

ANÁLISE COMPARATIVA DA CURVA DE TORQUE E POTÊNCIA DO MOTOR EA211 1.0 L TSI E MPI

Yago Levi Acypreste Benazio, yagolevi.yl@gmail.com¹
Fábio Cordeiro de Lisboa, fabiolisboa@unb.br²

^{1,2}Universidade de Brasília - Campus Gama,

Resumo. O presente artigo tem como objetivo comparar as curvas de torque e potência do motor VW EA211 1.0 L 3 cilindros na versão aspirada (MPI) e sobrealimentada com injeção direta (TSI), obtidas através de ensaios auxiliados por dinamômetros de rolo de corrente parasitas, ambos funcionando com etanol brasileiro como combustível. Baseado na norma de ensaio para motores NBR ISO 14396 de 2018 e metodologia experimental de exploração dos erros sistemáticos e aleatórios inerentes ao sistema e a variabilidade natural do mensurando. Diante dos resultados obtidos e da comparação das curvas para o motor na sua versão aspirada com injeção homogênea no coletor e na versão com turbo compressor e injeção direta de combustível, foi possível notar o ganho de rendimento proporcionado pela sobre pressão na admissão no caso do TSI, de que a diminuição dos motores e uso de tecnologias de injeção de combustível aliadas aos compressores permite extrair melhor o desempenho dos motores menores sem deixar de lado o consumo específico do motor.

Palavras chave: torque e potência, ensaio de motores, injeção direta, etanol.

Abstract. This article aims to compare the torque and power curves of the VW EA211 1.0 L 3-cylinder engine in the naturally aspirated (MPI) and turbocharged with direct injection (TSI) versions, obtained through tests aided by eddy current roller dynamometers, both running on Brazilian ethanol as fuel. Based on the 2018 NBR ISO 14396 engine test standard and experimental methodology for exploring the systematic and random errors inherent in the system and the natural variability of the measurand. In view of the results obtained and the comparison of the curves for the engine in its aspirated version with homogeneous injection in the manifold and in the version with turbo compressor and direct fuel injection, it was possible to notice the efficiency gain provided by the overpressure in the admission in the case of the TSI, that the reduction of engines and the use of fuel injection technologies combined with compressors allow better performance to be extracted from smaller engines without neglecting the specific consumption of the engine.

Keywords: torque and power, engine testing, direct injection, ethanol.

1. INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia utilizada em motores de combustão interna vem ganhando importância devido a necessidade de redução de emissões de carbono na atmosfera (BRUNETTI, 2012). Neste contexto, a pesquisa aproveitou a estrutura instalada para dois projetos do programa rota 2030 (BRASIL, 2020) para demonstrar o ganho em eficiência energética entre dois modelos de motores nos quais as diferenças estão relacionadas à dinâmica de gases e ao controle da combustão. Para isso, apresenta-se uma análise das curvas características levantadas em dinamômetro dos motores VW EA211 MPI e seu idêntico EA 211 TSI, que utiliza carga estratificada e sobrealimentação.

O desenvolvimento dos bicos injetores diretos foi alavancado pelo motor de ignição por compressão, sendo o mais comum o ciclo diesel. Opera por meio de autoignição do combustível injetado na câmara de combustão no final do ciclo de compressão, a queima ocorre logo que entra em contato com a atmosfera de alta pressão e temperatura do ar comprimido. De modo geral motores que aproveitam maiores taxas de compressão suportadas pelo combustível são mais eficientes. Em motores sem injeção direta o ar é admitido com a porção de combustível demandada e assim não podem operar com elevadas taxas de compressão sob o risco de gerar detonações do combustível em mais de uma frente de chama, fenômeno conhecido como ondas de choque sonoras capazes de danificar componentes mecânicos do motor, contudo quando pode-se controlar o momento da injeção já no final do ciclo de compressão é possível trabalhar com taxas de compressão mais elevadas do que o habitual para certos combustíveis, somado a isso o uso de sobrealimentação por meio de turbocompressor permite ainda controlar a pressão inicial do ciclo aproveitando a energia dos gases de escape.

