

1 Introdução

A preocupação com a inclusão de fontes de energia limpas e renováveis na matriz energética ganhou força na última década entre os principais países consumidores e foi elevada a um novo patamar, em conjunto com os planos traçados para a redução dos níveis de emissão de gases do efeito estufa e outros poluentes atmosféricos.

Na corrida para diversificar as fontes e produzir energia de maneira mais limpa e sustentável do ponto de vista dos recursos disponíveis, o Brasil leva vantagem. As condições geográficas e as reservas de recursos naturais são favoráveis e algumas iniciativas acertadas no passado trouxeram o país a uma posição privilegiada. Atualmente, as fontes renováveis provêm 46,8% da produção de energia do Brasil, muito acima da média mundial (12,9% em 2008). A base desse poderio provém da geração hidrelétrica e o uso de biomassa, relacionada, principalmente, à produção canvieira (BEN, 2010; IEA, 2011).

Apesar dessa melhor distribuição da matriz brasileira, a composição das fontes de energia ainda mostra uma elevada dependência do petróleo (41,9% em 2009) em relação à matriz energética mundial (33,1% em 2008). Entre os derivados de petróleo, o óleo diesel continua representando uma fonte essencial para a economia brasileira (16,7% do consumo de energia total), devido ao seu exclusivo uso na área de transporte terrestre de cargas e no transporte público de passageiros (BEN, 2010). Isso tem agravado as condições climáticas das grandes cidades e o balanço de pagamentos do país, por conta das importações desse combustível. Mais recentemente, dada a necessidade de se empregar o óleo diesel de baixo teor de enxofre nos grandes centros urbanos, as importações foram notoriamente aumentadas. Os últimos dados da ANP indicam que, entre janeiro e novembro de 2010, houve um aumento de 160% no volume de importações de óleo diesel, em relação ao ano anterior (Valor Econômico, 2011).

O Brasil já desenvolveu considerável conhecimento, experiência e desenvolvimento de mercado no uso de combustíveis alternativos, em particular

na substituição da gasolina, empregada em veículos leves. A partir desse ponto, surgiram alguns projetos no sentido de substituir o uso de óleo diesel mas, com exceção do uso parcial do biodiesel, nenhuma alternativa tecnológica foi consolidada no mercado nacional. Atualmente, os 5% de biodiesel adicionados compulsoriamente ao óleo diesel mineral representam um incremento significativo no setor de energia renovável, o que, sem dúvida, também representa um ganho ambiental importante. Mas isso não é suficiente. É preciso fortalecer e promover o desenvolvimento e as inovações tecnológicas que permitam o uso de outras fontes alternativas, buscando a redução na demanda crescente de óleo diesel e a consequente diminuição das emissões. As pesquisas convergem para o uso de combustíveis alternativos (renováveis ou não) que sejam disponíveis comercialmente no país, tais como o etanol e o gás natural, sobre os quais se discorrerá a seguir.

Nos últimos anos, a demanda do etanol brasileiro vem apresentando crescimento significativo, não apenas devido ao aumento da frota de veículos *flex* (que no período de 2003 a 2010 atingiu 12,5 milhões de unidades), mas também em função do crescimento das exportações do etanol renovável. Segundo as projeções da UNICA (2010), a produção de etanol no Brasil deve atingir na safra 2015/16 o patamar de 46,9 bilhões de litros, o que representa um valor 82,5% superior à produção da última safra (25,7 bilhões de litros). Enquanto isso, o consumo interno de etanol deve passar dos 22,5 bilhões de litros, produzidos na safra 2009/10, para 34,6 bilhões de litros na safra 2015/16, ou seja, um crescimento de 54% no período. Desta forma, presume-se que a diferença entre a produção e consumo interno seria destinada ao mercado externo. Sendo assim, o volume do etanol exportado aumentaria de 2,75 bilhões de litros, registrado em 2009, para 12,3 bilhões de litros na previsão de 2015. Por outro lado, o Brasil continua investindo no desenvolvimento da segunda geração deste combustível renovável, procurando um maior aproveitamento de energia da cana-de-açúcar através da produção do etanol utilizando o bagaço e a palha da cana (etanol celulósico), o que pode aumentar em até 30% a oferta do insumo sem ter que alterar a extensão das plantações.

