



PIBIC/CNPq/UFPG-2010



## ***ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA OPERANDO DE FORMA DUAL (DIESEL + GÁS NATURAL)***

**Arthur Azevedo Ferreira<sup>1</sup>, Yoge Jerônimo R. da Costa<sup>2</sup>**

### **RESUMO**

Este trabalho teve como objetivo analisar o desempenho de um motor do ciclo diesel instalado no laboratório de Termogeração da UFPG, submetendo o mesmo a trabalhar de maneira dual, utilizando os combustíveis diesel e gás natural simultaneamente para taxas de substituição pré-estabelecidas, com o objetivo de verificar o comportamento das emissões de poluentes por motores do ciclo diesel operando de forma dual. Também foi verificada a eficiência deste sistema para as condições de operação em modo dual. Para tanto, foram feitos vários experimentos alterando-se a taxa de substituição de diesel por gás natural para valores de 40 %, 60 % e 80 % e cargas que variaram de 50 kW, 75 kW, 100 kW e 125 kW. Todos os dados foram obtidos através de um sistema de aquisição de dados desenvolvido na própria Universidade. Os dados foram visualizados em uma planilha excel, que possibilitou sua análise e geração de gráficos para melhor avaliação dos dados obtidos.

**Palavras-chave:** Motor, Diesel, Gás Natural.

### **PERFORMANCE OF A INTERNAL COMBUSTION ENGINE OPERATING IN A DUAL FORM (DIESEL+ NATURAL GAS)**

#### **ABSTRACT**

This study aimed to examine the performance of a diesel cycle engine installed in the laboratory of thermal generation of UFPG, subjecting it to work in dual manner, using diesel fuel and natural gas substitution rates for both pre-established with the objective to verify the behavior of pollutant emissions by diesel cycle engines operating in a dual. We also observed the efficiency of the system for the conditions of dual mode operation. To this end, several experiments were done by changing the rate of replacement of diesel by natural gas to values of 40%, 60% and 80% and loads ranging from 50 kW, 75 kW, 100 kW and 125 kW. All data were obtained through a data acquisition system developed at the University itself. The data were viewed in an excel spreadsheet, which facilitated their analysis and generation of graphics for better evaluation of the data.

**Keywords:** Dual Engine, Diesel, Natural gas

---

<sup>1</sup> Aluno de Curso de Engenharia Mecânica, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: arthurferreira\_1@hotmail.com

<sup>2</sup> Engenheiro Químico, Professor. Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, UFPG, Campina Grande, PB, E-mail: yoge@dem.ufcg.edu.br

## INTRODUÇÃO

No presente trabalho foi utilizado um grupo gerador que trabalha simultaneamente com os combustíveis diesel e gás natural, tendo sido analisada a performance do conjunto em termos de desempenho e das emissões de poluentes. Assim, a utilização do gás natural o mais estável da família dos hidrocarbonetos, em motores de combustão interna, possibilita o aproveitamento das características benéficas desse combustível, justificando o seu uso principalmente em motores estacionários, frota de ônibus para transporte coletivo e transporte de cargas. Devido a sua disponibilidade e a algumas características próprias, este tem sido empregado de forma satisfatória tanto em motores do ciclo Otto, onde a substituição do combustível líquido pelo gasoso é total, como em motores do ciclo Diesel onde se utiliza os dois combustíveis ao mesmo tempo.

Em um ciclo Dual (diesel+gás natural) utiliza-se o diesel como chama piloto e o gás natural como combustível principal. Uma mistura de gás natural e ar é admitida e comprimida durante a fase de compressão, uma quantidade piloto de diesel é injetada para iniciar a combustão. Logo, para se desenvolver uma combustão correta em um motor que utilize esses dois combustíveis é preciso estabelecer uma proporção correta entre eles.

De acordo com a ANP – Agência Nacional do Petróleo, as reservas de gás natural comprovadas no Brasil até o ano de 2000 eram estimadas em aproximadamente 230 bilhões de metros cúbicos de gás. De acordo com a imprensa nacional, durante o ano de 2003 foram descobertas reservas adicionais de gás no litoral do Sudeste Brasileiro, incrementando de forma significativa as reservas desse energético.

O uso de combustíveis gasosos alternativos em motores diesel está aumentando em todo o mundo e deve-se a natureza limpa de sua combustão, comparada aos combustíveis líquidos convencionais, assim como pelo seu aumento de disponibilidade e preços atrativos. O gás natural tem alto número de octanas e, portanto é excelente para motores com alta taxa de compressão. Além disso, ele se mistura uniformemente com o ar, resultando numa combustão eficiente e numa redução substancial dos elementos poluentes.

