

1. Introdução

A metade final do século XX foi marcada por sucessivas oscilações do preço do petróleo no mercado internacional. A crise mundial do petróleo iniciada no ano de 1973, após o aumento do preço do barril em mais de 300% pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), obrigou os países importadores de petróleo e derivados a revisarem suas políticas energéticas, objetivando amenizar os impactos imediatos causados pelo embargo e tornar suas economias menos suscetíveis às variações do preço desta matéria-prima.

Observou-se no mundo durante os anos que se seguiram buscas por novas reservas petrolíferas e um crescente interesse em fontes de energia renováveis. O Brasil tornou-se pioneiro ao instituir em 1975 o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Após uma década de produção e demanda crescentes, a conjuntura internacional aliada à perda de interesse pelo governo brasileiro levaram o etanol ao quase esquecimento nos anos de 1990.

Em 2003, o aparecimento dos carros bicombustíveis no mercado brasileiro e a recente tendência de alta do preço do petróleo deram nova vida à produção nacional do etanol. As novas tecnologias de controle desenvolvidas pelas montadoras nacionais permitiram a eliminação da maioria dos problemas dos motores a etanol do passado, e em conjunto com a flexibilidade proporcionada ao usuário final, originaram uma demanda interna crescente e interesse internacional.

O Balanço Energético Nacional 2008 – Ano base 2007 (EPE, 2008) demonstra que o etanol responde ainda por apenas 4,3% do consumo final energético no país; em contrapartida, o óleo Diesel corresponde a 17,3% deste, sendo apenas inferior à energia elétrica (17,6%). Ainda, considerando-se apenas o setor de transportes (rodoviário, ferroviário, aeroviário e hidroviário), o etanol responde por 14,9% do consumo total, enquanto que o óleo Diesel corresponde a 49,9%; deste percentual, 15,0% são importados.

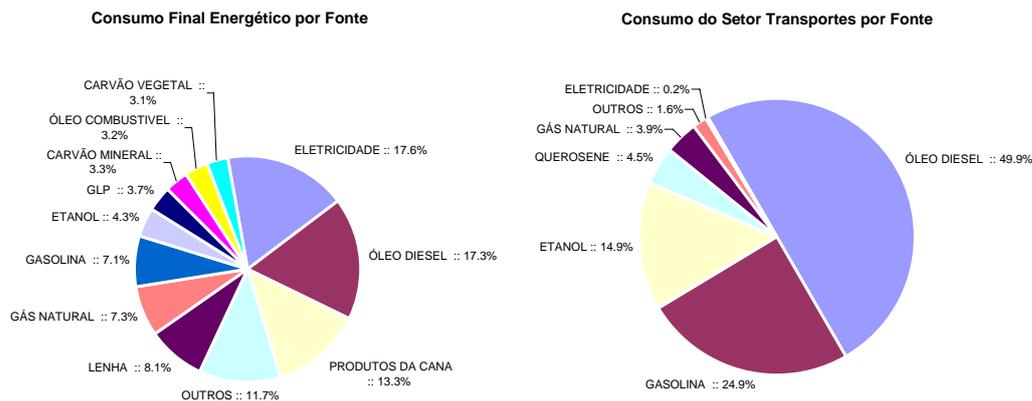


Figura 1.1 – Consumo final energético do setor de transporte por fonte para o Brasil (EPE, 2008)

Estes dados indicam a grande dependência do Brasil em relação ao Diesel, conclusão lógica considerando-se a matriz de transporte brasileira: predominantemente, o transporte de cargas e da população é realizado por veículos pesados com motores a óleo Diesel.

Historicamente, o Brasil é um país dependente da importação de óleo Diesel, dado que a produção nacional não consegue suprir completamente a demanda interna. Na última década, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) vem sendo pioneiro na busca da substituição do Diesel de origem fóssil, além de trazer benefícios como a redução da emissão de poluentes e gases causadores do efeito estufa. Não obstante, o PNPB, através da lei nº 11.097, define que apenas em 2013 haverá a obrigatoriedade do percentual mínimo de 5% de biodiesel adicionado ao óleo Diesel comercializado (Brasil, 2005). No entanto, este percentual não seria suficiente para, por exemplo, o fim da dependência externa caso o cenário atual seja mantido.

Diferentemente, o gás natural ainda responde por apenas 7,3% do consumo final energético no país; para o setor de transportes, este percentual é ainda menor (3,9%). As recentes descobertas de novas reservas petrolíferas na costa brasileira e o aumento da infra-estrutura das redes de distribuição levam a crer na viabilidade de ampliação da utilização deste combustível no mercado interno.

