

## 2 Revisão da Literatura

Este capítulo tem como objetivo apresentar as fontes bibliográficas e princípios teóricos mais relevantes dos processos de combustão nos motores do ciclo Diesel operando no modo bicomcombustível Diesel/etanol e Diesel/gás. Nesta etapa, tais estudos são analisados de forma que possam ser aplicados apropriadamente na otimização do desempenho, consumo de combustíveis e emissão de gases poluentes destes motores convertidos.

Sendo assim, a primeira parte deste capítulo expõe uma revisão de estudos experimentais que produziram resultados relevantes para o entendimento dos diferentes métodos de utilização dos alcoóis em motores de ignição por compressão. Os principais trabalhos relacionados ao método da “fumigação” (injeção do álcool no coletor de admissão do motor) são descritos em detalhe.

A segunda parte do capítulo se concentra na fumigação de combustíveis gasosos nos motores de ignição por compressão. Os aspectos teóricos mais importantes desta operação bicomcombustível são delineados, com ênfase nas misturas combustíveis contendo metano. Resultados de trabalhos experimentais e numéricos estão também incluídos.

## 2.1. Uso de alcoóis em motores de ignição por compressão

A revisão da literatura sobre o uso de alcoóis em motores de ignição por compressão aponta aos alcoóis de cadeias carbônicas pequenas, especificamente ao metanol (ou álcool metílico) e etanol (ou álcool etílico), como as melhores alternativas energéticas para a substituição parcial ou total do óleo diesel.

O metanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), em geral, é produzido a partir de gases de síntese (misturas de hidrogênio e óxidos de carbono) obtidos na reforma de hidrocarbonetos, principalmente do metano que compõe o gás natural. Também pode ser produzido a partir do carvão de origens mineral e vegetal (biomassa), por meio de processos mais complexos e onerosos.

O etanol ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) pode ser obtido por rota química semelhante ao do metanol, ou a partir da fermentação da sacarose (presente em vários produtos da biomassa, tais como cana-de-açúcar, beterraba e sorgo) bem como de amidos (milho, mandioca, batata, trigo, arroz). No entanto, o amido é um tipo de carboidrato mais complexo, que precisa passar por mais transformações do que a sacarose para gerar o etanol. No Brasil, a produção do álcool combustível provém exclusivamente da cana-de-açúcar (fonte renovável). Com os avanços na área da biotecnologia, é provável que dentro de uma década seja possível produzir etanol em escala comercial e a custos competitivos a partir de matérias que contém celulose e hemicelulose, como o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, possibilitando assim o aumento substancial na produtividade (BNDES, 2008).

Os alcoóis se apresentam como interessantes combustíveis alternativos ao óleo diesel, a fim de reduzir as emissões de poluentes. Isso porque os alcoóis contêm oxigênio em sua molécula, são combustíveis muito voláteis e porque também é possível adicionar água na sua composição. Essas características são geralmente favoráveis para uma boa combustão. Além disso, a menor composição do carbono nos alcoóis favorece a emissão quase nula de material particulado. No ciclo completo do etanol (produção-uso) a emissão de dióxido de carbono pode também ser considerada nula.

Abu-Qudais *et al.* (2000) destacam as principais dificuldades encontradas para a existência de pouca pesquisa no passado em relação a utilização dos alcoóis nos motores de ignição por compressão:

- é necessária maior quantidade, tanto em massa quanto em volume, de álcool combustível (devido à menor densidade de energia), se comparado com o óleo diesel;
- grandes quantidades de álcool não são miscíveis com o óleo diesel, conseqüentemente misturas álcool-diesel são limitadas;
- alcoóis possuem baixíssimos números de cetano, enquanto que um motor Diesel necessita de combustíveis de altos índices de cetano para facilitar sua auto-ignição e reduzido tempo de atraso na ignição;
- óleo diesel possui poder lubrificante, o que não ocorre com o álcool;
- a baixa capacidade de auto-ignição do álcool provoca detonação severa uma vez iniciada a queima (rápida) do combustível evaporado;
- extinção da chama, em alguns casos, devido ao alto calor latente de vaporização do álcool.

Porém, nos últimos anos, tem surgido novamente um interesse para a utilização dos alcoóis nos motores de ignição por compressão. As pesquisas estão procurando o melhor aproveitamento do combustível alternativo junto à menor emissão de poluentes, sem prejudicar o desempenho do motor.

Para melhor compreensão deste trabalho, é importante mencionar e descrever os seis métodos mais utilizados na queima de álcool em motores Diesel, divididos de acordo com a capacidade de substituição do óleo diesel:

- substituição parcial através de misturas álcool-diesel;
- substituição parcial por meio de misturas álcool-diesel utilizando surfactantes (emulsões);
- substituição parcial pela dosagem do álcool no coletor de admissão (“fumigação”), com jato piloto diesel na câmara de combustão;
- substituição parcial pelo uso da dupla injeção (uma para o álcool e outra para o óleo diesel), liberando os combustíveis diretamente na câmara de combustão;
- substituição total através da conversão do motor do ciclo Diesel para o ciclo Otto (“ottolização”);

- substituição total pela aditivação dos alcoóis como promovedores de ignição (para aumentar o número de cetano), além de lubrificantes e inibidores da corrosão.

De fato, as características do desempenho e as emissões do motor operando com álcool podem mudar significativamente dependendo da técnica aplicada e do tipo do álcool utilizado.

A seguir, é descrito, resumidamente, as principais características dessas técnicas, incluindo alguns dos trabalhos mais relevantes sobre o tema. Contudo, maiores detalhes serão cobertos na fumigação, por ser o método empregado neste trabalho.

### **2.1.1. Misturas álcool-óleo diesel**

A mistura do álcool no óleo diesel, sem a dosagem de aditivos, é o método mais simples para o uso de combustível alternativo em motores de ignição por compressão. Entretanto, essa técnica só é aplicável para o etanol em baixas concentrações, devido à limitada miscibilidade do metanol no diesel.

Enquanto o etanol-gasolina formam misturas homogêneas em todas as proporções, as misturas etanol-óleo diesel são menos miscíveis (Da Silva, 2005).

A adição de etanol ao óleo diesel afeta certas propriedades chave, com particular referência à miscibilidade da mistura, viscosidade, lubricidade, conteúdo de energia e número de cetano (Moses, 1979; Hansen *et al.*, 2001). Por conseguinte, o etanol é restringido às pequenas concentrações na mistura, tipicamente a 20% v/v ou uma quantidade inferior (Ecklund *et al.*, 1984).

Uma das maiores dificuldades encontradas com o uso das misturas etanol-diesel é a sua tendência à separação de fases (Waterland *et al.*, 2003). Essa tendência aumenta com a presença de água, diminuição da temperatura, aumento da concentração do etanol e com a composição do óleo diesel, em especial seu conteúdo de aromáticos (De Caro *et al.*, 2001; Waterland *et al.*, 2003). A natureza higroscópica do etanol gera, por sua vez, um incremento gradual da massa de água na mistura armazenada (Ecklund *et al.*, 1984). Usualmente, a separação de fases

etanol-diesel pode ser prevenida por emulsificadores, que podem suspender pequenas gotas de etanol dentro do óleo diesel (Waterland *et al.*, 2003).

Pesquisas envolvendo misturas etanol-óleo diesel foram iniciadas na África do Sul na década de 1970, nos Estados Unidos da América e na Alemanha, na década de 1980 (De Caro *et al.*, 2001).

Strait *et al.* (1979) realizaram diversos experimentos, de laboratório e de campo, utilizando misturas etanol-diesel com diversas concentrações de etanol anidro (até 30% v/v). Os testes foram realizados em dois motores Diesel, de injeção direta, naturalmente aspirados, com taxa de compressão de 16,8:1, utilizados na propulsão de tratores e máquinas agrícolas. Os sistemas de injeção dos motores não foram alterados para seu funcionamento com as soluções combustíveis. Quando os motores operaram com a mistura, suas máximas potências foram reduzidas. O consumo específico do combustível, a intensidade do ruído e o período de atraso da ignição foram maiores, comparados aos valores reportados no funcionamento com óleo diesel puro. Estas mudanças nas características operacionais dos motores acrescentaram-se, em magnitude, conforme aumentou a proporção do etanol utilizado na mistura combustível.

Resultados similares foram também reportados Wrage e Goering (1979). Comparando o desempenho do motor Diesel com e sem etanol, constataram um maior consumo do primeiro, porém com o mesmo desempenho para ambos os combustíveis. Além disso, foi observada uma menor produção de fumaça na combustão da mistura etanol-óleo diesel.

Mering *et al.* (1983) testaram uma mistura óleo diesel com 15% de etanol anidro objetivando determinar o desempenho e durabilidade de motores em tratores agrícolas. Nenhum aditivo foi utilizado, pois o sistema foi usado sob condições de temperatura de campo, porém com os cuidados necessários para minimizar a contaminação da mistura com a água. Houve apenas uma pequena redução no desempenho da máquina em relação ao óleo diesel puro e nenhuma significativa deterioração do motor ou sistema de injeção foi notado após 1.000h de testes.

Ecklund *et al.* (1984) afirmam que uma vantagem no uso das misturas etanol-óleo diesel é a necessidade de poucas mudanças nos principais componentes do motor. Apenas pequenos ajustes no ponto de injeção e na quantidade do combustível injetado podem ser requeridos para manter a potência

original do motor. Tais ajustes dependem da concentração do etanol na mistura e dos efeitos de sua combustão.

No que tange às emissões, geralmente os hidrocarbonetos não queimados aumentam com a concentração de etanol na mistura. As emissões de monóxido de carbono comumente permanecem iguais ou aumentam levemente, enquanto os óxidos de nitrogênio são maiores ou ligeiramente inferiores ao modo diesel puro, dependendo do tipo e configuração de cada motor. A fumaça e a emissão de particulados tendem a diminuir na proporção em que o etanol é utilizado (Ecklund *et al.*, 1984).

### **2.1.2. Emulsões álcool-óleo diesel**

Emulsões álcool-diesel associam muitas vantagens e características das misturas etanol-diesel. Porém, ao contrário das misturas, as emulsões são diferenciadas pelo uso de agentes emulsificantes (ou surfactantes) e pela possibilidade de escolha da mistura combustível (à base de etanol ou metanol). Emulsões álcool-diesel podem garantir reduções de até 40% no consumo do óleo diesel.

Os emulsificantes são substâncias adicionadas às misturas para aumentar a sua estabilidade, tornando-as razoavelmente constantes e homogêneas. A quantidade de surfactante numa emulsão álcool-diesel dependerá do tipo do álcool e das propriedades físico-químicas do óleo diesel. Tipicamente, os surfactantes aumentam a tolerância de água nas emulsões álcool-diesel, em contraste com as limitações de água nas simples misturas etanol-diesel. Por isso, é possível a utilização de alcoóis hidratados nas emulsões.

Entre as desvantagens das emulsões, destacam-se suas limitadas propriedades físicas em baixas temperaturas, além do custo elevado dos surfactantes. Emulsões (principalmente aquelas que contêm água) tendem a se tornar muito viscosas em temperaturas próximas de 0 °C (Ecklund *et al.*, 1984).

Em vista das modificações do óleo diesel causado pela presença do álcool, diversos pesquisadores sugerem o uso de aditivos nas emulsões. Tais aditivos contribuiriam para manter a viscosidade adequada para a lubrificação do sistema de injeção, manter as estruturas metálicas protegidas da corrosão promovida pela

presença de água e aumentar o número de cetano para atingir propriedades de ignição satisfatórias.

