

## DESEMPENHO DE UM MOTOR DE CICLO OTTO A ÁLCOOL ETÍLICO PRÉ-VAPORIZADO

**Márcio T. Ávila – mtavila@sc.usp.br**

**Marcelo V. Feitosa – feitosausp@hotmail.com**

**Antônio M. Santos – asantos@sc.usp.br**

**Josmar D. Pagliuso – josmar@sc.usp.br**

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos-NETeF, Laboratório de Motores. Av. Dr. Carlos Botelho, nº 1465 - 13560-250. Fax: (016) 273-9402. São Carlos - S.P. - Brasil.

***Resumo.** Um motor do ciclo Otto, do tipo CFR, foi testado utilizando álcool etílico pré-vaporizado como combustível. O álcool foi vaporizado por um trocador de calor que aproveitava o calor dos gases de escape. Resultados do motor movido a álcool vaporizado foram confrontados com outros obtidos no mesmo motor sob as mesmas condições, porém, com alimentação por álcool líquido. O motor a álcool vaporizado mostrou ser mais econômico, possibilitar maiores relações ar/combustível, chegando a até 12/1 sem perda de potência, ter rendimento termodinâmico aumentado em até 25% e funcionamento mais suave.*

**Palavras-chave:** Alcoóis, Combustíveis, Etanol, Metanol, Motores de Combustão Interna.

### 1. INTRODUÇÃO

A introdução em larga escala do uso de veículos automotivos, iniciada nos primórdios deste século, provocou mudanças dramáticas no modo de vida da população humana. Distâncias anteriormente intransponíveis passaram a ser vencidas cotidianamente; cargas excessivamente pesadas ou perecíveis deixaram de ser problema. Houve, literalmente, uma revolução no modo de viver e na cultura humanos. Entretanto, os motores utilizados para mover estes mesmos veículos trouxeram consigo alguns problemas, como a dependência do petróleo para sua produção e a poluição provocada por seu funcionamento.

O petróleo, embora presente como fonte de combustível automotivo há mais de 100 anos, deverá perder esta proeminência nas próximas décadas, na medida em que suas reservas forem se esgotando. Combustíveis renováveis obtidos a partir da biomassa, como o etanol, passarão a ter maior importância na matriz energética no futuro próximo. Países como os EUA estão fortemente empenhados na produção do etanol, chegando a ter hoje uma capacidade comparável à do Brasil, anteriormente um pioneiro e produtor isolado deste combustível no mundo (Rask, 1998, Ribeiro e Rosa, 1998). A produção americana é, hoje, de cerca de oito

milhões de metros cúbicos/ano, obtidos a partir do milho, e a meta dos EUA é alcançar 20 milhões nos próximos anos. A produção atual brasileira é de cerca de 13,5 milhões de metros cúbicos e, embora a produção atual de veículos a álcool seja muito pequena, infinitamente menor que os 94% obtidos ao final da década de 80, ainda existem rodando pelo país aproximadamente três milhões de veículos movidos por este combustível.

Os motores de combustão interna contribuem hoje com cerca de 70% do monóxido de carbono (CO), 36% dos hidrocarbonetos (HCs) e 46% dos óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) emitidos no mundo (Cooper, 1994). O dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), embora não citado com frequência entre os poluentes emitidos pelos motores, é notoriamente um poderoso gás estufa, distribuído de forma uniforme por todo o planeta com uma concentração que cresceu de 290 para 355 ppm nos últimos 150 anos, ou de 315 para 355 ppm nos últimos 45 anos (Seinfeld e Pandis, 1998).

Não é possível dispensar hoje a utilização de motores, tal é a necessidade de transporte, cultivo agrícola, produção industrial e outras a que se está submetido pelo enorme aumento populacional ocorrido nos últimos 100 anos. Por outro lado, não se conhece, no momento, nenhuma alternativa viável ao motor de combustão interna (Poulton, 1994). Urge, portanto, encontrar meios de suprir a demanda de energia reduzindo, simultaneamente, a dependência de fontes fósseis e a poluição emitida pelos motores.

Paradoxalmente, o nosso país tem diminuído o seu interesse em um programa de geração de energia alternativa que ele próprio criou, caso do álcool como combustível em motores, no mesmo momento em que este combustível vem se consolidando no mundo inteiro como alternativa para a solução dos problemas indicados acima, pois o álcool é um combustível renovável, emite intrinsecamente menos poluentes e, talvez mais importante, tem balanço nulo na produção de CO<sub>2</sub>.