Os compostos dos gases de exaustão emitidos, tanto por motores à diesel quanto a gasolina ou ainda com combustíveis mistos, podem ser classificados em dois tipos: os que não causam danos à saúde ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$ ), e os que causam danos à saúde, sendo esses subdivididos em compostos cujo emissão está regulamentada ( $\text{CO}$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  e material particulado), e aqueles que ainda não estão sob regulamentação (aldeídos, amônia, benzeno, cianetos, tolueno, e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos).

A grande vantagem da utilização do gás natural é a maior possibilidade de preservação e conservação do meio ambiente, reduzindo os níveis de poluição e de acidentes ambientais. Portanto, esta pesquisa possibilita viabilizar técnicas de geração de energia com diminuição de emissões de poluentes, abastecendo a sociedade acadêmica com fatores e resultados que possam solucionar problemas já existentes.

### Óleo Diesel

O óleo diesel é um derivado da destilação do petróleo bruto usado como combustível nos motores Diesel, constituído basicamente por hidrocarbonetos. O óleo diesel é um composto formado principalmente por átomos de carbono, hidrogênio e em baixas concentrações por enxofre, nitrogênio e oxigênio. O diesel é selecionado de acordo com suas características de ignição e de escoamento, adequadas ao funcionamento dos motores ciclo diesel. É um produto pouco inflamável, medianamente tóxico, pouco volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. Recebeu este nome em homenagem ao engenheiro alemão Rudolf Diesel que inventou um meio mecânico para explorar a reação química originada da mistura de óleo e do oxigênio presente no ar.

Produzido a partir da refinação do petróleo, o óleo diesel é formulado através da mistura de diversas correntes como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas do processamento do petróleo bruto. Sua fórmula molecular varia de acordo com o tipo de diesel, no entanto, em se tratando da combustão do combustível líquido é conveniente exprimir a composição em termos de um único hidrocarboneto, embora ele seja uma mistura de vários.

Pelo fato de uma mistura de diesel com o ar produzir uma forte explosão quando comprimida, tal reação passou a ser utilizada para gerar energia e movimentar máquinas e motores de grande porte. Esses motores são conhecidos como motores do ciclo diesel. Tais motores são empregados nas mais diversas aplicações, tais como: automóveis de passeio, furgões, ônibus, caminhões, pequenas embarcações marítimas, máquinas de grande porte, locomotivas, navios e aplicações estacionárias (geradores elétricos, por exemplo). Em função dos tipos de aplicações, o óleo diesel apresenta características e cuidados diferenciados para conservar sempre o mesmo ponto de fulgor e não fugir dos padrões de ignição pré-estabelecidos por essa tecnologia. Porém, em alguns países, essa regra vem sendo descumprida e já é costume os governos permitirem a mistura de outras substâncias ao óleo diesel.

Apresenta ponto de ebulição entre 200 e 360°C, tem poder calorífico médio (PCI) ou (calor de combustão) de aproximadamente 46054,8 kJ/kg (Martinelle Jr., 2005).

No Brasil há predominância do transporte rodoviário, tanto de passageiros quanto de carga. Por esta razão, o óleo diesel é o derivado de petróleo mais consumido no país. O volume de óleo diesel vendido em 2009 representou 41% do volume total de derivados. O crescimento econômico nos últimos anos tem elevado substancialmente as vendas (Figura 1).



Figura 1 - Venda de óleo diesel no Brasil

### Gás Natural

É um combustível fóssil catalogado como uma das fontes de energia mais limpas, seguras e úteis. Tipicamente está composto por metano (95% ou mais), propano e outros componentes mais pesados. Não tem cor nem cheiro e, em geral, encontra-se de forma natural misturado com outros hidrocarbonos fósseis. No momento de sua extração, o Gás Natural contém impurezas como água, ácido sulfídrico, dióxido de carbono e nitrogênio, que devem ser removidos antes de seu transporte e comercialização.

É dividido de acordo com sua origem em: Gás Associado: encontrado dissolvido no petróleo cru e/ou formando uma camada protetora gasosa sobre ele (gás livre). Quanto mais fundo o poço, encontra-se mais gás do que petróleo. No Brasil cerca de 65% das reservas de GN e 85% de sua produção é de gás associado, e em todo mundo cerca de 40%. Gás não-associado: encontrado em depósitos subterrâneos, não acompanhados de hidrocarbonetos em sua fase líquida.

O gás natural é inodoro, incolor e inflamável, por isso no processo de distribuição, por medida de segurança é adicionado compostos à base de enxofre, em concentrações necessárias a caracterização de um cheiro marcante, porém sem características corrosivas. O processo é conhecido como odorização.

