

Aspectos da produção de álcool combustível super-hidratado¹ (ACSH) e sua utilização em veículos automotores

**Flávio Dias Mayer¹
Gustavo Álvares da Cunha²,
Vanessa Baldo²,
Weslei Monteiro Ambros³,
Ronaldo Hoffmann⁴**

Resumo

O etanol carburante constitui-se em um importante combustível renovável no Brasil. Visando reduzir os custos energéticos na etapa de destilação, o uso de ACSH em motores de combustão interna têm surgido como uma alternativa atraente. Entretanto, são necessárias adaptações na configuração dos motores de uso comum, a fim de operar satisfatoriamente com elevados teores de água. Dentre estas, o uso de etanol hidratado com gasolina em motores flex, o desenvolvimento de catalisadores e a utilização de motores com ignição multiponto têm se destacado. A consolidação desta proposta acarretaria em uma melhoria no balanço energético de produção do etanol aliada a impactos positivos na performance e na redução de emissões em motores de combustão interna.

Palavras-chave:

Álcool combustível super-hidratado, Destilação, Consumo energético, Motor de combustão interna,

¹Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFRGS
flaviodymayer@yahoo.com.br;

²Acadêmico do Curso de Engenharia Química – UFSM

³Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – UFSM

⁴Professor do Departamento de Engenharia Química - UFSM

1. Introdução

A realidade mundial demonstra uma crescente preocupação com o meio ambiente servindo de incentivo no desenvolvimento de novas tecnologias. Neste enfoque, é fundamental a análise dos processos e variáveis envolvidas a fim de obter o máximo de aproveitamento energético. Assim, o uso do etanol se enquadra como uma fonte de energia econômica e sustentável, porém com desafios a serem vencidos para a sua otimização.

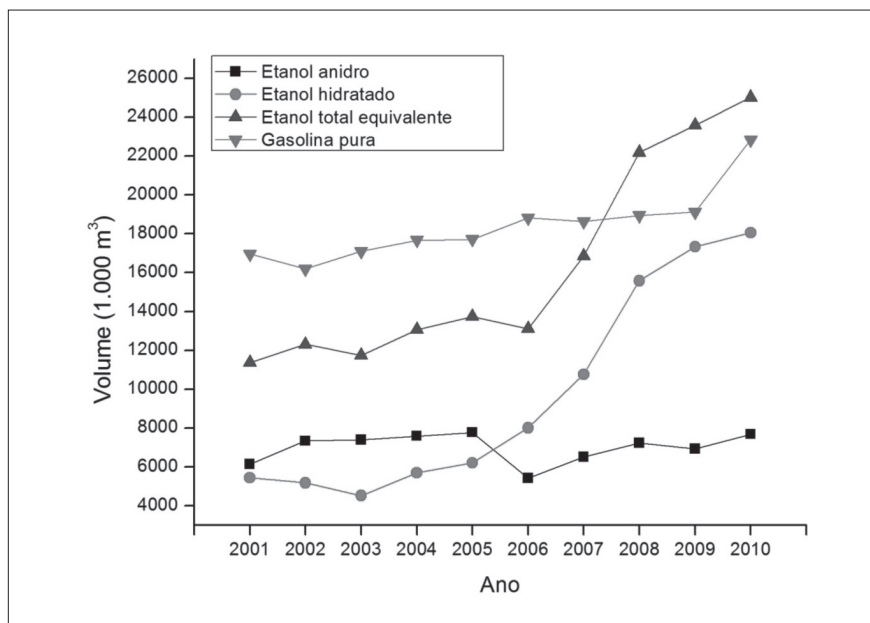
O etanol produzido a partir da biomassa apresenta-se como um excelente substituto à gasolina por ser renovável, por fazer uso da mesma infraestrutura logística desse combustível fóssil, por ser produzido localmente (ao contrário do petróleo) e, em alguns casos, por ser obtido de forma mais econômica.

