

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA MECÂNICA
JOSÉ LUIZ BOTREL CARDOSO NOGUEIRA

ANÁLISE DO AUMENTO DE EFICIÊNCIA DOS MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA SOBREALIMENTADOS

Varginha

2022

JOSÉ LUIZ BOTREL CARDOSO NOGUEIRA

**ANÁLISE DO AUMENTO DE EFICIÊNCIA DOS MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA SOBREALIMENTADOS**

Trabalho apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Me. Thiago Luis Nogueira Silva.

Varginha

2022

JOSÉ LUIZ BOTREL CARDOSO NOGUEIRA

**ANÁLISE DO AUMENTO DE EFICIÊNCIA DOS MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA SOBREALIMENTADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: ____/____/____

Prof.

Prof.

Prof.

Obs.:

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar o aumento de eficiência de um motor de combustão interna ciclo Otto 4 tempos com o uso de um turbocompressor. Sendo assim um trabalho de grande importância ao analisar o mercado de automóveis no Brasil, que está popularizando o uso deste acessório nos motores. Para realizar este trabalho, foi feita uma pesquisa para entender o funcionamento de motores de combustão interna e o funcionamento de um turbocompressor. Além de uma pesquisa de veículos atualmente produzidos em massa que fazem o uso deste acessório. Para a comparação entre os dois motores, foi determinado testes de consumo e aceleração entre dois veículos de mesmo modelo, porém com motores diferentes. Após os teste, foi concluído que o motor que usa um turbocompressor tem sua eficiência aumentada em até 96,10 %. Concluindo que motores turbos são ao mesmo tempo mais potentes e mais econômicos.

Palavras-chave: Motor ciclo Otto. Turbocompressor. Eficiência.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the efficiency increase of a 4 stroke Otto cycle internal combustion engine with the use of turbocharger. Thus, a work of great importance when analyzing the car market in Brazil, which is popularizing the use of this accessory in engines. To carry out this work, a research was carried out to understand the operation of internal combustion engines and the operation of a turbocharger. In addition to a survey of currently mass-produced vehicles that make use of this accessory. For the comparison between the two engines, consumption and acceleration tests were determined between two vehicles of the same model, but with different engines. After the tests, it was concluded that the uses of a turbocharger have its efficiency increased by up to 96,10 %. Concluding that turbo engines are at the same time more powerful and more economical.

Keywords: Otto cycle engine. Turbocharger. Efficiency.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	07
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	09
2.1	Motores ciclo otto quatro tempos.....	09
2.2	Turbocompressores.....	11
2.3	Motores Volkswagen.....	12
3	METODOLOGIA.....	13
3.1	Aceleração.....	13
3.2	Consumo	14
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
5	CONCLUSÃO.....	23
	REFERÊNCIAS.....	24

1 INTRODUÇÃO

No Brasil atualmente existem por volta de 58.850.554 de automóveis (Governo Federal, 2021), e as empresas automobilísticas se tornaram grandes potências desde a popularização destes automóveis, já que o número de veículos aumentou 1,2% de janeiro a agosto de 2021 (Governo Federal, 2021), e para que isso aconteça, é preciso sempre estar inovando e buscando novas tecnologias.

Os motores a combustão usados nestes automóveis utilizam a combustão de um determinado combustível junto ao ar ambiente para transformar a energia calorífica contida no mesmo, em movimento. Com a modernização destes motores, sempre buscando mais eficiência, surgiram os turbocompressores, que são equipamentos que comprimem o ar e conseguem jogar uma maior quantidade de oxigênio na mistura com o combustível.

Este trabalho busca entender essa tecnologia e comparar a eficiência destes motores turbos em relação aos naturalmente aspirados, já que se trata de uma tecnologia onde grande parte das montadoras estão aderindo a ela e prometendo uma maior eficiência e potência, com um motor relativamente menor.

O ponto de partida foi a percepção dasobre alimentação dos motores de combustão interna que resultaram em uma maior eficiência termodinâmica em relação aos motores aspirados naturalmente de mesmas cilindradas.

Pensando no funcionamento de motores a combustão interna, a utilização de oxigênio contido no ar atmosférico é de extrema importância para seu funcionamento. Devido a isto, motores maiores geram mais potência pois o volume de ar e combustível que os mesmos conseguem aspirar é maior.

