

COMPARATIVO TÉCNICA ENTRE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA 2.0 ASPIRADO X 1.0 TURBO

Breno Souza Bonadiman Garcia,
Sara Gambarini do Carmo,
Vitor da Silva Vieira¹.
Gilberto Estevão Bastos².

¹Estudantes do curso de Engenharia Mecânica, Multivix - Vila Velha-ES.

²Engenheiro Mecânico – Especialista em Engenharia – Docente Multivix – Vila Velha.

RESUMO

O presente trabalho realiza uma análise comparativa técnica entre duas filosofias de motorização distintas: o motor 2.0 naturalmente aspirado do Jetta e o motor 1.0 turbo do Polo que exemplifica a tendência de downsizing na indústria automotiva. O objetivo central do estudo é demonstrar, através de cálculos de potência, torque e rendimento, os benefícios da sobrealimentação e da redução de cilindrada em comparação com motores aspirados de maior volume a pesquisa destaca que a adoção do turbocompressor permite que o motor de menor cilindrada (1.0L) atinja níveis de desempenho (potência e torque) semelhantes ao motor 2.0L, ao mesmo tempo que oferece maior eficiência energética e menor consumo de combustível. A fundamentação teórica aborda os princípios dos motores de combustão interna, o ciclo Otto, e as características dos motores naturalmente aspirados e sobrealimentados o estudo conclui que o downsizing, aliado à tecnologia de turbocompressão, é uma solução tecnológica mais eficiente que concilia performance, economia e sustentabilidade, atendendo às exigências atuais do mercado por menores emissões de poluentes.

Palavras Chaves: Downsing, Sobrealimentação, Eficiência e Consumo

1 INTRODUÇÃO

Os motores de combustão interna são máquinas em que a energia química do combustível, ao ser queimada em mistura com o ar, transforma-se em energia térmica, sendo parte dessa energia posteriormente convertida em energia mecânica (GANESAN, 1995; BASSHUYSEN; SHÄFER, 2006).

Segundo Heywood (1988) a principal função de um motor de combustão interna

é converter a energia química do combustível em energia mecânica.

Com o grande avanço da tecnologia em motores, se popularizou os motores sobrealimentados, com isso os motores de ignição por centelha está vivenciando grandes mudanças, o que possibilita a obtenção de melhores resultados de rendimento e de emissão de poluentes em comparação de motores naturalmente aspirados. Cada vez mais as montadoras de veículos estão procurando fazer motores menores com potências altas e baixo consumo de combustível, tendência essa que ficou conhecida como *dowsizing*, com tudo esse termo no âmbito automotivo ficou conhecido como motores de baixa cilindrada que performam tão bem quanto um de maior cilindrada. Um exemplo de uma aplicação onde o *dowsizing* resulta em uma melhor obtenção de resultado e no menor consumo de combustível, caracterizado pelo funcionamento do motor em cargas parciais (borboleta parcialmente aberta). Para que a potência e o torque se aproximem aos de motores com maior cilindrada, torna-se necessário o uso de sistemas de sobrealimentação, sendo a turbocompressão a mais comum (BRUNETTI, 2012).

Com esse objetivo, são utilizadas soluções tecnológicas voltadas para a elevação da eficiência energética, resultando em menor consumo de combustível e redução na emissão de poluentes (PIELECHA, 2014). Entre as alternativas mais comuns utilizadas pelos fabricantes, destaca-se a adoção do turbocompressor associada à injeção direta de combustível.

De acordo com Patil et al. (2017), o conceito de *dowsizing* está relacionado à utilização de motores de menor cilindrada que, por meio do emprego de tecnologias modernas, conseguem oferecer a mesma potência de motores maiores.

O desenvolvimento dos motores sobrealimentados ocorreu como solução para elevar a pressão de admissão e, conseqüentemente, a quantidade de ar admitida no cilindro. Nesses motores, encontra-se dispositivos que são responsáveis por aumentar a pressão no coletor de admissão para valores superiores à pressão atmosférica. Dentre esses recursos, o turbocompressor é amplamente utilizado pelos fabricantes, pois utiliza a energia dos gases de escape para acionar uma turbina, que por sua vez movimenta o compressor, e promove o aumento da pressão no coletor (BRUNETTI, 2012).

Segundo Bell (1997), a sobrealimentação é considerada uma estratégia eficaz para acentuar a pressão interna do cilindro, resultando no aumento do torque e da potência do motor.

A comparação entre os motores do Jetta 2.0 (2012) aspirado e o Polo 1.0 turbo (2021) permite avaliar duas propostas distintas de motorização. Enquanto o motor 2.0 depende da maior cilindrada para gerar desempenho, o 1.0 turbo demonstra como o downsizing aliado à sobrealimentação garante potência uma equivalente e menor consumo, atendendo às exigências atuais de eficiência e sustentabilidade.

O objetivo deste estudo é demonstrar, por meio da análise comparativa, os benefícios da utilização de motores turbos e com downsizing frente aos aspirados de maior cilindrada. Serão avaliados aspectos de potência, torque e consumo de combustível, destacando como a tecnologia de sobrealimentação pode oferecer vantagens significativas para o mercado automotivo, conciliando desempenho e eficiência, além de contribuir para menores emissões de poluentes.

