

1 Introdução

Nas últimas décadas, especial atenção tem sido dada ao problema de formação de compostos poluentes durante a operação de motores de combustão interna. Devido aos contínuos efeitos negativos sobre a saúde humana destes compostos tóxicos, as legislações ambientais tornam-se cada vez mais rígidas quanto ao nível máximo de emissões em veículos de transporte.

Por outro lado, a crise do petróleo dos anos 70 impôs a revisão da política energética em nível mundial, tendo como diretriz fundamental a economia da energia e a substituição dos derivados do petróleo por combustíveis mais baratos.

Assim, a decisão por uma fonte energética leva em conta fatores técnicos, econômicos, sociais e políticos. Com o aumento do interesse pela manutenção da qualidade de vida no planeta, a importância dos fatores ambientais também vem aumentando.

Dentre os combustíveis alternativos, é notória a evolução do gás natural no consumo total de fontes primárias de energia no Brasil. O percentual de participação do gás natural na matriz energética brasileira cresceu de 0,2% para 7,5% entre os anos 1970 e 2006. As reservas nacionais passaram de 72,4 bilhões de m³, em 1982, para 316 bilhões de m³ em 2006. Estima-se até 2010 uma expansão das reservas, podendo atingir a 657 bilhões de m³. Com respeito ao consumo, projeta-se durante este mesmo período um crescimento anual de 14,2 % (Cecchi, 1995; Fontes e Fontes, 1995; Vera, E. 1996; Oliveira, N. 2006).

Neste último ano foram adotadas novas medidas, tal como a antecipação de 2012 para 2008, da produção de 24,2 milhões de m³/dia de gás natural das bacias de Santos (SP), de Campos (RJ) e do Espírito Santo. Assim, visa-se diminuir a dependência externa e assegurar a fonte energética a longo prazo (De Oliveira, N. 2006, MME, 2006).

Atualmente os derivados de petróleo, em conjunto, respondem por 28,4% do total de energia consumida no Brasil. Dentre estes, se destaca o óleo Diesel, segundo energético na matriz, e derivado mais empregado. Hoje se consome no

Brasil cerca de 100 milhões de litros de óleo Diesel por dia. Destaca-se o transporte rodoviário interurbano, com 78,1 milhões de litros diários. Logo após, vem o transporte coletivo urbano, responsável pelo consumo de outros 12 milhões de litros por dia. O volume de Diesel importado é aproximadamente igual ao volume demandado no transporte coletivo urbano nacional. Caso energéticos renováveis ou alternativos viessem a substituir este volume de Diesel, mesmo que parcialmente, a dependência brasileira relativa ao derivado importado poderia, se não eliminada, ser ao menos reduzida (Pereira, 2006).

No nível mundial, o foco de atuação dos países que vêm implantando gradativamente o uso de gás natural como combustível alternativo no setor de transporte, concentra-se nos grandes centros urbanos, priorizando a substituição dos combustíveis tradicionais como óleo Diesel e gasolina (Dondero, 2002).

Atualmente existem disponíveis, no âmbito nacional e internacional, motores do ciclo Otto operando com gás natural, que devido ao seu nível de octana relativamente alto, é ideal para tal funcionamento. Contudo, a razão de compressão deste tipo de motor não pode ser tão alta quanto àquelas em motores Diesel, devido à ocorrência da combustão anormal (detonação). Como resultado, o rendimento térmico dos motores a gás natural no ciclo Otto é inferior àqueles nos motores Diesel convencionais. Para superar esta desvantagem, a combustão Diesel-gás, em motores originalmente Diesel, utiliza de forma combinada os combustíveis óleo Diesel e gás natural (Kusaka et al., 2000).

Do ponto de vista ambiental, diversos resultados experimentais da combustão no motor Diesel-gás apresentaram reduções significativas das emissões de poluentes, tais como o material particulado e os óxidos de nitrogênio, comparados à operação Diesel tradicional. Porém, as emissões de CO e HC alcançaram elevados patamares em relação ao modo original.

Assim, deve-se otimizar a redução de emissões em motores Diesel-gás, já que, tecnicamente, existem soluções que podem vir atender às legislações ambientais cada vez mais rigorosas.

1.1. Poluição Atmosférica e Veículos Automotores

A poluição atmosférica é definida como a presença ou o lançamento na atmosfera de um ou mais poluentes (partículas, cinzas, gases ou vapores), em concentrações, características e tempo de vida suficiente para causar danos ao ser humano, à fauna, à flora, materiais.