Ao potencial do álcool como combustível pode ainda ser ligada a grande vantagem dos combustíveis gasosos que caracteristicamente produzem uma queima mais limpa ao se notar que, sendo substância pura, o álcool tem ponto de ebulição univocamente definido pela temperatura e pressão reinantes, com temperaturas baixas o suficiente para serem facilmente supridas pelas fontes térmicas residuais existentes no motor (78,2°C na pressão atmosférica padrão).

Diante deste cenário, a presente pesquisa é o primeiro passo dado no NETeF na investigação sistemática do uso do álcool vaporizado em motores. Emissões poluentes não foram ainda investigadas, pois não se dispunha, na época, de equipamento de análise de gases, o que não ocorre hoje. Entretanto, a contribuição é clara pois indica ganhos expressivos em eficiência termodinâmica e na possibilidade de uso de grande excesso de ar, o que pode traduzir-se em expressiva redução de emissões poluentes (Harrington e Shizu, 1976). O motor utilizado foi um motor de testes de octanagem de combustível (CFR) mas, atualmente, investiga-se um motor de série adaptado.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A possibilidade de uso de álcool em motores começou a ser investigada nas décadas de 60 e 70 (Michelin, 1962, Venanzi, 1972) principalmente na EESC/USP, CTA e ITA. Vencidos alguns problemas iniciais, especialmente de corrosão de materiais e partida a frio, o uso de motores a álcool disseminou-se a tal ponto que, no final da década de 80, 94% da produção de veículos leves no Brasil era equipada com motores a álcool, entrando, posteriormente, em declínio por problemas ligados à garantia de suprimento do combustível. Uma característica inesperada e importante destes motores era o seu baixo índice de emissões poluentes, notavelmente menor do que o de seus equivalentes a gasolina (Branco, 1984).

No Brasil, a investigação de motores utilizando álcool vaporizado foi iniciada ainda na década de 70. Celere publicou, em 1981, resultados obtidos com um motor Volkswagen a gasolina adaptado, com taxa de compressão inalterada e controle de alimentação manual. Seus resultados mostraram ganhos de potência e redução no consumo específico. Corsini (1985) propôs um sistema de vaporização e alimentação para motores de série operando com álcool vaporizado. Ávila e Santos (1993) estudaram a utilização do álcool vaporizado em um motor CFR, onde a taxa de compressão podia ser alterada, e noticiaram ganhos expressivos de eficiência termodinâmica e possibilidade de uso de excesso de ar em até 30%.

No exterior, Bergman (1982) e Mischke, Koerner e Bergman (1982) adaptaram um motor diesel, previamente convertido para o uso de gás, para trabalhar com álcool vaporizado, obtendo eficiência termodinâmica marcadamente melhor do que a do motores de ciclo Otto convencionais, chegando a atingir cerca de 42%, que é um valor muito próximo ao dos motores diesel. A emissão de poluentes foi fortemente diminuída, podendo, segundo os autores, satisfazer às normas do estado da Califórnia sem o uso de catalisadores. Parte do significativo aumento de eficiência termodinâmica repousaria na operação do motor sem uso da válvula-borboleta, no aumento da eficiência da combustão e no processo regenerativo (Wieser 1986, Bergmann, 1982) de vaporização do combustível. Quanto às emissões, parecem ter decrescido em razão da característica intrínseca do combustível, da alta eficiência da combustão na fase vapor e do elevado excesso de ar que o motor permitia, até 80%.

De fato, tem sido demonstrado que é possível operarem-se motores queimando gás natural com alto excesso de ar, produzindo níveis de emissões capazes de atender, ainda hoje, às normas ambientais americanas (Graboski e McCormic 1997) sem o uso de catalisadores.

### **3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

O sistema experimental é apresentado na Fig. 1. Um motor CFR (Cooperative Fuel Research) acoplado a um motor de indução elétrica por intermédio de uma correia foi utilizado nos testes com álcool líquido e vaporizado.

