. A razão para isso foram os preços declinantes de gás natural nos anos 90, conjugado a sua oferta abundante nos países do Oriente Médio, que investiram em plantas petroquímicas e de fertilizantes para monetizar suas reservas de gás natural associado, com baixo aproveitamento até então.

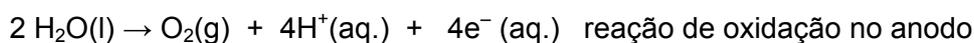
O meio comumente utilizado é a da eletrólise a baixa temperatura. As pesquisas em eletrolise a alta temperatura e reatores nucleares que operam a alta temperatura podem eventualmente levar a um suprimento de hidrogênio mais competitivo do que pela reforma a vapor de gás natural, porque parte da energia na eletrólise a alta temperatura é suprida na forma de calor.

A eficiência energética da eletrólise da água varia muito, dependendo basicamente de o processo ser realizado em laboratório ou em um nível industrial. A literatura indica desde a faixa de 50 a 70% até valores bem superiores, de 80 a 94%. De qualquer forma esses valores referem-se apenas a eficiência da conversão da energia elétrica na energia química do hidrogênio. A energia perdida na geração elétrica posterior não está incluída, o que traria para valores bem mais baixos a eficiência total do processo, da ordem de 25 a 35%, mesmo considerando a eletrólise a alta temperatura.

### Processo de Eletrólise da Água

A decomposição da água por eletrólise consiste de duas reações parciais que ocorrem em dois eletrodos separados por um eletrólito condutor de íons.

Hidrogênio é produzido no catodo, para onde se dirigem as cargas negativas, e oxigênio, no anodo. O fluxo de íons se encarrega da troca de cargas necessária para o desencadeamento das reações, sendo que as duas regiões são mantidas separadas por meio de um diafragma, que mantém os gases produzidos isolados um do outro. A energia necessária para a separação da água é suprida por eletricidade.



### **Eletrólise convencional da água**

O método convencional de eletrólise trabalha com uma solução eletrolítica alcalina aquosa. As regiões ocupadas pelo catodo e pelo anodo são separadas por um diafragma de micro poros para evitar a contaminação dos dois gases produzidos. Com pressões da ordem de 2 a 5 bar este processo pode atingir, em grandes plantas, eficiências de até 70%, quando relacionadas ao poder calorífico inferior – PCI – do hidrogênio.

O material da membrana do diafragma, no lugar de asbestos, é tema de pesquisa e desenvolvimento atual, tendo por objetivo permitir operar a célula sob condições operacionais flutuantes, característica esta encontrada quando a eletricidade vem de fontes renováveis e intermitentes de energia, como é o caso do vento e do sol.

Plantas comerciais para eletrólise são encontradas no mercado mundial desde 1 kW até 125 MW. Electrolyser Corporation Ltda. do Canadá, e Norsk Hydro Electrolysers AS da Noruega são fornecedores tradicionais de unidades de grande capacidade. As eficiências variam de 50-60% nos pequenos eletrolizadores até por volta de 65-70%, para grandes plantas [Zittel, 1996].

### **Eletrólise a alta temperatura**

Os mercados em forte ascensão conjugado aos preços altos de gás natural têm estimulado a procura por alternativas mais baratas para produção de hidrogênio. Uma dessas alternativas é a eletrólise termoquímica da água a alta temperatura.

Algumas usinas nucleares protótipos operam a temperaturas da ordem de 850 a 1000°C, muito mais altas do que as usinas comerciais existentes. A eletrólise termoquímica da água a estas temperaturas dobra potencialmente a eficiência da conversão, mas somente unidades piloto em laboratório obtiveram esse resultado, ainda não demonstrado em escala comercial.

O potencial de economia na produção de hidrogênio utilizando essa tecnologia pode ser considerável. A empresa americana General Atomics prevê que hidrogênio produzido em reatores nucleares de alta temperatura refrigerados a gás (HTGR) custaria US\$ 1,53/kg, muito inferior ao custo médio do hidrogênio produzido por reforma a vapor com os preços alcançados pelo gás natural em 2005, da ordem de US\$ 2,70/kg. Isto já representaria uma economia significativa

de dezenas de bilhões de dólares por ano, além de reduzir a necessidade de importação de gás natural pelos Estados Unidos [Argonne National Laboratory, 2005].

A outra vantagem de um reator nuclear que pode produzir tanto eletricidade quanto hidrogênio é a de que ele pode mudar o seu foco de produção na medida em que a demanda por energia elétrica varie ao longo do dia. Essas novas usinas nucleares poderiam passar a atender também a ponta de geração do sistema, além de atender a base, como fazem as usinas atuais. A demanda atual por hidrogênio norte americana já seria suficiente para acomodar esse esquema de geração.

#### **A.4.2 Barreiras para a Economia de Hidrogênio**

A opção de adotar o hidrogênio como vetor energético ainda depende da superação de vários problemas, dentre os quais se destacam [Kreith, 2004]:

##### **Preços das Células a Combustível**

Células a combustível são ainda muito caras. O atual preço das células é um importante fator limitante, pois podem custar até 100 vezes mais caro por kW instalado do que motores de combustão interna. Algumas requerem metais caros, do grupo da platina, em sua composição e outras apresentam vida útil operacional muito baixa. Ainda se aguarda que estes problemas sejam resolvidos no futuro.

##### **Produção**

Infelizmente, hidrogênio puro não existe em quantidade na natureza. A maior parte dele está ligada à molécula de oxigênio, formando água, ou associado ao carbono, nos hidrocarbonetos. Ele pode ser produzido a partir de combustíveis fósseis, mas nesse processo há geração de CO<sub>2</sub>, que contribui para o efeito estufa, em quantidades que podem ser até superiores do que se os combustíveis fossem queimados diretamente nos motores e turbinas.

Ele também pode ser produzido a partir de grandes quantidades de energia e água. Usinas nucleares ou hidrelétricas poderiam ser os supridores da potência elétrica necessária, mas existem sérias desvantagens nessa solução, a mais óbvia delas: as perdas nas conversões de energia elétrica para hidrogênio e de volta para energia elétrica.

