

# **SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO ÓLEO DIESEL PELO GÁS NATURAL EM MOTORES – ATRATIVIDADE DA TECNOLOGIA E SUA AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL**

**Ricardo Hernandez Pereira**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil  
e-mail: rhdzp@ituc.puc-rio.br

**Sergio Leal Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil  
e-mail: slbraga@mec.puc-rio.br

**Carlos Valois Maciel Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brasil  
e-mail: valois@mec.puc-rio.br

**Resumo.** *A capacidade de produção e refino do petróleo brasileiro hoje quase garantem a auto suficiência nacional. O elevado consumo de Diesel, entretanto, força a importação do derivado. O gás natural, caso a venha a ser consumido em motores do ciclo Diesel hoje existentes, mesmo que em substituição parcial do energético tradicional, pode modificar este quadro. Uma alternativa de compromisso para a redução da demanda de Diesel no Brasil pode ser realizada pela conversão dos motores originalmente Diesel para o consumo do gás natural em substituição parcial da totalidade de sua demanda por combustíveis. Nesta os motores operam num ciclo bi-combustível, consumindo simultaneamente tanto óleo Diesel quanto o gás natural. Resultados experimentais mostram que um motor em funcionamento bi-combustível pode ter rendimento térmico superior ao verificado em sua operação original Diesel.*

**Palavras-chave:** Diesel, gás natural, motores de combustão interna.

## **1. INTRODUÇÃO**

A crise do petróleo dos anos 70 impôs a revisão da política energética em nível mundial, tendo como diretriz fundamental a economia de energia e a redução da dependência dos derivados de petróleo. Iniciativas têm, desde essa época, focado tanto no desenvolvimento de novas fontes de energia (renováveis ou não), como, também, no incremento da eficiência dos equipamentos que demandam os energéticos tradicionais. Fontes e Fontes (1995) observam que, dentre os combustíveis alternativos, é notória a evolução do gás natural no consumo total de fontes primárias de energia no Brasil. Este percentual de participação cresceu de 0,2% para 2,2% entre 1970 e 1992 (Cecchi, 1995). O aumento médio de consumo de gás foi, neste período, da ordem de 16,2% ao ano. As reservas nacionais de gás natural exploráveis provadas passaram de 72,4 bilhões de metros cúbicos em 1982 para 137,8 bilhões em 1993. Neste mesmo período a produção diária saltou de 3,7 para 19 milhões de metros cúbicos. Cita-se ainda que durante o ano de 2003 foram descobertas

reservas adicionais de gás no litoral do Sudeste Brasileiro, incrementando de forma significativa os volumes das reservas do energético disponíveis no País.

Incentivos ao desenvolvimento do mercado de gás brasileiro têm sido dados já há anos. Cabe citar o programa de gás natural para o uso automotivo, criado em meados da década de 80, com a elaboração do Plano Nacional de Gás Natural para o uso no Transporte (Plangás). Este tinha como principal objetivo a substituição do óleo Diesel pelo gás natural. O derivado não era, na época, produzido em volumes suficientes nas refinarias nacionais para o pleno atendimento da demanda brasileira. Esta situação em nada mudou nos últimos vinte anos.

O setor de transporte rodoviário, seja o de transporte coletivo ou o de transporte de cargas, conta basicamente com veículos propelidos por motores do ciclo Diesel. É este o setor da economia brasileira que demanda os maiores volumes do derivado (BEN, 2002). A possibilidade da substituição, pelo menos parcial, do Diesel hoje consumido nestes equipamentos pelo gás natural constituiria uma opção interessante do ponto de vista nacional. Tanto nossa dependência do Diesel hoje importado seria reduzida como, também, seria dado uso às nossas reservas de gás natural, hoje sub aproveitadas.

Existem disponíveis motores do ciclo Otto a gás natural que poderiam ser empregados em substituição aos tradicionais Diesel. Hoje, equipamentos como esse apresentam, entretanto, custo elevado. A mudança da motorização dos veículos existentes constitui uma opção economicamente inviável para usuários finais. Uma alternativa de compromisso pode ser realizada pela conversão dos motores originalmente Diesel, hoje existentes, para o consumo de gás natural em substituição parcial da totalidade de sua demanda por combustíveis (Carvalho, 1985; Ahouissoussi e Wetzstein, 1997). Nesta os motores operariam num ciclo bi-combustível, consumindo simultaneamente tanto óleo Diesel quanto o gás natural. O combustível alternativo supre grande parcela da demanda total do motor por combustíveis.

Conversões Diesel/gás não exigem mudanças de vulto nos motores originalmente Diesel que inclusive podem, a qualquer momento, retornar à sua operação apenas com o derivado líquido. Este fato permite que veículos convertidos para o Diesel/gás trafeguem por regiões que ainda não disponham de gás natural (malha de distribuição em processo de implantação), simplesmente consumindo óleo Diesel. Ocorrendo a expansão da rede de gás natural encanado através do país, uma empresa transportadora pode, por exemplo, progressivamente ampliar a área na qual seus veículos bi-combustível consomem gás. Motores operando no modo Diesel/gás podem apresentar rendimento térmico superior tanto ao verificado em seu funcionamento original Diesel, como o obtido dos motores do ciclo Otto dedicados ao gás natural (MacLean e Lave, 2003). Reduções significativas das emissões de poluentes, em especial dos particulados, também são verificadas resultado da conversão bi-combustível (Abd-Alla, 2002; Beer, 2002; Papagiannakis e Hountalas, 2003; Rabl, 2002; Selim, 2003).