Todos os dados foram tomados com o motor aquecido e funcionando em regime permanente. A potência produzida pelo CFR era determinada através da leitura, no wattímetro, da potência transferida ao motor de indução que passava, assim, a atuar como freio dinamométrico. A descarga de combustível era regulada manualmente, determinada medindo-se o volume de álcool líquido contido em uma bureta graduada, e o tempo, estabelecido por um cronômetro, tempo esse necessário para que aquele volume fosse consumido. A descarga de ar, por outro lado, era medida através de um tanque contendo, em sua seção de entrada, um bocal calibrado por onde o ar passava até chegar ao motor.

Para cada rotação de trabalho era mantida uma única potência no motor CFR, independentemente da taxa de compressão ou do estado termodinâmico do combustível utilizados em um teste em particular. Isto era obtido com o auxílio da carga representada pelo motor de indução e com o ajuste da descarga adequada de álcool.

O ângulo de avanço da centelha era determinado através de uma lâmpada estroboscópica que incidia sobre o volante, previamente marcado, e podia ser ajustado no distribuidor conforme necessário. O motor CFR foi preparado para funcionar nos regimes de 700, 800 e 1000 rpm através do uso de um jogo de polias adequado a cada rotação. Rotações maiores, embora de interesse no estudo, não puderam ser utilizadas devido às limitações construtivas do motor CFR. A rotação de trabalho era medida pela lâmpada estroboscópica. As taxas de compressão utilizadas foram de 8/1 e 10/1.