Na participação das fontes de energia na matriz brasileira, o gás natural se encontra na 5ª posição com 9,3% de participação, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2008 (Figura 2):

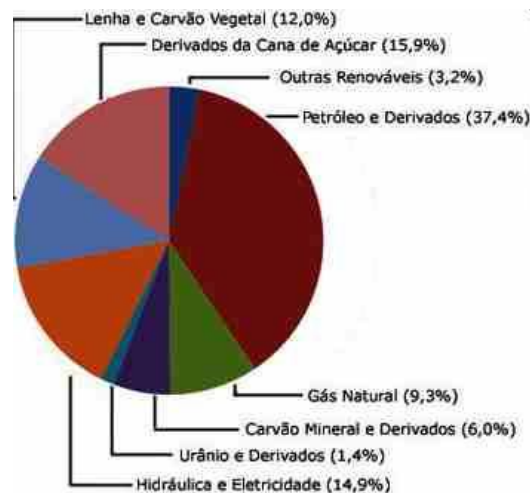


Figura 2 – Participação do gás natural na matriz energética brasileira

## MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado no Laboratório de Termogeração da Universidade Federal de Campina Grande, onde trabalham em conjunto os Departamentos de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica, que dispõem de estrutura física, de pessoal e equipamentos capazes de viabilizar o desenvolvimento do presente projeto.

### Material

Gás Natural e Diesel adquiridos de um posto de combustível vizinho a UFCG, sensores de temperatura e pressão (termopares e transdutores de pressão), medidores de vazão de diesel, de gás natural e de ar atmosférico.

A Tabela 1 abaixo apresenta a composição do gás natural utilizado nos experimentos e a Tabela 2, revela as suas propriedades médias mais importantes que são o poder calorífico superior, a densidade relativa ao ar e a densidade média do combustível.

Tabela 1. Composição do gás natural. Fonte: PBGÁS (2009)

Composição média do gás natural	% em Volume
Metano	90,09
Etano	6,84
Dióxido de carbono	1,56
Nitrogênio	1,35
Propano	0,16

Tabela 2. Propriedades do gás natural. Fonte: PBGÁS (2009)

Propriedade (valores médios)	Valor
Poder calorífico superior ( $kcal / m^3$ )	9,100
Densidade relativa ao ar	0,614
Massa específica ( $kg / m^3$ )	0,737

### Sistema eletro-mecânico (motor-gerador)

O sistema motor-gerador é dotado de um motor da marca CUMMINS 6CTA8.3, com capacidade máxima de 188 kW de potência à 1800 rpm, além de um gerador da marca Onan Genset de 150 kW, todos instalados e prontos para testes experimentais com os combustíveis diesel e gás natural. A unidade está totalmente instrumentada com medidores de vazão de ar, gás e diesel, além de sensores de pressão e temperatura em vários pontos do sistema e sonda para análise de gases.

A Figura 3 apresenta o sistema eletro-mecânico composto pelo motor diesel de seis cilindros em linha, enquanto a Figura 4 mostra o medidor de vazão de ar que está instalado antes do filtro de ar do motor, a Figura 5 mostra o redutor de pressão de gás, que vai alimentar o sistema do kit gás (Figura 6).