Fontes não convencionais e renováveis de energia seria outra saída e alguns advogam que se fossem contabilizados os danos causados à natureza pelas fontes tradicionais, como carvão, óleo e gás natural, as não convencionais já seriam competitivas, mesmo com preços de geração superiores. Entretanto essas fontes renováveis não convencionais, como solar, eólica, biomassa, produzem energia de baixa intensidade, insuficiente na atualidade para abastecer o mercado de hidrogênio a partir do processo de eletrólise.

### **Estocagem**

A estocagem é um dos maiores problemas tecnológicos a serem superados para tornar viável a economia de hidrogênio. Uma das intenções para viabilizar a utilização do hidrogênio seria utilizá-lo como um armazenador de energia para fontes intermitentes, como energia eólica, por exemplo. A principal limitação para a consecução desta solução é a conversão de energia utilizando hidrogênio não ser barata, tanto para a sua produção quanto para o seu aproveitamento posterior, como combustível.

O modo mais comum de armazenar hidrogênio, também o mais eficiente, é comprimi-lo até por volta de 700 bar. Hidrogênio tem uma boa densidade de energia por peso, mas muito menor do que a dos hidrocarbonetos, quando considerado por volume, o que é fisicamente importante, pois os tanques devem ser muito maiores e pesados para armazenarem a mesma quantidade de energia, o que inviabiliza a utilização em veículos, por exemplo.

A alternativa de se aumentar a pressão do gás permite diminuir o volume dos vasos, mas não o seu peso, pois pressões maiores exigem paredes mais espessas, além de trazer problemas de segurança intrínsecos. Comprimir gás também requer energia, tanto maior quanto maior for a razão de compressão aplicada. Outra opção seria produzir hidrogênio líquido, mas a temperatura de liquefação do hidrogênio é da ordem de 20 K (-253°C), o que exige enormes dispêndios de energia para resfriá-lo, além de sofisticados e caros isolamentos térmicos nos tanques.

Devido a sua pequena e muito reativa molécula, o hidrogênio é propenso a se difundir pela parede do vaso de contenção, provocando um fenômeno metalúrgico conhecido como fragilização do aço pelo hidrogênio.

A grande vantagem dos hidrocarbonetos líquidos é a sua armazenagem nos locais onde serão consumidos. O hidrogênio é muito mais caro de armazenar e transportar com a tecnologia atual disponível. Mesmo assim, superado todas essas limitações, a densidade de energia por volume seria inferior por um fator aproximado de 4 vezes quando comparado à gasolina.

Amônia ( $\text{NH}_3$ ) pode ser utilizada para armazenar hidrogênio, liberando o gás por reforma catalítica. Ela melhora substancialmente a densidade no armazenamento de hidrogênio com condições moderadas de pressurização e resfriamento. Quando misturada à água pode até mesmo ser armazenada a temperaturas e pressões ambientes.

Amônia é um produto químico muito produzido no mundo, com uma grande infra-estrutura de produção, transporte e distribuição implantada. A reforma para liberar hidrogênio não acarreta emissões de poluentes e, se desejável, ela pode ser misturada com combustíveis e queimada eficientemente a pressão atmosférica. Se comprimida pode até mesmo ser utilizada pura em motores ciclo Otto ligeiramente modificados. No entanto, ela é muito cara para ser produzida e a infra-estrutura atual haveria de ser em muito ampliada para atender a demanda do setor de transportes, além de ser um gás tóxico com um odor muito pronunciado.

Hidratos metálicos, de boro e lítio, podem ser induzidos a liberar ou absorver hidrogênio. Eles apresentam razoável densidade de energia por volume, embora a densidade por peso deixe a desejar. Uma das aplicações de hidratos seria para uso automotivo, mas um tanque de hidrato é aproximadamente três vezes maior e quatro vezes mais pesado do que um tanque de gasolina contendo a mesma quantidade de energia, sendo que o preço do aço é da ordem de US\$ 3/kg e do lítio, US\$90/kg.

Hidratos também reagem violentamente quando expostos ao ar com umidade, além de serem tóxicos em contato com a pele ou olhos. Esta foi a razão pela qual a indústria aeroespacial nunca utilizou este tipo de combustível em suas naves, apesar de intensa pesquisa para tal.

Borohidreto de sódio e amônia borada são menos reativos e podem ser armazenadas na forma líquida se misturados à água em altos níveis de concentração, para que armazenem hidrogênio com densidades superiores a 10% em peso. Esses líquidos podem alimentar diretamente a célula, permitindo

que elas fiquem mais eficientes e baratas, pois passam a dispensar a platina como catalisador. Contudo reciclar borohidreto de sódio e amônia borada gasta muita energia, além de ser muito caro, requerendo plantas de reciclo específicas, ainda experimentais.

A idéia de se utilizar reformadores e oxidadores de hidrocarbonetos leves ou alcoóis acoplados às células poderia tirar proveito da rede de distribuição, caso já estivesse disponível para esses combustíveis. Essa solução poderia aproveitar o combustível mais eficientemente, produzindo menos quantidade de CO<sub>2</sub> por quilômetro rodado ou kWh gerado, sem investimentos pesados em infra-estrutura que uma rede de fornecimento de hidrogênio requer.

Entretanto, por outro lado, a tecnologia de motores de combustão interna tem evoluído bastante. Por exemplo, motores a gás natural e outras soluções, como os motores híbridos, geram menos poluição quando comparado à gasolina e óleo diesel, além de proporcionarem uma vida útil maior ao motor. Desta forma, a sua substituição por células só será viável quando os ganhos em eficiência forem substancialmente compensadores.

### **Transporte**

Hidrogênio está longe de ser o método mais barato para transportar energia por longas distâncias, pelo menos com as atuais tecnologias disponíveis. Por isso, apenas os avanços nos processos de eletrólise, para produção, e nas tecnologias de células, para o uso final, não serão suficientes para viabilizar a aplicação do hidrogênio em larga escala.

Tubulações para transportar hidrogênio são mais caras do que gasodutos de gás natural ou, até mesmo, do que linhas de transmissão de energia elétrica, as quais empregando cabos elétricos com maior capacidade de transferir potência e mais baratos têm acentuado essa diferença, ao invés de diminuí-la.