A metodologia adotada baseia na aplicação de cálculos de potência, torque e rendimento através de conceitos e equações presentes em literaturas e trabalhos acadêmicos relacionados ao assunto. Serão utilizadas as especificações técnicas dos motores selecionados (Jetta 2.0 aspirado e Polo 1.0 turbo), com os dados sendo tratados de forma comparativa. Com isso, será possível verificar, como o downsizing aliado ao turbocompressor se apresenta como uma solução tecnológica e mais eficiente em termos de desempenho e economia de combustível, além de atender às necessidades do setor automotivo. Vale salientar que, mesmo que o deslocamento volumétrico do motor 2.0 seja o dobro do 1.0, a presença do turbocompressor permite que o motor de menor cilindrada alcance níveis de desempenho semelhantes, o que evidencia os benefícios da sobrealimentação em motores compactos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

O motor de combustão interna (MCI) é o mais utilizado como fonte de potência em veículos automotores. Os motores de combustão interna (MCI) têm como principal função converter a energia química presente no combustível em energia térmica, por meio do processo de combustão. Essa transformação eleva a pressão do fluido de trabalho, e durante a expansão ocorre a conversão dessa energia em trabalho mecânico (BRUNETTI, 2012).

O trabalho mecânico gerado nos motores de combustão interna resulta de uma de uma série de transformações realizadas por um meio denominado fluido ativo (FA).

Esse fluido corresponde à mistura de ar e combustível na entrada do volume de controle e aos gases resultantes da combustão na saída (BRUNETTI, 2012).

De acordo com Brunetti (2012) os motores de combustão interna apresentam diferentes tipos de configurações: Número de ciclos do motor, por exemplo 2 ou 4; Disposição dos cilindros; Naturalmente aspirado ou sobrealimentado; Quantidade de válvulas; Tipo de ignição, podendo ser de centelha ou espontânea e tipo de combustível.

De acordo com Albaladejo (2013), a termodinâmica pode ser entendida como uma força resultante do calor. Nesse sentido, o funcionamento de um motor está associado ao aumento repentino da pressão dentro dos cilindros, provocado pela combustão dos gases. Para que essa reação ocorra, é indispensável a presença de três elementos reagentes. São eles:

- Comburente: oxigênio;
- Combustível: gasolina, etanol ou gás natural veicular (GNV) ou diesel;
- Calor: centelha ou faísca proveniente da vela para motores Ciclo Otto, e no diesel ocorre pela pressão proveniente na câmara de combustão.

2.1.1 Motores Ciclo Otto de quatro tempos (4T)

Em 1876, Nikolaus Otto desenvolveu, fundamentado na teoria proposta por Beau de Rochas, o primeiro motor a combustão interna, originando assim o sistema conhecido como Ciclo Otto, que consiste no funcionamento do motor dividido em quatro etapas (SANTOS; PASSARINI, 2015).

De acordo com Varella (2014), os motores de ciclo Otto de quatro tempos completam o ciclo em quatro cursos do pistão, o que corresponde a duas rotações completas do eixo virabrequim, totalizando em 720°.

Os quatro cursos na respectiva ordem:

1. Admissão: o pistão desloca-se do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI), sucedendo assim a admissão da mistura ar-combustível. Durante este processo a válvula de admissão encontra-se aberta, enquanto a válvula de escape encontra-se fechada.
2. Compressão: nessa segunda etapa o pistão desloca-se do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS). Com isso ocorre a redução do volume da câmara de combustão. Neste processo tanto a válvula de admissão quanto a válvula de escape encontram-se fechadas.

3. Combustão: após a compressão ter sido realizada, o pistão encontra-se no ponto morto superior (PMS) juntamente com a mistura ar-combustível. Neste momento a vela de ignição gera uma centelha que provoca a combustão da mistura, gerando uma força que desloca o pistão do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI). Durante esse processo válvula de admissão e de descarga encontram-se fechadas.

4. Descarga: por último, mas não menos importante, o pistão desloca-se do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS), nesse momento a válvula de admissão encontra-se fechada enquanto a de descarga está aberta, dessa forma o pistão que está se deslocando do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS) empurra os resíduos provenientes da combustão para fora da câmara de combustão permitindo assim que o ciclo se recomece.

2.2 MOTORES NATURALMENTE ASPIRADOS

Em motores naturalmente aspirados, a admissão do ar se dar pelo gradiente de pressão gerado pelo movimento do pistão. O pistão move-se do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior. Durante esse processo ocorre uma depressão dentro do cilindro, que provoca a entrada da mistura gasosa por meio da válvula de admissão aberta (BRUNETTI, 2012).

Dentre as vantagens dos motores naturalmente aspirados destacam-se pela construção mais simples, o que implica menor número de componentes sujeitos a falhas e, conseqüentemente, maior confiabilidade e durabilidade. Com essa simplicidade também reduz os custos de fabricação, manutenção e reparo. Além disso, os motores apresentam resposta mais linear e previsível, e possuem custo de produção e manutenção inferior em comparação ao m (DINAMICARPNEUS, 2021).

Os motores naturalmente aspirados apresentam algumas limitações em comparação aos modelos sobrealimentados. Seu desempenho e potência são inferiores, uma vez que a admissão de ar ocorre apenas pela pressão atmosférica, o que limita a quantidade de combustível que pode ser queimada. Para atingir níveis semelhantes de potência e torque, esses motores precisam operar em rotações mais elevadas, o que acarreta em um aumento no consumo de combustível. Assim, observa-se que melhorias significativas de desempenho dependem diretamente do

trabalho em faixas de rotação mais elevadas, o que resulta em uma eficiência energética menor em relação aos motores turbinados (DINAMICARPNEUS, 2021).

2.3 MOTORES SOBREALIMENTADOS

A sobrealimentação apresenta soluções eficientes para o aumento de potência de um motor sem acréscimos significativos no peso ou no volume deslocado pelos pistões (BRUNETTI, 2012).

Nos motores sobrealimentados, a pressão de admissão permanece próxima ou igual à atmosférica até uma certa faixa de rotação, até o momento que o dispositivo de sobrealimentação entra em funcionamento. Quando atinge uma certa faixa de rotação o dispositivo de sobrealimentação o ar é comprimido e forçado para dentro do motor, aumentando a quantidade de massa de ar admitida. Resultando em uma queima de uma maior quantidade de combustível, o que resulta no aumento de potência (BRUNETTI, 2012; CENGEL; BOLES, 2013).

