

MATHEUS DE OLIVEIRA PAULA

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM MOTOR A COMBUSTÃO
INTERNA UTILIZANDO SOBREALIMENTAÇÃO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

MATHEUS DE OLIVEIRA PAULA

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM MOTOR A COMBUSTÃO
INTERNA UTILIZANDO SOBREALIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Marta de Souza.

UBERLÂNDIA

2022

MATHEUS DE OLIVEIRA PAULA

ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM MOTOR A COMBUSTÃO
INTERNA UTILIZANDO SOBREALIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 2023.

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Ana Marta de Souza - Orientadora

Prof^ª. Dr^ª. Elaine Gomes Assis

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida a mim concedida, e por ter me guiado até aqui.

Agradeço a minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Marta de Souza pela orientação e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos meus pais por sempre incentivar e apoiar a seguir o caminho dos estudos, e as minhas irmãs por sempre estarem ao meu lado e também estar caminhando nessa jornada.

Agradeço a minha namorada, por sempre estar presente neste percurso, me apoiando e ajudando mesmo nos momentos importantes e difíceis.

E agradeço a todos que contribuíram com alguma forma para essa formação.

“A dúvida é o princípio da sabedoria.”

Aristóteles

RESUMO

Este presente trabalho tem como intuito apresentar de modo sucinto como ocorre a utilização de turbocompressores em veículos da atualidade, mostrando como esta tecnologia pode influenciar o desempenho dos motores de combustão interna.

Primeiramente, o trabalho aborda alguns fatos históricos sobre a origem e componentes dos motores de combustão interna com ignição por centelha (ICE). Posteriormente realizou-se pesquisas bibliográficas, através desse estudo abordou os principais sistemas existentes no mercado, bem como suas vantagens e desvantagens quando comparado ao um sistema aspirado naturalmente. Foram analisados as fichas de alguns veículos e pôde-se concluir que o motor equipado com o turbocompressor apresenta maior desempenho que o motor naturalmente aspirado. A perspectiva é que as montadoras ,cada vez mais, introduzam essa tecnologia ao mercado.

Palavras chaves: motor a combustão interna, sobrealimentação, automóveis.

ABSTRACT

This present work aims to succinctly present how turbochargers are used in current vehicles, showing how this technology can influence the performance of internal combustion engines.

Firstly, the work addresses some historical facts about the origin and components of spark ignition internal combustion engines (ICE). Subsequently, bibliographical research was carried out, through this study it addressed the main systems on the market, as well as their advantages and disadvantages when compared to a naturally aspirated system. The records of some vehicles were analyzed and it was concluded that the engine equipped with the turbocharger proved to be more efficient than the conventionally aspirated engine and the prospect is that automakers will increasingly introduce this technology to the market.