Segundo dados disponibilizados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2023), a produção de Etanol hidratado (E100) teve um aumento de 80% em 2019 em relação ao ano de 2012. Em 2019 foram produzidos 156.682.010 barris de etanol hidratado, o maior rendimento da série histórica de produção de barris entre 2012 e 2021. A partir desse ano a produção foi menor, mas mesmo assim apresenta aumento de 28% em 2021 comparado com 2012. Os dados demonstram que em pouco menos de dez anos houve um aumento expressivo da produção do etanol

hidratado em barris e que o mercado brasileiro não deixou de lado seu combustível alternativo à gasolina, demandados principalmente nas décadas marcadas por crises globais de petróleo.

Pretende-se com esse trabalho a investigação das diferenças mensuráveis no motor, buscando suas curvas características mediante ensaios normatizados para demonstrar e explorar o ganho de rendimento e eficiência em motores sobrealimentados e com injeção direta de combustível, em especial sobre o regime estratificado que o motor TSI opera com a gasolina, entretanto não há certeza de que a estratégia funcione para o Etanol brasileiro, uma vez que misturas estratificadas são pobres e portanto aumentam a temperatura da câmara piorando as emissões de poluentes. A estratificação do biocombustível oxigenado brasileiro com controle da queima e dos poluentes é o desafio atual das montadoras e está intimamente relacionado com a eficiência energética dos combustíveis líquidos, em especial o biocombustível derivado da cana de açúcar. Com o uso das tecnologias citadas é possível obter maior rendimento do combustível e aumentar a eficiência energética.

2. DESENVOLVIMENTO

Motores atuais movidos a gasolina são equipados com um sistema de injeção direta de combustível propriamente na câmara de combustão, isso permite que o motor trabalhe em dois modos distintos e de acordo com a carga. Uma delas é o modo de carga homogênea em que para elevadas cargas o combustível é injetado juntamente com o ar no momento da admissão. Outra forma para baixas cargas do motor é a estratificação da mistura injetada de combustível no tempo da compressão afim de formar uma mistura que seja heterogênea, na região próxima à vela de ignição ela se apresenta enriquecida e empobrecida ou mesmo somente ar nas demais regiões da câmara de combustão (MARTINS, 2006).

Os movimentos de turbulência causados no cilindro pelo movimento dos pistões e posicionamento das válvulas de admissão geram regiões de fluxo a favor e contra o direcionamento do leque de injeção de um motor com injetor posicionado na parte superior do cabeçote. Logo, o posicionamento e estratégia de injeção facilita a formação da mistura e permite o uso da estratificação da mistura (KIM, D. et al., 2021). Não somente para o controle da turbulência e mistura, o combustível pode ser injetado mais de uma vez, dosando a mesma quantidade em mais de um momento de injeção, uma parte do combustível do ciclo é injetado na admissão enquanto o restante só é injetado na compressão, pode-se comparar os resultados dessa estratégia em relação a um motor de carga homogênea e injeção única no ciclo (COSTA, M. et al., 2016).

O fenômeno de atomização do combustível se inicia com a abertura do bico injetor, a diferença entre a pressão da linha de combustível e do cilindro fazem com que o combustível ganhe velocidade, os efeitos aerodinâmicos facilitam as quebras, portanto, o tamanho das partículas de combustível e conseqüentemente a transformação do líquido em gás para a futura queima. O tamanho médio da gota de combustível injetado é inversamente proporcional ao diferencial de pressão a montante e a jusante da abertura do bico injetor. Quanto menor for o tamanho médio das gotas de combustível injetadas, maior será a área superficial total, essa que nada mais é do que a interface de contato entre o combustível atomizado e o ar presente nos cilindros, conseqüentemente isso facilita a troca de calor e a vaporização mais rápida do combustível e uma maior distribuição da mistura para facilitar a queima uma vez que o combustível precisa de se ligar ao oxigênio proveniente do ar admitido (BRUNETTI, 2018).