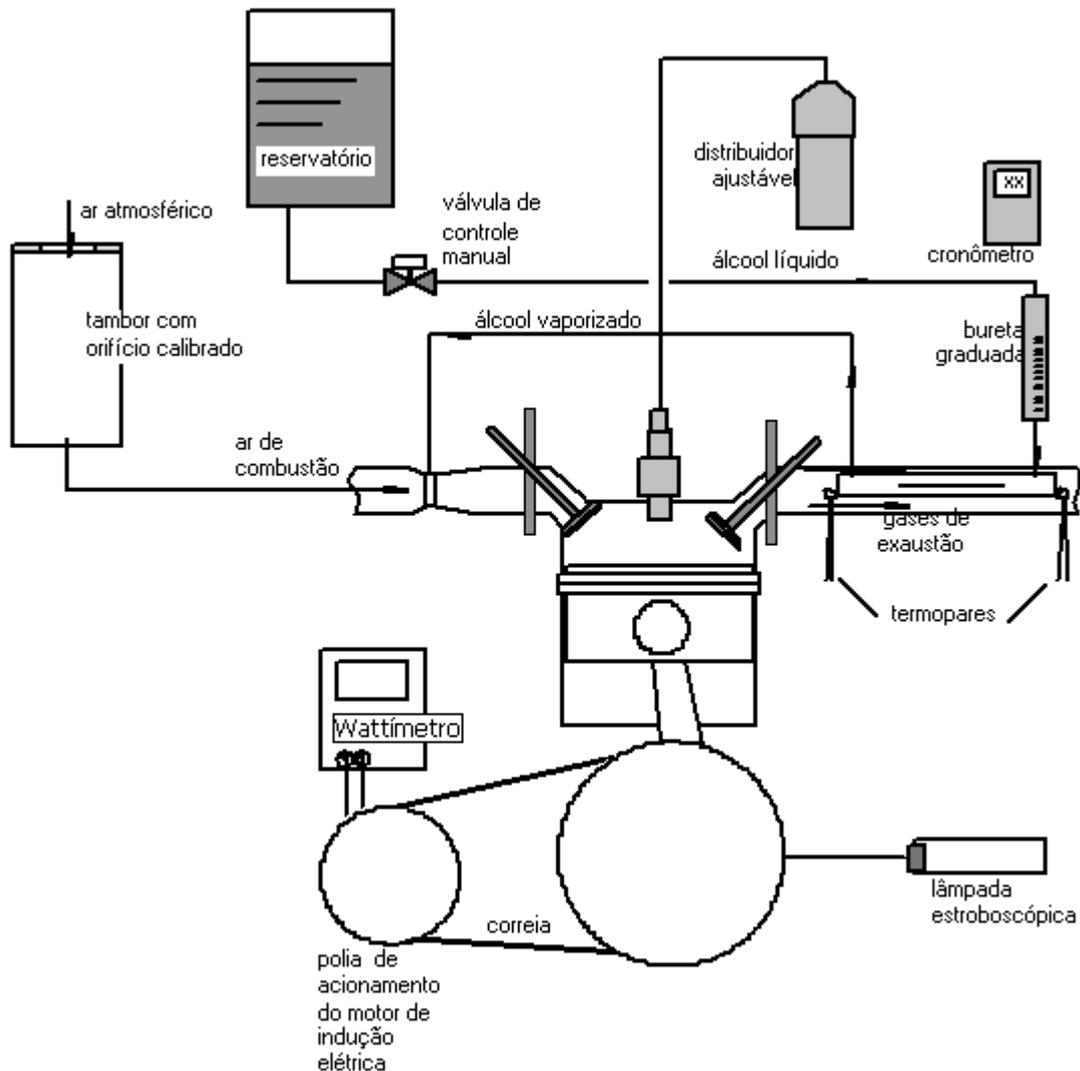


Figura 1 - Representação esquemática do sistema experimental.

As temperaturas do ar atmosférico, da mistura ar/combustível, dos gases de escape e do álcool antes e depois do vaporizador foram medidas com termopares tipo K (cromel/alumel). A pressão atmosférica foi determinada através de um barômetro Princo de coluna de mercúrio e resolução de 0,1 mmHg com correção para temperatura.

Determinaram-se, ainda, para cada teste, a densidade e o teor alcoólico do combustível utilizado.

Para iniciar o funcionamento do motor era usado, sempre, álcool líquido. Nos testes com álcool vaporizado, o álcool líquido passava por um trocador de calor tipo tubos concêntricos em contra corrente, inserido na tubulação de escape, Fig. 2, onde mudava de fase recebendo energia dos produtos de combustão. Este álcool era, então, dirigido a um venturi provido de um “gicleur” de 1,2 mm de diâmetro e introduzido na corrente de ar de combustão. O tempo necessário para se obter funcionamento estável com álcool vaporizado era de cerca de 5 min.

A escolha do motor de teste recaiu sobre o CFR principalmente por duas razões principais:

- Sendo a ocorrência de detonação assim como a eficiência termodinâmica do motor funções da taxa de compressão e do tipo de combustível utilizado, era altamente conveniente que a taxa pudesse ser modificada facilmente, durante as comparações entre álcool líquido e álcool

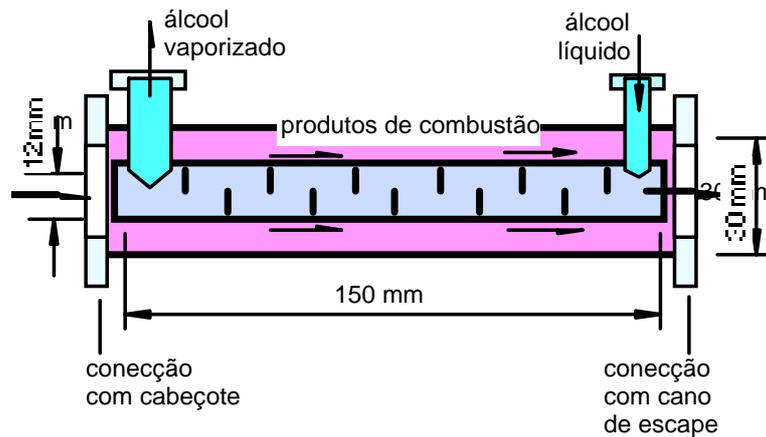


Figura 2 - Trocador de calor para vaporização do álcool.

vapor. O motor CFR pode ter sua taxa de compressão variada mesmo durante o funcionamento desde 4/1 até 12/1;

- No esforço para se determinarem condições otimizadas de funcionamento com um combustível cujo comportamento era ainda desconhecido, parâmetros como ângulo de avanço e, sobretudo, relação ar/combustível eram levados ao limite, o que ocasionalmente “apagava” o motor. Quando isto acontecia, o motor de indução recolocava rapidamente o CFR em funcionamento.