No presente trabalho se faz uma breve análise da matriz energética Brasileira, demonstrando a relevância que o Diesel tem hoje. Também são apresentados resultados de laboratório, levantados na PUC-Rio, onde algumas das características de um motor operando no modo bi-combustível Diesel/gás são apresentadas.

## 2. POSIÇÃO DO ÓLEO DIESEL NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A participação percentual de diversos energéticos junto a totalidade da demanda brasileira é apresentada na Fig. (1). O energético de maior consumo é a eletricidade respondendo por 43,4% do total. Vem seguida pelos derivados de petróleo que, em conjunto, atendem 28,5% da demanda energética do País. Dentre os derivados destaca-se o óleo Diesel, com 13%. A lenha (6,2%) e a gasolina e os produtos da cana, ambos responsáveis por 6,0% do consumo brasileiro de energéticos, seguem a eletricidade e o Diesel na seqüência dos energéticos individualmente mais demandados.

O Diesel é consumido em diversos setores da economia. A Fig. (2) ilustra que o setor de transporte rodoviário é o que mais demanda Diesel. O transporte de cargas por rodovias demanda cerca de 78% (25 bilhões de litros por ano) do total do Diesel consumido no Brasil. Já o Diesel

empregado em transporte urbano responde por cerca de 13% deste total (4 bilhões de litros anuais). Cabe ressaltar que caso apenas o Diesel consumido no transporte rodoviário urbano fosse completamente substituído pelo gás natural, o Brasil não precisaria mais importar o óleo Diesel. Resultariam correspondentes benefícios para a balança comercial Brasileira e a qualidade do ar nos grandes centros urbanos.

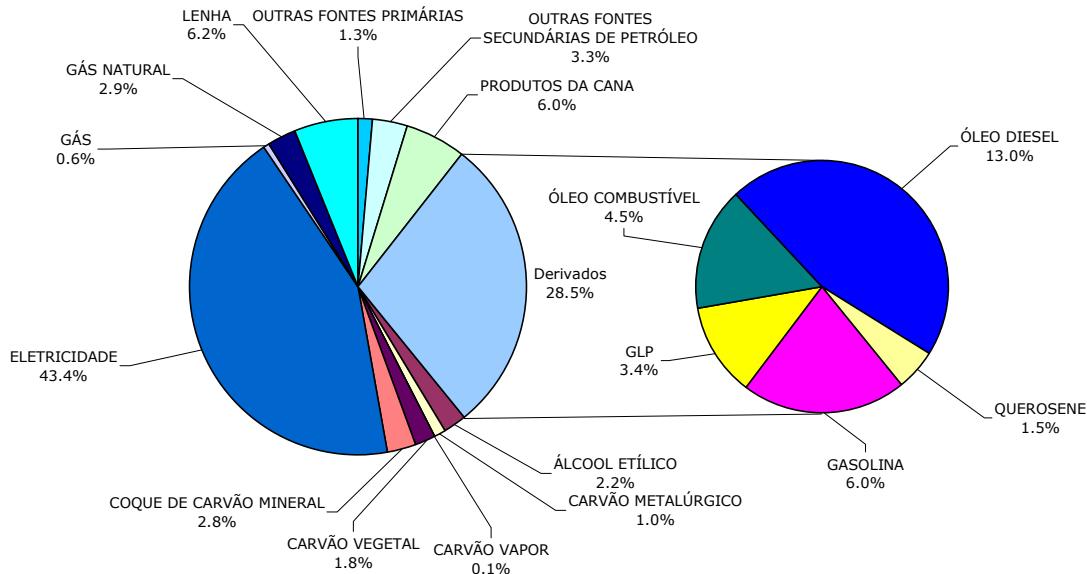


Figura 1. Participação de Diversos Energéticos no Total da Demanda Energética Brasileira.

Embora o mercado para o gás natural automotivo seja significativo, não se deve deixar de lado o Diesel demandado pelos outros setores. Um grande número de grupos geradores, tipicamente acionados por motores Diesel, está instalado em diversos setores da economia. Citam-se tanto os grupos de geração de energia elétrica para serviço público quanto os de energia elétrica de emergência, instalados na indústria, hotéis e hospitais.