O hidrogênio ocupa por volta de 3 vezes mais espaço do que o gás natural para transportar a mesma quantidade de energia nos mesmos níveis de pressão. Também é responsável por provocar fissuras no aço dos tubos pela fragilização do material pelo hidrogênio. Este fato aumenta os custos de manutenção da linha, taxas de vazamento e custos de material.

### Questões ambientais

A maior parte do hidrogênio produzido mundo – 48% – é oriunda da reforma a vapor de gás natural. Esta reação produz CO<sub>2</sub>, gás formador do efeito estufa, como subproduto, e que é liberado para a atmosfera apesar de que existem pesquisas em desenvolvimento para enterrá-lo no subsolo ou no fundo do mar.

Também existem questões ambientais relacionadas a possíveis vazamentos de hidrogênio, pois porções moleculares passam pela maioria dos vasos de aço o que poderia, por ação da radiação ultravioleta, formar radicais livres H na estratosfera, os quais, por sua vez agiriam, como catalisadores no processo de redução da camada de ozônio. Atualmente essas quantidades não parecem ser significativas, além do que não se acredita que uma economia madura de hidrogênio esteja desenvolvida antes dos próximos 50 anos, período de tempo suficiente para que surjam novas tecnologias para lidar com esta questão, até pequena se comparadas às outras, citadas anteriormente.

#### A.4.3 Motores Híbridos

Uma alternativa para acionamento de veículos muito mais barata do que pilhas a combustível consiste na solução híbrida, incluindo os carros “plug-in”, os quais também podem ser abastecidos em tomadas de força elétrica, caso seja mais conveniente.

Veículos híbridos são aqueles que combinam duas ou mais fontes de energia para, direta ou indiretamente, disponibilizar potência para sua propulsão. Alguns exemplos clássicos de veículos híbridos são: locomotivas, caminhões mineradores gigantes que são movidos a diesel e também por motores elétricos, submarinos a diesel ou nucleares também com motores elétricos acoplados [INEE, 2006].

Um carro movido a gasolina ou diesel dispõe de um tanque que supre combustível ao motor de combustão. Um carro elétrico tem um banco de baterias que provê eletricidade para um motor elétrico.

Um carro deve atender a alguns requisitos básicos para que ele seja vendável ao público em geral, quais sejam:

- Autonomia mínima de 400-500 km entre reabastecimentos;

- Reabastecimentos rápidos e fáceis de serem executados;
- Um conceito muito subjetivo de boa dirigibilidade, que significa respostas ágeis o suficiente do motor para que se consiga acompanhar o tráfego normal de forma segura.

Um veículo a gasolina ou a diesel atende a todos esses requisitos, mas consome relativamente muito combustível para rodar, além de produzir uma quantidade razoável de gases poluentes. O carro elétrico não polui, pelo menos no lugar em que ele está sendo utilizado, mas sua autonomia é bem menor, da ordem de 80 a 160 km, além do que o reabastecimento é muito lento e inconveniente de ser feito. O carro híbrido, acionado a gasolina ou a óleo diesel, mas que dispõe simultaneamente de um motor gerador, procura tirar proveito do melhor das duas tecnologias.

Os veículos híbridos disponíveis no mercado apresentam duas configurações distintas:

**Veículo híbrido em paralelo** – aplicado em carros e utilitários em geral. Dispõe de um tanque de combustível que supre o motor de combustão e um banco de baterias que alimenta o motor elétrico. Tanto o motor de combustão quanto o elétrico podem acionar o sistema de transmissão ao mesmo tempo, o qual, por sua vez, faz as rodas do veículo girar.

**Veículo híbrido em série** – solução geralmente adotada em veículos maiores, como ônibus de passageiros e caminhões. O motor de combustão aciona um gerador elétrico, o qual, por sua vez, alimenta um banco de baterias ou aciona um motor elétrico que fornece propulsão à transmissão do veículo para girar as rodas. O motor a combustão não movimenta diretamente o veículo.

### **Composição básica de um veículo híbrido**

Um veículo híbrido é composto dos seguintes itens (vide figura A-18):

**Motor de combustão a gasolina ou diesel** – os carros híbridos contêm um motor quase idêntico ao dos veículos comuns, apenas um pouco menor do que seu modelo similar e também se utiliza, geralmente, de tecnologias avançadas para redução de emissão e aumento de eficiência.

**Tanque de combustível** – do mesmo modo que nos veículos convencionais, armazena a energia necessária para fazer o carro andar. A densidade energética da gasolina ou do óleo diesel é muito superior ao de uma bateria. 1 litro de

gasolina ou diesel armazena tanta energia quanto 12 kg de um banco de baterias.<sup>37</sup>

**Motor elétrico** – o motor elétrico de um veículo híbrido é bem mais sofisticado do que um motor elétrico convencional. Um sistema eletrônico embarcado permite que ele funcione tanto como um motor quanto como um gerador. Quando é necessário, ele puxa carga das baterias para acelerar o carro, mas agindo como um gerador, ele freia o veículo e devolve energia para o banco de baterias.

**Gerador elétrico** – similar ao motor, mas apenas pode produzir energia elétrica, não estando conectado ao sistema de transmissão do veículo. Aplicado nos híbrido em série, geralmente em veículos maiores, conforme já salientado.

**Baterias** – servem de armazenador de energia para o motor elétrico, mas apresentam a característica diferente de um tanque de combustível na medida em que o motor de um carro híbrido pode tanto puxar carga como devolver energia, em casos de desaceleração, conforme explicado acima. As baterias de um veículo híbrido podem ser conectadas à rede, como em um carro elétrico (modelo tipo “plug-in”) ou, então, elas são completamente auto-suficientes e supridas apenas pelo motor ou gerador elétrico.

**Sistema de Transmissão** – realiza as mesmas funções que em um veículo convencional, mas em veículos híbridos podem ser mais sofisticadas, como, por exemplo, naqueles que utilizam a tecnologia de transmissão contínua variável.

Um controlador eletrônico faz entrar em operação os diversos componentes da tecnologia na medida em que as situações normais de utilização do veículo vão ocorrendo:

**Velocidade cruzeiro** – Em velocidades constantes, com cargas leves, o veículo é acionado pelo motor elétrico na cidade ou, então, nos automóveis de maior cilindrada, metade dos cilindros deixa de funcionar, ao transitar em estradas.