Moses (1979) é um dos primeiros pesquisadores que publicou dados relativos às propriedades físicas das emulsões metanol-óleo diesel e etanol-óleo diesel, com a concentração do álcool em 20% v/v. Os alcoóis foram feitos insolúveis no combustível diesel pela adição de água (1,75% v/v) nas misturas. Para estabilizar a mistura combustível, uma pequena concentração de surfactante foi aderida (3,25% v/v). Os resultados mostraram que os poderes caloríficos e os números de cetano das emulsões foram inferiores ao do óleo diesel puro. A menor energia específica foi devido ao menor poder calorífico dos alcoóis e também pela adição de água nas emulsões. O número de cetano foi, contudo, menor na emulsão metanol-óleo diesel.

Lawson *et al.* (1981) verificaram que a emulsão de metanol (20% v/v) diminuiu a máxima potência de um motor Diesel em quase 9%.

Não há uma diferença significativa nos níveis de emissões produzidos entre um motor operando com misturas ou emulsões (Ecklund *et al.*, 1984).

Can *et al.* (2004) investigaram os efeitos de duas emulsões etanol-diesel sobre o desempenho e as emissões de um motor Diesel com quatro cilindros, injeção direta, turbocompressor, razão de compressão 21,5:1. Os experimentos do motor foram nas condições de plena carga, alterando as pressões de injeção da mistura combustível (150, 200 e 250 bar). As emulsões utilizaram diferentes concentrações de etanol anidro (10 e 15%, em volume), além de uma pequena concentração de isopropanol (1%) para satisfazer a homogeneização e prevenir a separação de fases. Os resultados experimentais mostraram que as adições do etanol reduziram as emissões de monóxido de carbono, opacidade e dióxido de enxofre. Entretanto, as emulsões causaram aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio e reduções na potência do motor (12,5% na emulsão com 10% de etanol e 20% na emulsão com 15% de etanol). A maior pressão da injeção acarretou em maiores reduções do CO e da opacidade, especialmente entre 1.500 e 2.500 rpm, porém, isso também causou uma certa redução na potência.

Da Silva (2005) desenvolveu aditivos para aumentar a miscibilidade em misturas óleo diesel e etanol (10% v/v). Os melhores efeitos foram representados pela diminuição das temperaturas de separação de fases e obtidos por misturas de ácidos graxos e aminas. As alterações do número de cetano, que apresentaram

reduções inferiores a 10%, foram corrigidas com a adição de pequenas quantidades de um melhorador do cetano (nitrato 2-etil-hexila).

### 2.1.3.

#### **Injeção de álcool junto ao ar de admissão (“fumigação”)**

Durante a década de 50, Alperstein e seu grupo de pesquisa, em um intento por reduzir a emissão da fumaça de motores Diesel, introduziram combustíveis substitutos na linha de admissão do ar do motor. A essa técnica, Alperstein *et al.* (1958), denominaram “fumigação”. A partir de então, dito termo é amplamente utilizado pela comunidade acadêmico-científica para definir o processo pelo qual parte da energia requerida pelo motor Diesel é fornecida através de uma pré-mistura ar-combustível, como em um motor do ciclo Otto. A queima da carga fumigada é realizada após a ignição espontânea de um pequeno volume de óleo diesel injetado no interior do cilindro (como acontece em um motor Diesel).

Esse método foi utilizado neste trabalho. A sua escolha recai, conforme destacado por Abu-Qudais *et al.* (2000), nos seguintes aspectos:

- esse método requer o mínimo de modificações no motor, uma vez que o álcool pode ser injetado por um dispositivo apropriado, diretamente no coletor de admissão;
- o sistema de injeção de álcool pode ser isolado do sistema de injeção do óleo diesel, possibilitando a flexibilidade da operação nos dois modos através de comandos relativamente simples e de baixo custo;
- a injeção do álcool, por essa técnica, pode substituir com facilidade até 50% do óleo diesel, em termos de energia.

Num motor Diesel sobre-alimentado, a fumigação do álcool poder-se-ia realizar antes do turbocompressor para, através da maior pressão do ar, atomizar o combustível substituto. Porém, o choque do “spray” de combustível sobre o rotor do compressor pode causar-lhe sérios danos mecânicos (Baranescu, 1980). Outra possível instalação para a dosagem do álcool seria após o turbocompressor, mas neste caso, a evaporação do álcool poderia ser incompleta.



As pesquisas referentes à fumigação do álcool em motores Diesel indicam que, nas altas cargas de operação, existe um aumento do rendimento térmico quando comparada ao modo diesel puro. Já nas baixas cargas, este parâmetro diminui à medida que a massa de álcool utilizada aumenta. Tipicamente, a fumigação do álcool reduz as emissões de particulados, óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono. No entanto, aumentos significativos nas emissões de hidrocarbonetos não queimados e monóxido de carbono são reportados.

A seguir, são mostrados resumos dos principais trabalhos publicados referentes à fumigação do álcool nos motores Diesel.

Baranescu (1980) investigou as características da fumigação do etanol hidratado (50% v/v) num motor Diesel, 6 cilindros, injeção direta e com turbocompressor. Seus resultados mostraram que, durante a fumigação, as taxas de aumento da pressão foram superiores às da operação com óleo diesel puro. Isso foi atribuído à auto-ignição da carga fumigada, que teria ocorrido logo que as reações de pré-ignição do óleo diesel aumentaram a pressão e temperatura no interior do cilindro. Embora nesse trabalho não tenha sido especificado os limites máximos da taxa de aumento da pressão, permitidos pelo motor, sabe-se por dados estatísticos e experiências prévias que, acima de determinados valores, estas taxas podem ocasionar uma menor durabilidade do motor.

Heisey e Lestz (1981) investigaram os efeitos da fumigação de alcoóis combustíveis (etanol e metanol, contendo diferentes teores alcoólicos: 70, 80 e 99,5% v/v) sobre o rendimento térmico, intensidade da combustão e emissões de escapamento de um motor Diesel monocilíndrico, injeção direta e com razão de compressão 18:1. Os ensaios foram realizados para uma rotação constante de 2.400 rpm. A máxima substituição do álcool (até 55% da energia total dos combustíveis) foi limitada pela falha na combustão. A técnica da fumigação melhorou o rendimento térmico nas altas cargas do motor. Porém, o atraso de ignição, para todas as condições de operação, foi superior ao modo diesel puro, sendo maiores para os ensaios com o metanol. As emissões de monóxido de carbono geralmente aumentaram com a quantidade do álcool admitido. Tais resultados não mostraram dependência em relação ao tipo ou qualidade do álcool utilizado, ao contrário das emissões de óxidos de nitrogênio. As emissões de NO<sub>x</sub> diminuiram com a proporção de água no álcool fumigado. O material particulado foram sempre menores para os testes com etanol.

Resultados similares aos reportados por Heisey e Lestz (1981) foram constatados por Chen *et al.* (1981), na fumigação de diferentes teores de etanol (80 e 99,5% v/v) num motor Diesel de 4 cilindros, injeção direta, com turbocompressor. Os ensaios foram realizados em diferentes níveis de carga, para três diferentes rotações do motor (1.100, 1.500 e 2.100 rpm). Em altas cargas, a máxima substituição de etanol foi limitada pela capacidade de vazão do injetor utilizado. Além das medições de CO, NO<sub>x</sub> e opacidade, também foram medidos os hidrocarbonetos não queimados (HC) e dióxido de carbono. HC aumentaram com a massa de etanol fumigada, enquanto o CO<sub>2</sub> diminuiu ligeiramente. Reduções na temperatura dos gases de escape foram também observados na operação Diesel/etanol.

Broukhiyan e Lestz (1981) fumigaram etanol num motor Diesel automotivo, V-8 com injeção indireta e razão de compressão de 22,5:1. Eles avaliaram a eficiência da utilização dos combustíveis, a ocorrência de detonação e as emissões de particulados e NO<sub>x</sub>. O programa de ensaios contemplou 12 condições de operação em regime permanente (4 cargas e três rotações: 1.500, 1.720 e 2.000 rpm). Exceto nas baixas cargas, modestos incrementos do rendimento térmico foram notados sob a fumigação. Entretanto, a ocorrência da detonação limitou a máxima quantidade de etanol que poderia ter sido fumigado no motor. A detonação foi quantificada utilizando os valores picos da taxa de aumento da pressão no cilindro. As máximas substituições (até 50% da energia total) foram encontradas nas baixas cargas. As emissões de particulados e NO<sub>x</sub> diminuíram para todas as condições testadas.

Gao *et al.* (1983) realizaram trabalhos experimentais e simulação numérica da fumigação do etanol pré-vaporizado num motor Diesel com injeção direta, turbocompressor, razão de compressão 15,8:1. A porcentagem mássica do etanol foi variada de 0 a 80% nas baixas cargas e de 0 a 50% na plena carga. Dados da pressão no interior do cilindro foram utilizados para avaliar o atraso da ignição, a liberação de calor e a produção de óxido nítrico. No modelo de liberação de calor, a câmara de combustão foi dividida em três zonas homogêneas: duas zonas de mistura combustível-ar e uma terceira zona contendo os produtos da combustão. A mistura etanol-ar foi considerada uniforme através das duas zonas combustível-ar. O óleo diesel foi assumido a ocupar apenas uma destas zonas. O modelo predisse um maior aumento do pico da liberação de calor durante a primeira fase

da queima com fumigação, mesmo quando ocorreu uma redução no atraso da ignição. Além disso, a fumigação diminuiu ligeiramente a duração da combustão nas cargas altas de operação, mas aumentou muito nas baixas cargas. Através do mecanismo de Zeldovich o modelo predisse a formação de NO, porém os valores previstos foram sempre maiores aos obtidos experimentalmente.

Em outro trabalho, Baranescu (1986) investigou os efeitos da fumigação de metanol (95% v/v) e etanol (80 e 95% v/v) num motor Diesel de 6 cilindros, injeção direta, turbocompressor, taxa de compressão 16,3:1. Os ensaios foram realizados em nove pontos experimentais, que resultaram da combinação de três cargas em termos da pressão média efetiva (276, 551 e 841 kPa) e três rotações (1.200, 1.800 e 2.500 rpm). O álcool foi injetado sob pressão (7 bar), por meio de um injetor mecânico instalado à montante do compressor. A mistura ar-álcool foi, posteriormente, aquecida no coletor de admissão, a fim de ativar a vaporização e a melhor distribuição do álcool entre os cilindros. A combustão detonante foi atingida nas baixas substituições do álcool pelo diesel (em termos de energia), 17-25% para o metanol, 25-30% para o etanol a 95%, e 12-20% para o etanol a 80%. O motor foi mais tolerante à fumigação do álcool nas situações de maiores solicitações de potências (média e alta carga, e elevadas rotações). Em condições de detonação, o incremento da pressão com a fumigação foi relativamente baixa (entre 5 a 17 % maior do que na operação diesel normal). Entretanto, a máxima taxa de aumento da pressão (fator mais importante do ponto de vista mecânico) experimentou um crescimento de 160%.