Embora o CFR tenha as habilidades descritas acima, por ser um motor-padrão para teste de combustível, não possui cruzamento de válvulas nem válvula-borboleta. É intrinsecamente um motor de baixo desempenho, com pequena eficiência termodinâmica, e trabalha sempre na condição de carga máxima.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra a eficiência termodinâmica em função da rotação do motor para taxa de compressão 8/1, nos casos de combustível líquido e vaporizado, definida pela eq. 1, onde  $\eta_t$  é a eficiência termodinâmica,  $P$  a potência desenvolvida pelo motor,  $V_a$  a vazão de combustível,  $\rho$  a densidade do combustível e  $PC_i$  seu poder calorífico inferior, 26.750 kJ/kg.

$$\eta_t = P / (V_a \rho PC_i) \quad (1)$$

Nota-se que, embora a eficiência seja baixa nos dois casos - o que se deve às características construtivas do motor CFR, conforme discutido na Seção 3 - o álcool vaporizado produz um resultado claramente superior. Na rotação de 1000 rpm, a eficiência com álcool vaporizado chegou a 14%, ao passo que o álcool líquido apresentou uma eficiência de 11% para as mesmas condições. Percentualmente, isto representa um aumento de 30% em relação à eficiência do álcool líquido. Nas rotações mais altas, o rendimento com álcool vaporizado foi mais elevado, provavelmente devido à melhor vaporização alcançada com o aumento das temperaturas do coletor de escapamento. Esta tendência é menos acentuada para o álcool líquido.

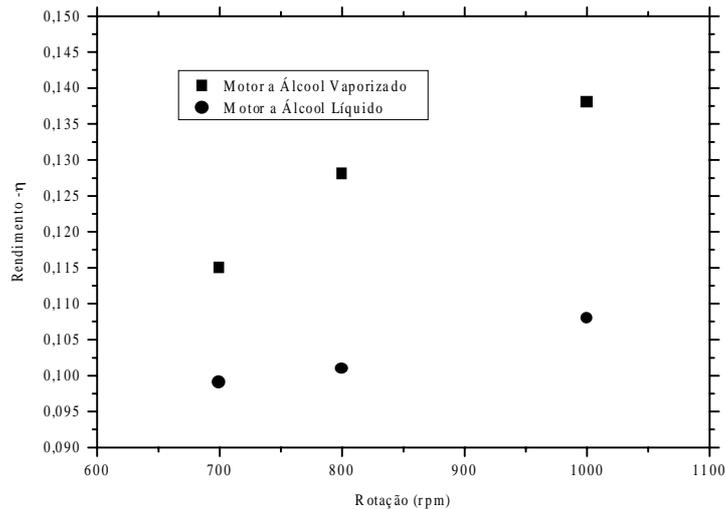


Figura 3 - Eficiência termodinâmica em função da rotação do motor CFR com uso de álcool líquido e vaporizado e taxa de compressão de 8/1.

A Figura 4 mostra o mesmo tipo de resultado da Fig. 3, porém, empregando uma taxa de compressão de 10/1. Tanto a eficiência do motor com combustível líquido como com álcool vaporizado sobem cerca de 5% em relação ao caso com taxa 8/1, como era de se esperar. O ganho em eficiência devido à vaporização do álcool permaneceu praticamente o mesmo em relação à taxa 8/1.

As Figuras 5 e 6 mostram a relação ar/combustível, em massa, utilizada nos mesmos testes mencionados nas Figs 3 e 4. Verifica-se que o motor trabalhou de modo estável e suave com relações ar/combustível de até 12,5/1, com taxa de compressão de 8/1 e rotação de 700 rpm. Considerando que a relação estequiométrica é de 9,0 kg de ar/kg de álcool, isto representa um excesso de ar de cerca de 30%, tendo importantes implicações positivas sobre as emissões poluentes do motor.

Como evidenciado por vários autores (Harrington e Shizu, 1976; Bergman, 1982; Mischke, Koerner e Bergman, 1982; Graboski e McCormic, 1997), o uso de excesso de ar elevado, sobretudo se associado a combustíveis gasosos, pode reduzir drasticamente a emissão de poluentes a ponto de, em alguns casos, dispensar o uso de catalisadores para cumprir os níveis requeridos pelas normas ambientais de países como os EUA.

Embora não haja, no presente trabalho, confirmação experimental sobre a redução de emissões poluentes reportada por outros autores pois não se dispunham de sistemas de análise de gases quando foram realizados os testes, o trabalho prossegue com um motor de série equipado com injeção eletrônica e um novo sistema de vaporização. Este motor será totalmente mapeado, inclusive e principalmente quanto ao aspecto emissões.

