

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES DIESEL – METODOLOGIA DE TESTES EM BANCO DE PROVAS

Everton Lopes da Silva¹, Carlos Roberto de Camargo¹, Lucas Lazáro Squaiella e Juliano Pallaoro de Souza¹

¹MAHLE Metal Leva S/A – Centro Tecnológico

E-mails: everton.silva@br.mahle.com, carlos.camargo@br.mahle.com,
lucas.squaiella@br.mahle.com, juliano.pallaoro@br.mahle.com,

RESUMO

Demandas provenientes da legislação e do mercado visando melhoria da eficiência energética dos motores Diesel que equipam veículos pesados têm direcionado a indústria automotiva a desenvolver novas tecnologias.

A medição de consumo de combustível com alta acuracidade em banco de provas de motores à combustão interna é complexa, devido a grande quantidade de condições de contorno as quais influenciam os resultados. Com base neste desafio a empresa MAHLE desenvolveu um protocolo de teste para determinar o consumo de combustível de motores Diesel com alta precisão, em condições estacionárias e dinâmicas, reproduzindo ciclos representativos para aplicação em campo, suportando o desenvolvimento de novas tecnologias.

INTRODUÇÃO

Melhorar a eficiência dos veículos é essencial para reduzir os custos de operação para o usuário, a poluição atmosférica com foco nos GHG (Gases de efeito estufa) e aumentar a segurança energética.

Conforme acordo realizado no COP21, vários países tem acordo de reduzir drasticamente as emissões de GHG até 2030, como exemplo, a união europeia desdobrará ações para reduzir 40% tais emissões até 2030, tendo como base as emissões de 1990. Já o Brasil tem a meta de redução de 43% até 2030, tendo o ano base às emissões de 2005. [8]

Este desafio somente poderá ser alcançado através de programas para aumento da eficiência energética das áreas consumidoras mundiais, como setor de transporte, indústria, geração de energia e agronegócio. Para o setor de transporte, que é o foco deste trabalho, a melhoria da eficiência dos motores à combustão e a aplicação de combustíveis renováveis, são os principais caminhos para o alcance destas metas.

Enquanto as emissões de CO₂ de novos veículos de passeio e vans estão sucessivamente em redução, para caminhões e ônibus que produzem aproximadamente 25% das emissões de CO₂ do setor de transporte na Europa, não havia perspectiva de redução destas emissões para este segmento.[8] Em maio de 2014 a legislação Europeia adotou como medida analisar os dados de consumo de combustível através de sistema computacional chamado VECTO (*Vehicle Energy Consumption Calculation Tool*) qual através das medições de emissões de CO₂ desta

classe de veículos definirá uma política para certificação de novos veículos nos países da comunidade Europeia.[7]

Já nos Estados Unidos, em 2010 o governo lançou um programa denominado *Supertruck* onde foi definido que *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) e *US Environmental Protection Agency* (EPA), devem trabalhar em conjunto para estabelecer os parâmetros para redução das emissões de CO₂ e aumento da eficiência energética dos veículos médios e pesados. Empresas e entidades foram escolhidas para desenvolver tecnologias que serão aplicadas no mercado prevendo o aumento da eficiência dos veículos entre 6% à 23% de um veículo ano-modelo 2017, comparado a um veículo ano-modelo 2010.

Em 2016 houve novo lançamento, o programa *SupertruckII*, onde empresas e institutos foram escolhidos e financiados pelo governo americano para desenvolver e demonstrar tecnologias para aumentar a eficiência de veículos pesados modelo (*Class 8*), modelo mais comum no transporte rodoviário dos Estados Unidos. [9]

Para o Brasil, atualmente está sendo discutida uma nova política industrial do setor automotivo, denominada ROTA2030, qual incluirá entre outras políticas, o programa de emissões gasosas e eficiência energéticas para veículos leves e pesados.

Existem diversos campos para desenvolvimento de tecnologias e estão vinculadas ao veículo como um todo, tais como:

No veículo: massa, transmissão, potência resistiva (aerodinâmica, contato ao solo) e carga.