O turbocompressor consegue por meio da reutilização dos gases expelidos pela câmara de combustão, comprimir o ar limpo e jogar uma maior quantidade do mesmo dentro do motor. Sendo assim gera uma maior potência no motor, mesmo que seu tamanho seja menor que um motor naturalmente aspirado.

O objetivo do trabalho foi comparar os motores sobrealimentados em relação aos motores naturalmente aspirados de mesmas cilindradas cúbicas, visando demonstrar as vantagens de desempenho e ganhos em eficiência. O que pode ser alcançado através das seguintes ações: a) explicar o funcionamento de um motor ciclo Otto quatro tempos; b) explicar o funcionamento de um turbocompressor; c) obter dados sobre motores naturalmente aspirados; d) obter dados sobre motores sobrealimentados; e) comparar os dois motores tendo em vista desempenho e eficiência.

A escolha do tema está relacionada a evolução que está acontecendo nos motores de veículos, tendo em vista que os motores mais modernos sobrealimentados prometem uma maior eficácia se comparados aos motores naturalmente aspirados que estão ficando obsoletos.

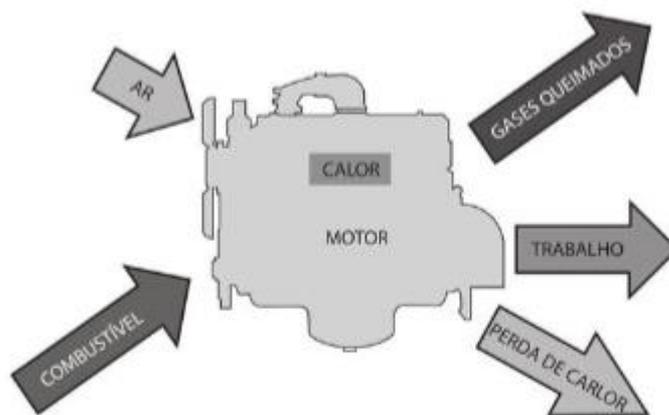
A tendência das montadoras é cada dia mais usar motores sobrealimentados em seus veículos, com a promessa de uma maior eficiência, sendo ela no menor consumo, ou uma potência maior por meio de um motor de cilindradas menor (HYUNDAI, 2021).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Motores ciclo Otto quatro tempos

Máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar calor em trabalho por meio da combustão conforme é exemplificado na figura 1 (BRUNETTI, 2018).

Figura 1: Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna.



Fonte: Adaptado de Brunetti (2018).

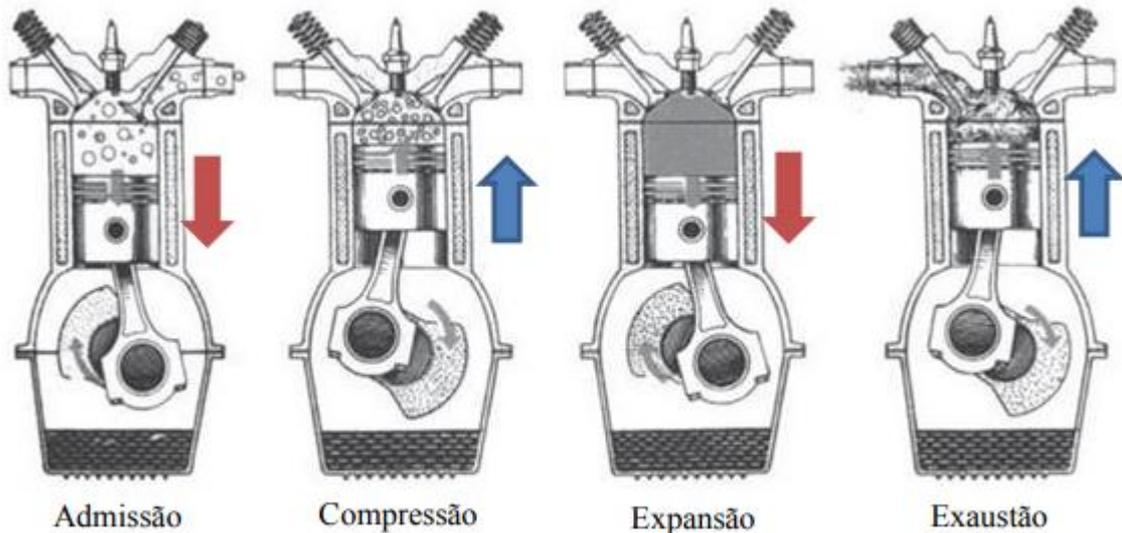
Segundo Capelli (2010), é necessário o uso de três elementos para que a energia química se transforme em energia calorífica: o comburente, que no caso é seria o ar atmosférico; a fonte de ignição que no caso é a faísca emitida de pelas velas; e o combustível.