Outra fonte de energia alternativa que vivencia período de notória evolução na matriz energética brasileira é o gás natural. Mesmo sendo um recurso não renovável, o gás natural é considerado um combustível menos poluente que o

diesel e suas reservas provadas são significativas. Em 2009, apesar da queda na demanda desse combustível no setor industrial, devido à crise mundial que atingiu a economia brasileira, a participação do gás natural na composição das fontes primárias de energia utilizadas no país atingiu o patamar de 8,7%, ocupando a quinta posição entre as fontes mais demandadas (BEN, 2010). Porém, essa participação deverá aumentar nos próximos anos a partir do desenvolvimento das reservas do pré-sal, que permitirão ao Brasil passar de importador a exportador desse combustível.

Tendo em vista as estimativas de aumento na produção do etanol e gás natural, vislumbra-se a potencialidade de aproveitamento dessas fontes de energia alternativa em substituição, parcial ou total, do óleo diesel. Isso se tornaria um grande atrativo econômico-ambiental para o desenvolvimento sustentável do Brasil. Nesse sentido, a conversão de motores do ciclo Diesel para o modo bicomcombustível Diesel/etanol e Diesel/gás constitui-se em uma proposta tecnicamente viável para a substituição parcial do derivado do petróleo. A maior inserção de motores bicomcombustível no mercado brasileiro permitiria, também, a “absorção” da produção crescente dos combustíveis alternativos do país, diminuindo inclusive – no caso do etanol – uma parcela importante destinada à exportação.

Entre as aplicações típicas do motor Diesel, as mais promissoras para o uso parcial do etanol e gás natural seriam os segmentos do transporte urbano (ônibus de passageiros e caminhões municipais), ferroviário e hidroviário, além do setor de geração elétrica. Os segmentos do transporte poderiam ter o uso bicomcombustível restrito às frotas cativas e, devido à redução na emissão de poluentes, receberiam, possivelmente, incentivos fiscais ou facilidades legais que promovam sua viabilização (como acontece nos veículos de passeio pelo uso de GNV). Por outro lado, o próprio setor sucroenergético (máquinas agrícolas, veículos de transporte de carga e geradores elétricos) apresentaria, indiscutivelmente, condições técnico-econômicas mais adequadas para a operação Diesel/etanol, em razão do fornecimento interrompido do combustível renovável e a margem de lucro positiva que se obteria pelo menor custo do etanol.

Do ponto de vista ambiental, o consumo parcial do etanol ou gás natural em motores do ciclo Diesel permitiria obter reduções significativas na emissão de material particulado (MP), dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de enxofre (SO_x).

Ambos os combustíveis alternativos possuem menores razões mássicas de carbono/hidrogênio, em relação ao óleo diesel, devido às menores concentrações de carbono nas suas estruturas moleculares. Isto favoreceria a redução tanto de CO₂ quanto de MP. Contudo, é esperado que a menor emissão do principal gás de efeito estufa seja através do uso parcial do etanol renovável, uma vez que o sequestro de carbono feito na plantação da cana-de-açúcar retiraria o gás carbônico produzido na queima bicombustível. Por sua vez, a menor emissão de SO_x da operação bicombustível estaria certamente associada à composição praticamente livre de enxofre dos combustíveis alternativos a serem empregados.

Do ponto de vista operacional, as operações Diesel/etanol e Diesel/gás garantem flexibilidade e funcionamento contínuo do motor, já que a qualquer momento pode-se alternar entre o modo bicombustível e o modo original. Este fato permite que motores convertidos possam operar, sem etanol ou gás natural, simplesmente consumindo óleo diesel. Tal característica apresenta-se interessante em cenários de fornecimento interruptível do combustível alternativo.