Hayes *et al.* (1988), utilizando o mesmo motor ensaiado por Baranescu (1986), estudaram os efeitos da fumigação empregando a injeção eletrônica multiponto de diferentes concentrações de etanol. Cada injetor, instalado à montante da válvula de admissão, foi pulsado duas vezes (uma injeção na etapa da admissão e a outra na expansão). Os pesquisadores afirmaram que as possíveis vantagens dessa técnica seriam o pré-aquecimento da metade da carga do etanol (devido ao impacto do “spray” sobre a válvula de admissão) e o fornecimento de uma parcial estratificação da carga no interior do cilindro. Os ensaios foram realizados numa rotação constante (2.400 rpm) e para três níveis de carga (200, 500 e 800kPa, em termos da pressão média efetiva). Na carga mais elevada os autores utilizaram concentrações de etanol a 50, 62,5, 75, 87,5 e 99,5% (v/v). Nas

menores cargas empregaram apenas altas concentrações de etanol, 75, 87,5 e 99,5%; devido às limitações da vazão dos injetores.

Dos resultados, Hayes *et al.* (1988) constataram que o valor médio da máxima substituição do etanol (em termos de energia total fornecida) diminuiu conforme a carga imposta ao motor (75, 60, e 36% para 200, 500 e 800 kPa, respectivamente). A 800 kPa existiu um leve aumento no atraso da ignição proporcional à massa de etanol injetada e à sua respectiva quantidade de água utilizada. Nessa mesma carga, a máxima taxa de aumento da pressão foi reduzida com a menor concentração do etanol. Porém, a máxima redução foi ainda 60% maior que o valor da operação a óleo diesel. Em 500 e 200 kPa, o atraso da ignição foi mais notável com a quantidade de etanol utilizada. Isso ocasionou uma combustão atrasada, na etapa de expansão, e a redução das taxas de aumento da pressão. Todavia, nestas condições, não foi notória a relação entre o atraso e a concentração de água do combustível substituto. As emissões de HC e CO foram maiores na fumigação (independente da concentração de etanol usado), enquanto as emissões de NO foram sempre menores (principalmente nas menores concentrações de etanol). Na menor carga, o HC da operação etanol/diesel foi 7,2 vezes superior ao valor do modo diesel puro.

Kwon *et al.* (1989) conduziram um estudo para medir os efeitos do metanol fumigado sobre o atraso da ignição e a taxa de liberação de calor num motor Diesel monocilíndrico com injeção direta, resfriado a água, razão de compressão 15,5:1. A massa do metanol foi variada de 0 a 150 mg/ciclo, enquanto a massa do óleo diesel foi fixado em 70 mg/ciclo. O ar de admissão foi aquecido por meio de resistências elétricas a temperaturas diferentes entre 20 e 250 °C. Com isso, os autores procuraram compensar a diminuição da temperatura devido à evaporação do metanol, melhorar a pré-mistura admitida, e gerar condições no interior do cilindro que promovessem a auto-ignição do combustível fumigado. Dos resultados eles concluem que o atraso da ignição nos ensaios com fumigação depende mais de fatores físicos (tal como a formação de mistura), que dos fatores químicos. A auto-ignição do combustível fumigado aconteceu algumas vezes para altas relações de equivalência ar/metanol e altas temperaturas na admissão (acima de 100 °C). A redução no atraso da ignição do diesel apenas ocorreu após a auto-ignição do metanol, sob elevadas relações de equivalência. A mínima temperatura no interior do cilindro, para uma possível auto-ignição do metanol, foi reduzida

com a maior relação de equivalência. Para menores proporções de riqueza da pré-mistura (típicas para baixas cargas de operação do motor), a auto-ignição do metanol somente aconteceu quando as temperaturas no cilindro foram muito elevadas. Com respeito à taxa de liberação de calor, a máxima taxa na etapa inicial da combustão cresceu rapidamente com a massa de metanol fumigado.

Os efeitos da fumigação de diferentes teores de etanol sobre o desempenho e emissões de um motor Diesel de 4 cilindros, turbocompressor, razão de compressão 16,8:1, foram investigados por Jiang *et al.* (1990). Dentre as relações destacadas, a que recebeu maior ênfase foi o efeito da fumigação sob a temperatura de chama do óleo diesel e as emissões de NO<sub>x</sub>. A temperatura adiabática de chama foi calculada e usada para relacioná-la com a temperatura de chama do óleo diesel. Os resultados desta pesquisa indicam que as menores emissões de NO<sub>x</sub> podem ser atribuídas à redução na temperatura de chama e à queima do etanol (total ou parcial) sob condições de mistura pobre de ar e álcool.

Ajav *et al.* (1998), realizaram experimentos da fumigação do etanol num motor Diesel monocilíndrico (taxa de compressão 15,6:1), para avaliar os efeitos do aumento da temperatura (de 20 a 50 °C) da pré-mistura ar-etanol. O aquecimento na admissão foi realizado através de um recuperador de calor dos gases de escape do motor. Os resultados mostraram que, apenas na plena carga, a fumigação do etanol aumentou ligeiramente o rendimento térmico do motor. As emissões de CO também aumentaram em relação ao funcionamento com óleo diesel puro; enquanto a temperatura dos gases de escape e as emissões de NO<sub>x</sub> diminuíram. Contudo, tais efeitos foram mais notáveis quando a pré-mistura foi aquecida a 50 °C. Por outro lado, a melhor vaporização do etanol a 50 °C não melhorou a máxima substituição mássica do óleo diesel, dos valores previamente atingidos a 20 °C (33,6 e 15%, em baixa e plena carga, respectivamente).

Abu-Qudais *et al.* (2000) realizaram experimentos com etanol anidro, objetivando comparar as técnicas da mistura e da fumigação sobre um motor Diesel monocilíndrico (razão de compressão 18:1). Os ensaios foram realizados numa carga elevada, variando a rotação do motor de 1.000 a 2.000 rpm. Os pesquisadores constataram que, alterando o aporte da energia do etanol (de 5 a 20%), ambas as técnicas apresentaram características similares, afetando os parâmetros de desempenho e emissões do modo diesel puro. Contudo, os melhores resultados foram obtidos utilizando a técnica da fumigação. Quando o

aporte de energia do etanol fumigado representou os 20%, existiram aumentos de 7,5% no rendimento térmico, 55% no CO, 36% no HC, e ao mesmo tempo, redução de 55% na fuligem. No funcionamento com a mistura etanol-diesel, a melhor atuação foi para uma substituição de 15%. Nesta condição, obtiveram-se aumentos de 3,6% no rendimento térmico, 43,3% no CO e 34% no HC; além da diminuição de 32% da fuligem.

No Brasil, Reis (2004) avaliou o desempenho e emissões de um motor Diesel com quatro cilindros, aspiração natural, com razão de compressão de 16:1, operando com a fumigação do etanol hidratado (teor alcoólico próximo a 93%, em massa). Os ensaios foram realizados para 4 cargas (25, 50, 75 e 100% da plena carga) e 3 rotações do motor (1.800, 2.300 e 2.800 rpm). Nos testes da fumigação, somente foram analisadas as condições com máxima substituição energética do etanol. Esses valores variaram de 30% (em plena carga) a 60% (em 25% de carga). Em cargas parciais, existiu queda do rendimento térmico e aumentos médios de 100% no CO e 400% no HC. No entanto, houve redução de 50% na concentração de NO<sub>x</sub>.

#### **2.1.4.**

#### **Injeção do álcool na câmara de combustão (dupla injeção)**

A técnica da dupla injeção é uma combinação de dois sistemas individuais de injeção, um sistema do álcool e outro do diesel (injeção piloto). Nesta técnica, a injeção de ambos os combustíveis se dá de forma direta na câmara de combustão, diferente da fumigação, onde o álcool é injetado direto no coletor de admissão. Por meio da injeção piloto diesel é possível inflamar uma injeção atrasada de álcool, produzindo uma combustão estável e eficiente. Na sequência oposta (injeção do álcool antes da injeção piloto) podem acontecer falhas da combustão, devido ao efeito do esfriamento da chama causado pelos altos calores latentes de vaporização dos alcoóis (Ecklund *et al.*, 1984).

A dupla injeção é uma técnica que permite substituir parcelas significativas do consumo do diesel nos motores de ignição por compressão. Em elevadas cargas é possível substituições acima de 90% (em termos de energia). Em marcha lenta ou baixa carga, a substituição varia de 50 a 60% (Pischinger e Havenith, 1980; Dietrich *et al.*, 1980; Sugiyama, 1980). Sabendo que a miscibilidade entre o

álcool e o diesel não é uma preocupação, a qualidade e o conteúdo de água dos alcoóis utilizados na dupla injeção não é tão crítico quanto em outras técnicas de uso do álcool em motores Diesel (Pischinger e Havenith, 1980).

Porém, entre as principais desvantagens dessa técnica destacam-se a complexidade e onerosidade de um segundo sistema de injeção para o álcool. Motores a diesel devem dispor de um espaço físico suficiente, no cabeçote do cilindro, para a instalação e orientação correta do segundo injetor na câmara de combustão (Ecklund *et al.*, 1984).

Em uma investigação conduzida pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) foram avaliadas as emissões dos gases de escape de um motor Diesel com injeção direta, utilizando diesel-etanol e diesel-metanol através da dupla injeção. Os valores médios dos poluentes foram calculados por meio de dois ensaios padrões, um ciclo estacionário e um ciclo transiente. Independente do álcool utilizado, as emissões de HC aumentaram 50% no ciclo estacionário e 100% sob o transiente, quando comparadas com o funcionamento a diesel puro. As emissões de CO foram três vezes maiores em ambos os ciclos, enquanto o NO<sub>x</sub> foi reduzido em 50% no ensaio estacionário e ao redor de 33% no transiente. O material particulado diminuiu 50% em ambos os ensaios padrões (Ullman e Hare, 1981).

Cipolat *et al.* (1986) avaliaram o desempenho de um motor Diesel, 8 cilindros, adaptado para a dupla injeção do diesel e álcool (etanol e metanol). Os ensaios do motor foram realizados às condições de plena carga, sem alterar o ponto original da injeção do óleo diesel. A contribuição do piloto foi de aproximadamente 5% do volume total dos combustíveis utilizados. Os resultados mostraram que o torque e a potência do motor foram superiores (entre 10 e 15%) quando utilizaram etanol, em vez do metanol. Os autores afirmaram que tal resultado foi devido, em parte, ao menor poder calorífico do metanol. É importante mencionar que, nesse trabalho, os valores do desempenho na operação original a diesel não foram fornecidos para efeitos de comparação com a dupla injeção.

### 2.1.5.

#### Conversão do ciclo Diesel para o ciclo Otto (“ottolização”)

A ignição por centelha dos alcoóis em motores Diesel permite a substituição total do óleo combustível. A “ottolização” é uma técnica bastante atrativa por utilizar as vantagens dos altos calores latentes de vaporização e altos números de octano dos alcoóis. O atraso de ignição, definido classicamente para motores Diesel, torna-se um parâmetro irrelevante na ignição por centelha de um “motor ottolizado” (Ecklund *et al.*, 1984).

Na conversão do motor Diesel, o sistema de injeção original é tipicamente substituído por dispositivos de carburação ou válvulas injetoras. Além disso, é introduzida uma vela na câmara de combustão e os componentes associados ao sistema de ignição também são adicionados ao motor.