Dentre os principais tipos temos os supercompressores e os turbocompressores, neste trabalho iremos decorrer sobre os turbocompressores (BRUNETTI, 2012).

Os turbocompressores são divididos em duas partes, a turbina e o compressor, que são montados no mesmo eixo. Eles utilizam os gases do escape, que normalmente não seria utilizado em motores naturalmente aspirados, através dos gases provenientes da combustão que são expelidos para o escape que giram o motor da turbina, acionando assim o compressor, fazendo assim que comprima o ar admitido e forçando a entrada no motor (SOUZA, 2021; FOX et al., 2021).

Os motores equipados com turbocompressor apresentam maior potência e torque, o que garante um desempenho mais ágil mesmo em baixas rotações. Esse aspecto garante respostas mais rápidas do acelerador, que resulta em maior segurança para ultrapassagens e retomadas (BOSCH, 2018).

O sistema funciona comprimindo o ar que está sendo admitido, permitindo assim uma combustão mais eficiente, resultando não somente em ganhos de potência, mas também como em maior eficiência no consumo de combustível quando comparado a motores aspirados de potência equivalente. Dessa forma, esta tecnologia possibilita que motores de menor cilindrada entreguem o desempenho de motores maiores, adaptando performance e sustentabilidade (BRUNETTI, 2012; CENGEL; BOLES, 2013).

Dentre as desvantagens dos motores sobrealimentados com turbocompressores estão, o custo de fabricação, manutenção e reparos mais elevado pois motores turbos são mais complexos e necessitam de mais peças como a própria turbina, intercoolers, válvula de alívio e tubulação (BOSCH, 2018).

2.4 POTÊNCIA E TORQUE

A compreensão dos conceitos de potência e torque é fundamental para a análise do desempenho de motores automotivos. A potência, expressa em cavalos vapor (cv) ou quilowatts (kW), representa a capacidade do motor de realizar trabalho ao longo do tempo. Já o torque, medido em quilograma-força metro (kgfm) ou Newton- metro (Nm), refere-se à força de rotação aplicada ao virabrequim do motor, sendo responsável pela sensação de força nas acelerações e retomadas (Heywood, 1988).

Dessa forma, motores que apresentam alto torque em baixas rotações tendem a proporcionar respostas mais vigorosas em situações de arrancada, enquanto motores que mantêm torque elevado em altas rotações alcançam maiores valores de potência máxima (Martins, 2013).

Os gráficos de torque x rpm e potência x rpm são ferramentas essenciais para visualizar o comportamento do motor em diferentes faixas de rotação. Em motores aspirados, o torque geralmente atinge seu pico em rotações intermediárias, enquanto em motores turboalimentados, o torque máximo é alcançado em rotações mais baixas e mantido por uma faixa mais ampla, graças à sobrealimentação proporcionada pelo turbo (Basshuysen; Schäfer, 2004).

A correta interpretação desses gráficos permite identificar o regime de funcionamento mais eficiente do motor, além de auxiliar na escolha do veículo mais adequado ao perfil de uso do condutor. Por exemplo, veículos destinados ao uso urbano se beneficiam de motores com alto torque em baixas rotações, enquanto veículos esportivos valorizam a potência máxima em altas rotações (Heywood, 1995).

2.4.1 Potências do motor

Segundo Brunetti 2018, A potência efetiva chamada de potência útil ou potência no virabrequim, apresentada na equação (1), é a potência realmente disponível para mover o veículo, descontando as perdas mecânicas internas do motor. E a potência indicada, escrita na equação (2), é a potência total gerada dentro dos cilindros, antes das perdas por atrito e outros mecanismos internos do motor.

$$P_e = T \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} \quad (1)$$

$$P_i = P_{mi} \cdot V_d \cdot \frac{n}{2} \quad (2)$$

Onde: P_e é a potência efetiva (W); T é o torque (N.m); ω (rad/s) é a velocidade angular; P_i = Potência indicada (W); P_{mi} = Pressão média indicada (Pa); V_d = Volume deslocado por ciclo (m^3); n = Número de ciclos por segundo (para motores de 4 tempos, $n = N / 2$, onde N é rpm).

2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética dos motores de combustão interna é um tema central na engenharia automotiva, especialmente diante das crescentes exigências por redução de consumo de combustível e emissões de poluentes. Dois conceitos fundamentais nesse contexto são a eficiência térmica e a eficiência volumétrica (Tristão; Sumioshi, 2020)

A eficiência térmica refere-se à capacidade do motor de converter a energia química do combustível em trabalho mecânico útil. Motores de combustão interna, em geral, apresentam baixos rendimentos energéticos, com grande parte da energia sendo dissipada em forma de calor. O rendimento total do motor pode ser decomposto em diversos fatores, como rendimento de combustão, rendimento mecânico e eficiência de bombeamento (Tristão; Sumioshi, 2020).

Já a eficiência volumétrica está relacionada à quantidade de ar admitida pelo motor em relação ao volume total dos cilindros. Quanto maior a eficiência volumétrica, maior a quantidade de ar (e, conseqüentemente, de combustível) admitida, resultando em maior potencial de geração de potência. Motores aspirados, por dependerem da pressão atmosférica para admissão de ar, tendem a apresentar menor eficiência volumétrica em altas rotações. Por outro lado, motores turboalimentados utilizam a pressurização do ar de admissão para aumentar significativamente essa eficiência, permitindo maior desempenho mesmo com menor cilindrada (Basshuysen; Schäfer, 2004).

Diversos fatores influenciam a eficiência energética dos motores, entre eles a taxa de compressão, o tipo de combustível utilizado e a geometria do motor. O aumento da taxa de compressão, por exemplo, pode elevar a eficiência térmica, desde

que o combustível utilizado possua resistência suficiente à detonação. A composição da mistura ar-combustível e o avanço da ignição também são variáveis operacionais que impactam diretamente o rendimento do motor (Heywood, 1988; Tristão; Sumiوشي, 2020).