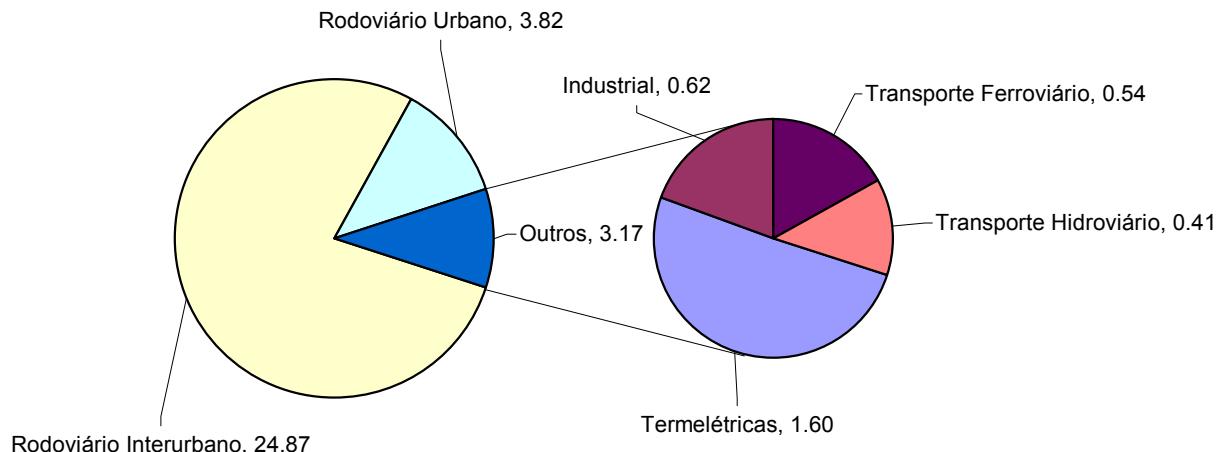


Figura 2. Atividades que Demandam Diesel e Seu Consumo (Bilhões de Litros por Ano).

A potência unitária dos geradores Diesel, se comparada a das grandes usinas termelétricas ou hidráulicas, tipicamente não é grande. Deve-se, entretanto, ponderar que o número de unidades instaladas é expressivo e que, em conjunto, representam por uma fração significativa da potência total instalada no parque gerador brasileiro. Usinas Diesel registradas junto a ANEEL (ANEEL,

2002), autorizadas a fornecer energia elétrica à rede, respondem por 26,6% da potência total instalada em termelétricas no Brasil. Normalmente este potencial fica ocioso devido ao custo do óleo Diesel.

O consumo de Diesel para a geração contínua de energia elétrica é um procedimento economicamente inviável, uma vez que deve concorrer com a tradicional energia hidráulica. Seu uso se justifica apenas em situações especiais, como são os casos das eventuais interrupções de fornecimento da rede, horários de ponta, quando a demanda por potência é grande, e em localidades distantes da rede elétrica (ONS, 2002). Mesmo nesta baixa cadência de funcionamento o setor termelétrico demanda anualmente 1,6 bilhões de litros de Diesel, Fig. (2).

A possibilidade do consumo de gás natural, energético de preço atraente, nos geradores Diesel atualmente instalados constitui uma oportunidade interessante. A conversão das máquinas a Diesel existentes para o gás natural representaria um grande aumento na oferta de energia elétrica já que estes, consumindo um energético de baixo custo, poderiam operar continuamente e não mais ocasionalmente como hoje. O esforço para o fornecimento desta potência adicional à rede elétrica seria mínimo já que, em estando o gás natural disponível, apenas a conversão dos motores se faria necessária. Não seriam exigidas modificações nas ligações, já existentes, destes equipamentos com a rede elétrica ou a construção de novas usinas que operariam exclusivamente com o gás natural. Espera-se, assim como na conversão de motores de uso veicular, que a operação Diesel/gás de grupos geradores de energia elétrica também resultem em emissões de poluentes reduzidas e associados ganhos ambientais e benefícios à saúde das populações (Cârdu e Baica, 2003; Reddy e Venkataraman, 2002).

Grupos geradores de energia de emergência representam um outro segmento onde o gás natural também pode ser empregado. Estes se encontram instalados tanto na indústria como comércio e, tipicamente, permanecem ociosos durante grande parte do tempo. Pode-se citar, como exemplo, as instalações existentes em hospitais, hotéis e *shopping centers*. Considerando que hoje as figuras do produtor independente e do auto-produtor de energia estão bem definidas no Brasil, os proprietários de grupos geradores poderiam, tendo a possibilidade da conversão de seus motores e acesso ao energético de baixo custo, fazer negócios produzindo energia elétrica com seus equipamentos.

Os benefícios que a conversão traria para estes possíveis consumidores de gás natural não se relacionam apenas à geração da própria energia elétrica (incluindo a possibilidade da venda de excedentes da energia produzida). Hotéis, *shopping centers* e hospitais, por exemplo, normalmente demandam grandes quantidades de energia para climatização (condicionamento de ar) e aquecimento (cozinhas e lavanderias). O calor de rejeito de geradores, seja o disponível no fluido de arrefecimento, seja o disponível nos gases de exaustão, pode ser empregado de forma a suprir, parcial ou totalmente, estas demandas térmicas.

### **3. PRINCIPIOS DO FUNCIONAMENTO DE MOTORES DIESEL/GÁS**

Aplicações comerciais pioneiras empregando combustíveis gasosos em motores do ciclo Diesel remontam a 1935 (Karim et al., 1966). Durante a segunda guerra mundial usaram-se misturas de gás de carvão, biogás, metano e gasolina de baixa qualidade em forma de vapor gaseificado, em motores Diesel, para uma grande variedade de aplicações. Após a guerra o interesse em tais aplicações flutuou dependendo do custo relativo de tais combustíveis em relação ao do tradicional.

O motor Diesel/gás pode ser definido como um que opera consumindo, simultaneamente, gás natural e óleo Diesel como combustíveis. Diferentemente do que acontece no motor Diesel tradicional, onde apenas ar é admitido nos cilindros, motores operando no modo bi-combustível admitem uma mistura de ar e gás natural. Pelo fato do gás natural ser composto quase que exclusivamente de metano, hidrocarboneto de alto número de octana (Nwafor e Rice, 1994), a mistura é capaz de resistir a taxas de compressão elevadas como as empregadas nos motores Diesel, sem que ocorra a detonação (Lee et al., 2003).