**Frenagem** – Ao diminuir a velocidade o motor elétrico passa a funcionar como um gerador, carregando as baterias ao recuperar a energia cinética, com a ajuda de um sistema de transmissão controlado eletronicamente, o qual está regulado para maximizar essa capacidade de recarga.

---

<sup>37</sup> Considerando que baterias de íon-lítio armazenam até 1,3 kWh/10 kg e veículos elétricos consomem 13 kWh/100 km, enquanto carros com motores de combustão interna consumiriam 8,33 l de combustível para o mesmo percurso

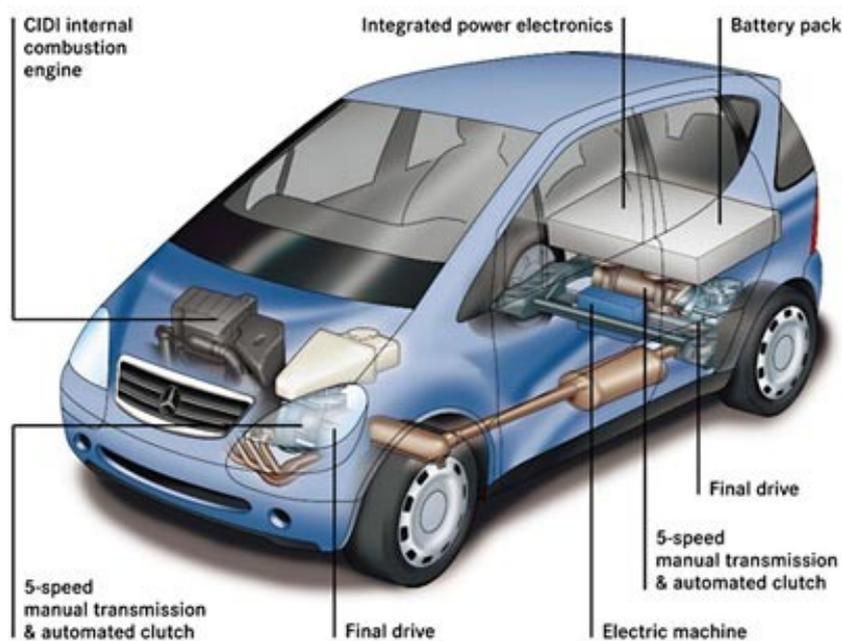


Figura A-18 – Esquema de um carro híbrido da Mercedes-Benz.

**Partida/ Parada** – O sistema de controle do veículo normalmente aciona o motor elétrico para efetuar partidas, mas uma bateria convencional de 12 volts também está disponível, quando as baterias híbridas do motor/gerador estão com nível baixo. Ao parar o veículo no trânsito, o sistema de marcha lenta também interrompe o fornecimento de combustível, reduzindo tanto o consumo quanto as emissões.

**Aceleração** – Em situações de ultrapassagem ou qualquer outra em que uma rápida aceleração se faz necessária, toda a potência do motor a combustão, associada ao motor elétrico fica disponível.

### Eficiência e Desempenho

O grande fator diferenciador da tecnologia híbrida é que o motor opera sempre próximo ao ponto de carga máxima. Os veículos utilizam motores relativamente grandes para que possam produzir potência suficiente em situações de rápidas acelerações. Os veículos híbridos podem utilizar motores de combustão menores e mais eficientes, mantendo desempenhos equivalentes aos modelos convencionais.

Motores grandes são menos eficientes por razões bastante singelas:

- Por serem mais pesados, os veículos consomem energia extra cada vez que aceleram ou enfrentam cargas mais demandantes, como na subida de ladeiras, por exemplo;

- Os pistões e outros componentes do motor são maiores e mais pesados, consumindo mais energia para se movimentarem;
- Cilindros maiores implicam em maior volume deslocado pelos pistões e mais admissão de combustível;
- Motores maiores geralmente têm mais cilindros, que consomem gasolina ou diesel mesmo com o veículo parado, em ponto morto.

O motor de combustão em um carro convencional é dimensionado para atender os picos de potência e essas situações, estatisticamente, respondem por menos de 1% do tempo de utilização dos veículos, para a maioria dos motoristas. O motor a combustão de um veículo híbrido é menor do que seu similar convencional e, devido a este fato, ele opera mais próximo da potência média demandada do motor.

Em uma estrada os veículos com motores menores consomem menos combustível para se deslocarem do que os similares com motores maiores, apesar de a potência demandada ser a mesma. Quando o veículo híbrido necessita momentaneamente de mais potência, em uma ultrapassagem ou para vencer uma ladeira, por exemplo, ele obtém essa potência extra do motor elétrico e das baterias. Além disso, as duas características de frenagem e parada, específicas dos veículos híbridos em paralelo, redundam em mais economia.

Ao acionar o freio do carro, a energia cinética é perdida, dissipada em forma de calor. O carro híbrido recupera parte dessa energia e a armazena nas baterias para uso posterior. Esta frenagem regenerativa é conseguida por intermédio do motor trabalhando como gerador elétrico, o qual carrega as baterias ao mesmo tempo em que desacelera o veículo. O veículo híbrido também pode desligar o motor de combustão ao parar em um sinal vermelho, por exemplo, pois ele pode ser colocado novamente em marcha pelo motor elétrico e baterias.

Os efeitos desta tecnologia na eficiência do veículo são marcantes:

- A economia de combustível é notável, mais de 60% na utilização na cidade (49 x 30 milhas por galão) e quase 30%, na estrada (51 x 40 milhas por galão). Também é interessante observar que as variações de consumo em condições de utilização na cidade e na estrada são muito menores.

- A dirigibilidade do carro híbrido aparenta ser muito superior, dado que a curva de torque máximo do motor a combustão funciona em uma faixa ampla e baixa de rotações (1000 a 2500 rpm) e, somado ao torque produzido pelo motor elétrico, apresenta um valor bem superior ao do veículo normal (199 x 128 lb-ft @ 4300 rpm).