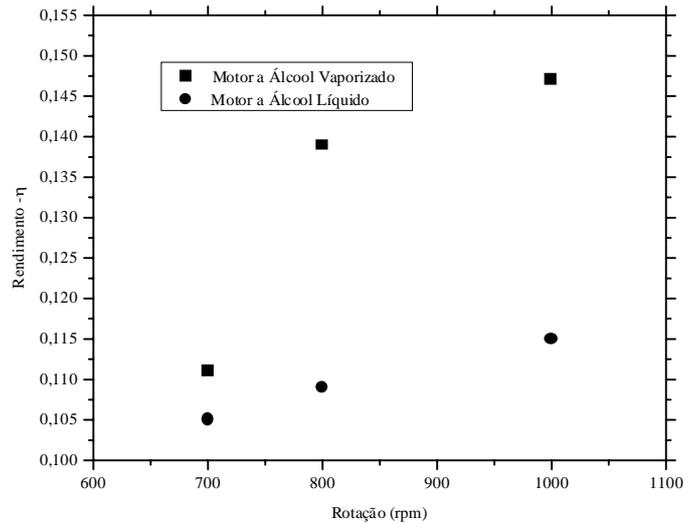


Figura 4 - Eficiência termodinâmica em função da rotação do motor CFR com uso de álcool líquido e vaporizado e taxa de compressão de 10/1.

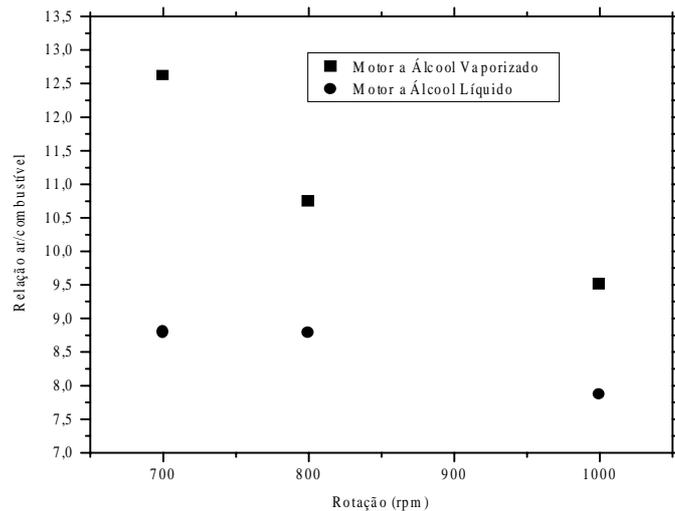


Figura 5 - Relação ar/combustível em função da rotação do motor CFR com uso de álcool líquido e vaporizado e taxa de compressão de 8/1.

Quanto ao ângulo de avanço ótimo da centelha, detectou-se que o seu valor geralmente diminuía com o aumento da taxa de compressão, devido, possivelmente, ao aumento da velocidade de queima que a taxa de compressão mais elevada determinava; maiores ângulos de avanço da centelha estiveram sempre acompanhados de menores temperaturas dos gases de escape, indicando que a queima do combustível se processava, em sua grande parte, no interior da câmara de combustão.

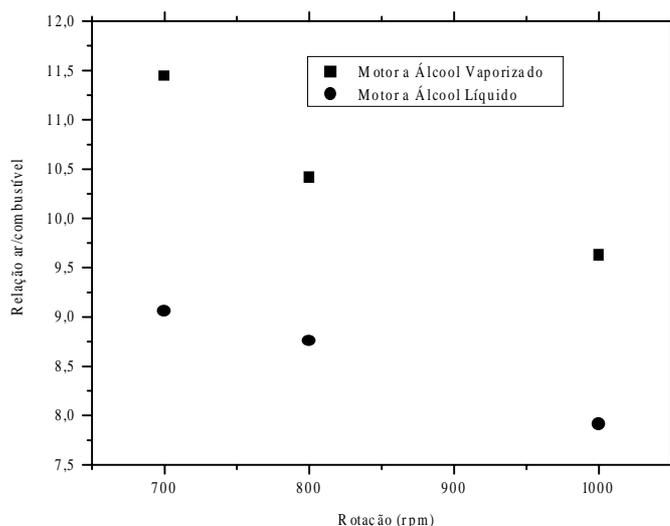


Figura 6 - Relação ar/combustível em função da rotação do motor CFR com uso de álcool líquido e vaporizado e taxa de compressão de 10/1.