Os motores alternativos de combustão interna por faísca podem ser caracterizados individualmente por meio das propriedades analisadas que fornecem informações importantes sobre seu funcionamento, o que permite o estudo experimental para futuros aprimoramentos e melhorias afins de torna-los mais eficientes. Dados obtidos experimentalmente através de freios dinamômetros, equipamentos capazes de aferir o torque médio gerado e conseqüentemente a curva característica de cada propulsor (BRUNETTI, 2018).

2.1 Equações

As equações 1, 2 e 3 apresentam formas de se obter a potência de um motor quando se sabe o torque médio gerado e a velocidade angular do motor, em destaque a primeira equação que mostra a potência como produto vetorial do Torque pela velocidade angular, a equação 2 fornece a potência com base na frequência medida em rotações no tempo sendo segundos no caso, como é mais usual a medida de rotações por minuto (RPM) e que também é uma velocidade angular podemos usá-la para obter o resultado em cavalos vapor (CV) conforme demonstra a equação 3 com uso de velocidade em RPM e torque em quilograma força por metro.

$$N = T \times \Omega \tag{1}$$

$$N = 2\pi nT \tag{2}$$

$$N_{(cv)} = \frac{2\pi \cdot m \cdot T}{60 \cdot 75} = \frac{2\pi \cdot m \cdot T}{716,2} \quad (3)$$

Sendo:

- N : Potência Efetiva [CV];
- Ω : Frequência angular rad/s ;
- n : Frequência angular [rps];
- T : Binário de força (Torque) [$kgf \cdot m$];
- m : Frequência angular [rpm];

A equação 4 apresenta o consumo específico de combustível, expresso como a vazão mássica de combustível dividido pela potência gerada, dessa forma é possível comparar o consumo em motores de qualquer tamanho e potência, uma vez que o consumo é em relação a potência gerada.

$$C_e = \frac{\dot{m}_f}{N} \quad (4)$$

Sendo:

- C_e : Consumo específico [$kg/CV \cdot h$];
- \dot{m}_f : fluxo mássico de combustível [kg/s];

3. METODOLOGIA

3.1 Objetivo e metodologia geral

O principal objetivo deste trabalho é realizar uma comparação entre as curvas características de um motor de combustão interna por faísca com injeção homogênea sem sobre alimentação e o mesmo motor dotado de injeção direta de combustível e sobrealimentação na admissão (turbo compressor).

A metodologia do presente trabalho é de caráter indutivo, o método consiste em observação somada a experimentação dos fenômenos. Assim, parte-se do caso particular para o geral em busca de conclusões. A abordagem escolhida é a interatividade do método quantitativo e qualitativo, da forma que a combinação dessas abordagens permita uma exploração maior dos dados obtidos com o que foi apresentado na introdução (OLIVEIRA, 2011).

3.2 Método de ensaio dos motores e obtenção das curvas

No que diz respeito a metodologia dos ensaios dos motores, o procedimento é normatizado pela NBR ISO 14396 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011), que ainda tem parte complementar no que tange as emissões dos motores. Uma alternativa ao ensaio do motor diretamente no dinamômetro de bancada, é através do ensaio dos veículos equipados com os motores objeto de estudo no dinamômetro de chassi, equipamento que mede o torque e a rotação do veículo através das rodas de tração do veículo. A obtenção dos dados do motor instalado no laboratório se dá na forma de acoplamento do motor em um dinamômetro dinâmico de corrente alternada. Todo o gerenciamento do motor é feito através de uma injeção programável, um microcontrolador que permite alterar parâmetros de configuração dos mapas do motor. A ligação do motor ao dinamômetro foi realizada por meio de um eixo ligado a duas juntas deslizantes, que devido problemas apresentados foi substituída por um eixo do tipo cardam.