A tabela A-20 apresenta uma comparação de dados de fabricante para um veículo convencional e sua versão híbrida [Honda, 2006].

Tabela A-20 – Comparação veículo híbrido x convencional

Modelo	Civic Sedan Híbrido	Civic Sedan Automático
Tipo do motor	4 cilindros em linha	
Bloco do motor/ cabeçote	Liga de alumínio	
Capacidade Volumétrica litros	1,339	1,799
HP @rpm (SAE líquida)	110 @ 6000	140 @ 6300
Torque @ rpm - lb x ft	123 @ 1000-2500	128 @ 4300
Rotação máxima rpm	6300	6800
Dimensões do cilindro mm	73 x 80	81 x 87,3
Razão de compressão	10,8:1	10,5:1
Trem de válvulas	8-Valve SOHC i-VTEC®	16-Valve SOHC i-VTEC®
Transmissão	Contínua Variável	Automática
Consumo mpg cidade/estrada	49/51	30/40
Nível de emissão	AT-PZEV	ULEV-2
Volume do tanque gal.	12,3	13,2
Injeção combustível	Eletrônica multi ponto	
Combustível	Gasolina regular sem chumbo	

#### Dados do motor e baterias do carro híbrido

Tipo do motor gerador	Magneto permanente
Potência / torque saída	20 HP / 76 lb-ft
Largura	70 mm
Tipo bateria	Níquel Hidrato metálico (Ni-MH)
Volts	158
Capacidade nominal	5,5 Ah

As conseqüências que a aplicação deste tipo de tecnologia traria para a diminuição das emissões de gases poluentes, assim como para a preservação das reservas de petróleo são bastante promissoras.

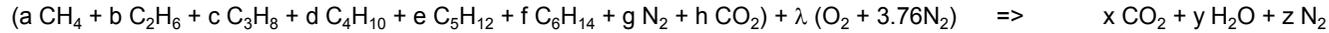
No caso específico do híbrido em série, aplicado em ônibus e veículos mais pesados, a deficiência de torque dos motores a gás seria automaticamente solucionada, pois o acionamento da transmissão é feito pelo motor elétrico, o qual pode desenvolver torques elevados.

Caso houvesse a renovação de toda a frota mundial de veículos e caso a utilização de petróleo fosse priorizada para o transporte, podemos estimar que os prazos para o esgotamento das reservas conhecidas de óleo triplicariam. Algumas cidades do mundo já adotaram ônibus híbridos, como Nova York, por exemplo, que começou a trocar sua frota em 2003, sendo a cidade com o maior número de híbridos em circulação, com uma estimativa de cerca de 500 unidades até dezembro de 2006 [INEE, 2006].

Um prazo de 10 anos é factível para tal renovação, porém a economicidade de tal programa haveria de ser calculada, pois toda essa eletrônica embarcada tem um preço e, muitas vezes, os consumidores não estão dispostos a assumi-lo sozinhos e integralmente. Uma regulamentação específica favorecendo a aquisição desse tipo de veículo é aplicada quando existe interesse da sociedade em melhorar a qualidade do ar nos grandes urbanos como, por exemplo, a sancionada pelo Clean Air Act, nos EUA.

### A.5 ANÁLISE TERMODINÂMICA DA PILHA DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DA PLUG POWER

#### Poder Calorífico do GN nas condições do escoamento



Balanco de massa:

	a	b	c	d	e	f	g	h
C: $(a + 2b + 3c + 4d + 5e + 6f + h) = x$	0.90894	0.06869	0.01159	0.00022	0.00004	0.00003	0.00550	0.00517
H: $(4a + 6b + 8c + 10d + 12e + 14f) = 2y$								
N: $g + 3.76\lambda = z$								
O: $2h + 2\lambda = 2x + y$								

ou

$$\begin{cases} x = 1.08752 \\ y = 2.07186 \\ z = 0.00550 + 3.76\lambda \Rightarrow z = 7.9702 \\ \lambda = 2.11828 \end{cases}$$

T = 45 °C                      p = 101.325 kPa

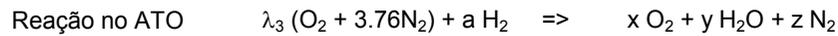
	<b>PCS</b>	<b>PCI</b>
<b>kJ/kmol</b>	<b>935822.6</b>	<b>848450.4</b>
<b>kJ/kg</b>	<b>53297.3</b>	<b>48321.2</b>
<b>kJ/m<sup>3</sup></b>	<b>35846.1</b>	<b>32499.4</b>

	moles	componente	$h_f^0$ -kJ	$\Delta h_f$ -kJ	$h_f^0 + \Delta h_f$
1 Mol de GN	0.90894	CH <sub>4</sub>	-68.055	0.6675	-67.388
	0.06869	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-5.821	0.0756	-5.745
	0.01159	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-1.204	0.0180	-1.186
	0.00022	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-0.028	0.0005	-0.027
	0.00004	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-0.006	0.0001	-0.006
	0.00003	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	-0.005	0.0001	-0.005
	0.00550	N <sub>2</sub>	0.000	0.0032	0.003
	0.00517	CO <sub>2</sub>	-2.035	0.0039	-2.031
Ar	2.118	O <sub>2</sub>	0	0.6842	0.6842
	7.965	N <sub>2</sub>	0	4.6357	4.6357
				$H_{in}$	-71.06
Gas Combustão	7.970	N <sub>2</sub>	0.000	4.6389	4.639
	1.088	CO <sub>2</sub>	-427.963	0.8285	-427.135
	2.072	H <sub>2</sub> O(l)	-592.200	7.8083	-584.391
	2.072	H <sub>2</sub> O(v)	-501.030	4.0104	-497.019
				$H_{out} (l)$	-1006.89
				$H_{out} (v)$	-919.51

### Reação global na Pilha de Células com Reformador

A reação final na pilha consiste da queima do hidrogênio e eventuais resíduos de monóxido de carbono contidos nos gases exaustos no anodo da célula, realizada no ATO - Oxidador Final dos gases exaustos do Anodo.