Muitos países têm se aperfeiçoado na produção de etanol para fins carburantes, notadamente os Estados Unidos e o Brasil, responsáveis por mais 86% da produção mundial em 2010 (Boundy et al., 2011). Outras regiões também pretendem ampliar a produção ou a participação dos biocombustíveis em sua matriz energética, como na América Latina, Europa e Ásia (Sorda et al., 2010; Ravindranath et al., 2011; Janssen e Rutz, 2012; Chalmers e Archer, 2012).

O etanol carburante constitui-se em um importante combustível renovável no Brasil (Figura 1). Ele é utilizado hidratado, diretamente em motores, ou anidro, obrigatoriamente adicionado à gasolina, em uma concentração entre 20 e 25%. Na década de 1980 o etanol foi o combustível mais utilizado em veículos de passeio, perdendo esse posto devido a uma crise de desabastecimento em 1989 e à queda dos preços internacionais do petróleo (Sorda et al., 2010).

Nos últimos quatro anos, os veículos do tipo *flex fuel* licenciados no Brasil respondem, em média, por 85% do total e totalizam 15,3 milhões de unidades fabricadas desde 2003 (ANFAVEA, 2012). Estima-se que em 2015 atinjam 47% da frota nacional de veículos leves (Sorda et al., 2010). Essa flexibilização no consumo possibilitou aos consumidores escolher qual combustível utilizar em função do preço, escolhendo-se o etanol hidratado quando esse situar-se abaixo de 70% do valor da gasolina. Essa versatilidade resulta em uma mudança quase instantânea no consumo desses energéticos verificado no Brasil, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Consumo de etanol equivalente (anidro + hidratado) e gasolina pura no Brasil, em 1.000 m³.



É importante notar que as emissões líquidas de gases de efeito estufa do etanol são consideravelmente menores quando comparadas com outras formas de combustíveis, pois o etanol emite 73% e 68% menos dióxido de carbono do que a gasolina e o diesel, respectivamente, mostrando assim ser o combustível ideal para cumprimento de metas de redução da emissão desses gases, contidas no Protocolo de Kyoto. (MACEDO, 2007).

No caso do Brasil, que produziu um total de 27,7 bilhões de litros de etanol em 2010 (CONAB, 2011), tem-se como principal matéria-prima a cana-de-açúcar, em um sistema de produção centralizado e em grande escala, em unidades que, em sua maioria, produzem concomitantemente açúcar, etanol e energia elétrica.

Mais recentemente, tem-se dado destaque à produção de álcool combustível em microdestilarias, em um modelo de produção oposto ao modelo atual (Mayer et al., 2010). Na pequena escala, além da produção de etanol,

¹ No Brasil, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis estabeleceu, através da Resolução ANP nº23 de 06/07/2010, as definições para o etanol utilizado como combustível. De maneira a definir com exatidão os termos empregados nesse trabalho optou-se pelas seguintes significações: etanol, como denominação genérica, correspondendo à fração anidra e à hidratada; etanol anidro, para designar o etanol anidro adicionado à gasolina; álcool combustível, para indicar o etanol hidratado 92,5% em massa e; álcool combustível super-hidratado, para nomear a mistura de etanol em concentrações menores que 92,6% em massa em água.

procura-se desenvolver outras modalidades de produção, como a de alimentos, através do aproveitamento de subprodutos oriundos do processamento do álcool combustível, como o bagaço e o vinhoto.

É nesse contexto de sustentabilidade energética (produção de combustível automotivo e de alimentos) que surge a possibilidade de modificações no modelo de utilização do álcool combustível que não aquele com elevada concentração (92,5% em massa ou 92,5°INPM, conforme a Resolução ANP nº 07, de 09 de fevereiro de 2011). Isso só é possível por que se trata de um caso de autoprodução de combustível, sem venda a terceiros.

Nesse modelo de produção surge a possibilidade de utilização de ACSH, ou seja, em concentrações de etanol menores que 92,5% em massa. A vantagem dessa alternativa seria reduzir os custos energéticos na destilação, uma vez que, conforme Mayer et al. (2010), as atividades relacionadas com a destilação do etanol (destilação propriamente dita e geração de vapor) respondem pela maior parte dos custos de produção (59,67%).