Nos instantes finais da compressão da mistura ar – gás natural ocorre a injeção de óleo Diesel. O combustível pulverizado se inflama ao entrar em contato com os gases aquecidos no interior do

cilindro, exatamente da mesma maneira como ocorre durante a operação de um motor com ignição por compressão tradicional. A combustão, iniciada com o óleo Diesel, se propaga então pelo restante da carga do cilindro consumindo, assim, a mistura ar – gás natural (Boyer, 1949; Kusaka *et al.*, 2000; Kazuyoshi *et al.*, 1991; Huang e Chang, 1994). Os processos de expansão e exaustão dos produtos da combustão ocorrem como no motor tradicional.

A diferença fundamental entre o motor por compressão tradicional e o operando no modo Diesel – gás está na quantidade de óleo Diesel injetado. No motor operando da forma tradicional toda liberação de energia provém unicamente da combustão do óleo injetado no cilindro. Já no motor Diesel – gás, grande parte da energia de combustão provém da queima do gás. Apenas uma pequena injeção de Diesel se faz necessária para a ignição da mistura ar – gás natural. Alguns afirmam que, sob condições favoráveis, pode-se operar motores bi-combustível com o gás correspondendo a até 90% do total de combustíveis consumidos. Taxas de substituição normalmente verificadas dificilmente ultrapassam o patamar de 70-80% (Selim, 2003).

#### 4. APARATO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A Fig. (3) fornece tanto uma vista geral do dinamômetro de bancada empregado nos testes realizados na PUC-Rio, como o aspecto do motor ensaiado no modo Diesel/gás. Este é de fabricação da MWM Motores Diesel e é empregado na propulsão de diversos caminhões leves. É um modelo supercarregado e conta com inter-resfriamento do ar de admissão. Tem cilindrada de 4,3 litros e, em funcionamento Diesel, desenvolve 145cv a 2600rpm.

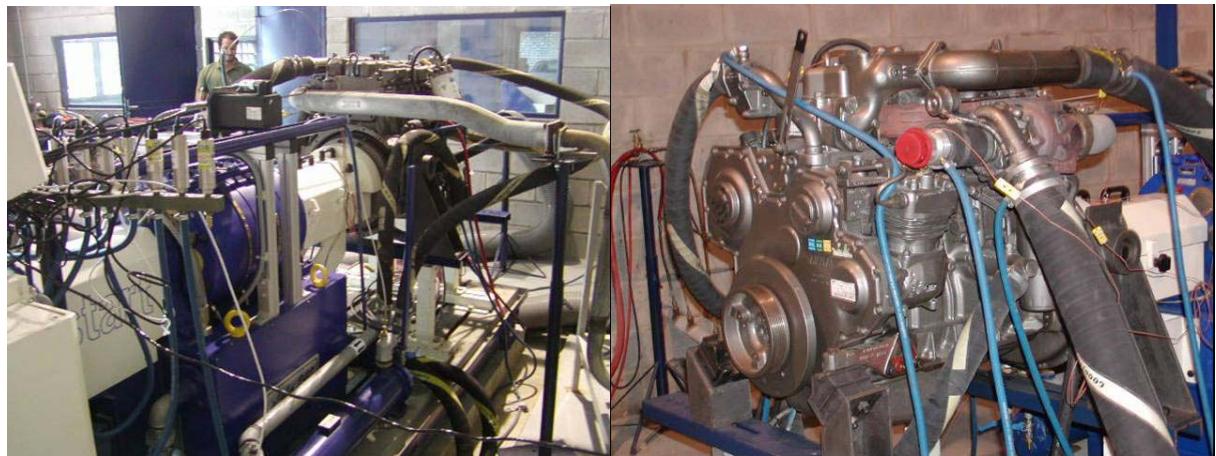


Figura 3. Vista do Aparato Experimental.

O dinamômetro de bancada empregado é de fabricação AVL, modelo Alpha 240. É capaz de testar motores de até 320cv. As emissões de fumaça foram feitas por opacímetro (modelo 439) e ***smoke meter*** (modelo 415 S), ambos também de fabricação AVL. O consumo de Diesel foi determinado via balança de combustível AVL modelo 733S. O consumo de gás natural (encanado), disponível nas instalações do Laboratório de Engenharia Veicular da PUC-Rio, foi realizado por medidor de vazão mássica do tipo Coriolis (Micromotion CMF010).

A medida do consumo de ar do motor foi realizada por medidores de vazão do tipo bocal calibrado. Medidores de vazão como este são indicados para a medida de vazões que ocorram, fundamentalmente, em regime permanente. Como a admissão de ar de um motor alternativo é, por natureza, pulsante faz-se necessário a instalação de algum amortecedor de pulsações entre a tomada de ar do motor e o dispositivo medidor de vazão.

Nos testes realizados os medidores de vazão de ar foram montados como tomada de ar para um reservatório de volume elevado. Este, por suas grandes dimensões, atua como um pulmão amortecendo pulsações entre o ar que dele é direcionado ao motor e o admitido do ambiente da sala

do dinamômetro. Garante-se desta forma o escoamento em regime permanente pelos bocais calibrados. O pulmão empregado possuía volume de 400 litros.