No cenário atual, observa-se uma tendência de downsizing, ou seja, a substituição de motores grandes aspirados por motores menores turboalimentados. Essa estratégia visa aumentar a eficiência energética, reduzindo o consumo de combustível e as emissões, sem comprometer o desempenho.

Motores turboalimentados conseguem entregar potência e torque equivalentes ou superiores aos motores aspirados de maior cilindrada, com menor consumo específico de combustível, especialmente em regimes de baixa e média rotação (Webmotors, 2022). Entretanto, é importante ressaltar que, em determinadas condições de uso, como em altas velocidades e cargas elevadas, o consumo dos motores turbo pode se igualar ou até superar o dos motores aspirados, devido ao funcionamento constante do sistema de sobrealimentação. Ainda assim, a eficiência global dos motores turboalimentados é, em geral, superior, justificando sua ampla adoção pela indústria automotiva contemporânea (Basshuysen; Schäfer, 2004; Webmotors, 2022).

2.5.1 Eficiências do motor

A eficiência volumétrica conforme a equação (3), indica o quanto do volume teórico dos cilindros é efetivamente preenchido com mistura ar-combustível, a eficiência térmica, apresentada na equação (4), mede a fração da energia do combustível convertida em trabalho útil e a eficiência mecânica escrita na equação (5) relaciona a potência efetiva com a potência indicada (Brunetti, 2018).

$$\eta_v = \frac{V_{ar\ admitido}}{V_{cilindrada}} \quad (3)$$

$$\eta_t = \frac{P_{util}}{M_{comb. PCI}} \quad (4)$$

$$\eta_m = \frac{P_{efetiva}}{P_{indicada}} \quad (5)$$

Onde: η_v = Eficiência volumétrica (adimensional ou %); $V_{ar_admitido}$ = Volume real de ar admitido por ciclo (m^3); $V_{cilindrada}$ = Volume total deslocado pelos pistões por ciclo (m^3); η_t = Eficiência térmica (adimensional ou %); P_{util} = Potência útil do motor (W); M_{comb} = Vazão mássica de combustível (kg/s); PCI = Poder calorífico inferior do combustível (J/kg); η_m = Eficiência mecânica (adimensional ou %); $P_{efetiva}$ = Potência efetiva (útil, medida no virabrequim) (W); $P_{indicada}$ = Potência indicada (gerada na câmara de combustão) (W).

2.6 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

2.6.1 Medição: km/l ou L/100 km.

Existem duas principais formas de medir o consumo de combustível de um veículo, cada uma com suas particularidades e prevalência regional (PIGOZZO, 2015).

A unidade km/l (quilômetros por litro), comum no Brasil e nos Estados Unidos, indica a distância percorrida por litro de combustível, sendo uma medida de “produtividade”. Já a unidade L/100 km (litros por 100 quilômetros), predominante na Europa, expressa a quantidade de combustível necessária para percorrer 100 km, sendo uma medida mais direta de “consumo” (BOSCH, 2018; PIGOZZO, 2015).

Ambas são válidas para avaliar a eficiência, mas a escolha pode influenciar a percepção e o cálculo de autonomia, a precisão na medição do consumo de combustível é crucial para a avaliação da eficiência veicular, e diversos métodos são empregados, desde a medição direta do fluxo de combustível até a análise de dados da CAN-bus do veículo (JOKINIEMI et al., 2012).

No contexto agrícola, JOKINIEMI et al. (2012) desenvolveram um método acessível baseado no sensor de nível de combustível e rastreamento GPS, visando obter valores médios de consumo por hectare o que reforça a importância de métodos práticos e confiáveis para a medição do consumo energético.

2.6.2. Fatores que Influenciam o Consumo de Combustível

O consumo de combustível de um veículo é um resultado complexo de múltiplos fatores intrínsecos e extrínsecos:

Peso do Veículo: Um veículo mais pesado requer maior energia para aceleração e para superar a inércia e a resistência ao rolamento, resultando em maior consumo de combustível. Estudos indicam que a redução de peso é um dos principais

fatores para melhorar a eficiência de combustível, para cada 100 kg de redução de peso, o consumo combinado cidade/estrada pode diminuir em aproximadamente 0,4 L/100 km para carros (AUTOSMART, 2014).

Aerodinâmica: A resistência do ar (arrasto aerodinâmico) é uma força significativa que o veículo precisa superar, especialmente em velocidades mais altas. Um design aerodinâmico eficiente minimiza essa resistência, reduzindo a demanda de potência do motor e, conseqüentemente, o consumo de combustível. A aerodinâmica é um fator crítico no projeto de veículos, com o objetivo de reduzir o arrasto para otimizar a eficiência, a redução do coeficiente de arrasto (CDCD) pode levar a ganhos expressivos na economia de combustível, especialmente em velocidades elevadas (ALJADEI, 2021).

Tipo de Transmissão: A eficiência da transmissão é crucial para o consumo de combustível, câmbios manuais permitem maior controle ao motorista, mas a economia depende da habilidade, Câmbios automáticos modernos (com mais marchas) e CVT (Transmissão Continuamente Variável) são projetados para manter o motor na faixa de rotação ideal, otimizando o consumo, câmbios DSG (Direct Shift Gearbox – Dupla Embreagem) oferecem trocas rápidas e eficientes, contribuindo para um bom consumo devido à minimização da perda de potência. No estudo, observou-se que tratores com transmissão moderna e gerenciamento eletrônico do motor apresentaram consumo até 10% menor (JOKINIEMI et al., 2012).