Ainda, a crescente preocupação global relacionada à emissão de poluentes na atmosfera por motores a combustão interna vem sendo refletida na adoção de padrões cada vez mais restritivos. Os cronogramas adotados pelas agências reguladoras ao redor do mundo demandam avanços consideráveis na tecnologia destes motores e dos combustíveis. Neste contexto, o gás natural surge como uma

alternativa viável devido à menor emissão de poluentes e custo inferior quando comparado aos demais derivados de petróleo.

O Brasil é um dos países pioneiros na utilização do gás natural no setor dos transportes. No final da década de 1980, o governo federal instituiu o Plano Nacional de Gás Natural (Plangás), com o objetivo de substituir gradativamente a utilização do óleo Diesel no transporte rodoviário de cargas e passageiros. O programa sofreu resistência devido à falta de postos de abastecimento, pouca diferença de custo em relação aos derivados, baixa autonomia dos veículos e dificuldades para sua revenda e (Cavalcanti, 2005).

Ciente das dificuldades enfrentadas pelo Plangás, o governo brasileiro tomou novas medidas para a viabilização deste projeto. Após regulamentação, a Petróleo Ipiranga, distribuidora nacional de derivados de petróleo, inaugurou em 1991 o primeiro posto de fornecimento de gás natural veicular (GNV) na cidade do Rio de Janeiro (Ipiranga, 2009). No ano seguinte, autorizou-se então a utilização incondicional do gás natural para táxis, ônibus e veículos de carga (Brasil, 1992).

Entretanto, somente em 1996 o governo brasileiro regulamentou a utilização do GNV para todos os veículos automotores (Brasil, 1996). Desde então, em conjunto com o desenvolvimento de tecnologia nacional, foi observado o aumento considerável no número de veículos particulares com motores de ciclo Otto convertidos para a utilização do GNV. Atualmente, o Brasil é o segundo país no mundo em número de conversões, ficando atrás apenas da Argentina (Ipiranga, 2009).

1.1 Motivação

A abordagem HCCI (ignição por compressão de carga homogênea, do inglês, *homogeneous charge compression ignition*) Diesel é considerada uma das mais promissoras para a redução de poluentes em motores de ignição por compressão. Entretanto, grandes inconvenientes ainda são observados no seu atual estágio de desenvolvimento, como ruídos e auto-ignição instável, os quais impedem a sua incondicional aceitação como solução definitiva. Uma alternativa de menor prazo é a operação bicomcombustível dos motores Diesel, a qual permite a combinação de suas vantagens com a dos motores de ciclo Otto.

Esta alternativa é evidenciada, por exemplo, desde meados dos anos de 1980 pela fabricante sueca de motores Scania. Em parceria com o departamento de trânsito da cidade de Estocolmo, a fabricante testa até os dias atuais uma frota de ônibus urbanos com motor Diesel operando unicamente com etanol e um aditivo para melhoria de sua auto-ignição (Scania, 2006).

Outra possibilidade evidenciada é a utilização do gás natural como substituto de parte do óleo Diesel, conforme investigado pelos trabalhos pioneiros de Tesarek (1975), Bro e Pedersen (1977) e Karim e Brun (1980). Motores de ignição por compressão Diesel-gás vêm sendo empregados em uma extensa gama de aplicações a fim de minimizar a emissão de particulados e de óxidos de nitrogênio (NO_x), sem que haja o aumento excessivo de custo em relação aos motores Diesel convencionais. A natureza de sua combustão mais limpa e seu baixo custo são os grandes diferenciais do gás natural em comparação a outros combustíveis líquidos; outra vantagem é sua elevada resistência à detonação, que permite sua utilização direta em motores Diesel sem a necessidade da alteração da taxa de compressão destes (Hountalas e Papagiannakis, 2002).

A utilização do gás natural é uma solução poderosa para adequar os atuais motores Diesel às futuras necessidades de redução de emissões. A conversão destes pode ser bem simples, necessitando de, por exemplo, apenas um sistema de fornecimento de gás natural ao coletor de admissão e de um dispositivo adicional para variação da vazão de injeção do óleo Diesel (Cordiner et al., 2007).

A Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) é uma das instituições pioneiras no estudo da utilização do gás natural em motores de ciclo Diesel. Diversos estudos foram conduzidos no Laboratório de Engenharia Veicular (LEV) da universidade, dando origem a projetos de conversão com aplicações comerciais.

Em seu trabalho, Egúsquiza (2006) buscou através de experimentos a redução das emissões geradas por um motor Diesel turbo-alimentado convertido para a operação bicomustível Diesel-gás. Este motor foi montado em um dinamômetro de bancada e sua conversão se deu pela adição de um sistema de injeção de gás natural ao coletor de admissão. Foram comparadas com o modo convencional as emissões e o desempenho de diferentes taxas de substituição de Diesel. Em seguida, avaliou-se o impacto do método da restrição parcial da admissão de ar nas emissões de poluentes. A mistura ar-gás natural relativamente

mais rica resultou em menores índices de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) por todas as faixas de operação. Além disso, um maior rendimento térmico foi verificado para cargas no eixo de até 50% da total. No entanto, o autor observou como ponto negativo o aumento das concentrações de NO_x para maiores cargas.