O gás natural oriundo da rede de gás encanado do laboratório, após passar por seu medidor de vazão, era dosado ao motor por uma válvula manual. Em seguida, era carburado ao ar de admissão do motor, logo após a extração deste do tambor amortecedor de pulsações.

Recorrendo às facilidades oferecidas pelo dinamômetro de bancada foi possível a operação do motor no modo bicombustível, inclusive com a variação da taxa de substituição Diesel/gás, mesmo sem a disponibilidade de um kit de conversão. Fixava-se no dinamômetro o funcionamento do motor, inicialmente operando apenas com Diesel, em um par torque/rotação definido. A operação bicombustível era obtida ao se aumentar, a partir do zero, gradual e manualmente, a vazão de gás natural. Com o gás sendo fornecido independentemente do sistema de controle do dinamômetro, este reduzia automaticamente o débito de Diesel. Assim, mantinha o motor operando no par torque/rotação pré-estabelecido. O registro dos parâmetros de interesse eram feitos para diferentes taxas de substituição de Diesel por gás natural.

O incremento da vazão de gás (e correspondente redução no débito de Diesel) prosseguia até que se alcançasse alguma condição de operação irregular para o motor. A baixas cargas, esta tipicamente representa a falha na ignição de cilindros e o correspondente funcionamento instável do motor, como se este estivesse para “morrer”. Já a cargas elevadas, gás em demasia (alta taxa de substituição Diesel/gás) levava ao funcionamento do motor com elevado ruído e vibração. Muito provavelmente, estes eram resultado de combustão anômala nos cilindros, onde deveria estar ocorrendo a detonação.

## 5. REDUÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nas medidas feitas (rotação, torque, particulados, consumo de combustíveis e temperatura dos gases no escapamento) podem-se determinar demais variáveis de interesse:

Potência – Produto do torque, T, pela rotação  $\omega$  (rd/s):

$$P = T \cdot \omega \quad (1)$$

Taxa de Substituição Diesel/gás – Razão entre o calor obtido da combustão do gás natural pelo calor total obtido da combustão dos dois energéticos fornecidos (Diesel + gás):

$$T_{D/G} = \frac{\dot{m}_{gás} PCI_{gás}}{\dot{m}_{gás} PCI_{gás} + \dot{m}_{Diesel} PCI_{Diesel}} \quad (2)$$

O poder calorífico inferior do Diesel ( $PCI_{Diesel}$ ) vale 42,45 MJ/kg. O do gás natural distribuído no Rio de Janeiro tem  $PCI$  de 48,53 MJ/kg.

Rendimento Térmico – Razão entre a potência líquida obtida no eixo do motor e o calor total obtido pela combustão dos combustíveis Diesel e gás natural:

$$\eta_T = \frac{T \cdot \omega}{\dot{m}_{gás} PCI_{gás} + \dot{m}_{Diesel} PCI_{Diesel}} \quad (3)$$

com  $\dot{m}_{gas}$  e  $\dot{m}_{Diesel}$  sendo os consumos (kg/s) de gás natural e Diesel, respectivamente.

As Fig. (4) e Fig. (6) demonstram alguns dos resultados obtidos. Embora se tenha mapeado o motor por toda sua faixa de funcionamento aqui apenas se reportam os pontos experimentais levantados a 1800rpm. Ressalta-se que não se consegue obter elevadas taxas de substituição a

baixíssimas cargas. Para carga nula a maior taxa de substituição que se conseguiu obter foi pouco superior a 50%. Já para cargas levemente superiores a esta, como é o caso das curvas relativas a 16,9cv e 30,5cv (respectivamente 14% e 26% da plena carga), já se conseguem taxas de substituição da ordem de 70-80%. Chama-se também a atenção para o fato de termos obtido taxas de substituição superiores a 90% em grande faixa do campo de aplicação do motor, de 58cv a 106cv (50% a 90% da potência de plena carga).

A Fig. (4) indica a variação do rendimento térmico verificado a diversas cargas e taxas de substituição Diesel/gás. O rendimento a plena carga aumenta, de 33,7% verificado no funcionamento apenas com Diesel, para 36,7% a 80% de taxa de substituição Diesel/gás. Isso corresponde a um aumento de 9% no rendimento térmico. Já em baixas cargas o rendimento térmico cai substancialmente com a taxa de substituição. No caso da curva correspondente a 16,9cv (14,4% da plena carga), o rendimento térmico cai de 23% verificado na operação apenas com Diesel para cerca de 13,5% a 78% de substituição Diesel/gás. Isto corresponde a uma redução de 41% no rendimento do motor. É interessante também ressaltar que o rendimento térmico do motor 100% Diesel permanece quase inalterado para cargas acima de 50% da máxima. Isto também se verifica no funcionamento Diesel/gás, mesmo a taxas de substituição de Diesel por gás tão elevadas quanto 90%, em potência superior a cerca de 70% da plena carga. Motores do ciclo Otto dificilmente preservam o rendimento de plena carga a cargas parciais. Este comportamento é característico do ciclo Diesel.