2.6.3 Tecnologias de Economia de Combustível

A engenharia automotiva tem desenvolvido diversas tecnologias para otimizar a eficiência dos motores:

Injeção Direta: Esta tecnologia injeta o combustível diretamente na câmara de combustão, permitindo um controle mais preciso da mistura ar-combustível isso resulta em uma queima mais eficiente, maior potência e torque, e significativa economia de combustível em comparação com a injeção indireta (JOKINIEMI et al., 2012).

Sistema Start-Stop: Desliga automaticamente o motor quando o veículo para e o religa instantaneamente ao retomar a marcha, o objetivo é eliminar o consumo de combustível em marcha lenta, especialmente em tráfego urbano, podendo gerar uma economia considerável (AUTOSMART, 2014).

Downsizing: Consiste na redução da cilindrada e do número de cilindros do motor, mantendo ou melhorando a potência e o torque através de tecnologias como a turboalimentação. Motores menores são mais leves e, quando bem projetados, são mais eficientes em consumo, especialmente em cargas parciais (BRUNETTI, 2012). O Polo 1.0 MPI (3 cilindros) e o Jetta 2.0 Turbo (com alta potência específica) são exemplos dessa filosofia, visando desempenho com menor consumo e emissões (BOSCH, 2018).

2.7 EMISSÕES E SUSTENTABILIDADE

2.7.1 Gases emitidos: CO₂, NO_x, HC, CO.

A crescente preocupação com a qualidade do ar e as mudanças climáticas têm impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias automotivas mais limpas e eficientes. Veículos automotores são uma das principais fontes de poluentes atmosféricos em áreas urbanas, contribuindo significativamente para a degradação ambiental e problemas de saúde pública. A compreensão dos tipos de gases emitidos, a eficácia das normas regulatórias e o potencial de tecnologias avançadas de motores são cruciais para o avanço da sustentabilidade no setor de transporte (RIBEIRO VIEIRA, 2008; CARDINALE BRANCO, 2015).

Os motores de combustão interna liberam uma variedade de poluentes na atmosfera. Os principais constituintes das emissões veiculares incluem material particulado (PM), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos (HCs) e monóxido de carbono (CO), resultantes da incineração de combustíveis. Além desses, gases de efeito estufa (GEE) como dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) também são produzidos (BRUNETTI, 2012; BOSCH, 2018), além desses gases são produzidos outros como:

O monóxido de Carbono (CO): Gás incolor e inodoro, formado pela combustão incompleta do combustível, é tóxico e contribui para a formação de ozônio troposférico. Os Hidrocarbonetos (HCs) que são Moléculas de combustível não queimadas durante o processo de combustão que podem causar problemas respiratórios e alérgicos. Os óxidos de Nitrogênio (NO_x): Formados em altas temperaturas dentro do cilindro do motor, na presença de nitrogênio e oxigênio, que contribuem para a chuva ácida e problemas respiratórios [Mahmoudi et al., 2017].

E o dióxido de Carbono (CO₂): Principal produto da combustão de combustíveis fósseis e o GEE mais significativo, contribuindo para o aquecimento global [Mahmoudi et al., 2017].

2.7.2 Normas ambientais (ex: Proconve no Brasil).

As normas de emissão veicular são limites estatutários estabelecidos para proteger a saúde humana e alcançar padrões de qualidade do ar. Governos em todo o mundo regulam as emissões de poluentes [Winkler et al., 2018], no Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) tem sido fundamental na regulamentação das emissões veiculares. As normas PROCONVE são alinhadas com as normas europeias, implementando limites progressivamente mais rigorosos para poluentes como CO₂, NO_x, HC e CO [Singh et al., 2022].

As novas normas PROCONVE L-7 e L-8, introduzidas a partir de 2022 e 2025, respectivamente, visam endurecer os requisitos de emissão para veículos leves, a norma L-8, em particular, adota uma abordagem de média corporativa, exigindo que os fabricantes atendam a limites de emissão médios para toda a sua frota, no entanto, o Brasil ainda não exige testes em uso ou monitoramento pós-produção, e mantém isenções para veículos com características off-road, o que pode permitir que SUVs e picapes emitam mais poluentes do que veículos de passageiros de uso similar.

2.7.3 Vantagens dos motores menores e turboalimentados na redução de emissões.

A busca por maior eficiência de combustível e menor impacto ambiental tem levado ao desenvolvimento de motores menores (downsized) e turboalimentados, o downsizing de motores, combinado com a turboalimentação, permite que motores de menor cilindrada produzam potência e torque equivalentes a motores naturalmente aspirados maiores, mas com menor consumo de combustível e, conseqüentemente, menores emissões de CO₂ [Mahmoudi et al., 2017].

Estudos indicam que a turboalimentação pode reduzir o consumo de combustível e as emissões de GEE, por exemplo, a redução de 20% na cilindrada do motor e o aumento da pressão de entrada em 20-50% podem diminuir o consumo de combustível em 6- 14%, e as emissões de HC em 2-4%, CO em 7-20% e NO_x em 8-23% [Mahmoudi et al., 2017].

Embora a concentração de NO_x, CO e CO₂ no gás de escape de motores turboalimentados possa ser maior em comparação com motores naturalmente aspirados, as emissões específicas de freio (por unidade de potência) são menores, indicando uma maior eficiência geral [Mahmoudi et al., 2017].

3 METODOLOGIA E MÉTODO DA PESQUISA

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS VEÍCULOS

A tabela 1, apresenta os dados de cada motor a ser analisado.