Os motores estudados são os motores de ciclo otto de quatros tempos, que funcionam por meio de quatro meias-voltas ou conhecido como “tempos” que são: admissão, compressão, expansão e exaustão (HEYWOOD, 1988).

Segundo Brunetti (2018), o primeiro tempo é a admissão, onde a válvula de admissão se abre e o pistão desloca do ponto superior até o ponto inferior, possibilitando a admissão da mistura ar-combustível, no segundo tempo ocorre a compressão, cuja movimentação do pistão vai do ponto inferior ao ponto superior, sendo este movimento acontecendo com todas as válvulas fechadas. No terceiro momento, ocorre a expansão, onde a mistura de ar e combustível entra em ignição causando a movimentação do pistão para o ponto inferior, e é neste momento que o pistão transfere a energia contida no combustível para os demais elementos do motor, gerando trabalho. No último tempo ocorre a exaustão, onde os gases são expelidos do motor

por meio da movimentação do pistão para o ponto superior e a abertura da válvula de escape, conforme é mostrado na figura 2.

Figura 2: Funcionamento dos quatro tempos no motor de combustão interna ciclo Otto.



Fonte: Adaptado de Capelli (2010).

De acordo com Brunetti (2012), o rendimento de um motor é calculado pela razão da massa de ar que entra no cilindro e a massa de ar que o pistão desloca.

A quantidade de cilindros cúbicos de um motor é o volume movimentado quando o pistão varia do ponto morto inferior ao ponto morto superior multiplicado pela quantidade de cilindros, conforme mostra a equação 1 (BRUNETTI, 2012).

$$C = \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \right) \cdot N_c \quad (1)$$

Onde: C é a cilindrada cúbica total do motor [cm^3]; D é o diâmetro do pistão [cm]; L é o curso entre o ponto morto superior e o ponto morto inferior [cm]; N_c é o número de cilindros do motor.

Taxa de compressão é usada para mostrar quantas vezes o volume da mistura ar-combustível consegue ser comprimido dentro do motor. Esta taxa está relacionada com a eficiência térmica do motor (CAPELLI, 2010).

A potência que um motor gera, pode ser descrita pela equação 2 (BRUNETTI, 2012).

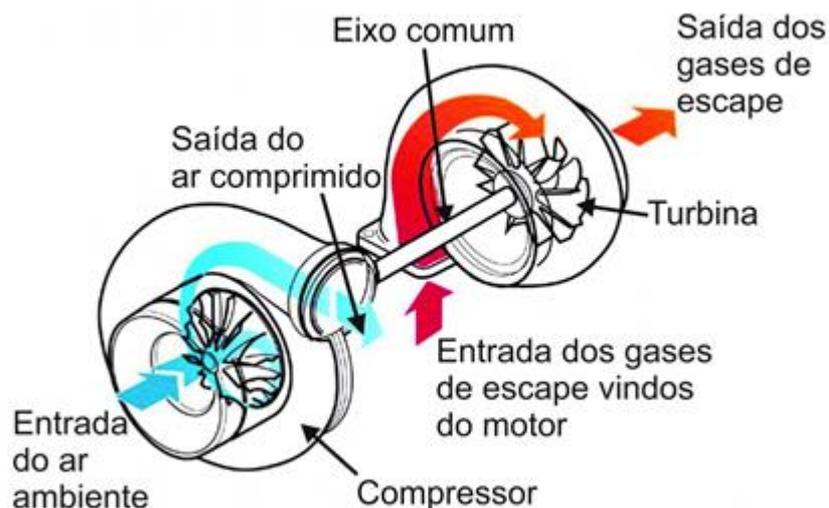
$$N_e = \dot{m}_c \cdot PCI \cdot \eta_t \cdot \eta_m \quad (2)$$

Onde N_e é a potência efetiva; \dot{m}_c é a taxa de combustível admitido; PCI é o poder calorífico inferior; η_t é a eficiência térmica; e η_m é a eficiência mecânica;

2.2. Turbocompressores

Turbocompressor é um equipamento formado por um compressor e uma turbina, e são unidos por um eixo. A parte da turbina canaliza os gases que saem da exaustão de um motor e transforma em rotação no eixo por meio de aletas. Esta rotação faz com que a parte do compressor, comprima o ar e desta forma, joga uma quantidade maior de oxigênio dentro da câmara de combustão conforme é mostrado na figura 3 (BOSCH, 2005).