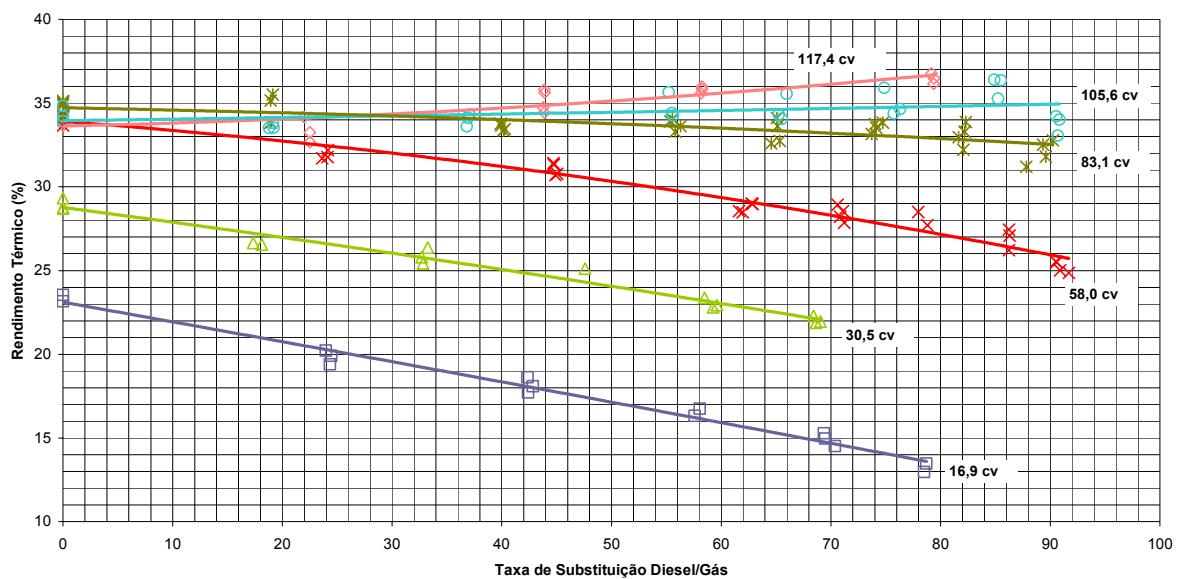


Figura 4. Rendimento Térmico com Carga e Taxa de Substituição Diesel/gás (1800 rpm).

Na Fig. (5) se indica a concentração de material particulado nos gases de escape. Sua concentração, assim como a opacidade (não mostrada), decai exponencialmente com a taxa de substituição Diesel/gás. A plena carga a concentração de particulados na descarga diminui uma ordem de grandeza entre as condições de funcionamento original Diesel e com 50% de taxa de substituição Diesel/gás.

Temperaturas dos gases de escape, variáveis com o nível de carga e taxa de substituição Diesel/gás, são apresentadas na Fig. (6). É interessante chamar a atenção para a relação existente entre a temperatura de escape, Fig. (6), e o rendimento térmico, Fig. (5). Para qualquer curva de carga constante, reduções no rendimento térmico acarretam aumentos na temperatura de escape. Com uma menor parcela do calor liberado na combustão convertida em trabalho mecânico resulta uma maior rejeição de energia pelo escapamento. Efeito análogo se verifica em cargas elevadas onde, como é o exemplo da curva a plena carga já citada, observa-se um acréscimo de 9% no

rendimento térmico e uma correspondente redução da temperatura dos gases de escape de cerca de 70°C .

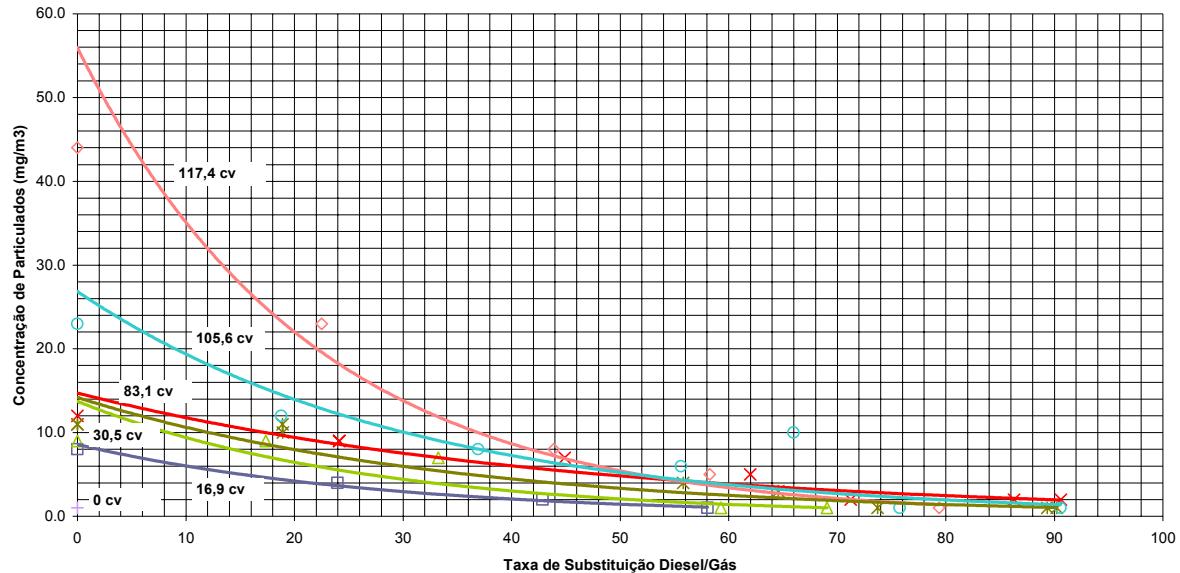


Figura 5. Particulados no Escapamento – Variação com Carga e Taxa de Substituição (1800 rpm).