Pereira (2006) avaliou experimentalmente o desempenho de quatro motores Diesel diferentes com o mesmo tipo de conversão supracitado, novamente montados em um dinamômetro de bancada. Verificou-se diversas condições operacionais e variações das taxas de substituição do Diesel pelo gás, de maneira a identificar toda a faixa onde o regime bicomcombustível é possível; os parâmetros de funcionamento dos motores foram alterados, sem que modificações aos seus desenhos fossem feitas. Os resultados indicaram que em grande parte da faixa de operação apenas parte do gás é efetivamente queimado. A partir dos dados experimentais foram propostas correlações empíricas para o rendimento térmico e eficiência volumétrica.

Diferentemente dos motores convencionais, os processos da combustão em motores bicomcombustíveis ainda não são completamente entendidos. Aparentemente, a combustão nestes motores parece ser uma combinação dos aspectos mais complexos dos ciclos Otto e Diesel. Desta forma, o aprofundamento dos conhecimentos básicos do processo de combustão é desejável para que estes motores funcionem da maneira mais eficiente em todas as faixas de operação (Miao e Milton, 2005).

Os avanços computacionais observados nas últimas décadas vêm possibilitando a simulação de sistemas cada vez mais completos. Antes, modelos complexos considerados caros em termos de processamento numérico podem hoje ser solucionados em computadores pessoais de baixo custo. A computação tornou-se uma aliada indispensável no desenvolvimento de novas tecnologias por permitir que experimentos e avaliações sejam realizados durante a fase de concepção, antes mesmo da construção do primeiro protótipo. Não é diferente para os motores de combustão interna. O entendimento e desenvolvimento de novos conceitos requerem cada vez mais o auxílio de ferramentas computacionais capazes de realizar simulações CFD (dinâmica dos fluidos computacional, do inglês, *computational fluid dynamics*) 3D e da combustão (Bohbot et al., 2009).

Resultados numéricos promissores vêm sendo obtidos para o melhor entendimento dos mecanismos envolvidos na combustão Diesel-gás (Hountalas et al, 2002; Singh et al, 2004; Miao e Milton, 2005; Cordiner et al., 2007; Liu et al., 2007). Contudo, nota-se que os modelos disponíveis ainda possuem certas limitações, principalmente no que diz respeito à simulação de casos com baixos carregamentos no eixo e altas taxas de substituição do Diesel pelo gás.

O presente trabalho é um dos resultados da parceria estabelecida entre a PUC-Rio, Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás) e IFP, antigo Instituto Francês do Petróleo. Este último é o desenvolvedor de um consagrado código numérico denominado IFP-C3D, o qual possui a simulação de motores Diesel como uma de suas principais aplicações. Tal código foi considerado uma excelente plataforma para o desenvolvimento de adaptações à simulação Diesel-gás.

1.2 Objetivo

Considera-se que este trabalho seja a primeira etapa no desenvolvimento de um simulador numérico eficaz para suportar projetos desenvolvidos nesta área pelo Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Desta forma, como objetivos principais, tem-se:

- Adaptação de um modelo existente da auto-ignição de combustíveis para o caso da combustão Diesel-gás
- Implementação computacional deste modelo no código-fonte desenvolvido pelo IFP
- Verificação numérica do simulador 3D

Pretende-se que a metodologia apresentada neste trabalho possa servir como referência para o desenvolvimento de outras adaptações, como por exemplo, para a simulação de motores Diesel-etanol.

1.3 Metodologia

A primeira parte deste estudo foi realizada durante um período de 6 meses no IFP, onde toda a sua excelente estrutura foi disponibilizada para o conhecimento do código-fonte e início do desenvolvimento das adaptações desejadas. A conclusão desta etapa do projeto ocorreu na PUC-Rio.

Quanto ao texto, é apresentada no capítulo 2 a revisão bibliográfica do tema. São identificadas as características gerais dos motores Diesel-gás, seguidas de trabalhos de simulação numérica disponíveis na literatura. Por fim, apresenta-se de maneira geral o IFP-C3D, com ênfase no seu principal modelo da combustão.

O capítulo 3 é dedicado à explicação de um dos modelos da auto-ignição disponíveis no IFP-C3D, para o qual são propostas as adaptações descritas no capítulo 4.

No capítulo 5 são mostradas as verificações numéricas realizadas. Este trabalho é concluído no capítulo 6.