Figura 3: Diagrama de um turbocompressor.



Fonte: Adaptado de SIMPLO (2019)

Segundo Capelli (2010), turbocompressores aumentam em cerca de 50% a massa de ar para dentro do motor, correspondendo a um ganho de potência na mesma proporção. Porém, o valor efetivo fica entre 30% e 40%, pelo fato de parte da energia dos gases de descarga deve girar a turbina, o que restringe seu fluxo e gera uma pequena contrapressão no cilindro

Turbocompressores podem aumentar em torno de 50% a massa de ar que entra no motor, porém na realidade este valor fica na faixa de 30% a 40%, pois uma parte da energia se dissipa no movimento da turbina (CAPELLI, 2010).

2.3 Motores Volkswagen

Para comparação do trabalho, será apresentado dois motores da montadora Volkswagen. Os dois motores exemplos equipam o mesmo veículo, sendo este o Volkswagen Polo.

O primeiro motor é o 1.0 MPI naturalmente aspirado, que segundo a Volkswagen (2022) possui 999 cm³, uma potência máxima de 84 cv a 6.350 rpm. O torque máximo é entregue na faixa de 3.000 rpm e possui 10,4 kgfm. O desempenho de aceleração de 0 km/h até 100 km/h fica na faixa de 13 segundos.

O segundo motor é o 1.0 TSI que possui um turbocompressor. Este motor entrega uma potência máxima de 128 cv a 5.500 rpm, um torque máximo de 20,4 kgfm a 2.000 rpm e aceleração de 0 km/h a 100 km/h em 9,5 segundos, sendo do mesmo tamanho do motor 1.0 MPI, ou seja, com 999 cm³ (VOLKSWAGEN, 2022).

Os dados técnicos dos dois motores são mostrados na tabela a seguir.

Tabela 1 – Dados motores Volkswagen

Motor Volkswagen	Potência	Rotação	Torque	Rotação	0 a 100 Km/h
1.0 MPI	84 cv	6350 rpm	10,4 kgfm	3000 rpm	13 s
1.0 TSI	128 cv	5500 rpm	20,4 kgfm	2000 rpm	9,5 s

3 METODOLOGIA

Este trabalho foi baseado em pesquisas bibliográfica e em testes seguindo alguns parâmetros para comparar os mesmos veículos com as mesmas características, sendo a única diferença, os motores.

Os veículos comparados são da marca Volkswagen modelo Polo, um possuindo um motor de 999 cilindradas cúbicas sem turbocompressor e o outro de 999 cilindradas cúbicas e possui um turbocompressor conforme mostra a figura 4.

Figura 4: Polo 1.0 MSI e Polo 1.0 TSI.



Fonte: Adaptado de Volkswagen (2022).

Os parâmetros definidos para realizar os testes fora basicamente aceleração e consumo de combustível para determinar a eficiência dos motores. Para isso os testes foram realizados em uma pista de teste alugada exclusivamente para este fim.

A pista de teste fica na cidade de Três Pontas-MG e possui um comprimento de 4 quilômetros, sendo possível dar mais de uma volta na pista. E para que as condições dos testes sejam exatas, os dois veículos foram abastecidos no mesmo posto de combustível, ambos com gasolina e mesmas quantidades. Os testes foram realizados no mesmo dia também para que não houvesse qualquer variação na temperatura e umidade que poderia intervir nos resultados.

3.1 Aceleração

Para comparar a aceleração de cada automóvel, foi colocado um software chamado That Racing Channel em cada carro que é capaz de medir a velocidade e a aceleração por meio de uma comunicação via GPS.

Este software busca medir aceleração saindo do repouso até o momento que o veículo atinge a velocidade de 96 quilômetros por hora.

Então para realizar o teste, cada veículo fez 3 largadas, partindo do repouso e buscando atingir a velocidade de 96 Km/h no menor tempo possível, sendo todas as tentativas partindo do mesmo ponto definido na pista de teste.

Dessa forma, o software consegue captar informações referente a largada e o tempo gasto e para comprovar os resultados, todas as tentativas foram filmadas e cronometradas.

