



## DESEMPENHO DE UM MOTOR ALIMENTADO A ÁLCOOL ALTAMENTE HIDRATADO



**Eduardo Klein & Pedro Mello**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia mecânica  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Rua Sarmento Leite, 425 - 90050-170 Porto Alegre/RS Brasil

### RESUMO

*Atualmente os combustíveis para alimentar motores de combustão interna em nível mundial são basicamente derivados do petróleo. O Brasil apresenta-se neste contexto como uma rara exceção, onde tem-se a possibilidade do uso do álcool hidratado como combustível alternativo. Os resultados obtidos desta experiência tem sido extremamente satisfatórios do ponto de vista técnico. Entretanto, a otimização do uso de motores alimentados com álcool com diferentes conteúdos de água ainda é uma questão em aberto. A desidratação do álcool junto ao parque produtivo representa custos muito elevados, dependendo do grau de água a ser eliminada nos processos de destilação. Neste trabalho é efetuado o levantamento experimental do desempenho de um motor de ignição por centelha alimentado a álcool com diferentes teores de hidratação.*

### INTRODUÇÃO

Desde o surgimento, no final do século passado, dos motores de combustão interna de quatro tempos para uso automotivo existe a preocupação no sentido de haver à disposição do usuário um combustível acessível e de baixo custo. Na verdade já em meados do século dezessete, os pesquisadores procuravam descobrir hidrocarbonetos gasosos e líquidos para serem utilizados como combustível. Mais tarde surgiria o álcool combustível, e, em 1861, Nikolaus August Otto, idealizador do motor de 4 tempos, já tinha em mente o uso desse álcool para alimentar seu motor (Penido, P. 1981).

Em 1975 o preço do barril de petróleo ( que , dois anos antes era de US\$ 2,50 ) começava a disparar chegando a US\$ 10,00. Foi o bastante para surgir o proálcool, por várias razões, mas principalmente para tentar encontrar uma saída para a crise por que passavam os produtores de açúcar, devido à falta de demanda e a queda de preços no mercado internacional. Neste mesmo ano iniciava-se no CTA (Centro Técnico Aeroespacial) em São José dos Campos (SP) as pesquisas para se utilizar o álcool como combustível para alimentar motores de combustão interna. Foi desta maneira o segundo combustível a ser oferecido nos postos de serviço do Brasil juntamente com a gasolina para motores Otto. Estes estudos tiveram aplicação prática nos anos oitenta com enorme expansão na produção de motores alimentados a álcool, mas gradativamente foi sendo reduzido até os dias atuais, onde a produção de automóveis alimentados a álcool é inferior a 4%. Nos anos oitenta a produção chegou a atingir 96% das unidades colocadas a venda no mercado(1986).

A maior vantagem do álcool como combustível, nos dias de hoje, é com relação aos níveis de poluentes que a combustão do mesmo lança na atmosfera que são muito menores que os da gasolina comum. Na vanguarda dos trabalhos feitos para se tentar solucionar o problema da poluição estão os Estados Unidos. Na Califórnia, por exemplo, existe até uma lei ligada a questão , denominada " Clean Air Act " ou decreto do ar limpo. Datada de 1990, ela determina a redução gradual nos níveis de emissões dos motores ao patamar zero ( 2% da produção total do ano 2000 ) até o fim do século, que tornará certamente impraticável o uso de motores de combustão interna. Talvez o mais nocivo produto da combustão do álcool sejam os aldeídos

acéticos por ele liberados. A questão básica sempre levantada de que o álcool é uma fonte renovável de energia não nos parece de muito fundamento visto que a crise do petróleo é bem mais política do que propriamente energética. Além disso, a terra em que é cultivada a cana de açúcar vai perdendo suas propriedades gradativamente, daí a necessidade de descentralizar a produção inclusive para a diminuição dos encargos com frete.

Neste trabalho é apresentada a análise experimental do desempenho de um motor alimentado com álcool com vários teores de hidratação. Os resultados indicam que é possível utilizar-se misturas álcool+água sem grandes perdas de potência,sem grandes alterações no consumo de combustível e sem grandes modificações no sistema de alimentação. Entretanto, é necessário uma otimização no ponto de início da ignição, no grau térmico das velas, na relação de compressão, bem como dos calibres do sistema de dosagem de combustível, quando tratar-se de motores carburados. Quando se tratar de um motor alimentado por sistema de injeção eletrônica de combustível deverá ser selecionado um programa computacional adequado para as condições de teste e funcionamento.