O conjunto do dinamômetro e absorvedor de corrente alternada bidirecional com tensão de 460 volts, transdutor de torque, computador de aquisição de dados DYNomite-Pro, acionamento eletrônico de controle de carga, interface de programação, banco de carga resistivo (arrefecido a ar) e chicote de dados de 28 canais. Essas são algumas das características do dinamômetro presente no laboratório, conta com banco de absorção de carga resistivo e módulo de acionamento do motor elétrico através do inversor de frequência variável (VFD), modo que permite frear e ou girar o motor mesmo com ele desligado, permitindo o cálculo das potências de atrito entre outros.

Esquemático de montagem do motor no laboratório

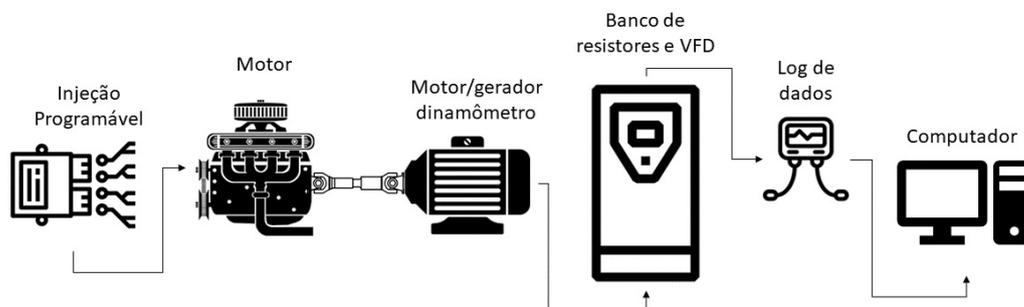


Figura 1. Esquemático de montagem da bancada do laboratório
FONTE: O autor (2022)



Figura 2. Dinamômetro de bancada do laboratório
FONTE: O autor (2022)

Outro tipo de ensaio adotado na pesquisa foi o de ensaio do automóvel equipado com motor TSI e outro com motor MPI no dinamômetro de chassi com freio de correntes parasitas, capaz de auxiliar as buscas por parâmetros de referência da pesquisa. No dinamômetro de chassi, o procedimento é colocar o veículo no dinamômetro, aprisioná-lo com as cintas nos pontos de fixação de forma que as cintas fiquem cruzadas para que a tensão tenha componentes ortogonais ao veículo e para que haja mais segurança no ensaio. Os veículos foram abastecidos com Etanol anteriormente a data do ensaio, de forma que ambos estivessem completamente abastecidos com o combustível desejado para o ensaio. Foram realizados no mínimo três passagens de teste com cada carro para que pudesse haver um tratamento dos dados obtidos para obtenção da média e dos respectivos erros e desvios, parcelas sistemáticas e parcelas aleatórias.

A obtenção de parâmetros foi feita por meio da porta serial OBD2 dos veículos testados para obter em tempo real os parâmetros que a central eletrônica fornece para leitura, permitindo assim obter através dos dados o consumo específico de combustível para cada velocidade angular do motor.

4. RESULTADOS

As Figuras 3 e 4 apresentam as curvas obtidas no ensaio de dinamômetro de chassi e curvas de consumo específico calculadas com os parâmetros obtidos via porta serial OBD2. Por fim, a Tabela 1 fornece um resumo dos principais resultados dos gráficos, sendo eles o maior torque e potência e o menor consumo específico dos dois motores.