Contudo, “motores ottolizados” se deparam com os mesmos problemas de modificação do motor que os encontrados na técnica da dupla injeção. É necessário que haja uma disponibilidade de espaço no cabeçote do motor para as velas de ignição, além da posição onde ela é instalada, o que é bastante importante para o melhor arrefecimento do eletrodo.

Adelman e Pefley (1980) realizaram estudos da “ottolização” em um motor Diesel, monocilíndrico CFR, injeção indireta, com taxa de compressão escolhida de 19:1. Os alcoóis (metanol e etanol) foram injetados quando o pistão se encontrava a 35° antes do ponto morto superior (APMS) e a vela (centelha única) foi configurada para 5° APMS. O tempo de injeção representou um avanço de 10° além do requerido para o diesel e o avanço de ignição foi limitado pela combustão detonante. Quanto aos resultados dos ensaios realizados a 900 rpm, destaca-se que em baixas cargas do motor a operação diesel puro ofereceu o melhor rendimento térmico, enquanto que em altas cargas ambos os alcoóis forneceram os maiores rendimentos. Em geral, as emissões de HC e CO foram evidenciadas como as mais altas no “motor ottolizado”, em comparação com às do diesel. Tal efeito, segundo os pesquisadores, estaria relacionado principalmente com o tipo de combustão do motor convertido. Enquanto as combustões do tipo Diesel são iniciadas em vários pontos ao longo do cilindro, as combustões dos “motores ottolizados” usando álcool começariam em um único ponto (nas extremidades dos eletrodos), o que resultaria numa queima incompleta da mistura ar-álcool em



algumas regiões no interior do cilindro. As emissões de  $\text{NO}_x$  foram de 30 a 40% menores que no modo Diesel puro. O motivo para isso está relacionado com os menores picos de temperatura da chama, causado pelo alto calor latente dos alcoóis. Os particulados emitidos pelo “motor ottolizado” (carga homogênea x heterogênea) foram praticamente inexistentes.

#### **2.1.6. Ativadores da ignição (“melhoradores”)**

Outra técnica potencial para substituir completamente o óleo diesel requerido pelos motores de ignição por compressão consiste na utilização de misturas de alcoóis e aditivos melhoradores da ignição. Esta técnica pode ser realizada sem extensas modificações no motor, embora a quantidade requerida do aditivo (entre 5 e 20%) tende a limitar sua aplicação.

Motores Diesel que operam diretamente com alcoóis aditivados para elevar o índice de cetano precisam, contudo, de algumas mudanças no sistema de injeção. Devido ao menor conteúdo de energia dos alcoóis, torna-se necessário fornecer uma maior vazão de combustível para satisfazer os requerimentos de torque e potência à plena carga. Por outro lado, para essas aplicações, os alcoóis também devem conter pequenas concentrações de aditivos lubrificantes (como por exemplo, óleo de mamona) e inibidores de corrosão.

Hardenberg e Schaefer (1981) testaram um motor Diesel, injeção direta, taxa de compressão 17:1, utilizando uma mistura de 88% de etanol hidratado (95% v/v) e 12% de um melhorador da ignição (hexil nitrato). Os ensaios foram realizados às condições de plena carga, em toda a faixa de rotação. Seus resultados mostraram um melhor rendimento térmico quando o motor, com etanol aditivado, operou em rotações inferiores a 80% do valor máximo (relativo ao modo diesel). Quando o motor funcionou entre 40 e 100% da máxima rotação, as emissões de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio foram menores com o etanol aditivado. Entretanto, nas menores rotações (abaixo de 40% do valor máximo) as emissões de  $\text{NO}_x$  do etanol aditivado foram maiores do que no funcionamento a diesel.

Nesse estudo, os pesquisadores também analisaram a decomposição do aditivo nitrogenado no processo de combustão e sua correspondente contribuição

na emissão de  $\text{NO}_x$ . Eles observaram que os níveis de  $\text{NO}_x$  medidos nos testes do motor foram muito menores comparados com aqueles previstos pela completa decomposição do aditivo melhorador da ignição. Em função deste resultado, Hardenberg e Schaefer afirmaram que o nitrogênio do aditivo (na forma de nitrato) é liberado como  $\text{N}_2$  e que o oxigênio do aditivo é utilizado como comburente na combustão.

No Brasil, entre 1979 e 1987, foram realizados diversos testes de campo em ônibus e caminhões (do tipo “treminhão”), equipados com motores do ciclo Diesel que utilizavam etanol aditivado como combustível. O objetivo principal era avaliar diferentes melhoradores de ignição no etanol (tais como o etil hexil nitrato e dinitrato de trietileno glicol). Os testes reportaram, comumente, falhas nos bicos injetores. Posteriormente e devido aos maiores custos operacionais, os veículos foram gradualmente deixados de lado. Atualmente a tecnologia está disponível e aperfeiçoada, como é visto amplamente na Suécia, onde utilizam o etanol hidratado misturado com 5% de um aditivo melhorador da ignição (ethamax-sekab), em motores Diesel com taxa de compressão de 28:1. Porém, o aditivo considerado indispensável na mistura representa, tipicamente, um acréscimo de 20% do preço do combustível. Além disso, um mesmo motor utilizado consome 60% a mais de etanol do que quando utiliza diesel (ABRATI, 2007; Rolf, 2007; Moreira, 2008).

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo mostrou as características das técnicas de utilização do álcool em motores Diesel. Os potenciais indicados tornam o álcool uma solução perfeitamente viável para implantação de diversos métodos que visem à substituição do óleo diesel nas diversas aplicações dos motores de ignição por compressão. No entanto, é importante destacar que de todos os métodos mencionados, a técnica da fumigação requer o mínimo de modificações do motor para atingir altas substituições do diesel pelo álcool. E, além disso, permite que o motor retorne, a qualquer instante, ao seu modo de operação original (a diesel puro).

Nesse estudo, foi possível verificar também que o metanol possui propriedades combustíveis e energéticas similares ao etanol. Porém, o metanol tem uma toxicidade mais elevada, causando, inclusive, cegueira e câncer quando utilizados em altas concentrações e longa exposição. Além disso, o Brasil não é

auto-suficiente na produção de metanol, sendo, portanto, mais vantajoso usar o etanol, já que este é produzido em larga escala.

As diversas pesquisas apresentam o etanol hidratado como um interessante combustível alternativo ao óleo diesel para reduzir as emissões de poluentes. O uso do etanol com altos conteúdos de água é também vantajoso do ponto de vista econômico, devido aos menores custos envolvidos na produção do combustível.

## 2.2.

### Uso de combustíveis gasosos em motores de ignição por compressão

Os três principais métodos para o uso de combustíveis gasosos em motores de ignição por compressão são:

- a injeção de gás no coletor de admissão (“fumigação”), com a ignição iniciando-se pelo combustível diesel;
- a injeção de gás na câmara de combustão (“injeção direta”), com a ignição iniciando-se pelo combustível diesel;
- a injeção de gás no coletor de admissão, com a ignição por centelha (conversão do ciclo Diesel para o ciclo Otto, “ottolização”).

As principais características destes métodos já foram descritas anteriormente, na revisão da literatura sobre o uso de alcoóis em motores de ignição por compressão. Porém, existem algumas qualidades distintas para o uso de combustíveis gasosos, ao invés de combustíveis líquidos, como os alcoóis. Com a fumigação de gases, são eliminados os efeitos causados pela formação de película (massa precipitada do combustível líquido) nas paredes do duto de admissão. Além disso, as diferenças entre as propriedades de ambos os tipos de combustíveis (vide Tabela I no Apêndice I), influenciam, de formas distintas, os processos de mistura e combustão bicomcombustível. Na injeção direta, ademais da dupla injeção, é considerado também o uso de um único injetor, com orifícios separados para o fornecimento de ambos os combustíveis.

A seguir, são apresentados os princípios teóricos mais importantes do método empregado no presente trabalho: a operação bicomcombustível Diesel/gás, com a injeção do combustível gasoso no coletor de admissão.

É importante também mencionar que na dissertação de mestrado de Egúsqiza (2006), foi apresentada uma ampla revisão bibliográfica deste método. Entretanto, a abordagem neste capítulo tem como propósito essencial estabelecer a base teórica para uma melhor análise das técnicas de otimização que serão utilizadas no modo Diesel/gás.

### 2.2.1.

#### **A operação do motor Diesel no modo bicombustível Diesel/gás**

No modo bicombustível Diesel/gás, a maior parte da liberação de energia provém da combustão do combustível gasoso, enquanto uma pequena quantidade de combustível líquido diesel (o “piloto”) é utilizada para fornecer a fonte de ignição. Este modo de operação, com adequados métodos de conversão, tem o potencial para fornecer características de funcionamento similares, e inclusive superiores, ao modo diesel original e aos motores de ignição por centelha. Isto pode ser alcançado enquanto exhibe características de emissão realçadas, funcionamento mais silencioso e suave, melhor operação a baixa temperatura ambiente e carga térmica reduzida (Turner *et al.*, 1994). O desempenho superior será possível, se forem garantidas medidas suficientemente eficazes para evitar a detonação, geralmente em altas cargas, e a utilização incompleta do combustível gasoso, típico das baixas cargas. Usualmente, um dos principais objetivos nas conversões Diesel para Diesel/gás é a maximização da substituição do óleo diesel pelo combustível gasoso, mantendo níveis aceitáveis de emissão de poluentes e do desempenho do motor.

A alta taxa de compressão do motor Diesel é ideal para o funcionamento bicombustível com metano, devido a sua alta resistência à detonação. Porém, por meio de um fornecimento adequado e consistente injeção e ignição do combustível líquido piloto, quase todos os combustíveis gasosos (ou em estado de vapor) podem ser utilizados, com graus variáveis de sucesso em tais motores. Combustíveis gasosos, tais como: o etano, propano, butano, hidrogênio e etileno têm sido empregados. Além disso, várias misturas combustíveis gasosas, incluindo aquelas que contêm gases diluentes como o gás natural, biogás, gases de aterro, gases liquefeitos de petróleo, etc., têm sido utilizadas. Existe também informação na literatura, conforme foi verificado na primeira parte deste capítulo, relativa ao desempenho dos motores bicombustível operando com uma ampla gama de combustíveis líquidos, fumigados no coletor de admissão do motor.

O modo Diesel/gás tem encontrado aplicações em diversos setores da economia. Numerosas instalações estacionárias utilizam estes motores para geração de energia elétrica, cogeração, sistemas de bombeamento e compressão. No setor de transporte, exemplos limitados de conversão podem ser encontrados

em veículos rodoviários e urbanos, incluindo caminhões pesados e ônibus municipais e escolares. Outras aplicações bem-sucedidas podem ser encontradas em embarcações de carga, balsas e navios de pesca. Existem também algumas aplicações notáveis no setor ferroviário e agricultura.