3.2 Consumo

Para medir o consumo de combustível dos veículos foi determinado um trajeto, partindo de um ponto inicial da pista e passando por toda a sua extensão completando a distância de 6,45 quilômetros, isso para que os veículos simulem um uso real, onde ele deve subir e descer inclinações.

Os testes também foram feitos seguindo alguns critérios de velocidade, partindo do repouso até estabilizar a velocidade de 50 km/h e seguir assim durante os 3 primeiros quilômetros, em seguidas os automóveis aumentaram suas velocidades para 80 km/h até o final do teste.

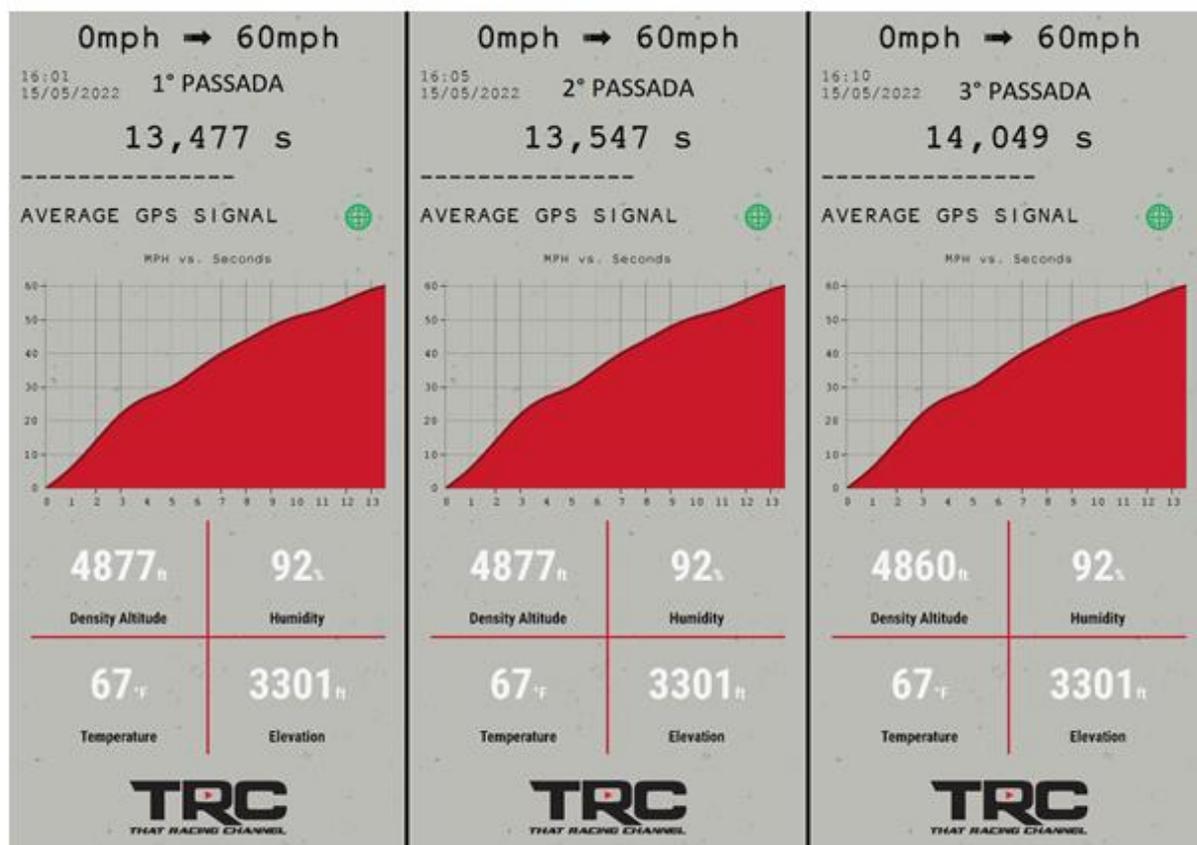
Para obtenção dos dados, os carros possuem um computador de bordo que calcula a quantidade de combustível que é injetada no motor e indica quantos quilômetros o mesmo percorre com 1 litro de combustível. Podendo assim ser calculado uma média de quilômetro por litro durante um mesmo percurso e também a quantidade de combustível que foi gasta em cada teste.

Neste teste também foi monitorado o percurso dos dois automóveis por meio de um software chamado Strava. Este grava o percurso por meio de comunicação via GPS, e apresenta os dados do percurso, como: distância, velocidade média e inclinação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro veículo a ser testado foi o Polo sem turbocompressor, onde o mesmo foi submetido a fazer 3 largadas partindo de o repouso até atingir a velocidade de 96 Km/h, o primeiro tempo foi de 13,47. O segundo tempo foi de 13,54 e a terceira tentativa obteve um resultado de 14,04 segundos, conforme é observado as medições pelo software na figura 5.