Observou-se, ainda, que a taxa de compressão maior concorria para o abaixamento da temperatura dos gases de escape, evidenciando melhor conversão da energia térmica em trabalho mecânico no interior do cilindro, e possivelmente, maior eficiência do processo de combustão em si.

O fato do combustível entrar já vaporizado no cilindro trouxe claros benefícios para a combustão pois, desta forma, era possível prescindir da fase de evaporação das gotículas durante o processo de queima no interior da câmara, acelerar a velocidade da reação e evitar a perda de parte do combustível pelo seu refúgio nos pequenos volumes internos do motor, no filme de óleo e nos próprios gases de escape. Estes benefícios são testemunhados pela maior eficiência termodinâmica alcançada pelo álcool vaporizado quando se compara seu desempenho com o do álcool líquido na mesma taxa de compressão, rotação e potência.

Notou-se que o aumento da taxa de compressão determinava uma tendência maior à detonação quando do uso do álcool vaporizado. Esta mesma tendência era menos clara com o álcool líquido. Possivelmente, a causa desta diferença de comportamento nos dois tipos de alimentação esteja no pré-aquecimento da mistura que naturalmente ocorre com o uso do álcool vaporizado.

Não foi observada queda significativa da eficiência volumétrica, embora um valor em torno de 3 a 4% seja de se esperar.

Apesar da rotação do motor não ter alcançado valores acima de 1000 rpm por limitações do sistema experimental, deve-se enfatizar que é nas baixas rotações que os motores emitem mais poluentes e têm maior consumo específico. Portanto, os testes realizados têm um valor muito claro como indicadores da potencialidade dos motores a álcool vaporizado.

Outro fato a salientar é que todos os testes foram realizados a plena carga, isto é, sem uso da válvula-borboleta (o motor CFR não a possui). Note-se, entretanto, que nas cargas parciais - quando a válvula-borboleta diminui apreciavelmente a pressão no coletor de admissão dos motores convencionais e, conseqüentemente, penaliza seu rendimento - deve ser mais acentuada a vantagem do motor a álcool vaporizado, pois este pode trabalhar com excesso de ar altamente variável. Em outras palavras, o motor a álcool vaporizado pode fazer menor uso da válvula-borboleta.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A eficiência termodinâmica do motor a álcool vaporizado apresentou-se, sempre, superior à do motor a álcool líquido, atingindo valores 25% maiores, em média. Este ganho era mais claro nas rotações maiores.

Foi possível alcançar operação estável e suave com misturas pobres de até 30% quando se utilizou álcool vaporizado. O mesmo comportamento não foi verificado para o motor a álcool líquido, cujas misturas se estabeleceram em torno da estequiométrica, tendendo à rica para rotações mais altas. O empobrecimento da mistura foi mais efetivo nas rotações mais baixas.

Os testes foram sempre realizados a plena carga. Em cargas parciais, a vantagem do combustível vaporizado pode ser ainda mais acentuada devido à sua possibilidade em se trabalhar, ao menos parcialmente, sem o uso da válvula-borboleta, isto é, com excesso de ar variável.

A operação com misturas pobres é, reconhecidamente, uma técnica efetiva para se diminuir emissões poluentes, e a habilidade demonstrada pelo álcool vaporizado em operar com grande excesso de ar faz dele um combustível claramente promissor no aspecto ambiental.

O motor a álcool vaporizado pode trabalhar com as mesmas taxas de compressão do motor a álcool líquido, sem problemas de detonação, o que mantém a vantagem deste combustível em termos de rendimento termodinâmico, sobretudo se comparado à gasolina.

Não foi possível atingir rotações acima de 1000 rpm por limitações do sistema experimental. Entretanto, são estas as rotações em que as emissões poluentes e o consumo específico dos motores tendem a ser maiores. Assim, os testes realizados têm grande valor como indicativos para testes mais completos

É necessário realizarem-se testes com motores de série de concepção moderna, otimizados para o consumo de combustível e emissões e compará-los com versões modificadas destes mesmos motores para funcionarem com álcool vaporizado. Estes testes já estão em andamento no NETeF.