Assim, uma análise dessa alternativa em relação aos custos de produção de ACSH em microdestilarias e o impacto de sua utilização em veículos automotores certamente contribuirá para esclarecer a possibilidade de redução de custos produtivos encontrados na pequena escala, com influência na viabilidade econômica de tais empreendimentos.

2. Consumo energético em uma microdestilaria

A destilação é um processo de separação que demanda grande quantidade de energia. Segundo Humphrey e Selbert (1992), 43% da energia consumida por indústrias de processamento químico são gastos em processos de separação. Dentre esses processos podem-se citar a destilação, extração e absorção.

A destilação e desidratação do etanol são os principais pontos relacionados aos custos da produção, envolvendo em torno de 20% do total, sendo o gasto energético linear até uma concentração do destilado de 80%, tendo a partir deste patamar um crescimento exponencial. Quanto mais próximo do ponto azeotrópico (95,6% em volume) mais rapidamente aumenta o gasto energético para esse enriquecimento, elevando o valor final do produto. (Robertson e Pavlath, 1985).

Assim como na indústria de grande porte, na realidade de uma microdestilaria, os gastos associados ao processo de destilação também são significativos.

Inicialmente, analisando a variação da concentração da alimentação da coluna de destilação, conforme Stampe et al. (1983), pode-se perceber que com o aumento da concentração de etanol no vinho fermentado haverá uma di-

minuição no gasto energético no processo de destilação do etanol. Essa analogia também é válida para o processo de destilação do etanol a partir da cana-de-açúcar.

Salienta-se que concentrações de etanol acima de 13% v/v resultam em pequena redução nos custos energéticos (Stamp, 1983; Collura e Luyben, 1988), além de comprometer a fermentação pela toxicidade do etanol para boa parte das cepas de leveduras (Walker, 1998).

Bengtson (1983) em seus estudos afirma que com o aumento da concentração de etanol na alimentação da coluna de destilação o consumo de calor mínimo requerido para a destilação (por litro do produto) tende a diminuir, para uma mesma concentração do destilado. Observa-se que, segundo esse mesmo autor, o caso mais representativo dessa variação ocorre quando a concentração da alimentação é elevada de 8,0 para 12,0% em volume e a concentração do destilado é reduzida de 95,0 para 80,0% em volume, resultando na redução de 42% no consumo energético do processo de destilação.

Entretanto, em microdestilarias, a concentração de etanol no vinho obtida a partir da cana-de-açúcar é, usualmente, em torno de 8 % em volume. Para obter concentrações mais elevadas de alimentação faz-se necessário empregar processos fermentativos mais elaborados, com o uso de leveduras selecionadas e um rigoroso controle de contaminação, requerendo investimentos expressivos para sua implantação. Considerando a realidade de pequenas propriedades rurais esse processo muitas vezes acaba inviabilizado por ser oneroso.

Ao avaliar a concentração do destilado Bengtson (1983) mostrou que com o aumento da concentração do produto o processo utiliza uma quantidade maior de calor para a destilação até obter-se a concentração de interesse. Isso é plenamente justificado pelo fato do sistema necessitar de uma quantidade adicional de calor para vaporizar mais líquido. Também pode ser necessário uma maior razão de refluxo ou, por outro lado, de maior investimento na construção de uma torre de destilação com maior número de estágios de separação. Conforme Mayer (2010b), um aumento na razão de refluxo de 2,15 vezes resulta na diminuição de 40% no fator energético da destilação.

Ladisch e Dyck (1979) discutiram em seus trabalhos a variação do fator energético (Energia da combustão do etanol/ Energia gasta no processo de destilação) em função da concentração do produto obtido. Seus experimentos mostraram que quanto maior for a concentração do álcool obtido no processo, menor será o valor do fator energético, sendo necessário gastar uma quantidade significativa de energia adicional para obtenção do produto mais concentrado. Entretanto esse gasto de energia adicional para gerar

tal concentração atinge um limite em que, além de economicamente inviável, se torna irracional pelo fato de a quantidade da energia gasta no processo é maior que a energia obtida na combustão do etanol.

Entretanto, para menores valores de concentração do produto obtêm-se valores de fator energético maiores, pois para a obtenção de um produto com menor pureza será necessário usar menor quantidade de energia no processo.