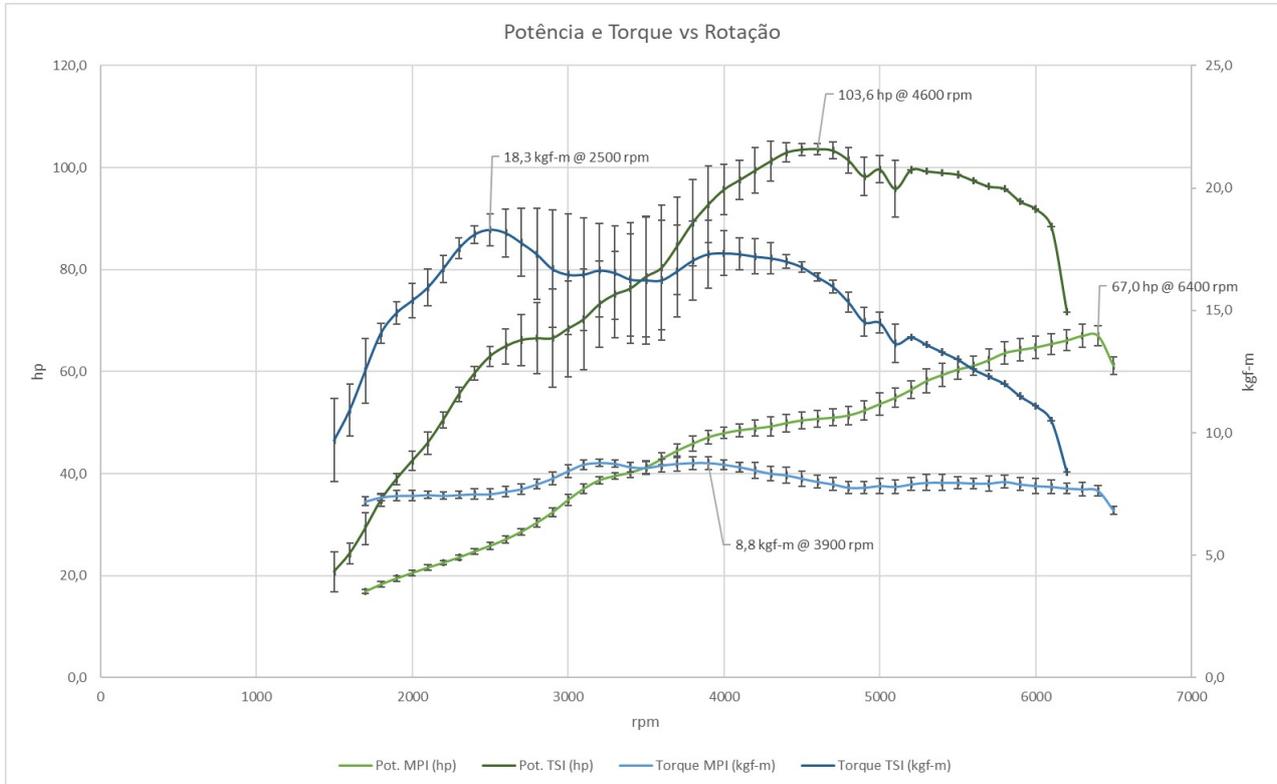


Figura 3. Curva de torque e potência motores tsi e mpi em teste de dinamômetro com intervalos de confiança
FONTE: Os autores (2022)

A Fig. 3 apresenta o gráfico do torque e potência do motor na versão aspirada MPI que apresenta elevada incerteza no início da curva, após determinada rotação a incerteza diminui dado o menor desvio padrão e variância das leituras obtidas em distintos ensaios, no caso em questão foram repetidos pelo menos três ensaios para determinar o erro associado com base na média mais ou menos um erro instrumental somado ao desvio padrão amostral. Na curva do motor TSI de torque e potência o comportamento da incerteza apresenta estabilidade em toda a faixa de rotações do motor, o que indica que o resultado obtido teve uma variância menor em relação à média calculada dos ensaios e por conseguinte um desvio padrão menor.