Figura 3 – Conjunto motor-gerador

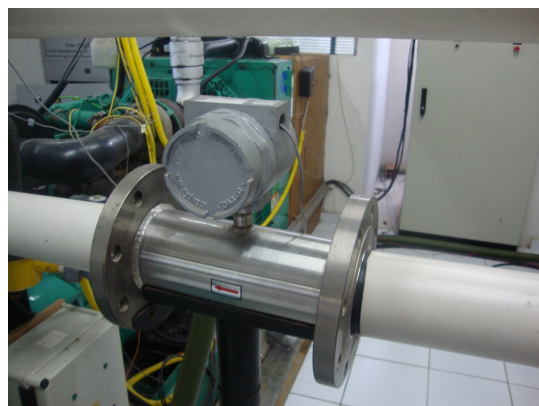


Figura 4 – Medidor de vazão de Ar

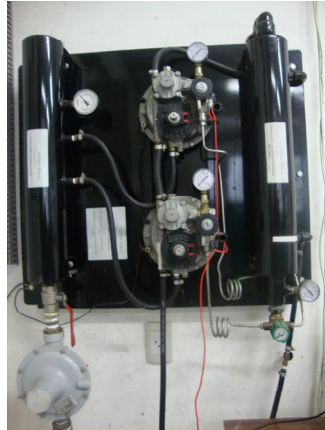


Figura 5 – Sistema de redução de pressão

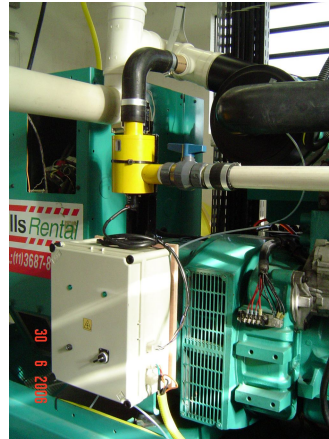


Figura 6 – Kit Gás

### Sistema de aquisição de dados

A Figura 7 apresenta o sistema de aquisição de dados, o qual é composto por uma unidade de leitura e tratamento de sinal, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Elétrica / UFCG (DEE/UFCG), e um micro computador, mostrado na Figura 8, que tem como função processar e armazenar todas as informações coletadas em tempo real.

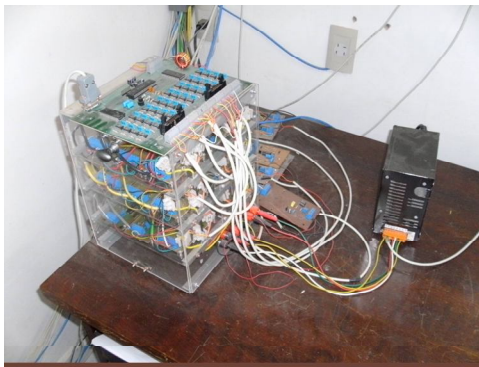


Figura 7 – Sistema de aquisição de dados



Figura 8 – Micro computador

### Sistema de análise dos gases de escape

O sistema de análise de gases do escape tem como objetivo avaliar a emissão de poluentes do motor em condições de carga e taxa de substituição previamente estabelecidas. É composto por um analisador de gases (Figura 9) fabricado por Kane International Limited, modelo KM 9106, juntamente com uma sonda (Figuras 11 e 12) e unidade de programação e controle, mostrado na Figura 10.



Figura 9 – Analisador de gases



Figura 10 – Unidade de controle

Na Figura 11, vê-se a sonda do analisador de gases instalada no escapamento do motor, onde os gases são captados para análise.



Figura 11 - Sonda do analisador de gases instalada

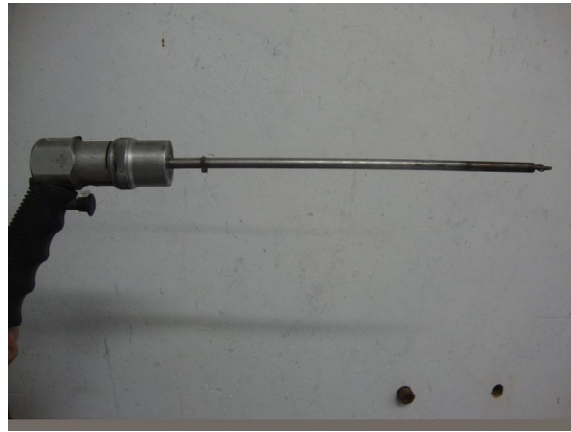


Figura 12 – Sonda do analisador

### Procedimento experimental

Antes do início dos experimentos, foi realizada uma aferição dos termopares, fazendo-se a imersão dos mesmos em gelo (0°C) e em água fervendo (100°C). Os transdutores de pressão e os medidores de vazão possuem certificados de aferição.

Para obtenção dos resultados realizamos testes na parte da manhã e da tarde, e em horários diferentes. Antes de cada teste foi preciso ligar um pouco mais cedo o analisador de gases para que ele pudesse calibrar-se automaticamente. Estando calibrado o analisador, o sistema de aquisição é ligado e em seguida liga-se o sistema motor-gerador. Feito isso, espera-se que o próprio motor alcance a temperatura de trabalho, que é a temperatura da água na saída, em torno de 80°C. Na realização dos ensaios utilizamos primeiro a carga de 50 kW para as taxas de substituição de 40%, 60% e 80% de diesel por gás natural, em seguida faz-se o mesmo para as cargas de 75kW, 100kW e 125kW.