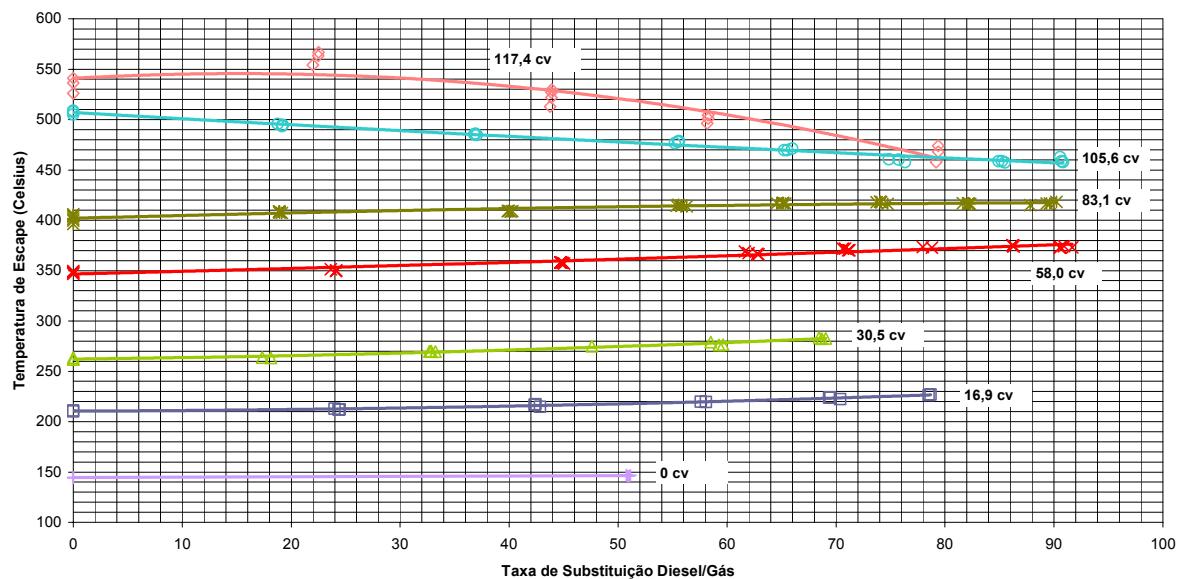


Figura 6. Temperatura do Escape – Variação com Carga e Taxa de Substituição (1800 rpm).

## 6. CONCLUSÕES

A capacidade de produção e refino do petróleo brasileiro cresceram de forma significativa ao longo das décadas passadas, a ponto de hoje quase garantir a auto-suficiência do País. O elevado consumo de Diesel, entretanto, força a importação do derivado. O gás natural, caso a venha a ser consumido em motores do ciclo Diesel hoje existentes, mesmo que em substituição parcial do energético tradicional, pode modificar este quadro. Simultaneamente criar-se-ia mercado para o gás natural, hoje, abundante. Uma alternativa de compromisso para a redução da demanda de Diesel no Brasil pode ser realizada pela conversão dos motores originalmente Diesel para o consumo do gás

natural em substituição parcial do Diesel. Nesta, os motores operariam num ciclo bi-combustível, consumindo simultaneamente tanto óleo Diesel quanto o gás natural.

Para carga nula a maior taxa de substituição que se conseguiu obter foi pouco superior a 50%. Em cargas intermediárias (da ordem de 14% da plena carga) se conseguiram taxas de substituição na faixa dos 70-80%. Em grande faixa do campo de aplicação do motor (50% a 90% da potência de plena carga) verificaram-se taxas de substituição de Diesel por gás natural de até cerca de 90%. O consumo do gás natural em motores originalmente Diesel pode elevar o rendimento térmico da máquina convertida, bem como também reduzir significativamente suas emissões de particulados.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a PETROBRAS/RedeGasEnergia/CENPES e FINEP pelo suporte financeiro das atividades. Também agradecem o apoio da distribuidora de gás do Rio de Janeiro, CEG, que disponibilizou gás encanado ao Laboratório de Engenharia Veicular da PUC-Rio. Os autores ainda agradecem a MWM Motores Diesel pela cessão de motores para teste.