Tabela 1 - Características dos Veículos

Dado do Motor	Polo 1.0 Turbo 2021	Jetta 2.0 Aspirado 2012	Unidades
Cilindrada	999	1984	cm ³
Cilindro	3 em linha	4 em linha	---
Curso do pistão	76,4	92,8	mm
Diâmetro do cilindro	74,5	82,5	mm
Peso/Potência	9,0	11,2	Kg/cv
Peso/Torque	56,2	73,2	kg/kgfm
Potência específica	128,1	60,5	cv/litro
Potência máxima (A)	128	120	cv
Potência máxima (G)	116	116	cv
Razão de compressão	10,5:1	11,5:1	---
Regime potência máx.	5500	5000	rpm
Regime torque máx.	2000	4000	rpm
Rotação máxima	6500	---	rpm
Torque específico	20,4	9,3	kgfm/litro
Torque máximo (A)	20,4	18,4	kgfm
Torque máximo (G)	20,4	17,7	kgfm
Consumo Rodoviário (A)	9,8	7,8	km/l
Consumo Rodoviário (G)	14,1	10,8	km/l
Consumo Urbano (A)	8	6,1	km/l
Consumo Urbano (G)	11,6	8,8	km/l

Fonte: Ficha Técnica Completa

3.2 COMPARAÇÃO TÉCNICA DOS MOTORES

O Volkswagen Jetta 2.0 aspirado 2012 se destaca pelo motor de maior cilindrada e uma entrega de potência mais linear, atingindo boa velocidade final. No entanto, tem o consumo mais elevado e utiliza uma transmissão manual de 5 marchas. Enquanto o Volkswagen Polo 1.0 turbo 2021 é um projeto mais moderno, com um

motor menor, porém com a utilização de turbocompressor, o que garante torque elevado em baixas rotações e maior agilidade para retomadas.

Além disso, é mais leve, o que ajuda ainda mais a consumir menos combustível e conta com câmbio automático de 6 marchas, oferecendo mais conforto. O Jetta exige rotações mais altas para alcançar maior potência, enquanto o Polo entrega desempenho em faixas mais baixas de giro, o que contribui para sua maior eficiência no consumo de combustível.

3.3 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

3.3.1 Relação entre desempenho e consumo

O motor 2.0 aspirado do Jetta 2012 apresenta uma potência máxima de 120 cv (álcool) e 116 cv (gasolina), com um torque máximo de 18,4 kgfm (álcool) e, 17,7 kgfm (gasolina). Seu consumo urbano é de 6,1 km/l (álcool) e, 8,8km/l (gasolina), e rodoviário de 7,8 km/l (álcool) e 10,8 km/l (gasolina).

Em contraste, o motor 1.0 turbo do Polo 2021, apesar de ter menor cilindrada, entrega uma potência máxima de 128 cv (álcool) e 116 cv (gasolina), e um torque máximo superior de 20,4 kgfm (álcool/gasolina), o consumo urbano é de 8,0 km/l (álcool) e 11,6km/l (gasolina), e rodoviário de 9,8 km/l (álcool) e 14,1 km/l (gasolina).

Observa-se que o Polo 1.0 Turbo, sendo um motor mais moderno e com tecnologia de turbocompressor, consegue entregar um desempenho similar ou superior ao Jetta 2.0 aspirado, com um consumo de combustível significativamente melhor em todas as condições, a relação peso/potência do Polo (9,0 Kg/cv) é mais favorável que a do Jetta (11,2 Kg/cv), indicando maior agilidade para o peso do veículo.

3.3.2 Eficiência volumétrica e térmica

A eficiência volumétrica refere-se à capacidade do motor de preencher seus cilindros com a mistura ar-combustível, a potência específica (cv/litro) é um bom indicador indireto dessa eficiência, o Polo 1.0 Turbo apresenta uma potência específica de 128,1 cv/litro, enquanto o Jetta 2.0 Aspirado tem 60,5 cv/litro, isso demonstra que o motor turbo, com sua menor cilindrada, é muito mais eficiente em extrair potência por litro de deslocamento, em grande parte devido à indução forçada do turbocompressor que permite a entrada de mais ar nos cilindros.

3.4 APLICAÇÕES E PERFIL DE USO

3.4.1 Qual motor é mais adequado para uso urbano?

Para o uso urbano, o Polo 1.0 Turbo é o motor mais adequado, seu torque máximo de 20,4 kgfm está disponível a baixas rotações, o que proporciona respostas rápidas e agilidade no trânsito, com menos necessidade de elevação do giro do motor, além disso, seu consumo urbano são notavelmente superior: 8,0 km/l (álcool) e 11,6 km/l (gasolina), contra 6,1 km/l (álcool) e 8,8 km/l (gasolina) do Jetta, o menor peso do Polo (1.147 kg contra 1.311 kg do Jetta) também contribui para a economia e facilidade de manobra em ambientes urbanos.

3.4.2 Qual motor se destaca em rodovias?

Em rodovias, o Polo 1.0 Turbo também se destaca devido ao seu consumo rodoviário ser superior ao do Jetta 2.0 embora o Jetta possa alcançar maiores velocidades, o Polo oferece um desempenho de aceleração maior o que é benéfico para ultrapassagens, além de também apresentar um bom torque disponível em baixas rotações, o que proporciona uma condução mais confortável e menos cansativa em viagens longas, mantendo o motor em regimes de rotação mais eficientes.

3.4.3 Manutenção, durabilidade e custo-benefício

Manutenção: Motores turbo, como o do Polo, geralmente exigem uma manutenção mais atenta, especialmente em relação ao sistema de lubrificação e ao turbocompressor. A troca de óleo e filtros deve ser rigorosamente seguida, e o uso de lubrificantes específicos é crucial, motores aspirados, como o do Jetta, tendem a ser mais simples em sua construção e, conseqüentemente, podem ter custos de manutenção preventiva ligeiramente menores em itens básicos. No entanto, a disponibilidade de peças e a rede de serviços para ambos os modelos Volkswagen são amplas.