A intervalos de 2 segundos são coletados dados da temperatura no sistema de escapamento do motor, do ar de admissão, do óleo lubrificante, do ar ambiente, da água na entrada e saída, do ar após a passagem pelo compressor, da pressão ambiente e após o compressor, da pressão do óleo lubrificante e de vazões para o ar, o gás e o óleo diesel na entrada do motor, bem como dados de emissão de SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> (metano), O<sub>2</sub>, eficiência da combustão e de excesso de ar.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apesar de os resultados serem compatíveis em todas as baterias de testes, foram feitas planilhas do Excel, Figura 13, com os cálculos médios desses resultados tanto da eficiência do motor, quanto das taxas de emissões de SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub> e C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>. Por fim, foi necessário a utilização do programa computacional Grapher 2.0, apresentado na Figura 14, para a plotagem dos gráficos correspondentes.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	Proteção	Peso inicial	Peso final	Consumo instantâneo	Tempo em segundos	Consumo horário	Taxa de substituição 40-80-80	LEITURA	DATA	Umidade relativa	Vazão de gás	período	CO
7													
8													
9	50.00	47.20	47.00	0.20	88.00	8.37	39.68	37.00	4-nov-08	4.60	manhã	1513	
10	50.00	45.35	45.15	0.20	122.40	1.86	29.28	26.00	4-nov-08	11.30	manhã	1568	
11	50.00	44.50	45.30	0.20	254.90	2.81	78.73	19.00	4-nov-08	19.40	manhã	810	
12	75.00	42.30	42.30	0.20	61.10	11.78	48.03	27.00	4-nov-08	8.20	manhã	1393	
13	75.00	43.25	43.05	0.20	93.90	7.67	69.98	26.00	4-nov-08	16.70	manhã	1029	
14	75.00	44.50	44.30	0.20	160.00	3.91	80.09	35.00	4-nov-08	24.00	manhã	976	
15	100.00	49.00	49.20	0.20	48.10	14.37	39.18	78.00	4-nov-08	10.80	manhã	1344	
16	100.00	39.35	39.15	0.20	73.40	9.81	60.14	85.00	4-nov-08	20.20	manhã	1594	
17	100.00	38.40	38.20	0.20	144.90	5.88	78.67	84.00	4-nov-08	29.20	manhã	1563	
18	125.00	35.10	34.90	0.20	39.20	18.37	38.08	112.00	4-nov-08	11.20	manhã	1186	
19	125.00	37.10	36.90	0.20	58.50	12.31	58.18	105.00	4-nov-08	26.20	manhã	1214	
20	125.00	37.60	37.40	0.20	119.90	6.81	80.08	101.00	4-nov-08	29.20	manhã	1583	

Figura 13 – Planilha Excel de dados

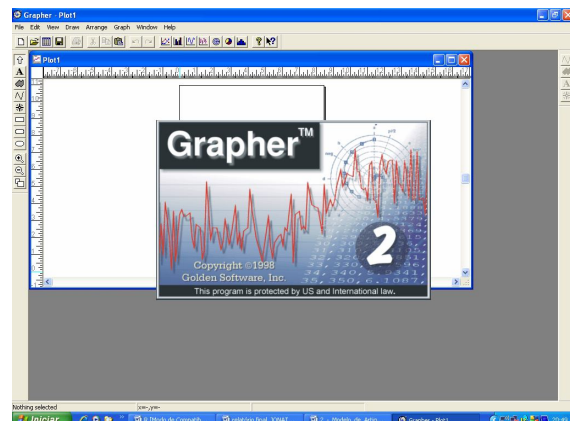


Figura 14 – Grapher 2.0

## Eficiência do motor diesel

Analisando-se o gráfico da Figura 11, nota-se que a eficiência aumenta para todas as taxas de substituição, destaque especial para a condição de 80 %.

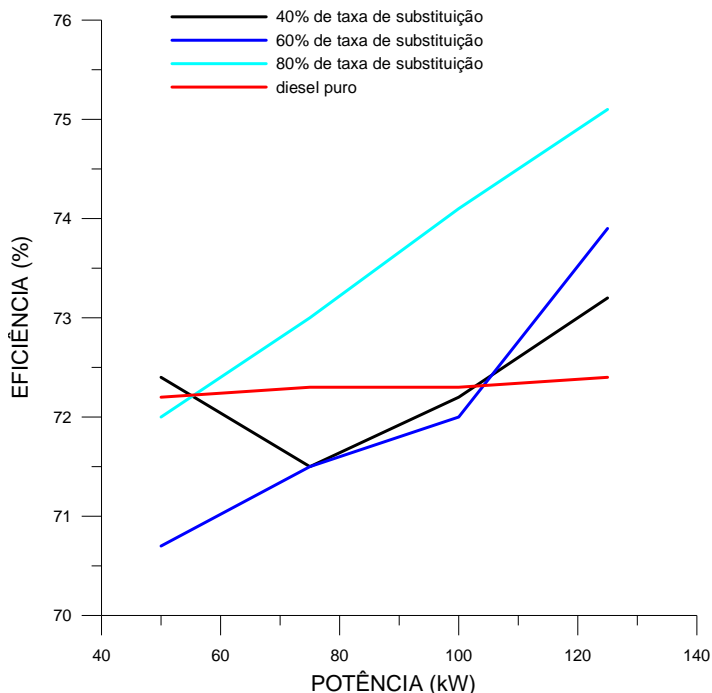


Figura 11 – Gráfico da eficiência em função da carga.