### O ÁLCOOL COMBUSTÍVEL

Devido à pureza e suas propriedades térmicas, o álcool é, sem dúvida, um combustível muito diferente dos hidrocarbonetos derivados do petróleo, e por ser também mais homogêneo a combustão é bem mais completa, deixando um número menor de sub produtos ao final da combustão, produzindo inclusive teores de CO bem inferiores aos da combustão da gasolina. A única desvantagem do álcool com relação a poluição é a emissão exagerada de aldeídos (como já mencionado anteriormente) e de óxidos de nitrogênio. A questão do menor poder calorífico do álcool pode ser resolvida em parte através do aumento da relação de compressão, já que o índice de octano do álcool é bem superior ao da gasolina vendida no Brasil. O fato do álcool iniciar sua evaporação a apenas 78,2° C talvez seja, ainda hoje, o ponto em que devam ser concentrados os maiores estudos a fim de se conseguir otimizar o funcionamento do motor ainda frio. Quando o motor está na fase de aquecimento, o álcool pode ser prejudicial ao filme de óleo presente nas paredes dos cilindros, já que é solvente de alguns

tipos de óleos, visto que ainda não começou a evaporar. Este tipo de problema não acontece com a gasolina, visto que inicia sua evaporação a partir de 27 graus Celcius.

O álcool, por ser um produto derivado da biomassa, é geralmente destilado e devido ao fato de ser altamente higroscópico, permanece misturado a este um certo teor de água, onde deve ser inicialmente separado por processos de retificação e químicos, se for o caso do álcool anidro. A partir de 96° GL, não se consegue mais extrair a água por processo comum de destilação, então deve ser utilizado um processo químico altamente dispendioso em termos financeiros. A matéria prima pode ser cultivada regularmente, logo renovável e pode ser obtida por grandes e pequenos agricultores, possibilitando assim uma boa distribuição econômica entre várias regiões. Esse álcool produzido a partir da biomassa pode prover de sacarídeos, amiláceos e celulósicos (Paul, J.K., 1979). Como a tecnologia utilizada na produção do álcool é bastante simples e amplamente conhecida, permite que pequenos produtores de cana de açúcar, por exemplo, possam também produzir esse combustível em minidestilarias, onde equipamentos mais simples podem ser aqui utilizados. Isso aplicado em grande escala reduziria a importação de petróleo, que hoje está ao redor de 500 mil barris/dia. Por outro lado o trinômio energia-economia-ecologia poderia encontrar um equilíbrio a partir da descentralização do setor de matérias primas para a produção de álcool através desses subsistemas. Também os subprodutos da cana de açúcar, por exemplo, o bagaço podem ser utilizados como fonte de energia para a geração do vapor da própria caldeira da usina. Em Bristoti, A. e Tolmasquin, M., 1987, encontram-se de forma abrangente uma análise técnica e econômica de microdestilarias, onde inclusive são enfocados aspectos ecológicos ligados aos resíduos gerados no processo produtivo.

Do ponto de vista energético, o que deve ser ressaltado é o fato de que o custo para a extração da água do álcool vai se tornando muito elevado a medida que vamos nos aproximando da condição de álcool anidro propriamente dito, em razão da curva de destilação ter um ponto de inflexão ao redor dos 96% em volume de álcool. Isto é um caso de legítima autofagia como mostra claramente Mc Cabe, M.R., 1967, ou seja, a destilação do álcool a partir de 90% em volume necessita uma certa quantidade de energia quase equivalente à energia obtida durante o processo de combustão do álcool.

Uma saída para produzir um álcool energeticamente mais viável é através de microdestilarias, que podem sem necessariamente grandes investimentos produzir álcool com teor entre 80 e 90% em volume, e que poderia ser utilizado na própria propriedade, tornando-a independente do ponto de vista energético e, conseqüentemente financeiro. Também do ponto de vista ambiental seria vantajoso, pois haveria uma dispersão dos resíduos gerados na produção. Seriam menores quantidades de resíduos e em pontos bem distribuídos; problema de fácil solução.

