

6 Conclusões e sugestões

Considerando os objetivos propostos, relacionados no Capítulo 3, as metodologias e os resultados obtidos, descritos ao longo dos Capítulos 4 e 5, este Capítulo apresenta um resumo consolidado do presente trabalho e destaca as suas conclusões.

Primeiramente são consideradas as conclusões referentes à modelagem computacional da combustão em motor comercial do ciclo Otto. Em seguida são relacionadas as conclusões referentes à modelagem computacional da autonomia urbana em veículos leves do ciclo Otto. Posteriormente, é considerada a modelagem computacional dos parâmetros de desempenho em veículos leves do ciclo Otto, dividida em duas partes: tempos de retomada de velocidade e parâmetros de desempenho em condições de velocidade constante.

Após as conclusões são relacionadas algumas sugestões para continuidade dos trabalhos e evolução do tema modelagem computacional de motores/veículos voltada para o desenvolvimento de combustíveis.

6.1 Modelagem computacional da combustão em motor comercial

A partir dos dados experimentais de Machado (2012), foi estabelecida com sucesso uma metodologia para a modelagem computacional das curvas de pressão no interior do cilindro de um motor comercial do ciclo Otto, a qual utiliza como dados de entrada, além das características do motor, as propriedades dos combustíveis.

A velocidade de propagação de chama (v_{pch}) exerce papel fundamental na obtenção das curvas de pressão simuladas. Destaca-se, como contribuição inédita do presente trabalho, a adaptação do expoente ξ do fator de turbulência, presente na equação de v_{pch} proposta por Machado (2012) e estabelecido no presente trabalho como uma função dependente do avanço de ignição. A velocidade laminar de referência (S_{LO}), que é uma propriedade do combustível, também merece atenção especial. Os seus valores para combustíveis comerciais, que possuem composição

complexa, devem ser obtidos experimentalmente. Os experimentos para a obtenção de S_{LO} requerem aparatos específicos, como câmaras de volume constante, que não estão amplamente disponíveis.

Como subprodutos, foram obtidos modelos para o expoente politrópico, o avanço de ignição e a eficiência volumétrica, todos, em última análise, como funções de propriedades dos combustíveis. Estes parâmetros servem como dados de entrada para os modelos de combustão.

Os valores de pressão média efetiva indicada (*IMEP*) e torque obtidos a partir das curvas de pressão simuladas apresentaram variações percentuais, em geral, de até 3% e tendências de resultados semelhantes às aquelas obtidas para os valores experimentais, conforme se variou os combustíveis. Além disso, a grande maioria dos resultados simulados de pressão máxima situou-se dentro da faixa de variação de 5% e os ângulos em que a pressão máxima ocorreu nas simulações distanciaram-se em até 2 graus do eixo de manivelas daqueles observados nos experimentos.

A modelagem computacional da combustão serve como ferramenta básica para o estudo da influência da composição e das propriedades dos combustíveis no desempenho do motor. Sendo assim, auxilia no melhor entendimento sobre os resultados de parâmetros como a potência e o consumo de combustível.

6.2 Modelagem computacional da autonomia urbana em veículos

A partir do banco de dados de resultados de autonomia urbana do CENPES, foi desenvolvida, com sucesso, uma metodologia para a modelagem computacional da autonomia urbana em veículos leves do ciclo Otto, em função das propriedades dos combustíveis.

Como parte do desenvolvimento, foi proposta adaptação da fórmula de cálculo da autonomia pelo método do balanço de carbono adotada na norma brasileira. Além disso, foi estabelecida modelagem computacional para as emissões de CO₂ equivalente ao longo do ciclo de condução normatizado. Estas atividades se constituem como contribuições inéditas do presente trabalho para o avanço do tema modelagem da eficiência de veículos com foco no desenvolvimento de combustíveis.

Devido às características particulares de projeto e de calibração de cada veículo, não foi possível estabelecer um modelo único para os treze veículos

estudados. No entanto, foi possível observar que a autonomia urbana é afetada mais fortemente pela massa específica e pelo poder calorífico dos combustíveis.

Dessa forma, foram obtidos modelos para treze veículos, representando as fases L2 a L6 do PROCONVE. Os modelos apresentaram resultados que se situaram, em geral, dentro da faixa de incerteza de medição do ensaio de autonomia em dinamômetro de chassi, de 1,5% ou, no máximo, até 3%, percentual coerente com outros trabalhos de modelagem do consumo de combustível. Mesmos nos casos em que as variações foram sutis, menores que a incerteza do ensaio, as simulações foram capazes de seguir as tendências experimentais.

Como os modelos foram desenvolvidos a partir de uma base de dados existente, as suas faixas de aplicação, para algumas propriedades, ficaram restritas. Com o aumento da base de dados do CENPES ou com a realização de uma campanha de testes específica para maximizar as suas faixas de aplicação, os modelos poderiam atender a maiores possibilidades de simulações da autonomia.

6.3 Modelagem computacional dos parâmetros de desempenho em veículos

A modelagem dos parâmetros de desempenho em veículos se baseiou em dados levantados para o presente trabalho, incluindo as análises físico-químicas de 15 formulações reduzidas e os resultados experimentais obtidos com dois veículos representativos da frota circulante.

6.3.1 Retomada de velocidade

Foi desenvolvida, com sucesso, uma metodologia para modelagem computacional dos tempos de retomada de velocidade, nos intervalos de 40 a 80 km/h e 60 a 100 km/h, em dois veículos representativos da frota circulante. Os tempos experimentais foram diretamente correlacionados com propriedades dos combustíveis. Para tanto, foi estabelecido um fator de potência (F_{POT}), que representa uma combinação das propriedades consideradas mais influentes no desempenho dos veículos: octanagem, massa específica, poder calorífico, teor de etanol e relação ar-combustível. Este fator se caracteriza como contribuição inédita do presente trabalho para a evolução da modelagem do desempenho de motores e veículos focada no desenvolvimento de combustíveis.