Segundo Ladisch e Dyck (1979), para a obtenção do ACSH a 85% em volume, o fator energético do processo chega a ser três vezes maior que o fator energético obtido no processo de destilação de um produto mais concentrado (95% em volume).

Assim, a produção de um álcool de menor concentração requer um gasto menor de calor durante o processo de destilação e torna-se vantajoso, pois mesmo a uma concentração menor este álcool gera uma quantidade significativa de energia no processo de combustão.

3. Utilização de ACSH em motores

Em virtude do consumo de energia necessário para remoção da água do etanol, especialmente durante os últimos estágios da destilação, o uso de ACSH têm se apresentado como uma interessante alternativa no abastecimento de motores de combustão interna, visto que seu uso direto pode melhorar o balanço energético de produção do álcool, tornando-o uma alternativa economicamente mais atrativa.

A tecnologia disponível atualmente permite que os motores sejam alimentados com etanol com percentual de água mais elevada, de forma a não comprometer o seu funcionamento. Moraes (1983) afirma que, em experiências realizadas em motores do Ciclo de Otto movidos a álcool hidratado, utilizando-se o ACSH com até 50% de água, obteve-se a mesma potência que com o etanol puro, desde que sejam realizadas adaptações nos motores para cada percentagem de água.

Moraes (1980) descreve que motores de ciclo Otto que utilizam ACSH 50% em volume podem desenvolver a mesma potência que com o etanol puro, desde que o motor seja convenientemente adaptado. Isso resulta do aumento da capacidade antidetonante da água devido ao seu elevado calor latente de vaporização (Moraes, 1980; Kotrba, 2008). O alto poder antidetonante do etanol admite uma taxa de compressão no motor de 12:1, determinando assim a alta eficiência da conversão da energia térmica em energia mecânica.

Em motores ciclo Otto, uma alta concentração de água resulta em substancial diluição da mistura ar-combustível, retardando a propagação da chama e podendo ocasionar falha na ignição da mistura. As dificuldades se acentuam

em motores diesel, visto que mesmo o etanol anidro não é um bom combustível devido sua considerável resistência a autoignição (alta octanagem). A adição de água aumenta ainda mais esta resistência, pois inibe a taxa de reação química ao resfriar o ar presente na câmara de combustão, tornando a duração da queima excessivamente longa. Desta maneira, o estabelecimento da fração ótima de água que permite uma operação satisfatória destes motores é uma questão que merece importante atenção, pois mesmo os usos de pequenos graus de hidratação podem representar uma considerável economia de energia frente aos processos industriais de destilação e desidratação (Martinez-Frias et al. (2007)).

Gupta et al. (2010) investigou os efeitos da mistura de diferentes teores de água em etanol na eficiência térmica e nas emissões em um motor ciclo Otto em comparação com o uso de gasolina (Gasohol 91). Os resultados mostraram um aumento na eficiência térmica para o uso de etanol hidratado com mais de 10% v/v de água, embora com um aumento proporcional no consumo específico de combustível. Os hidrocarbonetos totais não queimados e as emissões de monóxido de carbono (CO) se elevaram com a adição de água, mas mesmo após o teste com 20% em volume de água, a concentração de saída destes gases foi menor do que quando utilizada a gasolina.

Considerando que os veículos flex podem operar com gasohol (gasolina misturada com 18-25% em volume de álcool anidro), etanol hidratado 100% (4 – 4,9% em volume de água) ou qualquer mistura destes combustíveis, Melo et al. (2012) propôs a investigação dos efeitos na eficiência de combustão e emissões em um motor flex ciclo Otto alimentado à gasolina com 25% em volume de etanol anidro misturado a diferentes frações de etanol hidratado. Foi verificado que a eficiência aumentou gradativamente com o teor de etanol hidratado, destacando-se que o etanol hidratado 100% apresentou a melhor eficiência. As emissões de CO e hidrocarbonetos não-queimados diminuíram com a adição de álcool, devido a maior quantia de oxigênio na mistura, o que potencializa a oxidação a dióxido de carbono (CO₂). A geração de óxidos de nitrogênio (NO_x) apresentou comportamento complexo, aumentando ou decaindo de acordo com a velocidade de rotação adotada nos testes. Por outro lado, a formação de aldeídos aumentou significativamente com o aumento do teor de álcool hidratado.