Os poluentes atmosféricos possuem um grande volume por unidade de massa e, uma vez lançados na atmosfera, misturam-se com ar e são levados pelas correntes de vento, em um movimento basicamente incontrolável. Frequentemente pode-se ver e sentir o odor dos poluentes atmosféricos, não sendo necessário dispor-se de uma instrumentação para verificar sua presença em muitos locais (Andrade, J. e Teixeira, P.; 2003).

A poluição urbana do ar, a chuva ácida e as mudanças climáticas globais, por exemplo, são devidas, principalmente, à queima de combustíveis fósseis, tanto em fontes móveis (veículos automotores), como em fontes fixas (termelétricas, indústrias, entre outros).

Os principais agentes causadores de poluição atmosférica e presentes nos gases de combustão dos veículos automotores são: material particulado (MP), dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados (HC) (Dondero, 2002).

A seguir, se define as características de cada um destes poluentes, enfocando os oriundos do óleo Diesel e do gás natural.

Material Particulado

As partículas estão entre os poluentes que apresentam maiores riscos ao meio ambiente. A maior parte das partículas tem diâmetro variando entre 0,1 e 10 µm. Partículas muito pequenas movem-se aleatoriamente como moléculas de gás e, na prática, não se depositam no solo, permanecendo na atmosfera durante períodos indefinidos de tempo.

O particulado com tamanho inferior a 0,1 µm é denominado fuligem. É observada com maior intensidade em chamas de combustível líquido, principalmente pela maior dificuldade de mistura entre o combustível vaporizado e o oxigênio (Andrade, J. e Teixeira, P.; 2003).

O material particulado, em veículos automotores, resulta da combustão das frações mais complexas de hidrocarbonetos em condições de insuficiência de oxigênio e tempo para uma queima adequada (Dondero, 2002).

As partículas emitidas por motores Diesel e motores Diesel-gás são todas menores que 1 μm (Rabl, A. 2002).

Dióxido de Enxofre

A concentração resultante de SO_2 nos produtos da combustão é uma função da porcentagem de enxofre¹ contida no combustível e da razão ar/combustível.

O gás natural em sua composição primária é livre de enxofre. No entanto, uma pequena quantidade de enxofre é acrescentada ao gás por questão de segurança, para que ele deixe de ser inodoro. Mesmo com esse acréscimo, o gás natural apresenta uma emissão de SO_2 insignificante em relação à contribuição do óleo Diesel (Andrade, J. e Teixeira, P; 2003).

Parte do SO_2 lançado para a atmosfera é oxidado para SO_3 e este, pela reação com vapor d'água, é convertido em H_2SO_4 . O ácido é depositado no solo, nas águas e nas plantas com a chuva. Geralmente essa chuva também possui ácido nítrico formado a partir de NO_x . Os danos causados pela *chuva ácida* ao meio ambiente são sérios (www.epa.gov/airmarkets/acidrain).

Óxidos de Nitrogênio

NO_x é o termo geral que designa a soma de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2). Os dois componentes de nitrogênio são emitidos em processos de combustão. Normalmente, as quantidades de NO formadas são muito maiores que as de NO_2 . Contudo, uma vez lançado na atmosfera, o NO rapidamente se transforma em NO_2 (Andrade, J. e Teixeira, P; 2003). As emissões de NO_x têm a

¹ Em 2005, no Brasil, foi introduzido o óleo Diesel S500 (500ppm de enxofre), substituindo o Diesel metropolitano (2000ppm de enxofre), reduzindo, portanto, 75% do teor de enxofre contido no óleo Diesel.

sua formação regulada, principalmente, pelas altas concentrações de oxigênio e as altas temperaturas no interior da câmara de combustão (Heywood, 1988).

Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono resulta da combustão incompleta e tem sua formação regulada principalmente pela relação oxigênio/combustível presente na câmara de combustão e pela eficiência da queima da mistura ar-combustível (Dondero, 2002).

Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos também conhecidos como combustíveis não queimados², ou ainda como frações de compostos orgânicos, são frações do combustível que não foram oxidadas, bem como os produtos da degradação térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso molecular (exemplo: metano), que são descarregados na atmosfera sem sofrer oxidação completa (Lefebvre, 1983; Dondero, 2002).

Verifica-se também, a emissão de CO₂, que embora não seja considerado um poluente clássico, devido a sua baixa toxicidade, deve ser levado em conta, tendo em vista a sua participação na intensificação do Efeito Estufa ou aquecimento global.