Figura 5: Testes usando o software That Racing Channel.



Fonte: O autor

Levando em consideração que os testes foram realizados no mesmo ambiente e mesmas condições, foi feito o cálculo da média e desvio padrão, que apresentou um valor abaixo de 1, conforme é possível ver na tabela 2.

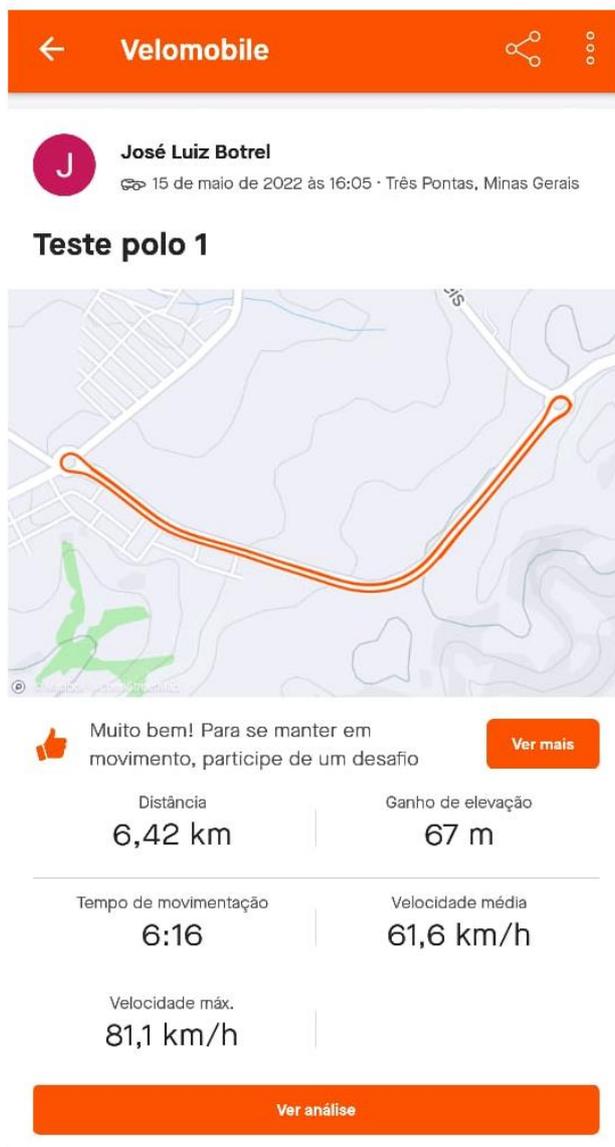
Tabela 2 – Análise dos tempos do Polo 1.0 MPI

Análise tempos Polo 1.0 MPI			
1° passada	13,477	Média	13,691
2° passada	13,547	Desvio padrão	0,238667
3° passada	14,049		

Em seguida o mesmo veículo passou para o segundo teste, o de consumo. Partindo do início da pista em repouso, até atingir a velocidade de 50 Km/h e mantendo essa velocidade por 3 quilômetros. Depois o veículo passou a rodar a uma velocidade de 80 Km/h até o final do teste.

O percurso total do veículo foi de 6,45 Km e o mesmo fez uma velocidade média de 61,6 Km/h, conforme foi observado no software Strava presente na figura 6.

Figura 6: Percurso Polo 1.0 MPI



Fonte: O autor

Com o marcador de consumo do veículo zerado antes da partida e travado ao final do teste, foi observado que o veículo sem turbocompressor fez uma média de consumo de 14,1 quilômetros por cada litro de combustível gasto, conforme foto do computador de bordo do veículo, mostrado na figura 7. Desta forma conseguimos calcular que durante o teste o veículo gastou 0,455 litros de gasolina conforme foi mostrado na tabela 3.