No motor: atrito, combustíveis avançados (biocombustíveis e combustíveis de alta octanagem), sistemas de gerenciamento térmico, otimização de auxiliares (direção hidráulica, alternadores, ar condicionado) e recuperação de energia em sistemas de escapamento. [1][3]

Este trabalho consiste em demonstrar um protocolo de medição de consumo de combustível em banco de provas, com o foco apenas no motor. Uma vez que o motor à combustão tem se tornado cada vez mais eficiente, cada modificação adicional pode ter uma contribuição pequena o suficiente para ser confundida com erros típicos da medição de consumo de combustível. Segundo Silva, E.L; et al [2], para que seja possível desenvolver tecnologias para redução de consumo é necessário uma repetibilidade de ± 1 g/kWh na medição. A repetibilidade da medição pode ser influenciada por diversos fatores como: configuração, instalação, operação e precisão dos equipamentos de medição de consumo, temperatura do ar, pressão atmosférica, poder calorífico do combustível, estabilidade da temperatura do combustível e óleo lubrificante, tempo de estabilização antes da medição, precisão na determinação do torque e na rotação do motor, bem como estabilização de parâmetros do motor que influenciam na combustão.

Neste trabalho será apresentado o protocolo de teste proposto para determinação de consumo de combustível em motores Diesel em banco de provas de motores (dinamômetros) em ciclos estacionários e dinâmicos. A metodologia de abordagem para elaboração deste protocolo consistiu principalmente em definir as condições de contorno que influenciam a medição e que necessitam de um controle ou atenção especial para redução da dispersão, bem como definir a sequência de execução do teste e os critérios de aceitação do resultado obtido. Isso é chave para o desenvolvimento de novos componentes de motor capazes de reduzir o consumo de combustível.

1. DESENVOLVIMENTO

A necessidade de acuracidade e baixa dispersão nas medições, gerando resultados estáveis e repetitivos, é o principal fator de sucesso deste protocolo, pois permite detectar contribuições pequenas oriundas dos novos componentes.

Os testes realizados para o desenvolvimento do protocolo e os testes descritos neste trabalho foram executados no laboratório de motores do Centro de Tecnologia da MAHLE Metal Leve S/A em Jundiaí - SP. O banco de provas utilizado para os experimentos possui sistemas automatizados de controle dos regimes do motor e aquisição de dados, permitindo assim um processo pouco influenciado pela intervenção humana. Todas as condições de contorno para o funcionamento do motor, tais como, controle das temperaturas de trabalho dos fluidos de arrefecimento e lubrificação, foram controlados de acordo com as faixas normais de trabalho do motor.

1.1. EQUIPAMENTOS

Para o desenvolvimento deste protocolo, um motor à Diesel para veículos pesados foi utilizado conforme características abaixo:

Tabela 1. Dados do motor Diesel utilizado

Ciclo	Diesel
Tipo	6 Cilindros em linha
PME Max	2.3 Mpa
PCP Max	18 Mpa
Taxa de Compressão	18,5:1
Deslocamento Volumétrico	12,0 l
Potência Máxima	335 KW
Torque Máximo	2200 Nm

O motor instalado no banco de provas é representado na figura 1.



Figura 1. Banco de Provas de Motores do Centro de Tecnologia da MAHLE

Para que fosse possível alcançar baixa dispersão de medição, a aplicação dos seguintes sistemas foi realizada:

- Medição de Combustível: Medidor de fluxo de combustível do tipo Coriolis, conforme figura 2 e controlador de temperatura de combustível [10].



Figura 2. Medidor Coriolis

Com a utilização deste medidor de fluxo de combustível é possível a medição de forma contínua até a taxa de 10Hz, obtendo assim grande população amostral que permitira análise mais detalhada da dispersão da medição.

- Sistema de análise da combustão: Medição de Pressão de Cilindro através de sensores piezoelétricos, conforme figura 3.



Figura 3. Sistema para análise da combustão[6]

O sistema de análise da combustão tem a principal função de avaliar a queima do combustível e geração do trabalho, permitindo a identificação de qualquer anormalidade que possa influenciar no resultado e na repetibilidade da medição.

Os demais sistemas utilizados estão integrados no banco de provas de motores e são convencionais para este tipo de aplicação.

Durante a execução dos testes os parâmetros mais importantes a serem monitorados e controlados com baixa dispersão são:

- Temperatura e pressão do ar de admissão do motor
- Temperatura e pressão do ar após cooler
- Temperatura do líquido de arrefecimento
- Temperatura e pressão do óleo lubrificante
- Temperatura o do combustível
- Início das injeções
- Pressão de injeção
- Posição do pedal de acelerador
- Tensão de alimentação da ECU
- Pressão do turbo alimentador
- Posição do atuador do turbo
- Correções pela ECU

- Restrição de escapamento

1.2. MÉTODOS

Para avaliação do consumo de combustível, é necessário avaliar em condições estacionárias (mapeamento do envelope motor e condições de aplicação) conforme figuras 4, 5 e 6 e dinâmicas (ciclos de emissões) conforme figura 8 e 9.