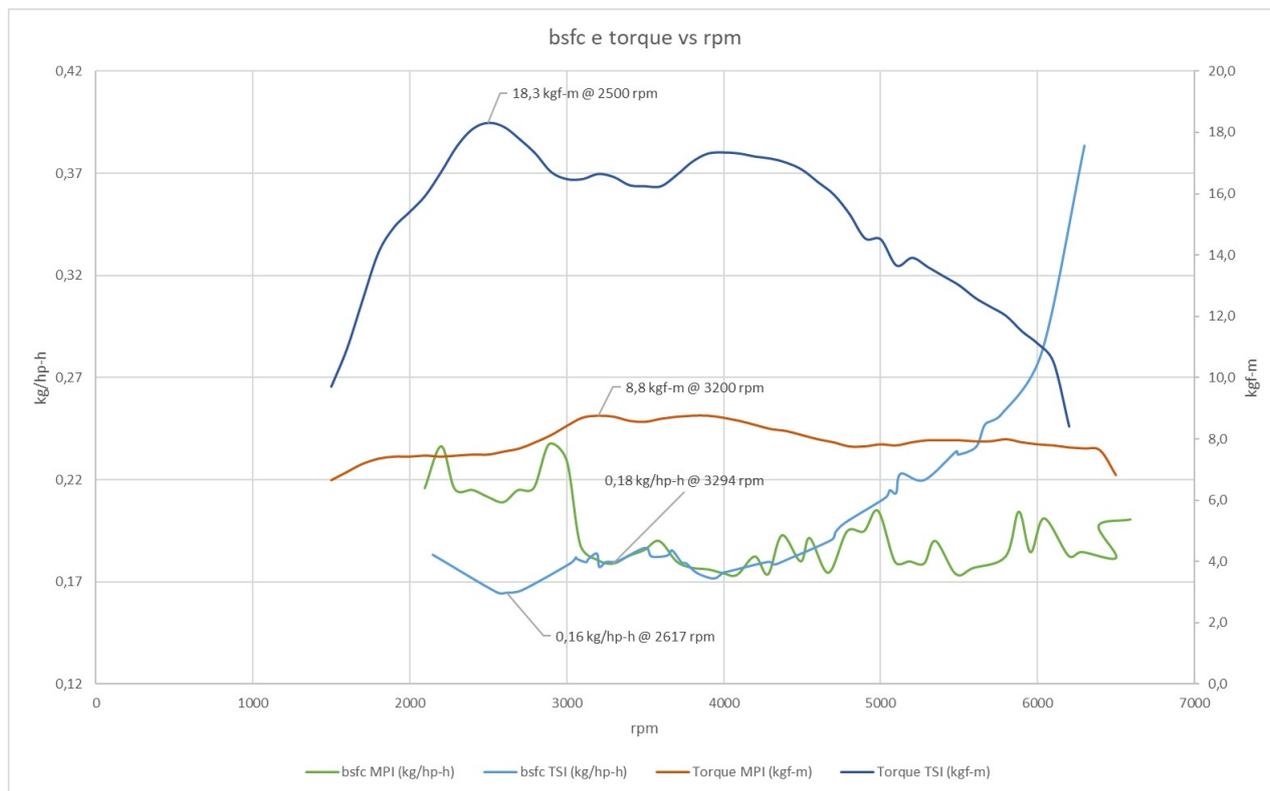


Figura 4. Curva de torque e bsfc motores tsi e mpi em teste de dinamometro com intervalos de confiança
FONTE: Os autores (2022)

A Figura 4 foi traçada a partir dos dados coletados via porta serial OBD2 (*on board diagnostics*). Os principais dados de interesse são a temperatura do ar da admissão, a pressão do ar da admissão, a rotação do motor segundo a ECM, o parâmetro lambda do sensor de oxigênio comandado pela ECM, o tempo de abertura dos bicos injetores. Dessa forma foi possível aferir aproximadamente a curva de BSFC (*Brake-specific fuel consumption*).