## O EXPERIMENTO

Para realizar os testes experimentais de desempenho e medição do consumo, com combustível com vários teores de conteúdo de água, foi utilizado um motor alimentado a álcool com 1,6 litros, diâmetro dos cilindros de 82,0 mm e curso dos pistões de 75,7 mm, taxa de compressão 12:1, com carburador de corpo duplo e fluxo descendente, estagiado a vácuo e com sistema de alimentação e escape do tipo fluxo cruzado. O motor

foi ligado ao dinamômetro através de um eixo cardã com duas cruzetas e de um eixo ranhurado para compensar a folga axial do conjunto. O banco de testes é um freio dinamométrico que utiliza correntes parasitas (correntes de Foucauld), onde uma corrente continua controla a magnitude do campo magnético que age como elemento frenante do eixo do motor. A energia de frenagem é dissipada por o líquido de arrefecimento, que circula em galerias internas ao redor das bobinas do freio.

O trocador de calor original do sistema de arrefecimento do motor foi substituído por um outro de maior capacidade de troca de calor com aproximadamente 90 litros de capacidade. Neste trocador existe a possibilidade de entrada de água da rede através de uma válvula controlada por um solenóide. Para as medidas de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido utilizou-se um psicrômetro. Para medir a pressão do óleo foi usada a própria saída do sistema original do sensor de pressão e acoplada a um manômetro. As temperaturas do óleo e da entrada e saída de água do motor foram medidas por meio de termopares do tipo K. As medidas de giro do motor foram feitas utilizando-se um frequencímetro digital YOKOGAWA. A força de frenagem foi obtida por meio de uma célula de carga acoplada à carcaça do dinamômetro.

O combustível utilizado foi adquirido em um posto de serviço da BR Distribuidora, apresentado uma composição de 94,8° GL medidos com um alcolômetro de Gay-Lussac. Nos diferentes testes foi sendo adicionada água destilada e deionizada ao álcool, mantendo-se a regulagem original e posteriormente substituindo-se os calibres do primeiro de do segundo corpo do carburador.

## RESULTADOS

Os resultados foram obtidos através de testes experimentais realizados de acordo com a NBR 5484 de fevereiro de 1985 editada pela ABNT, que descreve o método para testar motores para veículos automotivos e mostra como apresentar as curvas características de desempenho (torque, consumo específico e potência efetiva) a plena carga e abertura máxima da borboleta do carburador. No presente caso foram obtidas as curvas de torque efetivo líquido e calculadas as curvas de potência efetiva líquida, ou seja, são curvas de desempenho do motor em condições normais de utilização.

Para cálculo de potência de um motor de ciclo Otto devem ser usados os fatores de correção dados na norma como  $k_o = (99/ps)^{1.2} (273 + t/298)^{0.6}$ , onde ps é a pressão do ar seco (kPa) e t a temperatura do ar de admissão (°C);  $ps = pb - 1/7,5 \{e^{(21,106 - 5345,5/(t_u + 273))} - 0,49(ts - t_u)pb/100\}$ , onde pb é a pressão barométrica (kPa), ts é a temperatura de bulbo seco e tu a temperatura de bulbo úmido. O parâmetro  $k_o$  normalmente varia entre 0,93 e 1,07.

A fig. 1 mostra a curva de potência a freio em função do giro do eixo do motor, obtida de acordo com a norma acima, para as diversas combinações de hidratação e calibres do carburador. Na curva com álcool 94,8° GL, adquirido no posto de serviço, o motor foi equipado com os calibres originais de dosificação de combustível do carburador (132 e 162 no primeiro e segundo corpo respectivamente) e não foi alterada a posição inicial do ponto de ignição. As temperaturas de bulbo seco e úmido foram 18,2 e 15,6 °C, respectivamente, e a pressão atmosférica, 98,29 kPa. As temperaturas do ar de admissão e do óleo do motor variaram entre 26 e 30 °C e 105 e 121 °C, respectivamente, do início ao fim do teste.