1.2.1. Medições Estacionárias

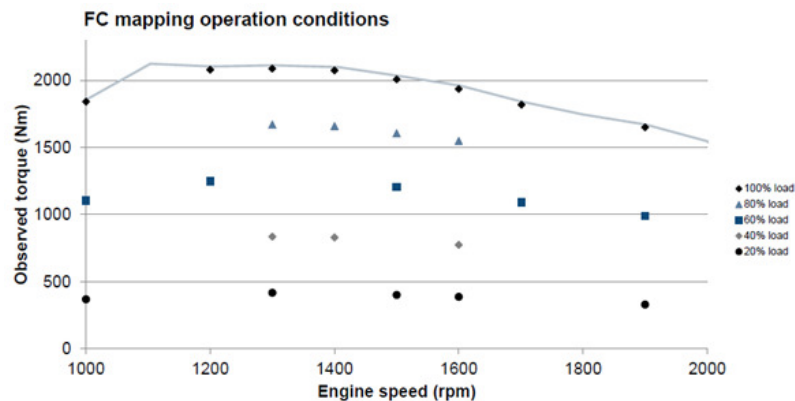


Figura 4. Pontos escolhidos para mapeamento do motor (estacionário)

Os pontos do mapeamento são definidos levando em consideração ciclos conhecidos de emissões como o ESC (*European Steady State Cycle*) e o WHSC (*World Harmonized Steady Cycle*), assim as análises comparativas podem ser realizadas referenciando condições já conhecidas pelos clientes. [11]

Como opcional, é possível também a avaliação em condições de aplicação em campo indicada pelo fabricante do veículo, como por exemplo:

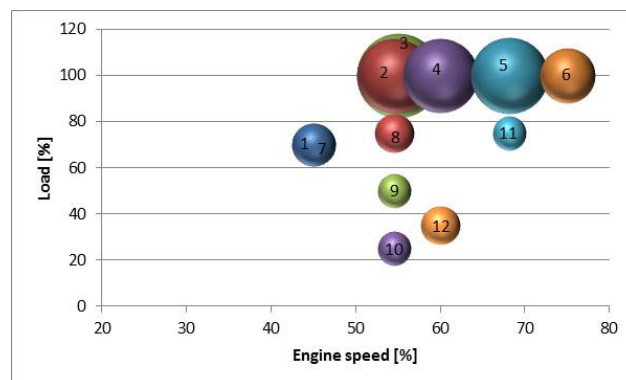


Figura 5. Exemplo de mapeamento de motor reproduzindo aplicação rodoviária.

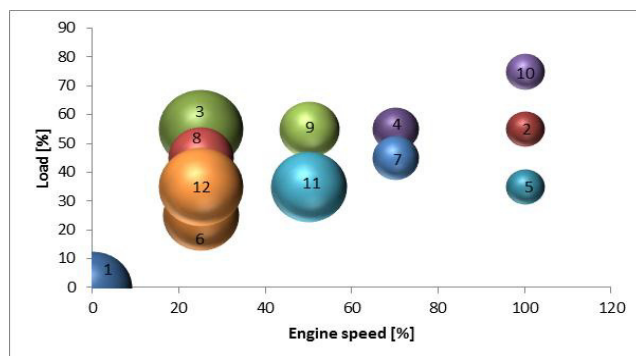


Figura 6. Exemplo de mapeamento de motor reproduzindo aplicação urbana.

Antes de cada medição o motor é estabilizado até que a incerteza da medição de consumo de combustível seja inferior a 0,2%, considerando o desvio padrão das últimas 30 medidas aquisitadas a 1 Hz. Após a estabilização são executadas 10 aquisições de dados consecutivas, sendo cada uma a média de 30 segundos.

Todos os passos do mapeamento são repetidos por três vezes, de forma que um mapeamento completo do motor será constituído pela média de três ciclos de medição, como representado na figura 7.