Tabela 3 – Consumo Polo 1.0 MPI

Consumo Polo 1.0 MPI	
Percurso	6,42 Km

Média	14,1 Km/l
Combustível gasto	0,455 l

Figura 7: Computador de bordo Polo 1.0 MPI

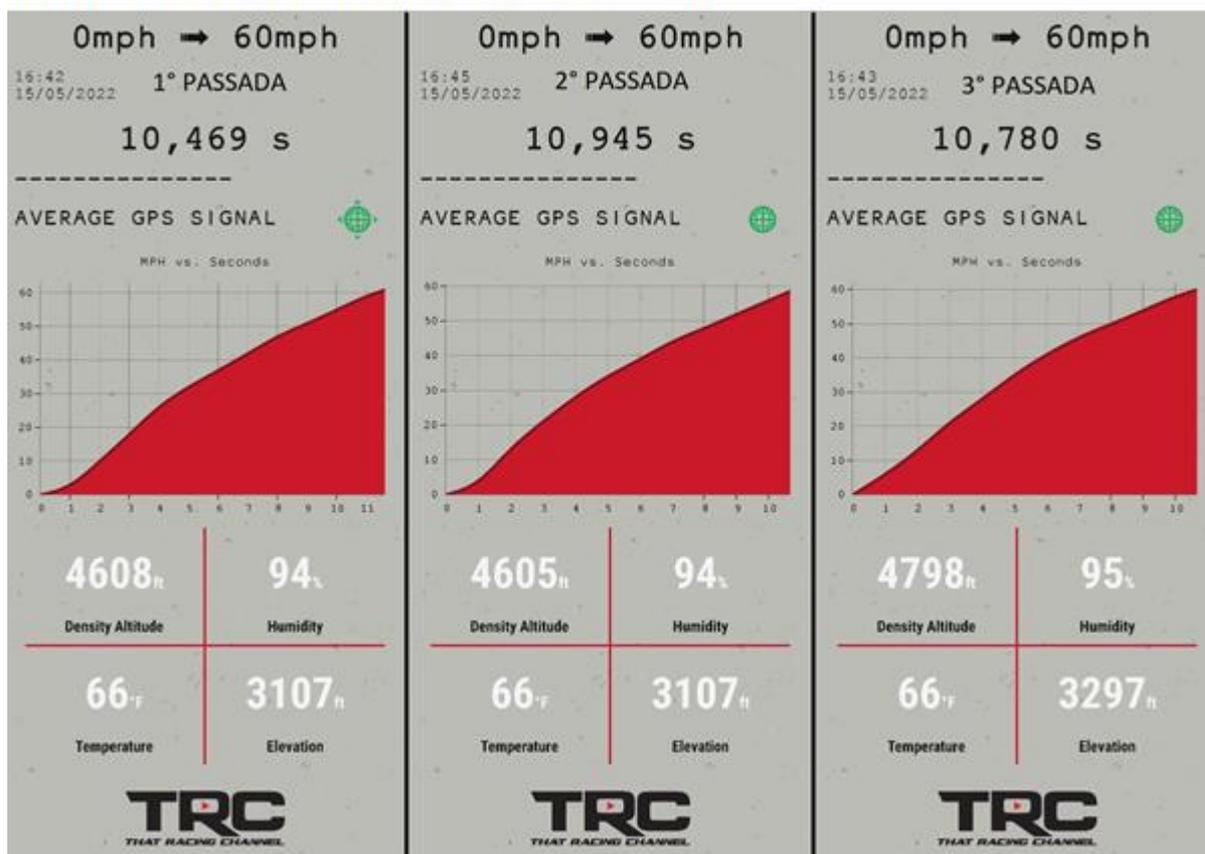


Fonte: O autor.

Passando para o segundo veículo que possui turbocompressor, os testes foram realizados nas mesmas condições, sempre seguindo os parâmetros usados com o primeiro veículo.

Dessa forma foi feito o teste de aceleração e na primeira passada, o tempo foi de 10,46 segundos, a segunda foi de 10,94 segundos e a terceira foi de 10,78 segundos, conforme figura 8.

Figura 8: Teste Polo 1.0 TSI usando That Racing Channel



Fonte: O autor.

A média de tempo do segundo veículo foi de 10,73 segundos e o desvio padrão foi de 0,17, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 – Análise dos tempos do Polo 1.0 TSI

Análise tempos Polo 1.0 TSI			
1° passada	10,469	Média	10,73133
2° passada	10,945	Desvio padrão	0,174889
3° passada	10,78		

Para o teste de consumo, o veículo com turbocompressor, seguiu os mesmos parâmetros do primeiro, sendo eles: a largada em repouso até atingir a velocidade de 50 Km/h e mantê-la durante os 3 primeiros quilômetros e terminar o teste a uma velocidade de 80 Km/h completando o percurso de 6,45 quilômetros.