A outra curva mostra o resultado com o mesmo álcool mas outras temperaturas e fatores de correção com regulagem e calibres originais. Entretanto, com pressão atmosférica de 102,1 kPa e com temperaturas de 18,6 e 16,1 °C para os termômetros de bulbo seco e úmido respectivamente. As temperaturas do ar de admissão e do óleo do motor variaram entre 26 e 28 °C e 110 e 122 °C, respectivamente, desde o início até fim do teste. Observa-se aqui uma ligeira redução na potência em virtude das diferentes condições ambientes de pressão, temperatura e umidade

Para as medições do motor alimentado com álcool 88,5° GL, os calibres foram mantidos os originais do motor, e não houve alteração na regulagem especificada pelo fabricante. As temperaturas de bulbo seco e úmido foram de 16,6 e 11,8 °C, respectivamente, portanto bastante inferiores às indicadas nos testes anteriores. A pressão atmosférica foi de 103,5 kPa. A temperatura do ar de admissão permaneceu quase constante ao redor de 32 °C e as temperaturas do óleo de lubrificação variaram entre 118 e 127 °C do início ao fim do teste.

Para o combustível 89° GL, os calibres do primeiro e segundo corpo do carburador foram alterados para as medidas de 140 e 170, respectivamente, e manteve-se o ponto inicial da ignição inalterado. Os termômetros de bulbo seco e úmido marcaram 17,8 e 11,9 °C, respectivamente. A pressão atmosférica foi de 102,17 kPa. A temperatura do ar de admissão variou entre 23 e 26 °C e a do óleo de lubrificação de 110 a 130 °C do início ao fim do teste, respectivamente.

Finalizando, a última curva mostra o resultado com álcool 84° GL. Os calibres do carburador foram de 140 e 170 do primeiro e segundo corpo, respectivamente. As temperaturas de bulbo seco e úmido foram de 17,8 e 11,9 °C, respectivamente. A pressão atmosférica foi de 102,18 kPa. As temperaturas do ar de admissão variaram entre 33 e 34 °C, e as temperaturas do óleo de lubrificação ficaram entre 120 e 127 °C, do início ao fim do teste.

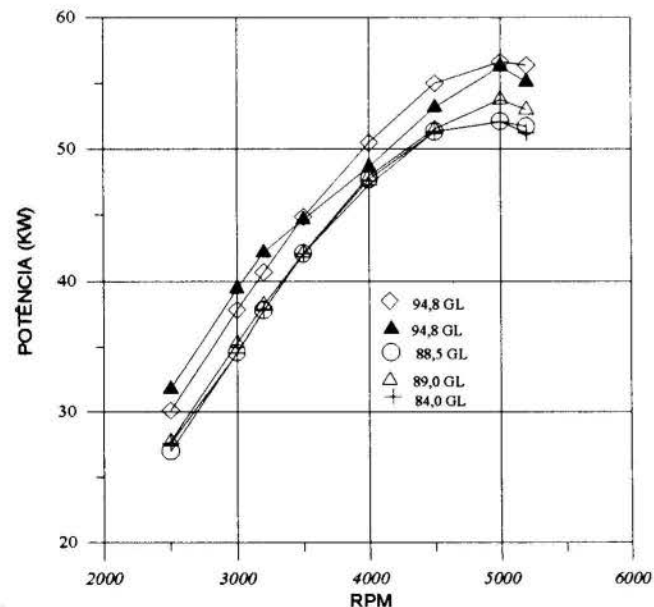


Figura 1. Curvas de potência líquida para os diferentes graus de hidratação.

Em todos os testes foram efetuadas medidas das temperaturas de entrada e saída do líquido de arrefecimento do motor, que manteve-se entre 90 e 92 °C. Foram também medidas as pressões do óleo do sistema de lubrificação, que variou entre 275 a 345 kPa do início ao fim dos testes. Essa variação é devido à diminuição de viscosidade do óleo em função do aumento de temperatura com o aumento de giro do motor.

Como continuação dos testes, foi inclusive iniciado o levantamento dos dados para cálculo de uma curva de potência deste motor alimentado com álcool 79° GL. Os calibres do primeiro e segundo corpo do carburador foram aqui alterados para 152 e 195, respectivamente. Aqui foram levantados apenas dois pontos para as velocidades de 4500 e 5000 RPM e que resultaram em potências de 47,49 e 48,743 kW respectivamente. Os testes foram neste ponto interrompidos por questões de segurança, pois embora o motor aparentemente tenha funcionado de forma regular com estas condições de alimentação, necessitava de uma nova regulagem do sistema de ignição e do próprio sistema de alimentação; embora em momento algum tenha-se notado qualquer tipo de funcionamento irregular, como ruído provocado por processo de combustão anormal (detonação). Isso serve apenas para demonstrar claramente a viabilidade do uso do álcool hidratado com teores de água superior ao usual como combustível para motores de ciclo Otto.