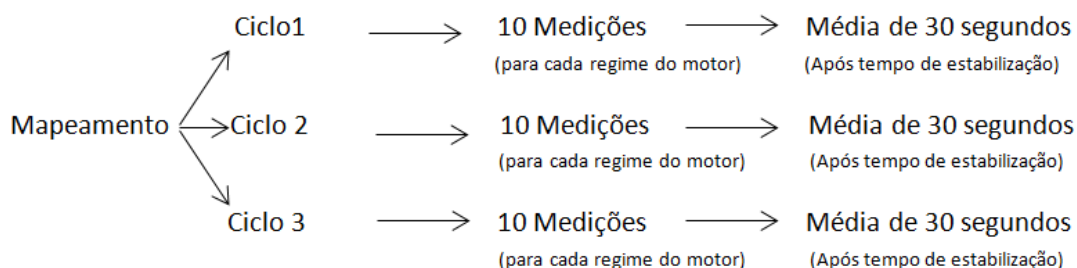


Figura 7. Sequência de medição.[2]

No caso de comparativo de pacotes de componentes de motor, todo o procedimento é executado para uma configuração referência do motor e novamente utilizando o pacote de componentes proposto. Entre as montagens do motor deve-se tomar o cuidado para que toda a instrumentação seja mantida.

Durante cada ciclo de aquisição de dados o desvio máximo aceitável entre as 10 medições consecutivas é de 0,5%. A diferença entre as médias de cada ciclo deve ser menor do que 0,3% para que o ponto do mapa seja considerado válido.

1.2.2 Medições Dinâmicas

As medições dinâmicas são realizadas em ciclos conhecidos tais como ETC (*European Transient Cycle*) e WHTC (*World Harmonized Transient Cycle*).

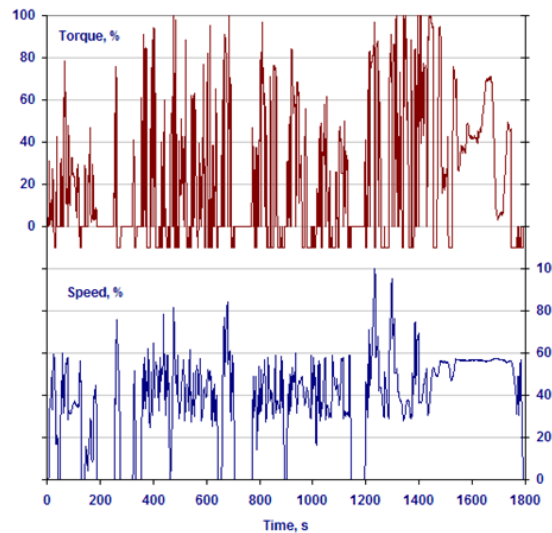


Figura 8. Ciclo WHTC.

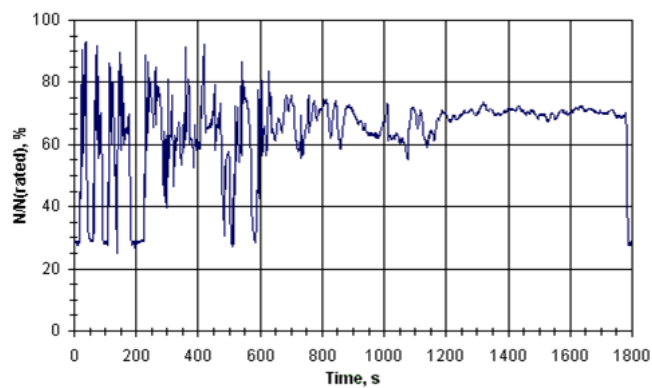


Figura 9. Ciclo ETC.

As medições dinâmicas são realizadas no mínimo 3 vezes cada ciclo para cada versão avaliada, aceitando dispersão máxima de 0,5% entre elas. As variáveis medidas e controladas são as mesmas das condições estacionárias.

Todas as medições devem ser realizadas utilizando o mesmo lote de combustível.

1.3 RESULTADOS

Após a reprodução dos ciclos, seguindo os critérios estatísticos adotados, é possível realizar a avaliação do impacto da adoção de uma nova tecnologia em diversas condições de aplicação, sendo desde os ciclos de emissões já conhecidos, como condições de estrada ou mesmo um ciclo que represente a aplicação do motor em questão. Neste exemplo foram realizadas alterações geométricas no pacote de anéis de pistão.