Todos esses dados foram registrados também pelo software Strava, conforme mostra a figura 9.

Figura 9: Percurso Polo 1.0 TSI



Fonte: O autor.

No final do teste de consumo, o indicador de consumo do segundo veículo mostrava uma média de 14,7 quilômetros por litro, conforme foto do computador de bordo do veículo, mostrado na figura 10, mostrando um consumo de 0,438 litros de combustível, conforme tabela 5.

Figura 10: Computador de bordo Polo 1.0 TSI



Fonte: O autor

Tabela 5 – Consumo Polo 1.0 TSI

Consumo Polo 1.0 TSI	
Percurso	6,45 Km
Média	14,7 Km/l
Combustível gasto	0,438 l

Ao final dos testes de combustível, foi comprovada uma eficiência do motor com turbocompressor em todos os aspectos analisados.

No quesito potência, o motor com turbocompressor mostrou ser 52,3 % mais eficiente comparado ao naturalmente aspirado. Já no quesito aceleração, o veículo com turbocompressor realizou os testes 2,96 segundos mais rápidos, mostrando uma eficiência superior de 21,6%. E no quesito consumo, novamente o motor sobrealimentado mostrou um consumo relativamente menor durante os testes, 4,25% a menos comparado ao outro motor, conforme tabela 6.

Tabela 6 – Comparação Motor 1.0 MPI e 1.0 TSI

Comparação dos motores				
	Potência	Torque	Aceleração	Consumo
1.0 MPI	84 cv	10,4 kgfm	13,69 s	14,1 km/l
1.0 TSI	128 cv	20,4 kgfm	10,73 s	14,7 km/l
Percentual sobreposto TSI em relação MPI	52,30%	96,10%	21,60%	4,25%

No quesito torque, a superioridade do motor sobre alimentado se mostrou ser 96,1% mais eficaz. Grande parte deste resultado se dá ao controle da injeção de ar no motor, visto que isso possibilita que o motor trabalhe com uma mistura ar-combustível mais pobre, ou seja, o volume de ar é superior ao volume de combustível dentro da câmara de combustão, possibilitando uma economia de combustível sem perder potência.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto uma comparação entre um motor naturalmente aspirado e um motor sobrealimentado, onde ambos os motores equipam um mesmo veículo da marca Volkswagen, modelo Polo.

Para isto, foi feita uma pesquisa de referencial teórico para demonstrar o que é um motor ciclo Otto 4 tempos e o que é um turbo compressor. Além de obter dados publicados pela própria montadora.

Seguindo adiante, foi determinado o que seria comparado e os parâmetros para isso acontecer. Então foi definido testes de consumo e aceleração de dois veículos de mesmo modelo, porém com motores diferentes.

Após a realização dos testes, os dados foram comparados e a eficiência do motor sobrealimentado foi superior em todos os parâmetros comparados.

Com este resultado é possível concluir que o motor turbo é consideravelmente mais eficiente pois consegue entregar mais potência com um consumo de combustível menor.

Uma sugestão para trabalhos futuros é avaliar se o uso de um turbocompressor em um motor ciclo Otto 4 tempos pode comprometer algum outro componente interno.

REFERÊNCIAS

BOSCH, Robert. **Manual de tecnologia automotiva**. Edgard Blucher, 2005.

BRUNETTI, Fabiano. **Motores de combustão interna**: Volume 1. Editora Blucher, 1 de jan. de 2018.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. V.1, São Paulo: Blucher, 2012.

CAPELLI, Alexandre. **Eletroeletrônica automotiva**: injeção eletrônica, arquitetura do motor e sistemas embarcados. São Paulo: Érica, 2010.

ENTENDA COMO FUNCIONA O TURBOCOMPRESSOR. **SIMPLO**, 2019. Disponível em: <<https://blog.simplusbr.com/turbo-compressor>>. Acesso em: 01/11/2021.

FROTA DE VEÍCULOS. **Governo Federal**, 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021>>. Acesso em: 01/11/2021.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York McGraw-hill, 1988.

MODELOS. **Volkswagen**, 2022. Disponível em: <<https://www.vw.com.br/pt/carros.html>>. Acesso em: 05/05/2022.

MOTORES TURBO. **Hyundai**, 2021. Disponível em: <<https://www.hyundai.com.br/hyundaiexplica/tudo-sobre-motores-turbo.html>>. Acesso em: 01/11/2021.