Com relação à ausência de detonação podemos ressaltar que a Petrobrás realizou um trabalho para a medição do índice de octano em amostras de combustíveis (álcoois) com diversos graus de hidratação. A tabela 1 nos dá uma idéia clara que realmente a não ocorrência do fenômeno da detonação era de se esperar. Com o aumento gradativo do grau de hidratação temos um aumento, também gradativo, do índice de octano; logo uma diminuição na tendência à detonação.

Tabela 1. Octanagem do álcool para diversos graus de hidratação.

Grau INPM	IOM	IOR
	97,4	
	96,0	
	95,4	
	93,9	
	91,9	
	91,2	
	90,8	

IOM- Índice Octano motor

IOR- Índice Octano Pesquisa

A fig. 2 mostra a curva de consumo específico de combustível em função do giro do motor, utilizando-se álcool 94,8 GL e calibres originais (132,162). Notar que o ponto de menor consumo específico é sempre ao redor do ponto de máximo torque do motor.

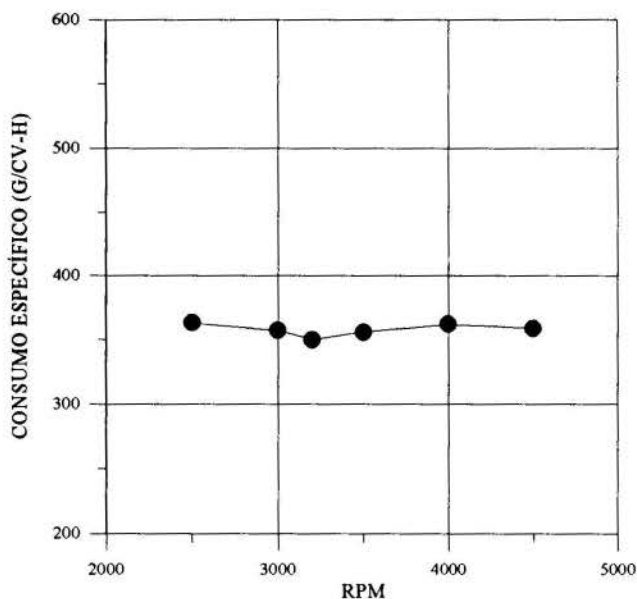


Figura 2. Consumo específico para o álcool 94,8 GL.

A fig. 3 mostra a curva de consumo específico em função do giro do motor para o álcool 88,5 GL com calibres originais (132,162). Notar que o consumo específico mínimo até diminuiu com a maior hidratação, permanecendo semelhante nas médias rotações e aumentando nas baixas .

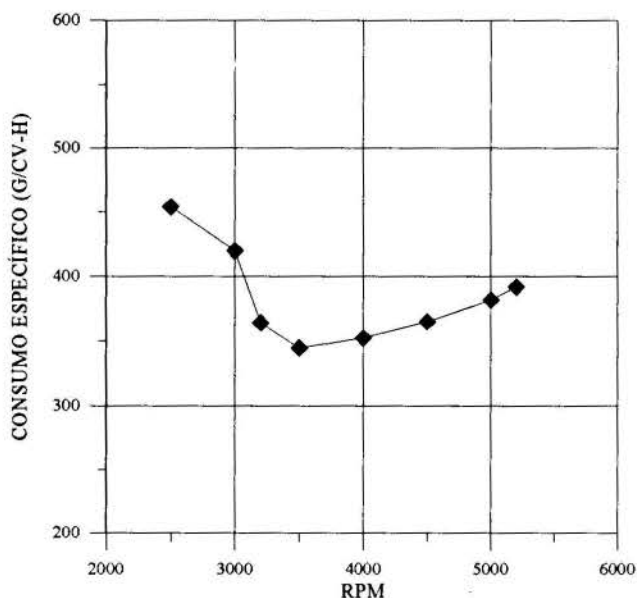


Figura 3. Consumo específico para o álcool 88,5 GL.

A fig. 4 mostra o gráfico do consumo total em uma hora de funcionamento em função do giro do motor para os álcoois 94,8 GL e 88,5 GL . Notar que o consumo total de álcool 88,5 GL é menor do que o do álcool do posto (94,8 GL), o que não deixa de ser no mínimo curioso e alentador. Uma explicação para isto talvez seja o fato de que a densidade do álcool altamente hidratado seja superior, logo a sua retirada do carburador

através dos calibres seja prejudicada pelo mínimo aumento da perda de carga, logicamente em níveis muito pequenos.