A seguir, são destacadas as principais dificuldades encontradas na conversão dos motores Diesel para o modo Diesel/gás (Karim, 2003):

- o funcionamento bicomcombustível, especialmente quando utilizam certas misturas combustíveis gasosas, é severamente limitado pelo início da detonação. Tal efeito dificulta a operação satisfatória nos motores Diesel com altas taxas de compressão, i.e., nos motores de maior eficiência;

- há uma frequente necessidade de desenvolver métodos operacionais para reduzir a emissão de óxidos de nitrogênio através de uma escolha criteriosa das características da injeção do combustível piloto e da combustão do combustível gasoso;

- em cargas baixas, operações bicomcombustível empregam misturas ar-gás muito pobres, as mesmas que podem levar a emissões significativas de combustível gasoso não queimado, monóxido de carbono e outros produtos. Além disso, o tratamento catalítico dos gases de escape tende a ser menos eficaz com algumas misturas combustíveis gasosas;

- a minimização do óleo diesel em relação ao combustível gasoso pode aumentar as emissões de gases de escape, a incidência à detonação e às variações cíclicas de funcionamento;

- a interação entre o *spray* do piloto líquido e o combustível gasoso não é apenas do tipo térmico, mas também existe um componente do tipo cinético. Essas interações podem ocasionar um aumento no atraso de ignição do diesel e nas emissões dos gases de exaustão;

- a injeção direta do combustível gasoso no interior do cilindro representa uma complexidade adicional, uma vez que se necessita de um sistema de injeção de alta pressão e os processos de mistura do combustível injetado com o piloto exigem um controle cuidadoso e um bom entendimento dos processos envolvidos.

### 2.2.2. A combustão no modo Diesel/gás

O processo de combustão em um típico motor bicomcombustível depende das características do *spray* e ignição do piloto diesel e do tipo de combustível gasoso utilizado e sua concentração total na carga do cilindro. As características da liberação de energia durante a queima serão as consequências de todas as interações físicas e químicas, relativamente complexas, que ocorrem entre os processos de combustão de ambos os combustíveis.

Na operação bicomcombustível, o combustível gasoso é geralmente introduzido no cilindro junto ao ar de admissão e, imediatamente, durante o processo de compressão é submetido a temperaturas e pressões cada vez mais elevadas à medida que o pistão se desloca para o PMS. Desse modo, a carga pré-misturada ar-gás, antes da injeção do piloto diesel, tende a ter uma significativa atividade de reações pré-ignição, o que resulta em uma liberação de energia associada e na produção de algumas espécies químicas ativas (Karim, 2003). As reações pré-ignição podem progredir de forma significativa, especialmente com determinados combustíveis reativos e certas condições de operação do motor. Entretanto, devido à adição de combustível gasoso, existirão também alterações nas propriedades físicas da mistura admitida, as quais ocasionarão variações nos níveis de temperatura e pressão da carga comprimida, além de variações nos parâmetros de transferência de calor entre a carga e as paredes do cilindro (Liu, 1995; Lida *et al.*, 1997).

Tais eventos, na pré-ignição, influenciaram nos processos de ignição e combustão do piloto diesel, os que por sua vez, ocasionaram mudanças no processo de queima de alguma parte da carga gasosa que teria sido arrastada para o interior e imediações da chama piloto e, posteriormente, na combustão do resto da mistura ar-gás contida no cilindro. A liberação de energia, mais tarde, reproduzirá tais ocorrências. Entretanto, a propagação da chama turbulenta desde as regiões de ignição piloto não continuarão por toda a carga, até que a concentração do combustível gasoso esteja além de um valor limitante, que variará de acordo com o tipo de combustível gasoso utilizado e com as condições de operação do motor (Elliot e Davis, 1951; Ding e Hill, 1986; Badr *et al.*, 1999).

A taxa de liberação de energia da combustão bicombustível pode ser considerada, por conveniência, composta essencialmente por três fases que se sobrepõem (Karim, 2003). A primeira fase (I) como mostrada na Figura 1 envolve a liberação de energia da combustão do piloto diesel. A segunda (II) consiste na combustão do gás natural que está nas vizinhanças dos centros de ignição e combustão do piloto. A terceira fase (III) é devido a qualquer atividade de reação pré-ignição e posterior propagação de chama turbulenta (e por vezes de auto-ignição) na mistura ar-gás pobre.

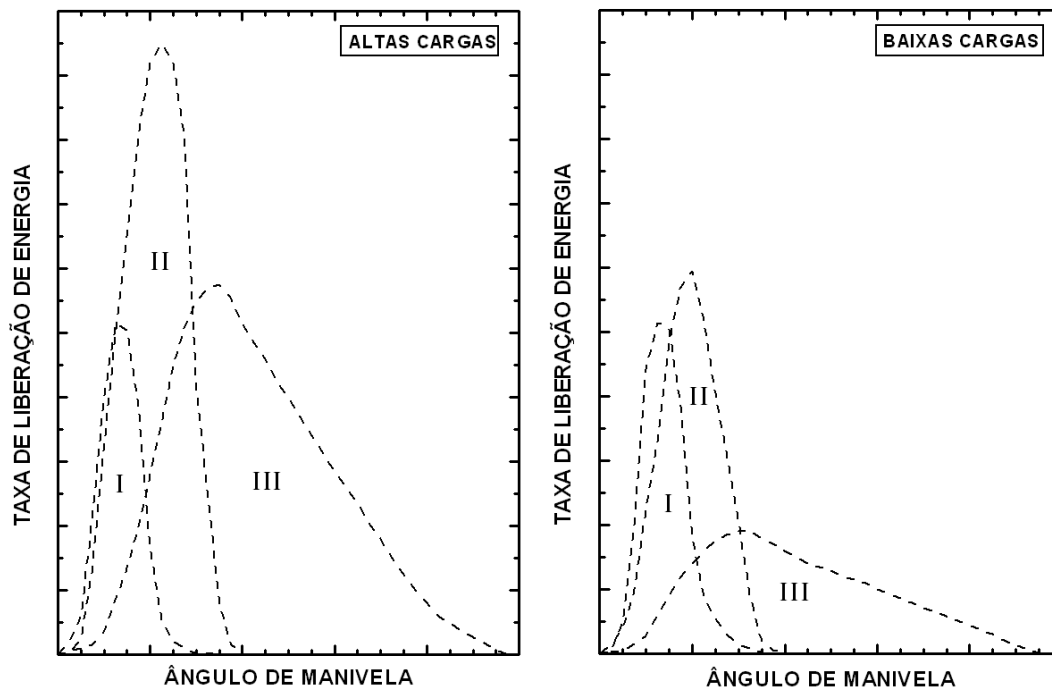


Figura 1 – Representação esquemática dos diferentes componentes da taxa de liberação de energia da combustão em um motor Diesel/gás (Karim, 2003).

Com misturas ar-gás muito pobres, típicas de cargas baixas, a maior parte da liberação de energia provém da ignição e decorrente combustão rápida da pequena zona do piloto (I). Esta surgirá também a partir da combustão de alguma parte de mistura ar-gás arrastada para o interior e as imediações da chama do piloto, onde as temperaturas mais elevadas e as regiões de mistura relativamente mais ricas estarão presentes. Como mostrado esquematicamente na Figura 1, sob estas condições, apenas uma contribuição relativamente pequena para a liberação de energia poderá chegar da maior parte da carga ar-gás que se encontra nas regiões



mais distantes da zona do piloto. Dentro das misturas muito pobres, nenhuma propagação de chama consistente terá lugar a partir dos centros de ignição e das regiões de queima influenciadas pelo piloto.

O aumento do tamanho da zona piloto, através do aumento da massa injetada de diesel ou de sua melhor distribuição nas misturas muito pobres, tenderá a aumentar a energia liberada e suas taxas associadas. Quantidades maiores de misturas ar-gás serão então oxidadas, devido às quantidades mais extensas de misturas arrastadas para a zona de combustão do piloto e como resultado da ampliação das regiões de queima na suas vizinhanças (Karim *et al.*, 1988). Liberação e taxas de energia maiores também serão evidentes, por causa de alguma parcial propagação da chama e aumentada atividade de reação pré-ignição do resto da mistura ar-gás (Wierzba *et al.*, 1992). O aumento da concentração do combustível gasoso permitirá, após a ignição piloto, a propagação de chama através do resto da carga resultante, causando um súbito aumento da contribuição para a liberação de energia total.

### **2.2.3. Atraso da ignição no modo Diesel/gás**

O atraso da ignição no motor Diesel é definido como o tempo necessário, após o início da injeção, para que os processos de pré-ignição possam produzir os núcleos de ignição e a combustão seja detetável. A duração do atraso da ignição é um dos critérios mais importantes, tendo um grande efeito sobre o processo de combustão, o estresse mecânico, o nível de ruído, as emissões de escape e a partida do motor (Heywood, 1988). O termo “atraso da ignição” no motor Diesel é também atribuído ao tempo empregado pelos atrasos físico e químico. Majewski e Khair (2006) afirmam que os processos físicos envolvidos no período de atraso de ignição são: a dispersão do *spray* combustível e formação de gotículas; a mistura do combustível com o ar aquecido; o aquecimento do combustível líquido e sua evaporação; e a difusão do vapor de combustível para o ar, formando a mistura inflamável. Essas etapas são muitas vezes referidas como os períodos destinados à “preparação da mistura”, embora esse termo possa incluir outros processos importantes, tais como: o movimento apropriado do ar e sua transferência de calor através da válvula de admissão, a evolução da temperatura do ar (bem como a

temperatura imediatamente antes da injeção do combustível) e qualquer outro parâmetro que poderia afetar a qualidade da mistura ar-combustível. A maioria dessas etapas, se não todas, são de natureza física e são geralmente concluídas em um período de tempo muito curto. Por sua vez, os processos químicos que ocorrem durante o período de atraso da ignição incluem a oxidação pré-chama do combustível hidrocarboneto, que tem sido pré-misturado, e a “ignição localizada” em diversas áreas dentro da câmara de combustão. Após a “ignição localizada” é gerado calor suficiente para originar a decomposição dos hidrocarbonetos pesados em componentes mais leves, favorecendo a ocorrência de reações químicas (entre os componentes decompostos e o oxigênio) e a formação de radicais durante o período de atraso.

Segundo Henein e Patterson (1972), é difícil traçar uma linha distinta separando os processos físicos e químicos, porque eles se sobrepõem. Os processos químicos se iniciam após o vapor de combustível fazer contato com o ar. Nas fases iniciais da injeção, no entanto, a massa de vapor de combustível que sofre reação química é muito pequena para provocar qualquer fenômeno de combustão detectável. Portanto, as fases iniciais de pré-ignição podem ser consideradas por serem dominadas pelos processos físicos que resultam na formação de uma mistura ar-combustível. As etapas posteriores da pré-ignição podem ser consideradas por serem controladas pelas mudanças químicas que levam à auto-ignição detectável.

No modo bicomcombustível Diesel/gás, o atraso da ignição do combustível diesel mostra tendências significativamente diferentes daqueles observados na correspondente operação do motor Diesel. Conforme observado na Figura 2, o atraso tende a aumentar com a admissão do combustível gasoso, até um valor máximo detectável, e depois diminui para um mínimo, bem antes de alcançar a condição estequiométrica, i.e., o valor unitário da razão de equivalência total. Tal razão de equivalência considera o consumo simultâneo dos dois combustíveis e a vazão de ar que seria necessária à combustão de ambos. O tipo de combustível gasoso utilizado para uma mesma quantidade de combustível piloto e uma mesma razão de equivalência total produz também alterações significativas no atraso de ignição (Karim e Burn, 1980).

A introdução do combustível gasoso junto ao ar de admissão produz alterações nas propriedades físicas e de transporte da mistura, tais como na relação

de calor específico e, em menor medida, nos parâmetros de transferência de calor. Em adição, variações na pressão parcial do oxigênio devido ao deslocamento do ar pelo combustível gasoso, mudanças na atividade das reações pré-ignição e sua liberação de energia associada, e os efeitos do gás residual podem trazer mudanças significativas nos processos pré-ignição do piloto líquido e, portanto, na duração do atraso da ignição (Karim, 1980; Lida *et al.*, 1997).