Durabilidade: Historicamente, motores aspirados são vistos como mais duráveis devido à menor complexidade e menores estresses térmicos e mecânicos, no entanto, a engenharia moderna dos motores turbo, com materiais mais resistentes e sistemas de arrefecimento e lubrificação avançados, tem elevado significativamente sua durabilidade, que dependerá da manutenção adequada de ambos os motores e a forma de condução do proprietário

Custo-benefício: O Polo 1.0 Turbo oferece um custo-benefício superior em termos de operação diária, principalmente devido ao seu consumo de combustível muito mais baixo, embora o custo inicial de aquisição de um veículo mais novo possa ser maior, a economia a longo prazo com combustível e, potencialmente, um seguro mais acessível (devido à menor cilindrada e perfil de risco) podem compensar. O Jetta 2.0 Aspirado, sendo um modelo mais antigo, pode ter um custo de aquisição menor, mas os gastos com combustível serão consideravelmente maiores.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa entre o Volkswagen Jetta 2.0 aspirado e o Volkswagen Polo 1.0 turbo revela uma clara vantagem da tecnologia de downsizing associada à sobrealimentação. Os dados apresentados na metodologia demonstram que, embora o Jetta possua um motor de maior cilindrada, o Polo entrega um desempenho superior na maioria dos cenários, com a vantagem de um consumo de combustível significativamente menor, a potência específica do motor do Polo (128,1 cv/litro) é mais que o dobro da do Jetta (60,5 cv/litro), evidenciando a maior eficiência do motor turbo em extrair energia do combustível, este resultado está em linha com os princípios da termodinâmica e da mecânica dos fluidos, que preveem que a maior densidade da mistura ar-combustível na câmara de combustão, proporcionada pelo turbocompressor, resulta em uma queima mais completa e, conseqüentemente, em maior rendimento (Çengel & Boles, 2013).

O motor do Polo apresenta torque máximo em rotações mais baixas, o que se traduz em maior agilidade no trânsito urbano e em ultrapassagens mais seguras em rodovias, em contrapartida, o motor aspirado do Jetta, para entregar sua potência máxima, necessita operar em regimes de rotação mais elevados, o que eleva o consumo de combustível e o nível de ruído, do ponto de vista da mecânica geral, a menor massa do Polo (1.147 kg contra 1.311 kg do Jetta) contribui para uma melhor relação peso/potência, o que, por sua vez, otimiza a dinâmica veicular e a eficiência energética (Hibbeler, 2017).

A tendência da indústria automotiva em direção a motores menores e mais eficientes é uma resposta direta às crescentes demandas por sustentabilidade e economia de combustível, o downsizing, aliado a tecnologias como a injeção direta de combustível e o turbocompressor, permite que os veículos atendam às rigorosas normas de emissões de poluentes, como as do PROCONVE no Brasil, sem sacrificar

o desempenho, a evolução dos materiais e dos processos de fabricação tem mitigado as preocupações com a durabilidade dos motores turbo, que hoje apresentam uma vida útil comparável à dos motores aspirados, desde que a manutenção seja realizada de forma adequada (Norton, 2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo comparar o desempenho de um motor aspirado de maior cilindrada (Volkswagen Jetta 2.0) com um motor turbo de menor cilindrada (Volkswagen Polo 1.0), a fim de demonstrar os benefícios da tecnologia de downsizing e uma demonstração comparativa para quem está pensando em comprar seu primeiro carro sendo ambos os modelos considerados carros populares, a análise dos dados técnicos e de desempenho dos dois veículos permitiu concluir que o motor 1.0 turbo do Polo é significativamente mais eficiente que o motor 2.0 aspirado do Jetta, o Polo entrega potência e torque superiores em regimes de rotação mais baixos, com um consumo de combustível consideravelmente menor em todas as condições de uso, estes resultados corroboram a tese de que a tecnologia de downsizing, associada à sobrealimentação, é uma solução eficaz para conciliar desempenho, economia e sustentabilidade na indústria automotiva.

As principais conclusões obtidas foram:

O motor 1.0 turbo do Polo é mais eficiente que o 2.0 aspirado do Jetta, tanto em termos de potência específica quanto de consumo de combustível. O maior torque em baixas rotações do motor turbo proporciona uma condução mais ágil e segura. O menor peso do Polo contribui para a sua maior eficiência energética e melhor dinâmica veicular. A tecnologia de downsizing é uma tendência consolidada na indústria automotiva, impulsionada pela necessidade de reduzir o consumo de combustível e as emissões de poluentes.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se a realização de uma análise comparativa de longo prazo, envolvendo os custos de manutenção e a durabilidade dos componentes dos motores turbo e aspirado, seria interessante também investigar o impacto de diferentes tipos de combustíveis (etanol e gasolina) no desempenho e nas emissões de cada motor, bem como a influência de diferentes estilos de condução no consumo de combustível.

REFERÊNCIAS

Abdullah, A. M. (2021). **The Effect of Automotive Aerodynamics in Fuel Consume. International Journal of Engineering Research and Applications**, 11(12), 12-18. Disponível em: <https://www.ijera.com/papers/vol11no12/Ser-1/B1112011218.pdf>

ALBALADEJO, Felipe Serafim. **Desenvolvimento de uma unidade de gerenciamento eletrônico para motores de combustão interna do ciclo otto**. 2013. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-11072014120932/publico/Diss_FelipeAlbaladejo.pdf.

BASSHUYSEN, R.; SCHÄFER, F. **Internal Combustion Engine Handbook: basics, components, systems, and perspectives**. Warrendale: SAE International, 2006. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/books/content/R-434/>

BASSHUYSEN, Richard van; SCHÄFER, Fred. **Internal Combustion Engine Handbook: Basics, Components, Systems, and Perspectives**. Warrendale, PA: SAE International, 2004. Disponível em: https://play.google.com/store/books/details/Internal_Combustion_Engine_Handbook?id=6Xd0EAAAQBAJ&hl=en-US.