Os resultados simulados dos tempos de retomada de velocidade se enquadraram na faixa de 3% de diferença em relação aos resultados experimentais. Este é o percentual de variação aceito em ensaios de pista. Além disso, a grande maioria dos resultados simulados também se enquadrara dentro da incerteza experimental dos ensaios em dinamômetro, estimada em 1,2%. As tendências de resultados foram as mesmas nos experimentos e nas simulações, conforme se variou os combustíveis.

Para a validação dos modelos, foram comparados simulações e experimentos, ambos realizados com combustíveis comerciais. Os bons resultados obtidos comprovam que as formulações reduzidas, base para a geração dos modelos, representaram com sucesso o desempenho de combustíveis reais nos dois veículos.

6.3.2 Condições de velocidade constante

Foi estabelecida, com sucesso, uma metodologia para modelagem computacional de parâmetros de desempenho de veículos em condições de velocidade constante. Também foi estabelecido, de forma inédita, um fator de potência modificado (F_{POT^*}), utilizado para desenvolver os modelos de quatro parâmetros de desempenho: potência, consumo de combustível, avanço de ignição e lambda, como funções de propriedades dos combustíveis. A partir dos resultados destes modelos foi possível obter os valores simulados das eficiências volumétrica, térmica, mecânica e global dos veículos.

Os valores do erro quadrático médio percentual ($EQM\%$) para os modelos de predição dos parâmetros de desempenho em condições de velocidade constante, respeitaram se situaram dentro da faixa de incerteza experimental dos ensaios. Além disso, apresentaram diferenças percentuais em relação ao experimento de até 3%, critério estabelecido com base em outros trabalhos de modelagem de motores/veículos e também foram capazes de reproduzir as tendências observadas nos experimentos.

Adicionalmente, foi desenvolvida metodologia para obtenção dos tempos de retomada de velocidade a partir dos resultados em condições de velocidade constante. Esta metodologia inclui a determinação das perdas mecânicas presentes no veículo tanto em pista, como em dinamômetro.

As simulações dos tempos de retomada nos intervalos de 40-80 km/h e 60-100 km/h resultaram nas mesmas tendências verificadas no experimento, apesar de em casos isolados terem extrapolado o limite de aceitação já mencionado, de 3%.

O cálculo dos tempos de retomada de velocidade, a partir de dados experimentais em condições de velocidade constante, viabiliza a obtenção de resultados transientes em veículos a partir de dados em condições permanentes obtidos, por exemplo, em bancada de motor e de chassi.

No entanto, foi verificado que existe um fator a ser aplicado aos tempos de retomada em dinamômetro de chassi calculados a partir de resultados em condições de velocidade constante. Esse fator se deve às diferenças entre o comportamento dos veículos em regimes permanente e transiente. Basicamente, essa diferença está no comportamento do avanço de ignição, que em regime transiente não alcança os mesmos valores observados no regime permanente.

6.4 Conclusões gerais

As metodologias desenvolvidas neste trabalho podem ser generalizadas com o objetivo de estabelecer modelos computacionais para avaliação da combustão, eficiência e desempenho de combustíveis em motores e veículos de diferentes tecnologias. Dessa forma, é possível reproduzir os efeitos de modificações nas características dos combustíveis nas tecnologias presentes na frota circulante ou mesmo em tecnologias novas que estejam em vias de introdução no mercado nacional.

É esperado para as próximas décadas um cenário de desenvolvimento contínuo nos segmentos de motores de combustão interna e combustíveis. As metodologias e modelos computacionais desenvolvidos no presente trabalho, contribuem para o melhor entendimento dos efeitos da composição e das propriedades dos combustíveis nos motores e veículos, auxiliando na formulação de combustíveis mais eficientes.

Com relação aos aspectos materiais, a aplicação da modelagem computacional no processo de desenvolvimento de combustíveis resulta na redução da demanda por ensaios experimentais e, conseqüentemente, na diminuição de prazos e de custos do processo em questão.

6.5 Sugestões

Com relação às sugestões para continuidade dos trabalhos podem ser relacionadas as seguintes atividades:

- Levantamento de um banco de dados de velocidades de chama laminares (S_{LO}) na condição padrão de componentes e correntes utilizadas em formulações de combustíveis. Estes dados permitirão a realização de estimativas de S_{LO} de misturas e combustíveis comerciais para utilização nos modelos computacionais de combustão em motor desenvolvidos neste trabalho ou em modelos que venham a ser desenvolvidos no futuro;

- Realização de campanhas de testes específicas para ampliação das faixas de aplicação dos modelos de autonomia urbana, utilizando combustíveis com propriedades tais, que cubram ou até mesmo excedam as variações permitidas em especificações, a fim de estudar e viabilizar aplicações especiais;

- Desenvolver modelos de retomada de velocidade e parâmetros de desempenho para veículos equipados com outras tecnologias, tal como a injeção direta de combustível, ou com outras estratégias de calibração do motor;

- Desenvolver e aplicar as metodologias apresentadas neste trabalho para a modelagem computacional de motores e veículos a diesel, contemplando também a adição de biodiesel;

- Ampliar o trabalho para o campo das emissões de poluentes em veículos, desenvolvendo metodologias e modelos computacionais. Isso demandará, previamente, o estudo aprofundado da influência da composição e das propriedades dos combustíveis nesse quesito, considerando ainda as particularidades de calibração dos motores.