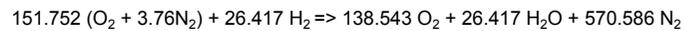
Considerando-se apenas o hidrogênio:



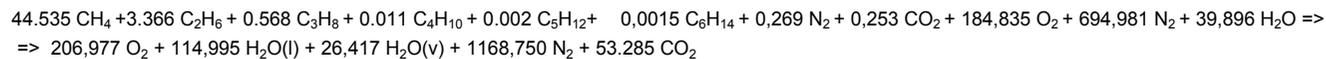
$$\begin{cases} \text{H: } 2a = 2y \\ \text{N: } 3.76\lambda_3 = z \\ \text{O: } 2\lambda_3 = 2x + y \end{cases} \quad \begin{cases} y = 26.417 \\ z = 570.586 \\ 2x + y = 303.503 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda_3 = 151.752 \\ x = 138.543 \end{cases}$$

Vazões estimadas (slm)			
$V_{\text{ar}}$	$V_{\text{O}_2}$	$V_{\text{N}_2}$	$V_{\text{H}_2}$
284.63	59.77	224.86	10.41

$\text{O}_2$	151.67467 moles/hr	$\text{N}_2$	570.585677 moles/hr	$\text{H}_2$	26.417 moles/hr
		Excesso de ar	11.489		
	$V = nRT/p$				
	Em 1 min				
R =	8.3145 kJ/kmol-K	R =	8.3145 kJ/kmol-K	R =	8.3145 kJ/kmol-K
T =	288.15 K	T =	288.15 K	T =	288.15 K
p =	101.325 kPa	p =	101.325 kPa	p =	101.325 kPa
V =	0.05977 m <sup>3</sup>	V =	0.22486 m <sup>3</sup>	V =	0.0104 m <sup>3</sup>
n =	0.00253 kmol	n =	0.00951 kmol	n =	0.00044 kmol
m =	0.0809 kg	m =	0.2664 kg	m =	0.0009 kg

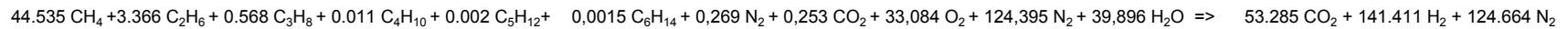
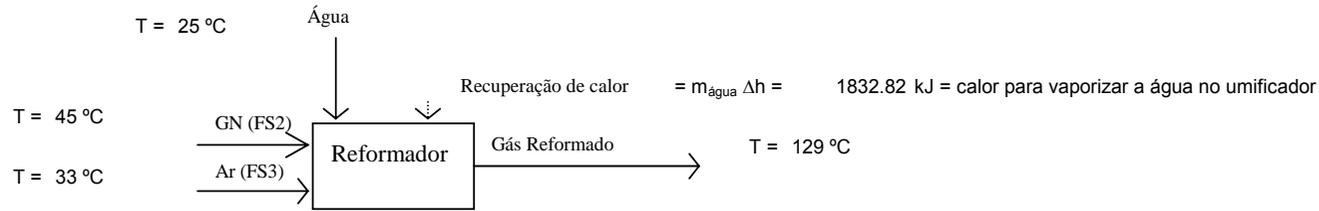


E a equação global de balanço fica:



**Análise Termodinâmica do Reformador**

$p = 163.361 \text{ kPa}$



$p_0 = 101.325 \text{ kPa}$

	moles	componente	$y_i$	$h_f^0$ -kJ	$\Delta h_f$ -kJ	$s_f^0$ -kJ/K	$n c_p \ln T/T^0$	$-nR \ln(y_i p/p_0)$	$\Delta S_f$ kJ/K	$h_f^0 + \Delta h_f$	$s_f^0 + \Delta S_f$
Reagentes GN + ar + água	44.535	CH <sub>4</sub>	21.57%	-3334.49	32.71	8.295	0.106	0.391	0.497	-3301.78	8.792
	3.366	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.63%	-285.20	3.70	0.773	0.012	0.102	0.114	-281.50	0.887
	0.568	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.28%	-59.00	0.88	0.153	0.003	0.026	0.028	-58.12	0.182
	0.011	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.01%	-1.36	0.02	0.003	0.000	0.001	0.001	-1.34	0.004
	0.0020	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.00%	-0.29	0.01	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.28	0.001
	0.0015	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.00%	-0.25	0.00	0.001	0.000	0.000	0.000	-0.24	0.001
	0.269	N <sub>2</sub>	0.13%	0.00	0.16	0.052	0.001	0.014	0.014	0.16	0.066
	0.253	CO <sub>2</sub>	0.12%	-99.68	0.19	0.054	0.001	0.013	0.014	-99.49	0.068
	33.084	O <sub>2</sub>	16.02%	0.00	10.69	6.787	0.035	0.372	0.408	10.69	7.195
	124.395	N <sub>2</sub>	60.24%	0.00	28.94	23.835	0.096	0.030	0.126	28.94	23.961
	39.896	H <sub>2</sub> O (líq)		-11403.57	0.00	2.791	0.000	0.000	0.000	-11403.57	2.79
206.484		100.00%							$H_{in}$	-15106.54	35.15
39.896	H <sub>2</sub> O(v)	19.32%	-9647.97	77.23	7.644	0.237	0.387	0.624	-9570.75	8.268	
Gás Reforma	53.285	CO <sub>2</sub>	16.68%	-20968.89	229.02	11.392	0.659	0.582	1.241	-20739.87	12.63
	141.411	H <sub>2</sub>	44.28%	0.00	428.67	18.479	1.233	0.396	1.630	428.67	20.11
	124.664	N <sub>2</sub>	39.04%	0.00	379.79	23.887	1.093	0.480	1.573	379.79	25.46
	319.361		100.00%							$H_{out}$	-19931.41

$\Delta H = H_{out} - H_{in} + Q = -2992.1 \text{ kJ}$   
 $\Delta S = 66.5 \text{ kJ/K}$   
 $\Delta G = \Delta H - T_0 \Delta S = -22809.9 \text{ kJ}$

A eficiência do reformador pode ser definida como a razão entre as energias químicas contidas na corrente de hidrogênio e do gás natural fornecido:

	Água estado líquido	Água estado vapor
H <sub>2</sub>	40092.1 kJ	34128.6 kJ
GN	45852.5 kJ	41571.5 kJ
η <sub>reformador</sub>	87.4%	82.1%

Por outro lado, podemos calcular a irreversibilidade associada ao processo utilizando a segunda Lei da Termodinâmica.