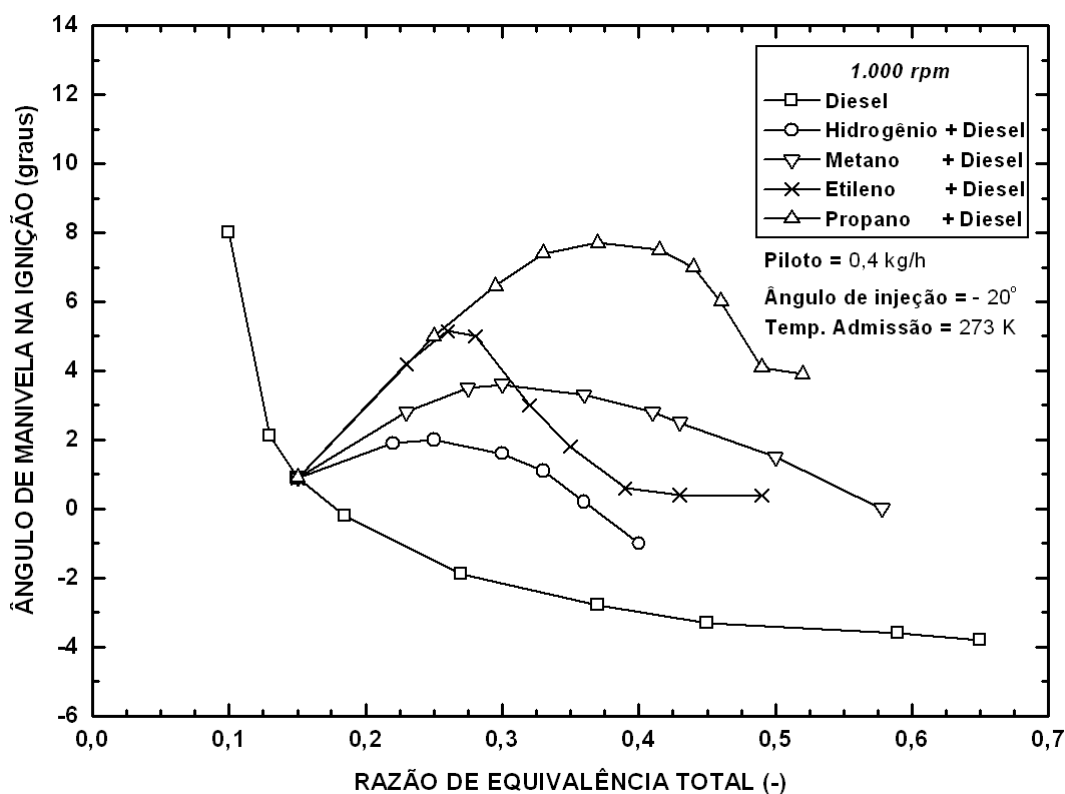


Figura 2 – Variações do ponto de ignição com a razão de equivalência total para diferentes combustíveis, mantendo a quantidade do piloto constante. A correspondente operação diesel é também mostrada (Karim e Burn, 1980).

Os processos de reação pré-ignição são muito diferentes entre os hidrocarbonetos que compõem o vapor de combustível piloto e os componentes do combustível gasoso. Por exemplo, o n-heptano, combustível que pode representar adequadamente o comportamento das frações leves do combustível diesel, começa a sofrer reações de ignição através de várias etapas muito complexas, em um nível de temperatura relativamente muito mais baixo do que o

requerido pelo metano, que procede à ignição através de uma sequência mais simples (Khalil e Karim, 2002).

Lida *et al.* (1997) realizaram um estudo em um máquina de compressão rápida, a fim de avaliar as influências de hidrocarbonetos gasosos (metano e propano) no processo de combustão de um *spray* diesel. Seus resultados confirmaram que o atraso da ignição do *spray* aumentou conforme as relações de equivalência ar-metano e ar-propano foram aumentadas. Imagens fotográficas da combustão confirmaram também que a posição da ignição do *spray* foi mais afastada do bico, na medida em que se aumentou a presença de gás no cilindro. Em adição, o brilho do núcleo da chama do diesel foi enfraquecido. Os pesquisadores argumentaram que o atraso de ignição com a mistura ar-metano, foi, muito provavelmente, devido à eficácia do metano para extinguir certos radicais intermediários acumulados durante o processo de decomposição térmica e reação elementar do combustível diesel.

Liu (1995) estudou, através de um modelo termodinâmico, incluindo esquemas de cinética química detalhada, o período do atraso de ignição no modo bicomcombustível empregando diferentes combustíveis gasosos. Seus resultados mostraram que, para qualquer razão de compressão constante, sem restrição do ar, à temperatura de admissão constante e na ausência de injeção piloto, a máxima temperatura no PMS varia significativamente com o tipo de combustível gasoso e sua concentração no cilindro. Na operação com hidrogênio, a máxima temperatura da mistura foi reduzida ligeiramente com o aumento da razão de equivalência, enquanto para o metano ou propano tal diminuição foi mais acentuada. A perda de calor durante a compressão, que também é fortemente dependente do combustível gasoso e de sua concentração, exerceu, igualmente, influência na temperatura da mistura ar-gás.

Os valores calculados das máximas taxas de transferência de calor diminuiram ligeiramente com a maior admissão de metano ou propano, mas aumentaram significativamente com a maior quantidade de hidrogênio utilizado (Liu, 1995). Durante o período da pré-ignição, a contribuição da liberação de energia para a temperatura média da mistura foi também avaliada pelo modelo, mostrando um melhor benefício com a adição do metano. As mudanças na temperatura de compressão, causadas pela admissão de alguns gases diluentes, foram também calculadas e analisadas, indicando uma diminuição quase linear da

temperatura com o acréscimo de dióxido de carbono, enquanto a maior concentração de nitrogênio praticamente não alterou tal parâmetro. Para a operação bicomustível com metano, o estudo conclui que as mudanças nas propriedades termodinâmicas da mistura (com o aumento da razão de equivalência) representa o fator mais importante na diminuição da temperatura e pressão da compressão, quando comparado ao efeito causado pela transferência de calor.

#### **2.2.4.**

#### **Combustão no modo Diesel/gás sob condições de baixas cargas**

A introdução de um combustível gasoso com o ar do motor, como mostrado anteriormente, pode ter um efeito significativo sobre os conteúdos do cilindro, durante a compressão, afetando consideravelmente os processos de pré-ignição e a subsequente combustão do piloto e da mistura ar-gás. A zona de combustão envolvendo uma chama de difusão do jato piloto pode ser significativamente estendida, enquanto a concentração do combustível gasoso no ar circundante é aumentada até certa proporção ar-gás ser atingida, que permita a propagação das chamas para varrer toda região adjacente ao jato (Karim, 2003). Esta concentração limitante pode ser vista como uma simples função do limite de inflamabilidade efetiva do combustível gasoso no ar, nas condições predominantes (Badr *et al.*, 1999).

Sendo assim, uma importante característica geral da operação bicomustível é o seu desempenho relativamente inferior em condições de baixas cargas quando misturas muito pobres de combustível gasoso com ar são empregadas. O nível dessa deterioração no desempenho depende, principalmente, da quantidade do piloto, do combustível gasoso utilizado, das condições de operação e do tipo de motor empregado. Sob estas condições, já corroboradas previamente, não somente o atraso de ignição aumenta com a introdução do combustível gasoso, mas também uma parte significativa do combustível não queima completamente, apesar da presença de ar em excesso e uma possível ignição piloto consistente. As chamas provenientes das regiões de ignição piloto não conseguem se propagar em tempo suficiente nas misturas pobres, deixando algumas partes do combustível gasoso sem reação na fase de exaustão. Normalmente, associado a essa baixa

utilização do combustível gasoso em misturas pobres está um aumento significativo na concentração de monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados, muito além do que normalmente é observado com a operação correspondente diesel (Egúsquiza *et al.*, 2009). Através da utilização de maiores concentrações de combustíveis gasosos, o limite de inflamabilidade efetiva será alcançado quando a conversão de combustível se tornar mais completa e o desempenho do motor for substancialmente melhorado. Esse limite de concentração da mistura pode ser correlacionado em termos do limite de inflamabilidade da mistura quiescente, a temperatura média durante a ignição do piloto (Badr *et al.*, 1999).

Devido aos efeitos adversos, muitos motores diesel convertidos para a operação bicomustível, sem otimização, tendem a manter o seu funcionamento original (consumindo apenas óleo diesel) nas condições de marcha lenta e baixa carga. Caso contrário, o consumo específico dos combustíveis (baseado no piloto diesel e o combustível gasoso) e as emissões associadas de monóxido de carbono e hidrocarbonetos não queimados serão superiores aos do modo original. Contudo, Karim (1980) verificou que isto é mais evidente para o uso de combustíveis gasosos contendo metano, devido à sua queima relativamente lenta, e, também, quando baixas temperaturas na admissão estão envolvidas, como quando usado o gás natural liquefeito.

Na Figura 3 é observado o pobre desempenho do motor Diesel/gás nas condições de baixas cargas (carga expressa em termos da pressão média efetiva) e, notadamente, quando utiliza altas proporções de gás natural (maiores taxas de substituição). Entretanto, conforme a carga é aumentada essa tendência é diminuída, devido à combustão mais completa do combustível gasoso (Egúsquiza *et al.*, 2009).

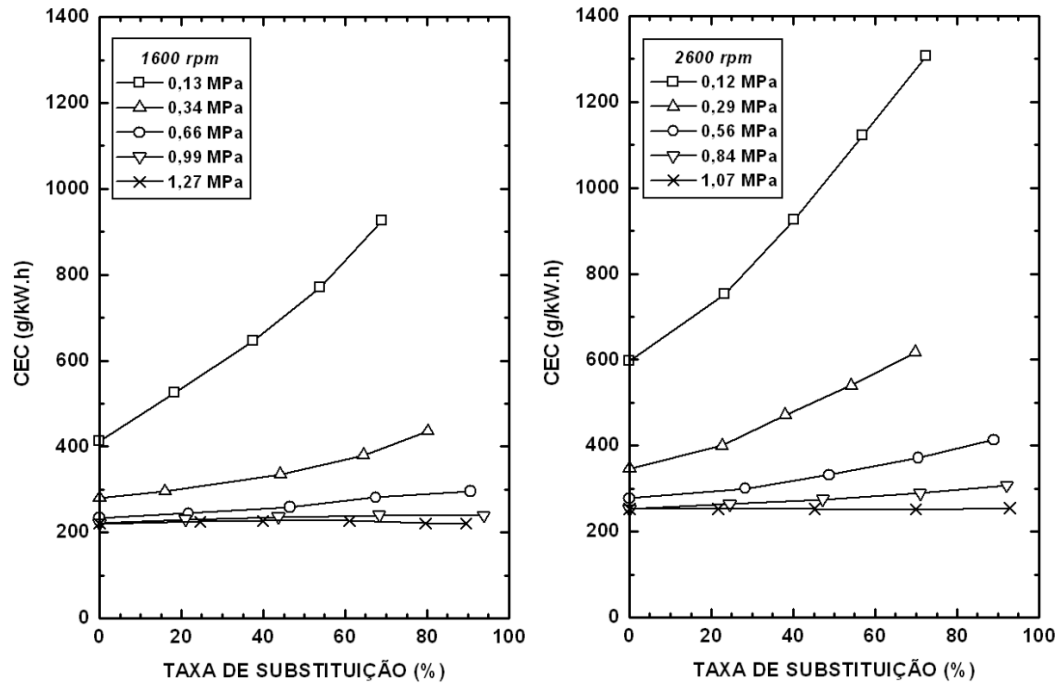


Figura 3 – Consumo específico dos combustíveis (diesel e gás natural) variando com as taxas de substituição e as cargas do motor (Egúsquiza *et al.*, 2009).