É conveniente desenvolverem-se novos conceitos e concepções para os sistemas de vaporização de álcool, se possível tirando vantagem da homogeneidade de mistura e velocidade de reação que se podem obter com esta técnica. Isto permite utilizar a injeção direta sem as conhecidas dificuldades associadas ao seu uso com combustível líquido atomizado.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ávila, M. T. & Santos, A. M., 1993, Uso do Etanol Pré-Vaporizado em Motores de Ignição por Centelha, SAE Paper 931631.
- Bergman, H. H., 1982 - *A Highly Efficient Alcohol Vapor aspirating Spark-Ignition Engine With Heat Recovery* - SAE 821190, pp 77-88.
- Branco, G. M., 1984 - *O Álcool Combustível e a Poluição do Ar* - Simpósio Internacional Copersucar.
- Celere, S. W., 1981 - *Desempenho de Motores de Ignição por Centelha com Álcool Etílico Pré -Evaporado* - tese de doutorado, EESC-USP São Carlos, SP.
- Chen, L. et al., 1988, Application of Methanol Vaporizer in D. I. Diesel Engine, Chinese Internal Combustion Engine Engineering, vol. 9, nº 3, pp. 53-59.
- Cooper, C. D. and Alley, F. C., 1994 - *Air Pollution Control* - Waveland Press, Inc., 694 pg.
- Corsini, R., 1985, *Sistema de Alimentação de Motores de Combustão Interna por*

- Vaporização Independente de Álcool Hidratado*, 2º Simpósio em Engenharia Automotiva (Brasília), Anais da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, São Paulo.
- Graboski, M. S., McCormic, R. L., Newlin, A. W., 1997- *Effect of Fuel Composition and Altitude on Regulated Emissions from a Lean-Burn, Closed Loop Controlled Natural Gas Engine* SAE paper 971707.
- Harrington, J. A., and Shisu, R. C., 1976 - *A Single Cylinder Engine Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Stoichiometry, and Hydrogen-to-Carbon Ratio on CO, NO, and HC Exhaust Emissions* - SAE paper, 730476.
- Michelan, C., 1962 - *Estudo da Aplicação do Álcool Etílico Hidratado como Combustível de Motores de Combustão Interna* - trabalho de formatura EESC-USP.
- Mischke, A., Koerner, D., Bergman, H., 1982 - *The Mercedes-Benz Alcohol-Gas-Engine.*- V International Alcohol Fuel Technology Symposium.
- Poulton, M. L., 1994 - *Alternative Fuels for Road Vehicles* - Computational Mechanics Publications, UK.
- Rask, K. N., 1998 - *Clean Air and Renewable Fuels: the Market for Fuel Ethanol in the US from 1984 to 1993* - Energy Economics 20, pp 325-345.
- Ribeiro, S. K. and Rosa, L. P., 1998 - *Activities Implemented Jointly and the Use of Fuel Alcohol in Brazil for Abating CO<sub>2</sub> Emissions* - Energy Policy, Vol. 26, Nº2, pp 103-111.
- Santos, A. M. & Celere, S. W., 1990, *Sistemas de Geração e Alimentação de Etanol Vaporizado para Motores a Combustão Interna*, Anais do Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Natal, pp. 239-245.
- Seinfeld, J. H. and Pandis, S. N., 1998 - *Atmospheric Chemistry and Physics* - Wiley Interscience, 1326 pg.
- Venanzi, D., 1972 - *Contribuição à Técnica do Emprego de Álcool Etílico em Motores de Ciclo Otto* - tese de doutorado EESC/USP.
- Wieser, R., 1986, *Ein Verbrennungsmotor mit dampferzeugungsanlage*, Waerme, Mannheim, 92 (1), pp. 1-4.

## **PERFORMANCE OF AN OTTO CYCLE ENGINE FUELED BY PRE-VAPORIZED ETHYL ALCOHOL**

**Abstract.** *An Otto cycle engine, CFR model, was fueled with liquid and pre-vaporized ethyl alcohol. A heat exchanger utilizing the exhaust gases was used to vaporize the fuel alcohol. Data from the engine moved by liquid and vaporized alcohol were compared. The engine using vaporized alcohol presented greater thermal efficiency (+ 25%), softer operation and smaller fuel consumption (air/fuel ratios around of the value of 12/1) than the liquid version. Leaner operation was feasible with the vaporized fuel reaching an air excess up to 30%.*

**Keywords:** *Alcohols, Ethanol, Fuels, Internal Combustion Engines, Methanol.*