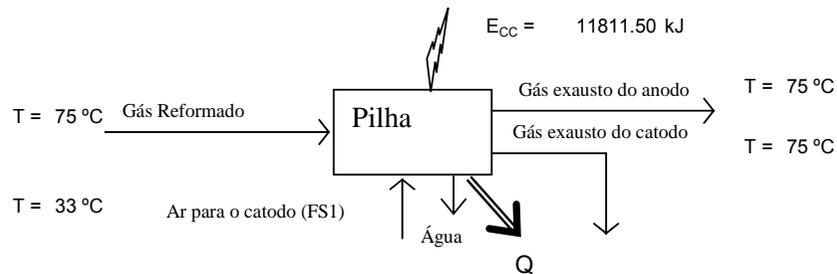
De acordo com a segunda lei, o trabalho reversível entre os dois estados, desprezando-se as variações de energia potencial e cinética, pode ser avaliado por:

$$W^{rev} = (H_{in} - T_0 S_{in}) - (H_{out} - T_0 S_{out}) = 24642.8 \text{ kJ} \quad \text{onde:} \quad T_0 = 298.15 \text{ K}$$

A irreversibilidade associada ao processo do reformador sendo: **I = W<sup>rev</sup> = 24642.8 kJ** 47.9% Energia Elétrica da Pilha (vide item 5.6 a seguir)

### Análise Termodinâmica da Pilha de células

$$p = 122.004 \text{ kPa}$$



Finalmente, podemos comparar o potencial eletroquímico por célula com o efetivamente medido pelo sistema de aquisição de dados da Pilha.

Sendo a voltagem média da pilha igual a: 55.072 V. E, como a pilha é composta por: 88 células:

O potencial por célula fica:  $\Delta V_{real} = \text{Fuel Cell DC Voltage} / 88 \text{ células} = 0.626 \text{ V} \Rightarrow \Delta V_{real} / \Delta V_{rev} = 53.9\%$

A eficiência térmica da pilha de células pode ser calculada multiplicando-se a razão entre o potencial elétrico real e o reversível e a eficiência máxima teórica:

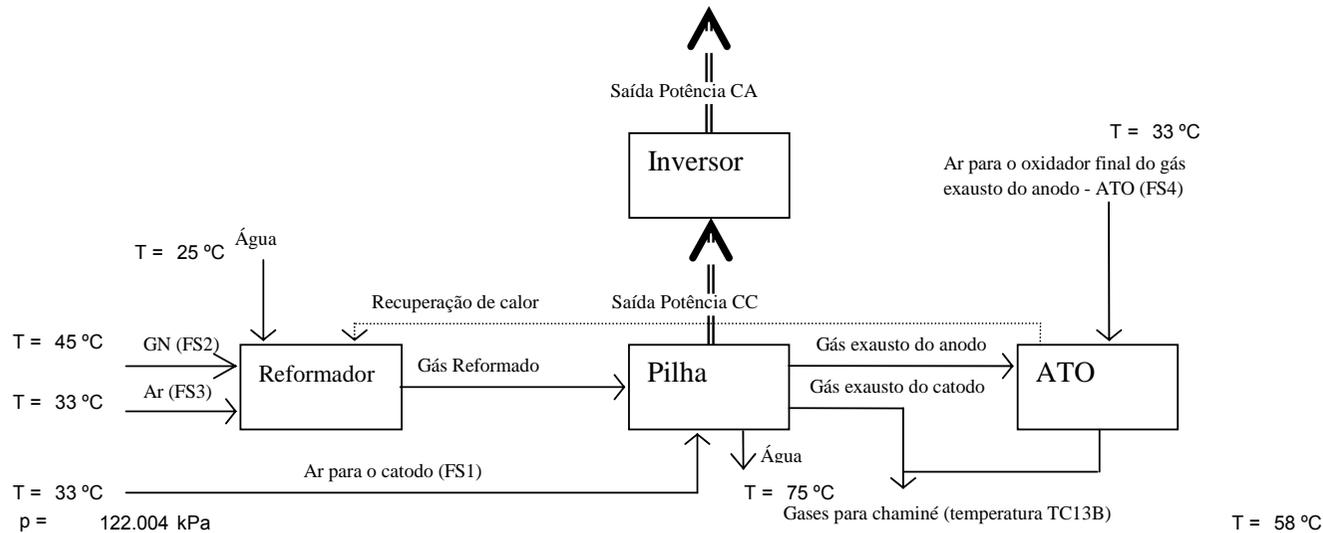
$$\eta_T = \Delta V_{real} / \Delta V_{rev} \times \eta_{rev} = 43.5\%$$

E a eficiência da pilha com conversor pode ser avaliada por:

$$\eta_{GLOBAL} = \eta_T \times \eta_{reformador} \times M_{H2 \text{ utilizado}} / M_{H2 \text{ gerado}} \times \eta_{ele} \quad \text{sendo } M_{H2 \text{ gerado}} / M_{H2 \text{ utilizado}} = 81.3\% \text{ e } \eta_{ele} = \text{saída CA} / \text{entrada CC} = 72.8\%$$

**$\eta_{GLOBAL} = 21.2\%$**  2.2% maior do que a eficiência calculada de forma direta baseada na PCI do gás natural (vide item 5.7 a seguir)

### Análise Termodinâmica Global da Pilha de Células com Reformador



A eficiência global da pilha pode ser avaliada pela razão entre a energia de saída e a energia contida no gás natural fornecido:

	PCS	PCI
CC output	11811.5 kJ	11811.5 kJ
GN	45852.5 kJ	41571.5 kJ
$\eta_{\text{GLOBAL}}$	25.8%	28.4%

Considerando-se a energia final de saída da pilha, abatendo-se as perdas do inversor, a eficiência fica:

	PCS	PCI
CA output	9154.2 kJ	9154.2 kJ
GN	45852.5 kJ	41571.5 kJ
$\eta_{\text{GLOBAL}}$	20.0%	22.0%