## Análise das emissões de poluentes

Observa-se na Figura 12 abaixo, que o comportamento de  $\text{SO}_2$  é o mesmo para qualquer taxa de substituição, ou seja, a quantidade de dióxido de enxofre tende para zero com o aumento da carga. Estes valores são bastante estranhos, visto que era esperado um crescimento deste poluente com o aumento da taxa de substituição e da potência.

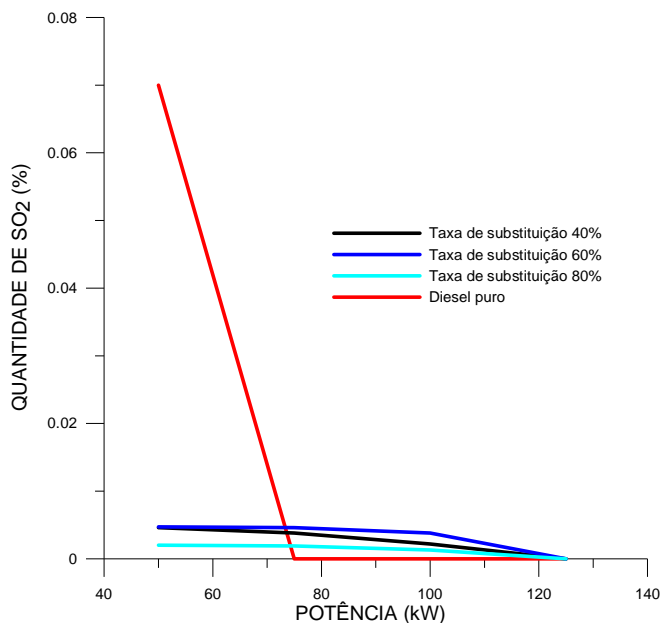


Figura 12 – Gráfico da quantidade de  $\text{SO}_2$  em função da carga

Analisando o comportamento do NO no gráfico abaixo, Figura 13, percebe-se um aumento de sua emissão principalmente quando o motor trabalha com taxa de substituição de 80%, isso ocorre devido ao aumento da quantidade de gás natural no processo de combustão.

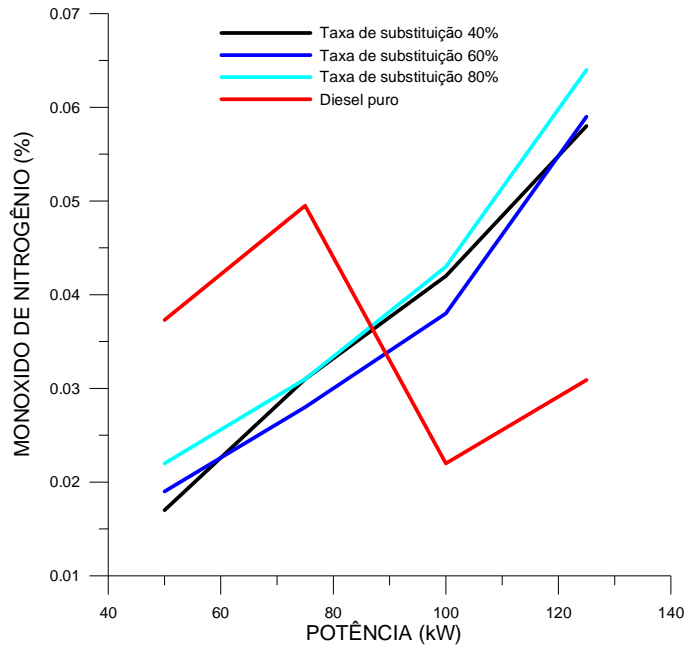


Figura 13 – Gráfico da quantidade de NO em função da carga

As taxas de emissão de NO<sub>2</sub> mostradas no gráfico da Figura 14, apresentam uma ligeira queda para o modo de operação dual. Quando a carga ultrapassa o valor de 75kW, este poluente volta a aumentar com o aumento da potência, no entanto pode-se desprezar estes valores quando comparados a emissão do NO.