A Tabela 1 é um resumo dos principais resultados obtidos nos ensaios e nas aproximações das curvas de consumo, Apresenta a potência em termos de cavalo vapor e também em quilowatts que trata-se da unidade de medida da potência no sistema internacional (SI), assim como o torque descrito em Newton-metro (Nm) é uma unidade do SI. A potência do motor TSI mostrou-se cerca de 60% superior ao MPI e fornece potência máxima em 4.600 rotações por minuto contra 6.400 rotações por minuto do MPI, ou seja, enquanto o MPI precisa girar em rotação elevada e perto do limite de corte da ignição para gerar 67,0 cavalos de média nos ensaios contra os 103,6 cavalos de média da potência do TSI a uma rotação ligeiramente menor e mais confortável para o motor.

Tabela 1. Compilado dos principais resultados obtidos

	Motor TSI	Motor MPI
Potência [CV]	103,6 ± 5,1 a 4600 RPM	67,0 ± 3,4 a 6400 RPM
Potência [kW]	77,3 ± 3,8 a 4600 RPM	50,0 ± 2,5 a 6400 RPM
Torque [kgfm]	18,3 ± 0,9 a 2900 RPM	8,8 ± 0,4 a 3200 RPM
Torque [Nm]	179,5 ± 8,9 a 3100 RPM	86,3 ± 4,3 a 2800 RPM
Consumo específico [kg/HP h]	0,16 ± 0,01 a 3900 RPM	0,18 ± 0,01 a 4100 RPM

FONTE: O Autor (2022)

Outra característica que difere os motores é o comportamento do torque, que apesar de apresentarem torques máximos em regimes de velocidade parecidos, 3.200 para o MPI e 2.900 para o TSI, a curva do torque (Fig. 3) aponta para um comportamento parecido com uma constante e faz com que a potência do MPI cresça com aspecto linear conforme a rotação aumenta, já a motorização sobrealimentada e com injeção direta TSI (Fig 3) apresenta uma taxa de variação alta entre 1.500 RPM e 3.200 RPM que, pelo *boost* do compressor, dobra o valor torque médio aferido e apresenta o pico a 3.200 rotações por minuto, após essa rotação do motor o torque começa a reduzir, mas ainda em patamares elevados se comparado ao MPI, no entanto, a potência máxima do TSI já está disponível a 5000 rotações por minuto.

Por meio da curva traçada de consumo específico de combustível que, Fig. 4, desmontra o comportamento do consumo em quilogramas de combustível por hora e pela potência gerada. Percebe-se que o menor consumo de ambos os motores está na faixa onde o motor consegue fornecer o maior torque e que o motor TSI devido à potência superior gerada pelo compressor aliado ao aproveitamento da energia dos gases de escape e o uso da injeção direta de combustível consegue apresentar uma curva de consumo melhor se comparada à curva obtida do MPI.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo da estratificação do Etanol em veículos equipados com bico injetor direto e turbocompressor como alternativas aos bicos indiretos e motores aspirados visa aumentar o entendimento e evidenciar os ganhos com o uso dessas tecnologias. Sabe-se que ainda há um longo caminho na investigação do tema, sobretudo no que tange a questões delicadas como o controle de emissões e poluentes para atmosfera oriundos de queimas pobres na estratificação, no entanto, novos estudos e experimentações com os motores sobrealimentados de injeção direta abastecidos com etanol brasileiro podem melhor elucidar as questões que tratam do limite de pobreza no combustível injetado quando no modo estratificado. Encontrar pontos de possível estratificação aliados com o controle individual e preciso da centelha responsável pela queima deve ser testado e validado, permitindo obter o melhor ponto de ignição em relação ao momento da injeção da carga no ciclo da admissão.