Perdas no Inversor	
PCS	PCI
2657.3 kJ	2657.3 kJ
5.8% Energ.GN	6.4% Energ.GN

$\eta_{\text{Inversor}}$
77.5%

Considerando-se a energia útil final entregue à rede, abatendo-se as perdas do inversor e da energia consumida em auxiliares da pilha, a eficiência fica:

	PCS	PCI
Grid output	8604.1 kJ	8604.1 kJ
GN	45852.5 kJ	41571.5 kJ
$\eta_{\text{GLOBAL}}$	18.8%	20.7%

Consumo Auxiliares	
PCS	PCI
550.1 kJ	550.1 kJ
1.2% Energ.GN	1.3% Energ.GN

De acordo com a segunda lei, o trabalho reversível entre os dois estados, desprezando-se as variações de energia potencial e cinética, pode ser avaliado por:

$$W^{\text{rev}} = (H_{\text{in}} - T_0 S_{\text{in}}) - (H_{\text{out}} - T_0 S_{\text{out}}) = 34032.9 \text{ kJ} \quad \text{onde:} \quad T_0 = 298.15 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{rev}} = E_{\text{CC}}^{\text{out}} / W^{\text{rev}} = 34.7\%$$

A irreversibilidade associada ao processo global sendo:

$I = W^{\text{rev}} - W = 22221.4 \text{ kJ}$
---

## A.6 PLANILHA EXCEL COM ROTINA PARA MAXIMIZAÇÃO DE RESULTADOS

Na rotina de cálculo desenvolvida em EXCEL cada Portfólio compõe uma planilha onde são explicitados os seguintes itens:

- Custo de geração de energia do Portfólio, representado pelo retorno da tecnologia = energia gerada por custo para produzi-

$$\text{Ia: } E(r_p) = \sum_{i=1}^N X_i \cdot E(r_i)$$

- Desvio-padrão dos custos para geração de energia por fonte/ tecnologia
- Distribuição inicial dos pesos do Portfólio dos componentes dos custos de geração
- Matriz de covariação dos custos
- Variância dos componentes do Portfólio

- Desvio-padrão dos custos do Portfólio:  $\sigma_p = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N X_i \cdot X_j \cdot \rho_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j}$

A função objetivo pode ser tanto a maximização do retorno variando-se a distribuição dos componentes  $X_i$  para um dado risco assumido, quanto à minimização do risco para um retorno pretendido. Em ambos os casos a função SOLVER é aplicada, obedecendo às condições de contorno estabelecidas.

### CUSTO GERAÇÃO DE ENERGIA DO PORTFOLIO

6,61      0,151

#### Participação das Fontes na Geração de Energia Elétrica em 2030 segundo a EPE

GN NOVA	CANA NOVA	CANA VELHA	GN VELHA	CARVÃO NOVA	NUCLEAR VELHA	HIDRO NOVA	HIDRO VELHA	EÓLICA	COGEN GN	NUCLEAR DISTRI	OD	CARVÃO VELHA	NUCLEAR NOVA	
11,65	3,87	2,13	4,35	6,80	1,60	27,41	40,89	3,30	0,00	0,00	0,00	1,20	2,40	105,60 GW médio

#### Distribuição das participações das fontes segundo o Portfólio

GN NOVA	CANA NOVA	CANA VELHA	GN VELHA	CARVÃO NOVA	NUCLEAR VELHA	HIDRO NOVA	HIDRO VELHA	EÓLICA	COGEN GN	NUCLEAR DISTRI	OD	CARVÃO VELHA	NUCLEAR NOVA	
0,00%	8,88%	3,29%	3,79%	3,79%	1,52%	27,62%	38,72%	5,80%	5,68%	0,00%	0,00%	0,92%	0,00%	100%
0,00	9,38	3,47	4,00	4,00	1,60	29,16	40,89	6,13	6,00	0,00	0,00	0,98	0,00	105,60 GW médio

Desvios padrões dos custos para geração de energia

GÁS NATURAL NOVA						RESÍDUO NOVA						RESÍDUO VELHA					
0.10	0.23	0.20	0.09	0.05	0.39	0.10	0.25	0.20	0.09	0.05	0.39	0.00	0.25	0.20	0.09	0.05	0.39

Matriz de correlação dos custos

1	0	0	0	0	0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0	1	0	0	0	0	0.0	0.454	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.454	0.0	0.0	0.0	0.0
0	0	1	0	0	0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
0	0	0	1	0	0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0
0	0	0	0	1	0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0
0	0	0	0	0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	1	0	0	0	0	0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.454	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1	0	0	0	0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0	0	1	0	0	0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0	0	0	1	0	0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0	0	0	0	1	0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0	0	0	0	0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	1	0	0	0	0	0
0.0	0.454	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1	0	0	0	0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0	0	1	0	0	0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0	0	0	1	0	0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0	0	0	0	1	0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0	0	0	0	0	1
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.274	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.142	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.142	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	-0.253	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.026	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.026	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

GN VELHA						CARVÃO NOVA						NUCLEAR VELHA					
0.00	0.23	0.20	0.09	0.05	0.39	0.15	0.07	0.20	0.09	0.05	0.39	0.00	0.25	0.20	0.09	0.05	0.39
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.274	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.253	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0
0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.454	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.142	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.026	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0
0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.454	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.142	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.026	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0
0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
1	0	0	0	0	0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0	1	0	0	0	0	0.0	0.274	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.253	0.0	0.0	0.0	0.0
0	0	1	0	0	0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
0	0	0	1	0	0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0
0	0	0	0	1	0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0
0	0	0	0	0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	1	0	0	0	0	0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.274	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1	0	0	0	0	0.0	0.183	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0	0	1	0	0	0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.0	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0	0	0	1	0	0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.0	0.0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0	0	0	0	1	0	0.7	0.0	0.1	0.1	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0	0	0	0	0	1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	1	0	0	0	0	0
0.0	-0.253	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.183	0.0	0.0	0.0	0.0	0	1	0	0	0	0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0	0	1	0	0	0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0	0	0	1	0	0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0	0	0	0	1	0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0	0	0	0	0	1
0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.7	0.0
0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.7	0.1	0.1	0.0
0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.7	0.1	0.0
0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0