O recente desenvolvimento de motores de ignição por carga homogênea (HCCI) apresenta uma opção versátil a vários tipos de combustíveis, pois combina a alimentação pré-misturada (tal qual em um motor ciclo Otto) com a autoignição (como acontece em um motor ciclo Diesel). O resultado é a combustão simultânea em vários pontos no interior da câmara de combustão (ignição multiponto). Visando a otimização do ciclo de vida do etanol, Martinez-Frias et al. (2007) investigaram o uso de ACSH em motores HCCI.

Partindo de uma concentração de água de 85% em volume e aumentando gradualmente a concentração de etanol, encontrou-se que a proporção máxima de água que permitia uma operação satisfatória do motor correspondia a 65% em volume. O uso de combustível com esta proporção de água reduziu o custo energético da destilação para apenas 3% (contra 37% na produção de etanol anidro) e aumentou o saldo líquido de energia de 21% para 55%, referente ao ganho líquido do etanol de milho e dos co-produtos (glúten e óleo de milho).

Martinez-Frias et al. (2007) descrevem previsões numéricas em que a utilização de ACSH a 35% em volume em motores HCCI resulta em elevada eficiência térmica (38,7%) e baixas emissões de NO_x (1,6 ppm).

Neste sentido, Mack et al. (2009) testaram diferentes concentrações de etanol hidratado (40 a 100% em volume) em motor do tipo HCCI, demonstrando funcionamento estável e baixas emissões de poluentes em concentrações de água de até 40%.

O aproveitamento do calor residual dos gases de exaustão também é uma ferramenta útil na economia de combustível e melhora na combustão de misturas de etanol hidratado. Saxena et al. (2012) propôs o uso de etanol hidratado em um motor Volkswagen de quatro cilindros adaptado para operar como um motor HCCI e munido de um sistema de integração energética. O sistema consistia de um trocador de calor que permitia a recuperação do calor dos gases de escape para o pré-aquecimento do ar de alimentação, fornecendo energia auxiliar para ignição do etanol hidratado. As misturas variaram entre 100% e 80% de etanol, em volume, e os testes foram realizados para pressões de entrada de 1,5 a 2 bar e razões de equivalência de 0,25 a 0,55. Os resultados deste estudo mostraram que os motores HCCI, sob condições ótimas de pressão de entrada e razão de equivalência, podem utilizar ACSH com até 20% de água mantendo as condições de funcionamento favoráveis.

O desenvolvimento de sistemas catalíticos que minimizem o atraso da combustão devido aos altos teores de água tem sido o foco de Beyerlein et al. (2001), nos quais os testes são realizados em uma mistura de 30% de água e 70% etanol em volume. No protótipo, um motor diesel convertido em motor HCCI munido com o dispositivo de ignição catalítica, uma diminuição de dez vezes nas emissões óxido nitroso (NO_x), um aumento de 10% da potência máxima e uma melhoria de 1% no consumo específico de combustível foram observadas em comparação com a configuração original do motor, que era o ciclo diesel.

4. Conclusão

Na produção de álcool combustível, a destilação e a desidratação figuram como as operações de maior custo energético, diretamente responsáveis pela elevação do valor do produto final. A utilização de ACSH em motores de combustão interna tem se apresentado como uma alternativa prática e atraente para redução destes custos. Entretanto, são necessárias adaptações na configuração dos motores de uso comum, a fim de operar satisfatoriamente com elevados teores de água. Dentre as modificações propostas se destacam o uso de etanol hidratado misturado com gasolina em motores flex, o desenvolvimento de catalisadores que facilitem a combustão de misturas altamente hidratadas bem como a aplicação direta de etanol super-hidratado em motores com sistema de ignição multiponto (motor HCCI).