A potência superior do motor sobrealimentado TSI comprova o ganho de rendimento e a otimização do mesmo que, para o mesmo volume total, consegue gerar cerca de 60% a mais de potência máxima e o dobro de torque máximo em relação ao MPI, contudo, é possível afirmar com base nos resultados obtidos pelas curvas de consumo específico que o motor TSI além de mais potente ainda consegue ter um consumo em relação à potência fornecida melhor que o motor MPI, fato que demonstra e evidencia o ganho de eficiência energética do motor equipado com o turbocompressor e bicos diretos. Vale ressaltar que mecanicamente o motor apresenta diversas melhorias como o contrapeso do virabrequim, o pistão mais resistente, a biela com colo maior, as válvulas de admissão e as de escape ligeiramente menores que a versão aspirada, além de outras diferenças, ou seja, apesar de ter o mesmo volume deslocado ou simplesmente capacidade cúbica iguais, os motores TSI e MPI têm diferenças relevantes até mesmo para suportar tal ganho de potência que pode ser entendido também como um aumento da pressão média específica dentro do motor durante a combustão; portanto implica a necessidade de maior resistência mecânica dos materiais. As válvulas menores justificam um aumento da velocidade de escoamento do ar que, pressurizado pelo compressor, consegue gerar maior turbulência nos cilindros com mais intensidade, facilitando a mistura do combustível injetado com ar presente. Nota-se que o motor consegue trabalhar em regime estratificado somente para uma faixa de rotações menores e mais comuns em trânsitos de cidades ou em velocidade de cruzeiro em quinta marcha logo, em regimes de cargas mais elevadas e velocidades maiores do motor o consumo do combustível e a eficiência têm relação com a turbulência que facilita uma queima completa do combustível injetado de forma homogênea.

6. REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. E. B. – Dados estatísticos, disponível em: <Dados estatísticos — Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (www.gov.br)>, acessado em mar de 2023
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. E. B. RESOLUÇÃO ANP Nº 807, de 23.01.2020 - DOU 24.01.2020 - RETIFICADO DOU 27.01.2020. [S.l.], p. 8. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10520 - Informação e documentação - Citações em documentos - Apresentação. Rio de Janeiro, p. 7. 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724 - Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, p. 13. 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14396 - Motores alternativos de combustão interna - Determinação e método para medição de potência de motor. Rio de Janeiro, p. 15. 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023 - Informação e Documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro, p. 74. 2018.
- BRASIL Ministério da Economia, Rota 2030 - Mobilidade e Logística, gov.br 2020, disponível em < Rota 2030 - Mobilidade e Logística — Português (Brasil) (www.gov.br)>, acesso em 12 de ago. 2022.
- BRUNETTI, F. Motores de Combustão Interna. São Paulo: Blucher, v. 2, 2012.
- BRUNETTI, F. Motores de Cobustão Interna. 2ª. ed. São Paulo: Blucher, v. 1, 2018.
- CASTRO, F. D. D.; RAHDE, S. B. Motores Automotivos: Evolução, Manutenção e Tendências. Porto Alegre: edi-PUCRS, v. 1, 2014.
- COSTA, M. et al. Split injection in a homogeneos stratified gasoline direct injection engine for high combustion efficiency and low pollutants emissions. Energy, Napoli, Março 2016. 10.
- HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Massachussets: McGRAW-HILL, 1988.
- KIM, D. et al. Characteristics of in-cylinder flow and mixture formation in a high-pressure spray-guided gasoline direct-injection optically accessible engine using PIV measurements and CFD. Energy Conversion and Management, Seoul, 2021.
- MARTINS, J. Motores de Combustão Interna. 2 ed. Porto: Publindústias edições técnicas , 2006.
- OLIVEIRA, M. M. D. Como fazer projetos, relatórios, monografias, dissertações e teses. 5. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.
- PARK, S. et al. Combustion phenomena affecting particle emission under boosting conditions in a turbocharged gasoline direct injection engine. Fuel, Republic of Korea, p. 15, Outubro 2020.