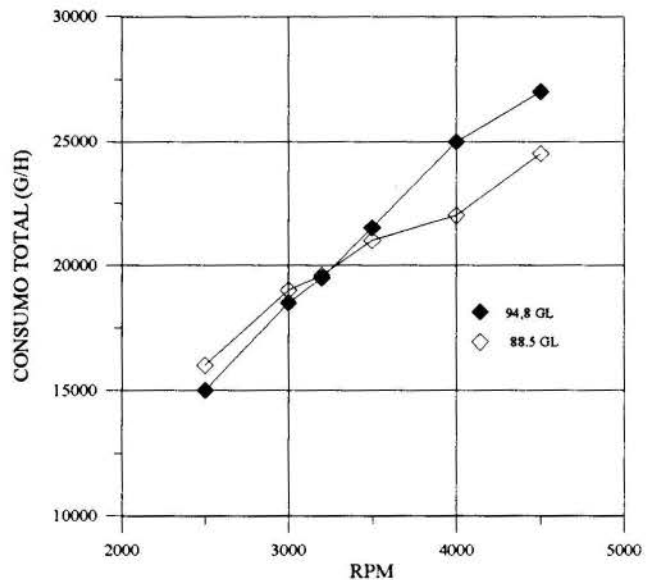


Figura 4. Curvas de consumo total para dois diferentes tipos de misturas (álcool 94,8 GL 88,5 GL).

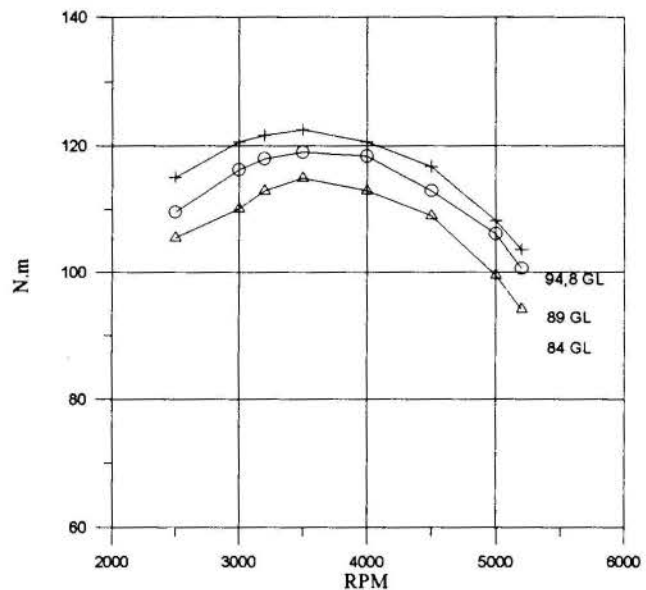


Figura 5. Curvas de torque para os diversos graus de hidratação.

A fig. 5 mostra como o torque motor varia com a variação da hidratação, tendo sido medido diretamente em N.m.

### CONCLUSÕES

De acordo com alguns autores, o uso do álcool hidratado com teores de água superior a o usual como combustível para motores de combustão interna pode trazer alguns inconvenientes como,



por exemplo a redução do poder calorífico, com conseqüente aumento no consumo específico. Por outro lado, a água tem alto calor de vaporização, e com isso a temperatura máxima de combustão seria reduzida, o que possibilita um menor índice de formação dos chamados óxidos de nitrogênio, e aumenta também o poder antidetonante da mistura, mas na verdade isso também pode levar a um decréscimo na velocidade do processo de combustão, que pode ser compensado com o aumento do avanço inicial de ignição.

Indiscutivelmente, entretanto, os dados apresentados neste trabalho são muito alentadores no que se refere ao uso de um álcool com maior teor de água do que o atualmente utilizado, pois a redução de potência do motor está dentro de padrões absolutamente aceitáveis e explicáveis devido às características do combustível utilizado e, considerando-se uma única modificação na regulagem de fábrica do motor, que foram as substituições dos calibres de dosificação do carburador à medida que aumentava-se o teor de água no álcool. Obteve-se com este motor de apenas 1,6 litros uma potência de mais de 48 kW com álcool 79° GL. Essa mistura contém aproximadamente 25% de água da massa. Para esse percentual de água, houve uma redução na potência de cerca de 15,5%, e como não efetuou-se nenhuma otimização do motor, o estudo mostra ser então realmente viável.