Os trabalhos citados são apenas exemplos de um amplo campo de estudos voltado ao uso de ACSH em motores. A redução de custos energéticos relacionados ao processamento do etanol figura entre os principais fatores que motivam estas pesquisas. Paralelamente, a minimização das emissões em motores de combustão interna em conjunto com a conservação dos parâmetros de operação de motores convencionais são vantagens adicionais de considerável impacto econômico e social.

Referências

- ANFAVEA, Indústria automotiva brasileira 2011/2010. **Carta da Anfavea**. Publicação mensal da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículo Automotores (Anfavea), nº 306, Janeiro, 2012.
- BENGTSON, H., Small Scale Ethanol Production from corn – Technology, Energy Efficiency and Economics. **Energy in Agriculture**, vol. 2, p. 197-217, 1983.
- BEYERLEIN, S. et al, **Homogeneous Charge Combustion of Aqueous Ethanol**. National Institute for Advanced Transportation Technology, Final Report, February, 2001.
- BOUNDY, B. et al.. **Biomass Energy Data Book: Edition 4**. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 2011.
- CHALMERS, J., ARCHER, G., Development of a sustainability reporting scheme for biofuels: A UK case study. **Energy Policy**, vol.39, p. 5682–5689, 2011.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento, **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, janeiro/2011**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília, 2011.
- GUPTA, P. et al., Impact of Water Contents Blended with Ethanol on SI Engine Performance and Emissions. **First TSME International Conference on Mechanical Engineering**, 20-22 October, 2010.
- HUMPHREY, J. L., SELBERT, A. F., New Horizons in Distillation. **Chemical Engineering**, December, p. 86-98, 1992.
- JANSSEN, R., RUTZ, D. D., Sustainability of biofuels in Latin America: Risks and opportunities. **Energy Policy**, vol. 39, p.5717–5725, 2011.
- KOTRBA, R., Testing the water. Ethanol Producer Magazine, April 08, 2008. Disponível em <http://www.ethanolproducer.com/articles/3981/testing-the-water>.
- LADISCH, M. R., DYCK, K., Dehydration of Ethanol: New Approach Gives Positive Energy Balance. **Science**, vol. 205, 31 august, 1979.

MACK, J. H. et al., Demonstrating direct use of wet ethanol in a homogeneous compression ignition (HCCI) engine. **Energy**, vol. 34, p. 782-787, 2009.

MARTINEZ-FRIAS, J. et al., **Improving Ethanol Life Cycle Energy Efficiency by Direct Utilization of Wet Ethanol in HCCI Engines**. Lawrence Livermore National Laboratory, 2007.

MAYER, F. D., Aspectos técnicos e econômicos da produção de álcool combustível em microdestilarias no Rio Grande do Sul. In: **XIII Congresso Brasileiro de Energia**, 2010, Rio de Janeiro. Energia e Qualidade de Vida, 2010, p. 185-197.

MAYER, F. D. (b), **Desenvolvimento da Tecnologia de Destilação Adequada à Produção de Álcool Combustível em Pequena Escala**. Dissertação de Mestrado. PPGE/UFSM. Santa Maria, 2010.

MELO, T. C. et al., Hydrous ethanol-gasoline blends – Combustion and emissions investigations on a Flex-Fuel engine. **Fuel**, vol. 97, p. 796-804, July 2012.

MORAES, J. R., **Álcool Carburante**. Manuais CNI, 1980.

RAVINDRANATH, N. H. et al., Biofuel production and implications for land use, food production and environment in India. **Energy Policy**, vol. 39, p. 5737-5745, 2011.

ROBERTSON, G. H., PAVLATH, A. E., Dehydration of Ethanol. **U. S. Patent. number 4,556,460**, december, 03, 1985.

SAXENA, S. et al., Wet ethanol in HCCI engines with exhaust heat recovery to improve the energy balance of ethanol fuels. **Applied Energy**, vol. 98, p. 448-457, October 2012.

SORDA, G. et al., An overview of biofuel policies across the world. **Energy Policy**, n 38, p.6977–6988, 2010.

STAMPE, S. et al., Energy Consumption of a Farm-Scale Ethanol Distillation System. **Energy in Agriculture**, vol. 2, p.355-368, 1983.