Apesar das vantagens mencionadas acima, é sabido que um dos pontos críticos na utilização da tecnologia bicombustível é a queda do rendimento térmico do motor, principalmente nas condições de baixas cargas e elevadas percentagens de substituição do óleo diesel pelo combustível alternativo. Além disso, na operação bicombustível são comumente emitidas altas concentrações de hidrocarbonetos não queimados (HC) e monóxido de carbono (CO), associados à queima incompleta do etanol e gás natural.

Em decorrência do exposto até aqui, a questão central a ser abordada neste trabalho de tese refere-se a, num primeiro estágio, analisar as influências do etanol hidratado e do gás natural, em relação aos parâmetros característicos da combustão, desempenho e emissões. Posteriormente, no modo bicombustível foram avaliadas duas técnicas conhecidas em motores de combustão interna: o avanço da injeção do diesel (utilizado motores do ciclo Diesel) e a restrição parcial do ar de admissão (utilizado em motores do ciclo Otto), as quais pretendem melhorar o desempenho e reduzir as emissões dos modos Diesel/etanol e Diesel/gás.

Cabe, neste ponto, ressaltar a contribuição e relevância do presente trabalho de tese: na fase da revisão da literatura, verificou-se que para o modo Diesel/gás existem inúmeros estudos experimentais que analisam isoladamente as técnicas do

avanço da injeção do diesel e da restrição parcial do ar de admissão, tais como os publicados por Ding e Hill (1986), Egúsqüiza (2006), Srinivasan *et al.* (2006), entre outros. Em relação ao modo Diesel/etanol, a literatura aponta escassos trabalhos que avaliam apenas os efeitos do avanço da injeção do óleo diesel (por exemplo, Schroeder *et al.*, 1988). Contudo, não existem investigações experimentais que avaliem ambas as técnicas em conjunto durante algum tipo de operação bicomustível (independente do combustível alternativo utilizado). Nesse contexto, o presente trabalho pretende contribuir à demanda por estudos que avaliem, de forma detalhada, as características do modo bicomustível funcionando, ao mesmo tempo, com diferentes técnicas de otimização. A necessidade de um estudo comparativo entre as operações Diesel/etanol e Diesel/gás é também um fator relevante da tese.

1.1. Objetivos

São dois os objetivos do presente trabalho:

- Levantar dados experimentais de um motor do ciclo Diesel, operando em dinamômetro de bancada, no modo bicomustível Diesel/etanol e Diesel/gás a fim de verificar os efeitos ocasionados pelos combustíveis alternativos utilizados em relação à operação Diesel original.
- Identificar os efeitos das técnicas do avanço da injeção do óleo diesel e da restrição parcial do ar na operação bicomustível, relacionando determinados parâmetros operacionais da combustão, desempenho e emissões.

1.2. Organização da Tese

De forma a cumprir os objetivos a que se propõe esta tese, a mesma estrutura-se em seis capítulos. No capítulo dois é apresentada uma revisão da literatura, a qual se concentra em trabalhos experimentais envolvendo os dois modos bicomustível: Diesel/etanol e Diesel/gás. No capítulo três descrevem-se

os equipamentos empregados na configuração experimental e a metodologia adotada na realização dos ensaios. No capítulo quatro é mostrado o equacionamento empregado na redução de dados e no cálculo das variáveis de interesse. Também, nesse capítulo, se inclui a análise das incertezas experimentais e sua propagação no cálculo dos principais parâmetros avaliados. Os resultados e suas respectivas discussões constituem o capítulo cinco.

A presente tese é concluída com o capítulo seis, onde se apresentam as conclusões e recomendações. Neste se resume os principais resultados atingidos e, em função das dificuldades experimentais encontradas, apresenta-se sugestões para melhorias a serem desenvolvidas em futuros trabalhos.