## 8. REFERÊNCIAS

- Abd Alla, G. H.; Soliman, H. A.; Badr, O. A. and Abd Rabbo, M. F. (2002); Effect of Injection Timing on the Performance of a Dual Fuel Engine; *Energy Conversion and Management*; 43; pp. 269 – 277.
- Abd-Alla, G. H. (2002); Using Exhaust Gas Recirculation in Internal Combustion Engines: A Review; *Energy Conversion and Management*; 43; pp. 1027 – 1042.
- Ahouissoussi, N. B. C. and Wetzstein, M. E. (1997); A Comparative Cost Analysis of Biodiesel, Compressed Natural Gas, Methanol and Diesel for Transit Bus Systems; *Resource and Energy Economics*; 20; pp. 1 – 15.
- ANEEL (2002); Banco de Informações de Geração – BIG. Agência Nacional de Energia Elétrica.
- Balanço Energético Nacional – BEN (2002). Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brasil.
- Beer, T.; Grant, T.; Williams, D. and Watson, H. (2002); Fuel – Cycle Greenhouse Gas Emissions from Alternative Fuels in Australian Heavy Vehicles; *Atmospheric Environment*; 36; pp. 753 – 763.
- Boyer (1949). Status of Dual – Fuel Engine Development. SAE paper 296.
- Cârdu, M. and Baica, M. (2003); About the Ecological Aspects of Dual Fuel Combustion in Thermopower Plants; *Energy Conversion and Management*; 44; pp. 1773 – 1786.
- Carvalho, A. V. (1985); Natural Gas and Other Alternative Fuels for Transportation Purposes; *Energy*; Vol. 10; No. 2; pp. 187 - 215.
- Cecchi, J.C. (1995). O gás natural na América Latina, no Brasil e no Estado do Rio de Janeiro – Algumas considerações, Cadernos de Energia – Centro de Estudos de Energia (ENERGE), Rio de Janeiro.
- Fontes, J.A.O. e Fontes, F.O. (1995). Transformação de um motor ciclo Diesel em ciclo Otto para utilização de gás natural. XIII Congresso Brasileiro e II Congresso Ibero-Americanano de Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, MG. Anais em CD-ROM.
- Huang, R. F. and Chang, J. M. (1994); The Stability and Visualized Flame and Flow Structures of a Combusting Jet in Cross Flow; *Combustion and Flame*; 98; pp. 267 – 278.
- Karim, G.A.; Klat, S.R.; Moore, N.P.W. (1966). Knock in Dual – Fuel Engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Internal Combustion Engines Group, 1966-1967.
- Kazuyoshi, N.; Mizutani, Y.; Hirao, T. and Fujioka, H. (1991); An Experimental Study on Detailed Flame Structure of Liquid Fuel Sprays With or Without Gaseous Fuel; *Combustion and Flame*; 84; pp. 3 – 14.
- Kusaka, J.; Okamoto, T.; Daisho, Y.; Kihara, R. and Saito, T. (2000); Combustion and Exhaust Gas Emission Characteristics of a Diesel Engine Dual – Fueled with Natural Gas; *JSAE Review*; 21; pp. 489 – 496.

- Lee, C. S.; Lee, K. H. and Kim, D. S. (2003); Experimental and Numerical Study on the Combustion Characteristics of Partially Premixed Charge Compression Ignition Engine with Dual Fuel; *Fuel*; 82; pp. 553 – 560.
- MacLean, H. L. and Lave, L. B. (2003); Evaluating Automobile Fuel / Propulsion System Technologies; *Progress in Energy and Combustion Science*; 29; pp. 1 – 69.
- Nwafor, O. M. I. and Rice, G. (1994); Combustion Characteristics and Performance of Natural Gas in High Speed Indirect Injection Diesel Engine; *Renewable Energy*; Vol. 5; Part II; pp. 841 – 848.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (2002); Informativos Diários da Operação. Centro Nacional de Operação do Sistema.
- Papagiannakis, R. G. and Hountalas, D. T. (2003); Experimental Investigation Concerning the Effect of Natural Gas Percentage on Performance and Emissions of a DI Dual Fuel Diesel Engine; *Applied Thermal Engineering*; 23; pp. 353 – 365.
- Rabl, A. (2002); Environmental Benefits of Natural Gas for Buses; *Transportation Research*; Part D7; pp. 391 – 405.
- Reddy, M. S. and Venkataraman, C. (2002); Inventory of Aerosol and Sulphur Dioxide Emissions from India: I – Fossil Fuel Combustion; *Atmospheric Environment*; 36; pp. 677 – 697.
- Selim, M. Y. E. (2003); Effect of Exhaust Gas Recirculation on Some Combustion Characteristics of Dual Fuel Engine; *Energy Conversion and Management*; 44; pp. 707 – 721.
- Selim, M. Y. E. (2003); Sensitivity of Dual Fuel Engine Combustion and Knocking Limits to Gaseous Fuel Composition; *Energy Conversion and Management*; *Energy Conversion and Management*; a ser publicado.

## **PARTIAL SUBSTITUTION OF DIESEL BY NATURAL GAS IN ENGINES – TECHNOLOGY ATTRACTIVENESS AND EXPERIMENTAL EVALUATION**

### **Ricardo Hernandez Pereira**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Department of Mechanical Engineering, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brazil.  
e-mail: rhdzp@ituc.puc-rio.br

### **Sergio Leal Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Department of Mechanical Engineering, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brazil.  
e-mail: slbraga@mec.puc-rio.br

### **Carlos Valois Maciel Braga**

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Department of Mechanical Engineering, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ – 22453-900 – Brazil.  
e-mail: valois@mec.puc-rio.br

**Abstract.** *The high Brazilian Diesel consumption imposes imports of this distillate. Natural gas, partially substituting the oil demanded by Diesel cycle engines, may contribute to reduce the country dependence of imported fuel. The dual fuel conversion may allow the use of the abundant and inexpensive gaseous fuel in existing engines. Experimental results show that the dual fuel conversion can both improve engine efficiency and emissions.*

**Keywords:** Diesel, natural gas, internal combustion engines.