Considerando-se que, diariamente, cerca de 12 m³ (15 kg) de ar são inalados pela maioria dos indivíduos, quantidade essa que pode variar com a idade e nível de atividade de cada pessoa, é de se esperar que a qualidade do ar respirado afete o funcionamento do metabolismo celular do organismo e, portanto, a saúde do indivíduo (Braun, 2003). A Tabela 1 resume o impacto ambiental dos principais poluentes atmosféricos à saúde humana (Dondero, 2002).

² Os hidrocarbonetos não queimados também são designados como UHC (*Unburned Hydrocarbons* na literatura inglesa).

Tabela 1 – Principais impactos ambientais à saúde humana.

Poluentes	Impacto á saúde humana
Material Particulado (MP)	Toxicidade aumentada em combinações com outros poluentes. Irritação, defesa imunológica alterada, toxicidade sistemática, função pulmonar diminuída e estresse do coração. Reduz a visibilidade.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Irritação respiratória, falta de ar, função pulmonar prejudicada, aumento da suscetibilidade a infecções, doenças do aparelho respiratórias inferior, doenças crônicas do pulmão, diminui a visibilidade, forma chuva ácida.
Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	Irritação dos olhos e do nariz, doença respiratória, função pulmonar diminuída e estresse do coração. Porém, seu mais grave efeito é seu juntar à umidade dos pulmões, formando ácido nítrico diluído, que em longo prazo pode trazer efeitos perigosos.
Monóxido de Carbono (CO)	Interfere no transporte de oxigênio do sangue, diminui reflexos. Pode produzir danos ao coração e ao cérebro, percepção prejudicada, asfixia e, em doses menores, fraqueza, fadiga, dores de cabeça e náuseas.
Hidrocarbonetos (HC)	Causam dores de cabeça, vertigem e irritação de olhos. Alguns hidrocarbonetos, como os benzopirenos, são tidos ainda como poderosos agentes cancerígenos. Outros tipos de hidrocarbonetos reagem na atmosfera promovendo a formação de SMOG fotoquímico (“ <i>smoke+fog</i> ” ou fumaça+ neblina).

Fonte: (Silveira, R., 1983; Dondero, 2002).

Outro fator a ser considerado é que essas emissões causam grande incômodo aos pedestres próximos às vias de tráfego. No caso da fuligem (fumaça preta), a coloração intensa e o odor desta emissão causam, de imediato, uma atitude de repulsa e pode ainda ocasionar diminuição da segurança e aumento de acidentes de trânsito pela redução da visibilidade (CETESB, 2006).

Atualmente, os veículos automotores têm se constituído como a principal fonte de emissão de poluentes para atmosfera, em especial nos grandes centros urbanos. Na Região Metropolitana de Rio de Janeiro (RMRJ), os veículos automotores que circulam nas principais vias, são responsáveis por 98% das emissões de **CO**, 67% das emissões de **HC**, 66% das emissões de **NO_x**, além de serem importantes contribuintes na emissão de dióxido de enxofre (**SO₂**) e material particulado³ (**MP10**); é por este motivo que as emissões veiculares desempenham hoje um papel de destaque no nível de poluição do ar na cidade (FEEMA, 2004). A Figura 1 apresenta um levantamento de emissões considerando as fontes fixas e as fontes móveis na RMRJ.

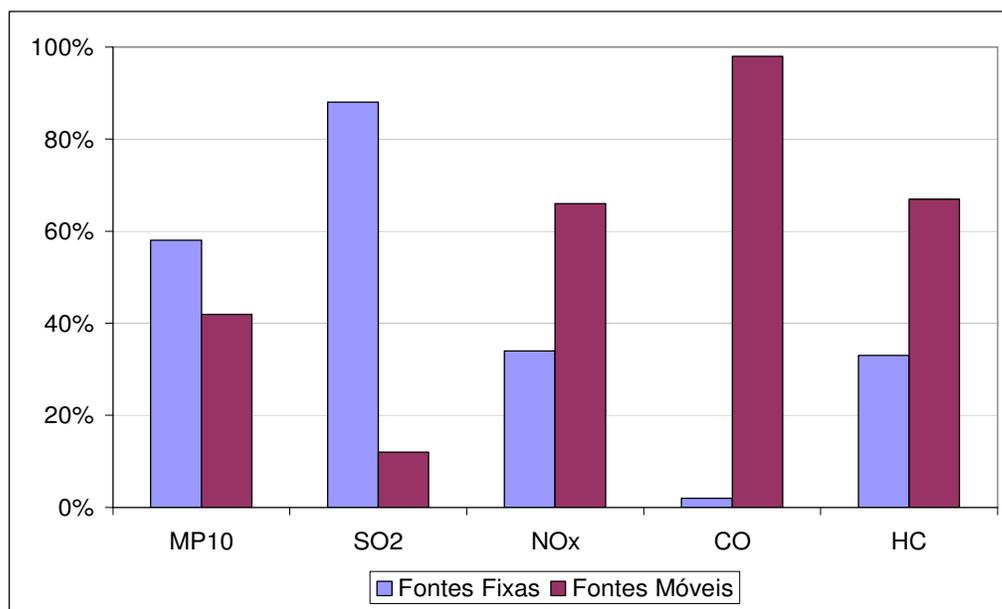


Figura 1 – Emissões por tipo de fonte na região metropolitana do Rio de Janeiro.