Uma operação bicombustível a baixa carga, utilizando quantidades relativamente pequenas do piloto diesel, pode ser melhorada através da incorporação dos seguintes procedimentos:

- usando quantidades relativamente grandes do piloto (menores taxas de substituição) com características de injeção otimizadas, tal como o avanço do ponto de injeção, evitando prejudicar a operação original a diesel (Karim, 1991; Mtui e Hill, 1996; Nwafor, 2000; Abd-Alla *et al.*, 2002; Selim, 2004);
- aumentando o número de cetano do piloto diesel, que além de melhorar a operação a baixa carga, permite o uso de misturas de combustíveis gasosas com altas concentrações de diluentes, como nitrogênio ou dióxido de carbono (Karim *et al.*, 1988);
- restrição parcial do ar de admissão, de modo a produzir uma mistura efetivamente mais rica para a mesma massa de gás combustível. No entanto, essa restrição deverá ser empregada com cuidado, evitando enfraquecer a ignição do piloto diesel (Tesarek, 1975; Karim, 1980; Pirouzpanah e Saray, 2002; Egúsquiza, 2006);

- ligeiro pré-aquecimento da mistura ar-gás pobre ou aumentar a temperatura da água de arrefecimento proporciona uma maior temperatura da mistura no final da compressão e reduz a fração do combustível gasoso não queimado no processo de combustão (Karim, 1980);

- adição de pequenas quantidades de um combustível auxiliar adequado para o combustível gasoso principal. Para o metano, os combustíveis auxiliares como o hidrogênio, hidrocarbonetos superiores ou vapor de gasolina, podem melhorar o funcionamento do motor bicomcombustível. Tal abordagem deve ser evitada fora da faixa de baixas cargas, uma vez que além de aumentar o consumo específico dos combustíveis, ela pode trazer um início mais prematuro da detonação (Karim, 2003);

- alguma estratificação do combustível gasoso em relação ao ar, como através da injeção direta de gás, pode melhorar a operação em baixas cargas, devido ao arranjo de uma mistura ligeiramente mais rica nas proximidades do combustível piloto (Hill e Douville, 1998);

- a recirculação dos gases de escape não resfriados pode também contribuir positivamente com o desempenho bicomcombustível, devido à maior temperatura da mistura admitida. Porém, isto também pode causar um aumento nas emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado (Daisho *et al.*, 1995; Selim, 2003).

É muito provável que recorrer a uma combinação adequada destas medidas pode ser muito eficaz no caminho da otimização da operação bicomcombustível. Estas possíveis melhorias, no entanto, deverão manter a capacidade de um motor para funcionar eficientemente no modo original (consumindo apenas diesel), sempre que necessário.

### **2.2.5.**

#### **Emissão de gases de escape no modo Diesel/gás**

Os principais constituintes dos gases de escape na operação bicomcombustível são os hidrocarbonetos não queimados, sob a forma de combustíveis gasosos não convertidos, o monóxido de carbono, o dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e particulados.



Conforme indicado anteriormente, a propagação de chamas turbulentas oriundas das regiões de ignição do piloto não penetrará por toda a mistura até que a concentração dos gases combustíveis seja superior a um valor limite, que varia com as condições de operação. De acordo com Liu (1995), na operação Diesel/gás, usando misturas ar-gás muito pobres, uma quantidade significativa do combustível gasoso e produtos dos processos de pré-ignição e combustão parcial sobrevivem à fase de exaustão (Liu, 1995).

Como mostrado na Figura 4, emissões de hidrocarbonetos não queimados, no qual o metano é o principal constituinte, aumentam com a maior admissão de gás natural (maior taxa de substituição), mas diminuem substancialmente com a maior intensidade da carga (Egúsquiza *et al.*, 2009).

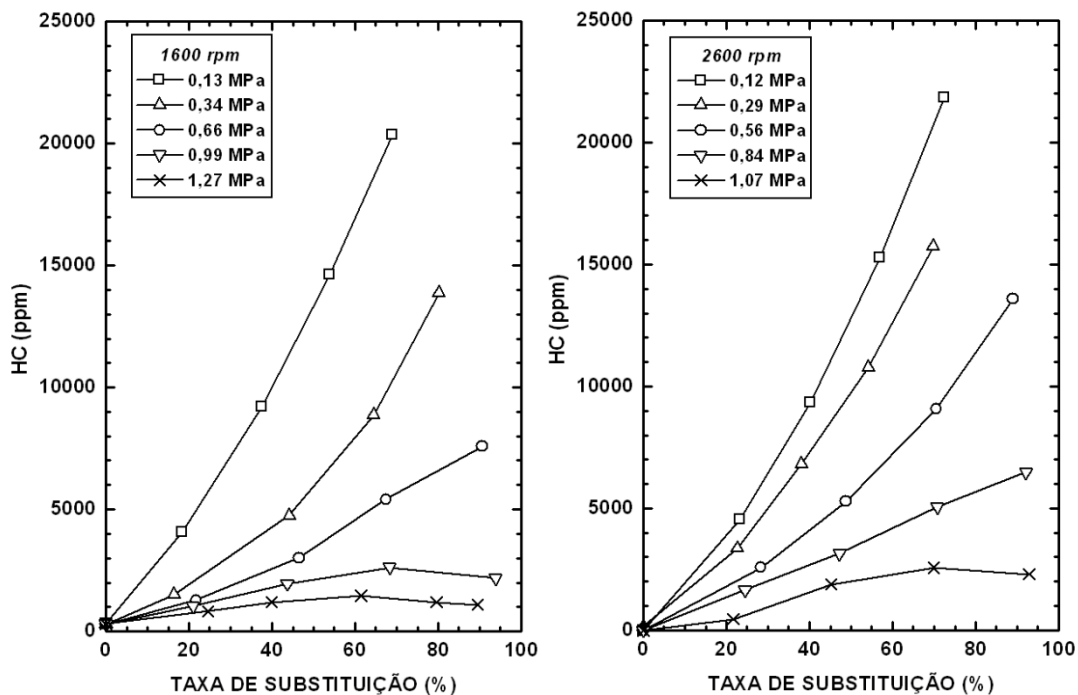


Figura 4 – Emissões de hidrocarbonetos não queimados variando com a taxa de substituição (diesel por gás natural) e as cargas do motor (Egúsquiza *et al.*, 2009).

O metano não consumido, quando liberado na atmosfera, tende a ser menos reativo em relação a outros hidrocarbonetos, para efeitos de geração de *smog* fotoquímico. No entanto, o metano é conhecido por ter um potencial de aquecimento global superior ao do dióxido de carbono, embora o seu tempo de

vida na atmosfera seja consideravelmente menor. Deste modo, os níveis de emissão de metano na operação bicomcombustível requerem controle e redução.

Como parte da sequência das reações de oxidação do gás natural no ar, o monóxido de carbono é produzido nas fases iniciais da oxidação e, posteriormente, muito desse monóxido formado será oxidado a dióxido de carbono. Entretanto, em misturas muito pobres, certa quantidade do monóxido de carbono não sofre oxidação, devido a falhas no processo de combustão para envolver toda a mistura ar-gás e pela relativa lentidão dos processos de reação. Assim, em cargas baixas da operação bicomcombustível, quando misturas ar-gás muito pobres e, especialmente, quando pequenas quantidades de piloto estão envolvidas, certas frações de monóxido de carbono sobreviverão à fase final de exaustão (vide Figura 5).

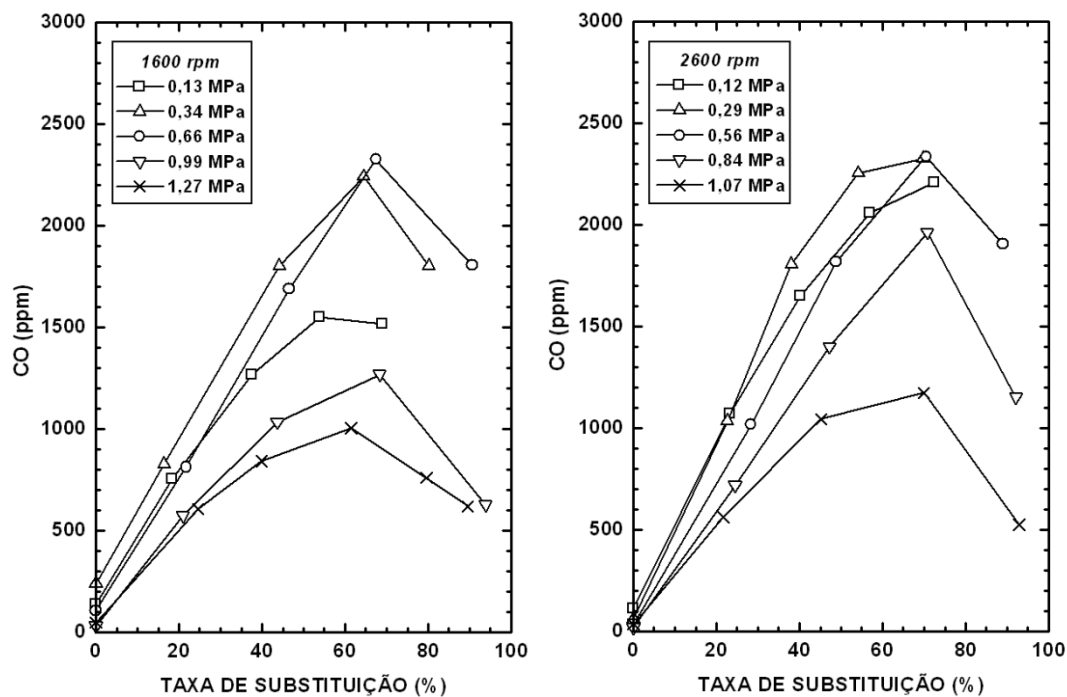


Figura 5 – Emissão de monóxido de carbono variando com a taxa de substituição (diesel por gás natural) e as cargas do motor (Egúsqiza *et al.*, 2009).

O monóxido de carbono nos gases de escape dos motores bicomcombustíveis é originado em grande parte pelo combustível gasoso, principalmente nas regiões internas e adjacentes à chama do piloto diesel. Deste modo, a concentração de monóxido de carbono dependerá do tamanho dessas regiões (Karim, 2003). A

contribuição de CO desde as reações de pré-ignição, da maior parte da mistura ar-gás, tende a ser variável, mas permanece geralmente pequena (Liu e Karim, 1997).