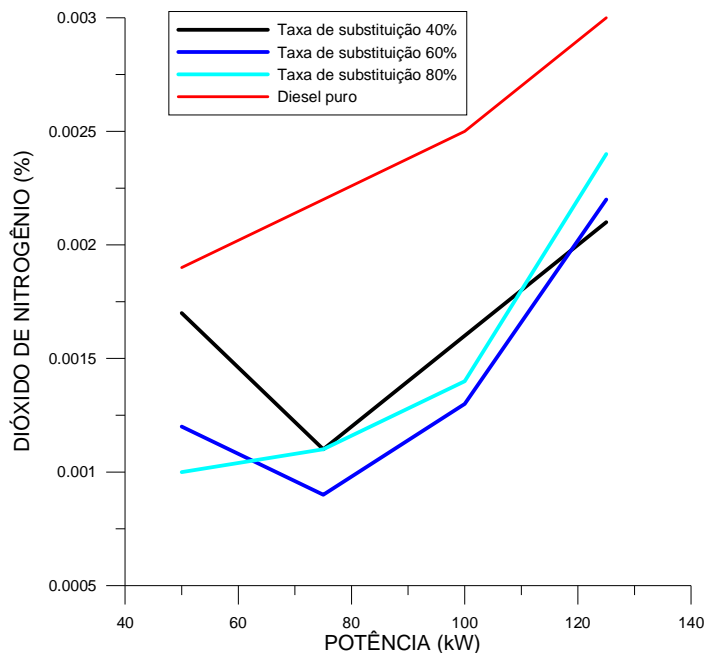


Figura 14 – Gráfico da quantidade de NO<sub>2</sub> em função da potência

Analisando agora o comportamento do monóxido de carbono na Figura 15, nota-se uma diminuição nas emissões deste poluente quando se trabalha com taxas de substituição de 40% e 60%, para a taxa de substituição de 80% ocorre um leve aumento nas emissões. Destaque para a taxa de substituição de 80%, que apresentou menores índices na operação dual.



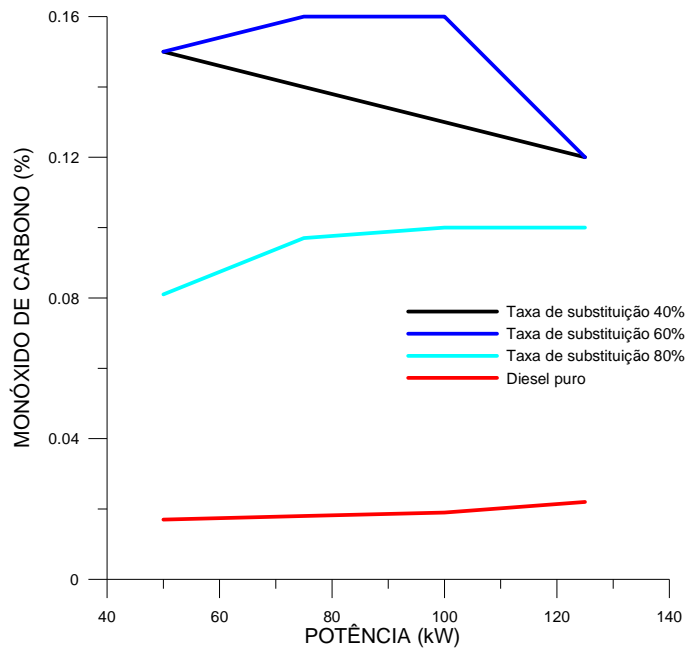


Figura 15 – Gráfico da quantidade de CO em função da potência

O gráfico da Figura 16 apresenta o comportamento do dióxido de carbono que aumenta com o aumento da potência do motor, este resultado mostra que a reação de combustão ocorreu de forma desejada, pois há uma melhor eficiência quando se tem um aumento dos níveis de  $\text{CO}_2$ .