Fonte: FEEMA, 2004 (Modificado).

Diferentes estudos ambientais, como o realizado pela FEEMA (2004) no Município do Rio de Janeiro, apontam os veículos automotores como as maiores fontes da poluição urbana do ar atmosférico. Estes veículos são movidos por motores de ignição por centelha ou por motores Diesel.

³ MP10 são partículas com diâmetro $\leq 10\mu\text{m}$, também chamadas de partículas inaláveis.

Infelizmente, o motor Diesel é aquele que produz a maior quantidade de poluentes, sendo também o mais utilizado em veículos de transporte de passageiros e de cargas, além da maioria das instalações estacionárias (Bet, 1991). A geração de particulados num motor Diesel é complexa e depende de muitos fatores, especialmente do chamado balanço NO_x/MP , já que a redução simultânea de ambos poluentes se torna difícil (Braun, 2003).

Assim, nos últimos anos a ignição homogênea de misturas comprimidas (ar-combustível gasoso), tem sido investigada por muitos pesquisadores, principalmente sobre o conceito promissor da combustão de misturas pobres, permitindo a redução de NO_x e MP em relação aos motores Diesel tradicionais. A redução de SO_x também é conseguida, já que o gás natural contém menos compostos de enxofre dissolvidos. Neste panorama, o gás natural é considerado como um combustível alternativo importante, já que este emite uma menor quantidade de poluentes em relação ao óleo Diesel (Ando, T. et al.; 2003).

Por outro lado, as concentrações de CO e HC no sistema de escape dos motores Diesel-gás são maiores do que as encontradas na operação convencional Diesel, com o HC sendo o mais crítico.

Pelas normas sobre emissões de hidrocarbonetos, o gás natural não teria vantagem sobre os outros combustíveis devido ao mencionado no parágrafo anterior. Entretanto, a toxicidade dos hidrocarbonetos provém de cadeias maiores (principalmente benzopirenos e aldeídos, de acordo com Patrakhaltsev, 1994) sendo, portanto, necessária uma discriminação das emissões de HC do metano e HC não metano, a qual favoreceria aos motores Diesel-gás.

1.2. Objetivos do Presente Trabalho

Neste trabalho, os esforços são concentrados em otimizar a redução de emissões atmosféricas em motores Diesel-gás. Assim, tem-se por objetivos:

1. Testar em dinamômetro de bancada estacionário um motor Diesel, com turbocompressor e *intercooler*, empregado na propulsão de diversos caminhões leves, funcionando no modo bi combustível (Diesel-gás). Busca-se assim, comparar os dados de desempenho e emissões do motor convertido em relação à operação tradicional (Diesel puro).
2. Avaliar a influência da restrição parcial do ar de admissão no motor Diesel-gás, a fim de produzir uma mistura efetivamente mais rica para a mesma quantidade de combustível gasoso. Assim, busca-se a oxidação mais completa do gás natural e, conseqüentemente, a redução de poluentes atmosféricos.

1.3. Descrição da Dissertação

O presente trabalho é composto por seis capítulos. O primeiro capítulo refere-se à introdução e à apresentação dos objetivos da dissertação.

A seguir, no capítulo dois, faz-se a revisão bibliográfica do tema. Especificam-se as características dos combustíveis Diesel e gás natural, os processos de combustão perfeita e real, os mecanismos de formação dos poluentes e os métodos teóricos e experimentais, propostos por diversos pesquisadores, para a redução de emissões em motores Diesel-gás.

O aparato experimental empregado será apresentado no capítulo três.

No capítulo quatro descreve-se a metodologia utilizada para a realização dos ensaios. Neste, também é detalhado o equacionamento empregado na redução de dados e os cálculos das variáveis de interesse.

A apresentação dos resultados experimentais e suas análises constituem o quinto capítulo do presente trabalho.

A dissertação é concluída com o capítulo seis, onde se apresentam as conclusões e recomendações. A análise das incertezas experimentais e planilhas são mostradas nos apêndices A e B, respectivamente.