A produção de óxidos de nitrogênio depende principalmente do valor do pico da temperatura de combustão, do volume efetivo da zona de combustão, da disponibilidade do oxigênio e do tempo disponível para as reações de oxigênio-nitrogênio (Heywood, 1988). Na operação bicombustível, grande parte da produção de  $\text{NO}_x$  é associada com a região do piloto, onde temperaturas locais muito altas são atingidas e longos tempos de reação são possíveis. Alguma outra produção de  $\text{NO}_x$ , porém, em uma escala muito menor, também será oriunda das regiões de mistura ar-gás aquecida na proximidade da zona de combustão do piloto (Karim, 2003). O aumento do piloto diesel terá uma importante contribuição para a crescente produção de  $\text{NO}_x$ , já que o tamanho da zona de combustão é similarmente aumentado. Em operações com misturas muito pobres, relativamente pouca produção de  $\text{NO}_x$  é esperada do restante das regiões da mistura gasosa (Karim *et al.*, 1993). Como observado na Figura 6, a produção de óxidos de nitrogênio é notavelmente influenciada tanto pela quantidade do piloto empregado (taxa de substituição), quanto pela carga do motor.

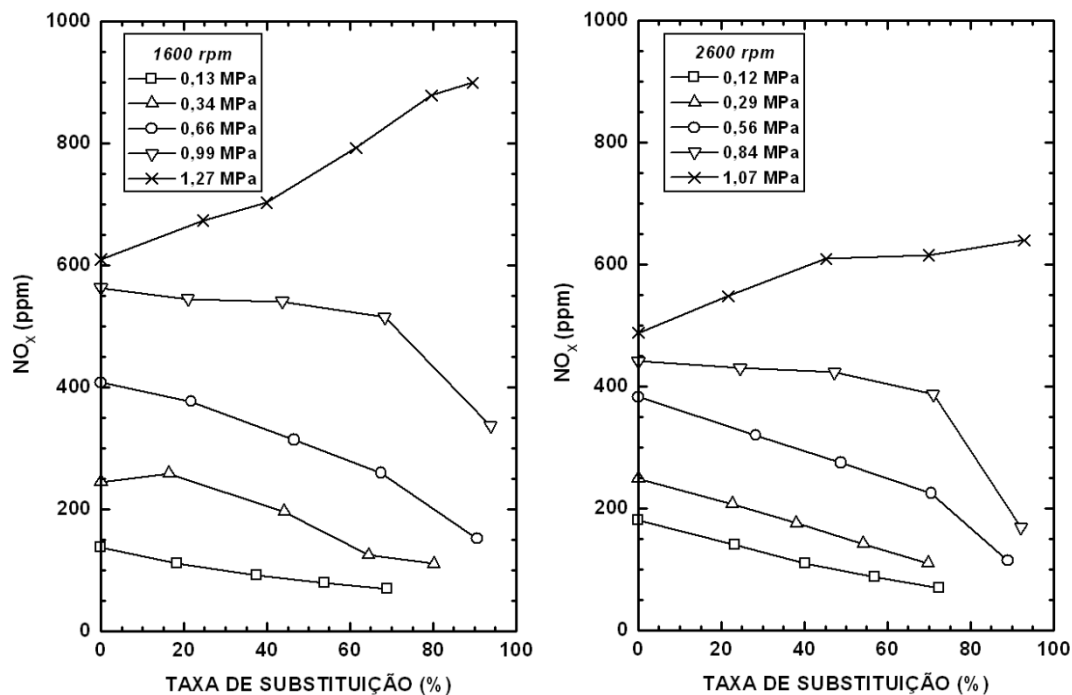


Figura 6 – Emissões óxidos de nitrogênio variando com a taxa de substituição (diesel por gás natural) e as cargas do motor (Egúsqiza *et al.*, 2009).

Em grande parte da região de operação, as concentrações de  $\text{NO}_x$  resultam em níveis inferiores aos correspondentes valores da operação diesel original. Só na condição de plena carga, associada com as maiores temperaturas no cilindro, existe a tendência de acréscimos dos  $\text{NO}_x$  com o aumento da substituição de diesel pelo gás natural.

Um aspecto muito importante da operação bicomcombustível é que o nível das emissões de material particulado é muito inferior aos encontrados na correspondente operação a diesel puro, uma vez que a maior parte da liberação de energia na operação bicomcombustível provém da combustão do combustível gasoso (vide Figura 7). Isso é possível durante toda a faixa de potência, mesmo quando as temperaturas de admissão da mistura são muito baixas, tal como no funcionamento com gás natural liquefeito. Esta característica torna a conversão de motores Diesel, ao modo bicomcombustível, notavelmente atrativa sobre toda a faixa de cargas (Egúsquiza, 2006).

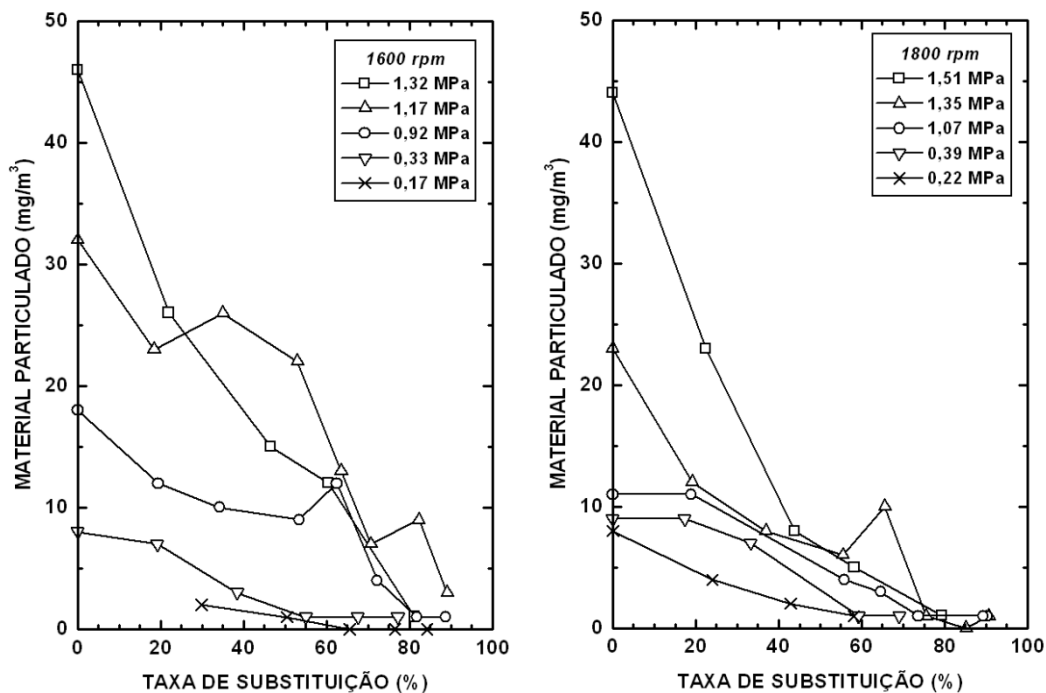


Figura 7 – Emissões de material particulado variando com a taxa de substituição (diesel por gás natural) e as cargas do motor (Egúsquiza, 2006).

### 2.2.6. Detonação no modo Diesel/gás

A liberação de energia na operação bicomustível normalmente envolve a contribuição combinada das regiões de combustível piloto em conjunto com a rápida propagação de frentes de chama turbulentas originadas dessas regiões. Este modo de combustão, que combina auto-ignição e processos de rápida propagação da chamas, é o principal responsável pela capacidade do modo bicomustível de operarem com misturas que são muito mais pobres do que as normalmente possíveis em motores de ignição por centelha operando com gás (Karim e Gao, 1992; Karim, 2003). Um requisito fundamental, para a operação satisfatória de qualquer combustível gasoso alternativo no modo bicomustível, é que a sua mistura com o ar não permita uma auto-ignição espontânea durante ou após a rápida liberação de energia do piloto. Já que isso pode conduzir ao início da detonação, que se manifesta com taxas excessivamente rápidas de aumento da pressão e sobreaquecimento das paredes do cilindro, levando a uma perda significativa na eficiência com o aumento de variações cíclicas (Schaberg *et al.*, 1990; Liu e Karim, 1994; Selim, 2004; Srinivasan *et al.*, 2009). Detonações persistentes são altamente prejudiciais e precisam ser evitadas, caso contrário, poderão provocar falhas no motor, comprometendo sua vida útil.

De acordo com Karim (2003), a detonação na operação bicomustível apresenta características de auto-ignição envolvendo, principalmente, a mistura de ar e combustível gasoso. Dependendo do tamanho do piloto e de seu modo de injeção, pode-se perceber que a detonação envolve a auto-ignição de uma parte da mistura ar-gás nas vizinhanças destes centros de ignição. Isso leva a taxas muito altas de aumento da pressão e uma conseqüente queima muito rápida da porção restante da mistura. Com pilotos muito menores, a liberação de energia durante os estágios iniciais da ignição e a resultante propagação de chama turbulenta podem levar, em determinadas condições, para uma auto-ignição da carga muito afastada destes centros de ignição, nas regiões do “gás extremo” (mistura de ar, combustível gasoso e gases residuais) que se encontram à frente do avanço destas chamas, de forma semelhante à ocorrência de detonação em motores de ignição por centelha.

A potência limitada pela detonação, para qualquer configuração do combustível gasoso e do piloto, demonstrou-se deteriorar logarithmicamente com o inverso da temperatura absoluta da admissão. Portanto, o início de detonação pode ser evitado ou reduzido através de diferentes estratégias de projeto do motor e por meio de novas medidas operacionais, como a redução das temperaturas do ar de admissão e da água de arrefecimento e o retardo do ponto de injeção do piloto (Karim, 1980).

Vários pesquisadores (Douville, 1994; Hill e Douville, 1998) coincidem em afirmar que um procedimento eficaz para reduzir a incidência de detonação é através da distribuição otimizada da razão ar-gás por uma adequada estratificação do combustível gasoso no interior do cilindro, bem como através da injeção direta do combustível gasoso durante as últimas etapas da compressão ou, com menor grau de eficácia, através da injeção do gás imediatamente antes da válvula de admissão. Esta estratificação visa obter misturas ar-gás mais pobres e menos reativas nas regiões distantes dos centros de ignição do piloto, onde as misturas mais ricas estão localizadas. Isso exigiria um controle cuidadoso da distribuição do combustível gasoso, de tal forma que não dificulte a ignição do combustível piloto e não promova a auto-ignição das regiões adjacentes ao piloto, enquanto reduz a possibilidade de tal efeito nas regiões mais distantes destes centros, apesar das elevadas taxas de aumento da pressão e temperatura no cilindro.

No modo bicombustível, utilizando gás natural, o surgimento da detonação pode também ser evitado através de um cuidadoso controle da composição do combustível gasoso. Isto pode ser feito através da máxima redução na concentração de alguns hidrocarbonetos mais pesados que o metano e/ou através do aumento da concentração de diluentes como o dióxido de carbono ou nitrogênio, que podem estar presentes na mistura combustível (Liu, 1995).

Pelo exposto neste capítulo, existe, para cada motor e combustível alternativo (gasoso ou líquido), uma diversidade de variáveis operacionais que podem ser controladas simultaneamente, de forma a melhorar o desempenho em cargas baixas, diminuir o atraso da ignição, evitar a detonação e reduzir as emissões de gases poluentes do motor bicombustível. Obviamente, há sempre uma necessidade de avaliar as consequências de tais estratégias de controle,

identificando seus efeitos positivos e evitando a complexidade e os custos elevados da operação bicomustível otimizada.