(Stumpf, U.E., 1978) mostra, em estudos realizados com uma mistura hidro-alcoólica em um motor CFR que o consumo específico do combustível não é linear com a variação do teor alcoólico. Ele demonstrou que com 11% de água no álcool 96° GL, o consumo específico aumenta em apenas 8%; após esse valor a curva inclina-se de forma mais acentuada até cerca de 15%, e novamente fica mais plana até cerca de 30%. Existem alguns aspectos capazes de fornecer subsídios para explicar as diferenças entre consumo específico e potência como mostrado acima. Como anteriormente citado a água tem grande calor de troca de fase e enorme expansão volumétrica por ocasião dessa troca. Se por um lado existe um aumento do poder antidetonante, por outro lado essa expansão age com se houvesse um aumento na relação volumétrica de compressão do motor e como a eficiência térmica aumenta com a taxa de compressão, tem-se definitivamente uma redução menor no consumo específico do que aquela teoricamente esperada. Isso em parte também vale para o potência. Pois embora haja uma redução na temperatura máxima de combustão em função do calor de vaporização e uma redução do calor desenvolvido pela combustão, devido a água teoricamente comportar-se como uma substância inerte; podem talvez ocorrer reações não conhecidas durante o processo de combustão inclusive formando produtos, que por meio de reações intermediárias aumentam a taxa de calor total desenvolvido durante a combustão.

Finalmente, é necessário recorrer-se a alguns dados citados por (Del Pino, J., 1994) a respeito da produção do álcool. E, como citado anteriormente, a quantidade de energia necessária a produção e destilação do álcool 96° GL é da mesma ordem de grandeza da quantidade de energia liberada pela combustão deste álcool, ou seja, é um caso real de autofagia. O autor afirma que, para produzir um álcool 85° GL, essa quantidade de energia fica reduzida para torno de 12 vezes, isto é, ao redor de 8%. Com estes dados e com os resultados acima colocados deve-se enfatizar novamente que o uso do álcool hidratado com teores superiores aos usuais é do ponto de vista do balanço energético viável e pode seguramente ser utilizado para alimentar motores de combustão interna, desde que haja uma otimização na

regulagem do motor para as diferentes condições de alimentação e, tudo isso significa economia de divisas para o país e traz também grandes benefícios no que se refere ao aspecto ambiental.

## REFERÊNCIAS

- Bristoti, A. et al, 1987 "Análise Econômica de um Modelo Microdestilaria Simplificado", I Congresso Brasileiro de Energia, p. 1145-1150, Rio de Janeiro,
- Del Pino, J.C., 1994, "Usos Alternativos do Bagaço de Cana de Açúcar na Indústria Avícola e da Borracha", Tese de Doutorado, PROMEC-UFRGS,
- Goldenberg, J. Menezes, J.R., 1989 Programa Nacional do Álcool em 1988", Revista Brasileira de Energia, p. 25-44, São Paulo,
- Mc Cabe, M.R. et al., 1967 "Unit Operations of Chemical Engineering", Mc Graw Hill, New York,
- Paul, J.K., 1979, "Álcool Production and Use a Motor Fuel", Noyes Data Corporation, New Jersey,
- Penido, P., 1981, "O Álcool Combustível obtenção e aplicação em motores", Livraria Nobel S.A. Editora e Distribuidora, São Paulo,
- Stumpf, U.E., 1978, "Aspectos Técnicos de Motores a Álcool", Ciência e Cultura, v 30, p. 428-435,
- Tolmasquim, M.T., 1987 "Análise Comparativa entre Grandes Destilarias de Álcool e Sistemas Integrados de Produção de Energia e Alimentos (SIPEAS)", I Congresso Brasileiro de Energia, p. 1159-1166, Rio de Janeiro.

## ABSTRACT

In this work wide-open-throttle operating parameters (Brake Power, Torque and specific fuel consumption) of a production spark-ignition automotive engine is presented.

The power break is the net the power for the engine; this is depends only on the built accessories.

All tests was performed using various concentrations of alcohol-water mixtures as work fuel.