BOSCH. **Bosch Automotive Handbook ou Engenharia Automotiva: Tecnologia do Motor**. [S.l.]: Editoras diversas, 2018.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2012. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://kaiohdutra.wordpress.com/wp-content/uploads/2021/01/384524440-motores-de-combustao-interna-vol-1.pdf>

CARDINALE BRANCO, Marcelo. **Inspeção Veicular: Como Instrumento de Controle da Poluição do Ar em Grandes Cidades**, 2015 Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-31122015-110304/publico/Diss_Marcelo.pdf

CARDOSO, Lucas. **Motor turbo ou aspirado? Qual o melhor?** Webmotors, 2022. Disponível em: <https://www.webmotors.com.br/wm1/noticias/motor-turbo-ou-aspirado-qual-o-melhor>.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Dallmann, T. (2020). **Brazil PROCONVE L-7 and L-8 emission standards for light-duty vehicles. International Council on Clean Transportation**. Disponível em: <https://theicct.org/publication/brazil-proconve-l-7-and-l-8-emission-standards-forlight-duty-vehicles/>

DINAMICARPNEUS. **Vantagens e desvantagens do motor aspirado**. 30 nov. 2021. Disponível em: <https://dinamicarpneus.com.br/vantagens-e-desvantagens-do-motor-aspirado/>

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos. 9. ed.** Rio de Janeiro: LTC, 2021.

GANESAN, V. **Internal Combustion Engines. 2. ed.** New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1995. Disponível em: <https://coursecontent.indusuni.ac.in/wp-content/uploads/sites/8/2021/10/425803401-IC-Engines-by-V-Ganeshan-PDFDrive-com-pdf.pdf>

HIBBELER, R. C. **Mecânica: estática e dinâmica. 14. ed.** São Paulo: Pearson, 2017.

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals. 2. ed.** New York: McGraw-Hill, 2018. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Internal-Combustion-Engine-Fundamentals-2E/dp/1260116107>.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals.** New York: McGraw-Hill, 1988. Disponível em: [https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/INTERNAL%20COMBUSTION%20ENGINES%20by%20Ganesan%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/ADVANCED%20ENGINE%20TECHNOLOGY%20AND%20PERFORMANCE/INTERNAL%20COMBUSTION%20ENGINES%20by%20Ganesan%20(z-lib.org).pdf)

Jokiniemi, T., Rossner, H., & Ahokas, J. (2012). **Simple and cost effective method for fuel consumption measurements of agricultural machinery.** Agronomy Research Biosystem Engineering Special Issue, 1, 97-107. Disponível em: <https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2012/05/p10s110.pdf>

Mahmoudi, A. R., Khazaee, I., & Ghazikhani, M. (2017). **Simulating the effects of turbocharging on the emission levels of a gasoline engine.** Alexandria Engineering Journal, 56(4), 737-748. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016817300960>

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna. 6. ed.** Porto: Engebook, 2020. Disponível em: <https://www.amazon.com.br/Motores-Combust%C3%A3o-Interna-Jorge-Martins/dp/9898927844>.

Natural Resources Canada. (2014). **Learn the facts: Weight affects fuel consumption** disponível em: https://naturalresources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/oeef/pdf/transportation/fuelefficient-technologies/autosmart_factsheet_16_e.pdf

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 5. ed.** Porto Alegre: Bookman, 2020.

PATIL, A.; PATIL, V.; PATIL, S.; JOSHI, M. **Engine downsizing and its effects on performance and emissions.** International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), v. 8, n. 1, p. 88-96, 2017.

PATIL, C.; VARADE, S.; WADKAR, S. **A Review of Engine Downsizing and Its Effects.** International Journal of Current Engineering and Technology, 2017. Disponível em: <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2017/06/Paper75319-324.pdf>

PIELECHA, I. **Technological solutions in combustion engines improving energy efficiency**. Poznań: Poznań University of Technology, 2014.

PIGOZZO, Luiz A. **Consumo de Combustível – Uma Questão de Atitude** Disponível em: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9788591990009_A50767259/preview-9788591990009_A50767259.pdf

RIBEIRO VIEIRA, Neise. **Poluição do Ar: Indicadores Ambientais**, 2008

SANTOS, G.; PASSARINI, F. **Motores de combustão interna: princípios e aplicações**. 2015. Disponível em: <https://www.abcm.org.br/anais/conem/2000/MC8824.pdf>

Singh, S., Kulshrestha, M. J., Rani, N., Kumar, K., Sharma, C., & Aswal, D. K. (2022). **An Overview of Vehicular Emission Standards**. MAPAN, 38(1), 241–263. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9098155/>

SOUZA, Zulcy. **Máquinas de Fluxo (Turbinas, Bombas e Ventiladores) ou Plantas de Geração Térmica a Gás**. [S.l.]: Interciência ou similar, 2015.

TRISTÃO, Guilherme de Almeida; SUMIOSHI, Silvio Sizuo. **Eficiência energética em motores de combustão interna**. X Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI, 2020. Disponível em: https://fei.edu.br/sites/artigos_sicfei_2020/130_SICFEI2020_ARTIGO.pdf

VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Princípios de funcionamento dos motores de combustão interna**. 2014. 9 f. Apostila Didática (IT - Departamento de Engenharia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2014. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/66073/1/MAYKOL+DOUGLAS+PESSOA+VALOTA.pdf>

Volkswagen Jetta Comfortline 2.0 Tiptronic 2012. Disponível em: <https://www.fichacompleta.com.br/carros/volkswagen/jetta-comfortline-2-0-tiptronic-2012>.

Volkswagen Polo Comfortline 1.0 TSi 2021. Disponível em: <https://www.fichacompleta.com.br/carros/volkswagen/polo-comfortline-1-0-tsi-2021>.

Winkler, S. L., Anderson, J. E., Garza, L., Ruona, W. C., Vogt, R., & Wallington, T. J. (2018). **Vehicle criteria pollutant (PM, NO_x, CO, HCs) emissions: how low should we go?** npj Climate and Atmospheric Science, 1(1), 1-10. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41612-018-0037-5>