O resultado é demonstrado conforme figura 10:

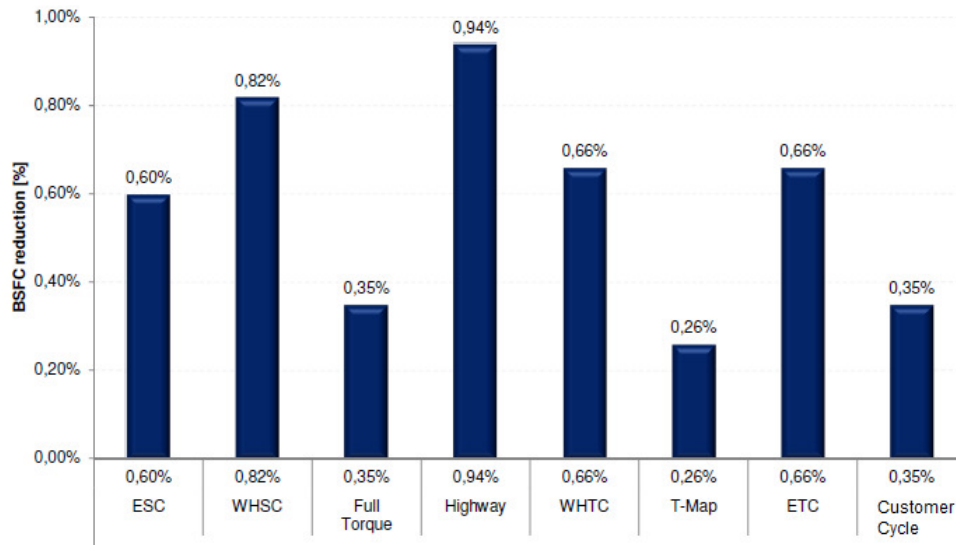


Figura 10. Resultados (melhoria) do consumo de combustível em comparação ao motor original.

CONCLUSÃO

Através da elaboração do protocolo específico para determinação de consumo de combustível em motores diesel, no qual os principais parâmetros de influência na variação dos resultados são identificados e controlados, foi possível estabelecer um procedimento de medição de consumo de combustível com baixa dispersão.

Os resultados obtidos demonstraram que as dispersões nas medições são dependentes da região de trabalho do motor. Nas regiões de cargas menores as dispersões obtidas foram da ordem de 0,3%, enquanto que em regiões de cargas mais altas as dispersões obtidas foram da ordem de 0,1%.

As condições dinâmicas também afetam a acuracidade da medição, pois em condições transiente os controles dos parâmetros se tornam mais difícil, neste caso a dispersão obtida foi na ordem de 0,4%.

Assim, mantendo as medições de combustão estabilizadas e conhecidas, podem-se comparar variações no consumo de combustível que sejam maiores que a dispersões apresentadas, como sendo o resultado das modificações dos componentes.

Sendo assim, o protocolo se apresenta com uma ferramenta importante para o desenvolvimento de componentes de motor como também para embasamento dos fabricantes de motor sobre as diferentes áreas a serem melhoradas, seja por componentes de menor atrito, sejam por soluções relacionadas aos sistemas de combustão.

REFERÊNCIAS

- [1] HEYWOOD, John. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill, 1988
- [2] SILVA, E.L; BERGANTIM, L. C.; CAMARGO,C; SOUZA, P.J. **Fuel Consumption Measurement Protocol For Diesel Engines**. SIMEA.2014.
- [3] SILVA, E. L. **Propostas para otimização do consumo energético em motores de combustão interna do ciclo Otto através da redução das perdas por atrito**. 2013, 73p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [4] Basshuysen, R.; Schafer, F. **Internal combustion Engine Handbook**. SAE International, 2004
- [5] SILVA, E. L.; BERGANTIM, L. C.; CAMARGO, C. R.; CARLINI, R. Z. **Monocylinder floating liner engine for friction determination**. SIMEA. 2012
- [6] **Combustion measurement (Indicating)**. Disponível em: <https://www.avl.com/combustion-measurement> Acesso em: 28/05/2017.
- [7] NIKIFOROS,G; FONTARAS,G. **Report on VECTO Technology Simulation Capabilities and Future Outlook**. European Union 2016.
- [8] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en. Acesso em 28/05/2017.
- [9] <https://energy.gov>. Acessado em 28/05/2017
- [10] <https://www.avl.com/-/avl-fuel-mass-flow-meter-and-fuel-temperature-control>, acessado em 28/05/2017
- [11] <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/#eu>, acessado em 28/05/2017