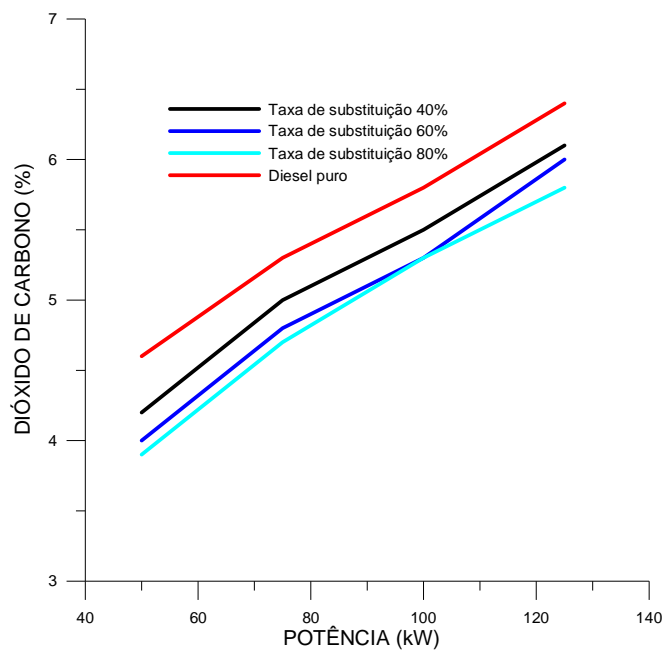


Figura 16 – Gráfico da quantidade de  $\text{CO}_2$  em função da carga

Observando-se o comportamento dos hidrocarbonetos na forma  $\text{C}_x\text{H}_y$  apresentados na Figura 17, verifica-se que ocorre uma pequena variação nas curvas de operação no modo dual, comparados aos valores obtidos com diesel puro.

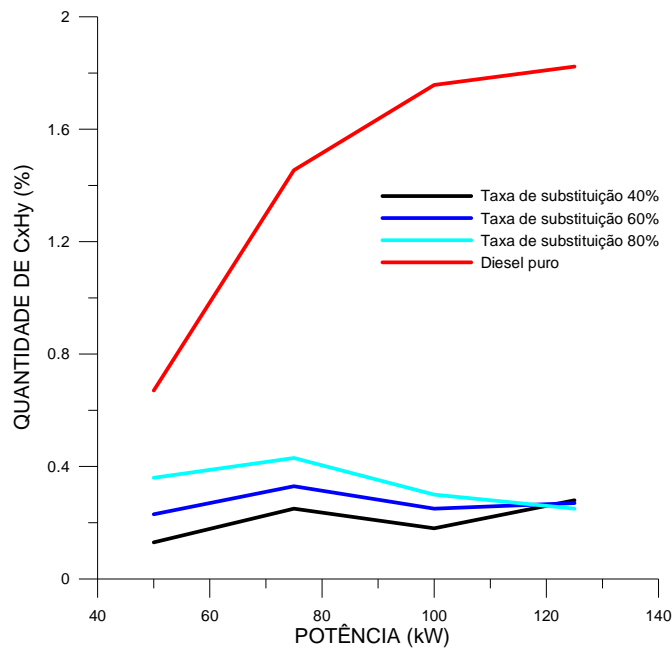


Figura 17 – Gráfico da quantidade de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> em função da carga

## CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostram que houve um aumento na eficiência do motor para taxas de substituição maiores que 60%; o nível de SO<sub>2</sub> caiu para zero em todos os testes, quando as cargas foram superiores a 125kW. Para cargas inferiores a 100 kW ocorreu um aumento na emissão deste composto (SO<sub>2</sub>). De acordo com os dados apresentados, sugere-se a realização de novos estudos sobre o comportamento do SO<sub>2</sub>. Para a condição de operação de 80% de substituição, ocorreu um aumento das emissões de NO; as emissões de NO<sub>2</sub> podem ser desprezadas em comparação ao monóxido de nitrogênio. As menores taxas de emissão de CO ocorreram com taxas de substituição de 80%. A emissão de CO<sub>2</sub> aumentou em todas as taxas de substituição, proporcional ao aumento da carga, o que é compatível visto que a eficiência da combustão também melhora com a maior carga aplicada; as concentrações de hidrocarbonetos na foram C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> cresceram para taxas de substituição de 40% e diminuíram para taxas de 60% e 80%. No geral, a eficiência do motor é melhorada com a utilização de gás natural como combustível principal no modo dual e as emissões apresentaram reduções que beneficiam e viabilizam a utilização do motor no modo dual.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica e ao Prof. Doutor Yoge Jerônimo Ramos da Costa.

## REFERÊNCIAS

- DIESEL. Wikipédia, a enciclopédia livre. Disponível em: < <http://pt.wikipedia.org/wiki/Diesel> >. Acesso em: 08 jun. 2010.
- ANP. **Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis**. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br> >. Acesso em: 20 jun. 2009.
- COSTA, Yoge Jerônimo Ramos. **Análise Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás**. Tese de Doutorado. 182 p. PPGE/CCT/UFMG, Campina Grande. 2007.
- HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M., **Energia e Meio Ambiente**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 545p.
- MARTINELLI, Jr. L. C.; **Motores de combustão interna: conceitos básicos**; Panambi, RS; Editora da Unijuí, Campus Panambi; 2005.
- PBGÁS. **Companhia Paraibana de Gás Natural**. Disponível em < <http://www.pbgas.pb.gov.br> >. Acesso em: 20 jul. 2009.