Keywords: internal combustion engine, supercharger, cars.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 - Componentes básicos motor ICE..... | 13 |
| FIGURA 2 - Diagrama P x V do motor ICE Real | 14 |
| FIGURA 3 - Curvas características de um motor | 16 |
| FIGURA 4 - Forças aplicadas à árvore de manivelas de um motor. | 17 |
| FIGURA 5 - Gráfico de torque e potência de motores naturalmente aspirados, sobrealimentados por turbocompressor e compressor mecânico..... | 23 |
| FIGURA 6 - A instalação de um turbocompressor em um veículo..... | 24 |
| FIGURA 7 - Representação do funcionamento do turbocompressor | 24 |
| FIGURA 8 - A/R do turbocompressor..... | 25 |
| FIGURA 09 - Torque x rotação, para diferentes turbocompressores | 26 |
| FIGURA 10 - Mapa compressor..... | 27 |
| FIGURA 11 - Sistema de Geometria Variável..... | 28 |
| FIGURA 12 - Funcionamento turbocompressor de geometria variável segundo o regime do motor. | 29 |
| FIGURA 13 - Sistema do turbocompressor elétrico..... | 30 |
| FIGURA 14 - Componentes do turbocompressor elétrico. | 31 |
| FIGURA 15 – Compressor centrífugo..... | 32 |
| FIGURA 16 – Funcionamento Roots. | 33 |
| FIGURA 17 - Esquema de montagem do compressor roots..... | 34 |
| FIGURA 18 - Compressor parafuso. | 35 |
| FIGURA 19 - Funcionamento do compressor parafuso. | 35 |
| FIGURA 20 - Compressor tipo palheta. | 36 |
| FIGURA 21 - Componentes do compressor tipo palheta | 36 |
| FIGURA 22 - Compressor tipo “G”. | 37 |
| FIGURA 23 - Funcionamento do compressor “G”..... | 38 |
| FIGURA 24 - Curva de desempenho do Honda Civic. | 43 |
| FIGURA 25 - Curva de desempenho do polo 1.0..... | 47 |
| FIGURA 26 - Curva de desempenho do polo 1.6..... | 47 |
| FIGURA 27 - Curva de desempenho do polo 200 TSI..... | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Chevrolet | 39 |
| TABELA 2 - Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Hyundai | 40 |
| TABELA 3 - Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Honda | 41 |
| TABELA 4 - Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Ford. | 44 |
| TABELA 5 - Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Volkswagen (Jetta). | 45 |
| TABELA 6 - Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Volkswagen (Polo). | 46 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 - INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2 - OBJETIVO | 12 |
| 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 3.1 - FUNCIONAMENTO DO MOTOR ICE..... | 13 |
| 3.1.1 - CILINDRADA | 15 |
| 3.1.2 -RAZÃO DE COMPRESSÃO | 15 |
| 3.2 - DESEMPENHO | 16 |
| 3.2.1 - TORQUE | 17 |
| 3.2.2 - POTÊNCIA..... | 18 |
| 3.2.3 - S.F.C. (SPECIFIC FUEL CONSUMPTION) - CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTÍVEL..... | 19 |
| 3.2.4 - PRESSÃO MÉDIA EFETIVA..... | 20 |
| 3.2.5 - EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA (NV) | 20 |
| 3.2.6 - EFICIÊNCIA MECÂNICA (NM)..... | 21 |
| 3.2.7 - EFICIÊNCIA TÉRMICA (NT) | 21 |
| 3.3 - SOBREALIMENTAÇÃO..... | 22 |
| 3.3.1 - TURBOCOMPRESSOR | 23 |
| A - FATORES DE DESEMPENHO DO TURBOCOMPRESSOR | 25 |
| 3.3.1.1 - TURBOCOMPRESSOR DE GEOMETRIA VARIÁVEL | 28 |
| 3.3.1.2 - TURBOCOMPRESSOR ELÉTRICO | 30 |
| 3.3.3 - COMPRESSOR MECÂNICO | 31 |
| 3.3.3.1 - COMPRESSOR CENTRÍFUGO | 32 |
| 3.3.3.2 - COMPRESSOR DE LÓBULO (ROOTS)..... | 33 |
| 3.3.3.3 - COMPRESSOR TIPO PARAFUSO (LYSHOLM)..... | 35 |
| 3.3.3.4 - COMPRESSOR TIPO PALHETA | 36 |
| 3.3.3.5 - COMPRESSOR TIPO G (ESPIRAL)..... | 37 |
| 4 - METODOLOGIA | 38 |
| 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 39 |
| 5.1 - ESTUDO DE CASO 1 | 39 |

| | |
|-------------------------------------|-----------|
| 5.2 - ESTUDO DE CASO 2 | 40 |
| 5.3 - ESTUDO DE CASO 3 | 41 |
| 5.4 - ESTUDO DE CASO 4 | 44 |
| 5.5 - ESTUDO DE CASO 5 | 45 |
| 5.6 - ESTUDO DE CASO 6 | 46 |
| 6 - CONCLUSÕES..... | 49 |
| 7 - REFERÊNCIAS..... | 50 |

1 INTRODUÇÃO

O inventor do motor turbo foi o suíço Alfred Büchi que, em 1903, começou a experimentar um sistema muito primitivo de turbo alimentação, mas que daria as bases para os motores turbo de hoje, e em 1905, ele registrou uma patente, onde explicava que os motores de combustão interna perderam dois terços da sua energia sob a forma de calor por meio do tubo de escapamento.

Atualmente, encontra-se no mercado um grande número de carros equipados com motores turbo, e embora agora estejamos mais familiarizados com eles do que há várias décadas, convém lembrar que fizeram suas primeiras aparições foram na indústria aeronáutica e naval.

Antigamente a palavra “turbo” era imediatamente associada com automóveis de alta performance, competição ou modelos preparados. Mas esse cenário mudou drasticamente nos últimos anos e esse componente atualmente está intimamente ligado à eficiência energética. que se traduz por automóveis mais econômicos e menos poluentes do que a qualquer outra coisa.

O turbo é um importante componente do processo de “downsizing”, que consiste em adotar motores de menor deslocamento volumétrico, e em muitos casos, inclusive com redução no número de cilindros, mas mantendo os níveis de potência e de desempenho. O motor com dimensões menores será, conseqüentemente, mais leve fator que, juntamente com a ajuda do turbo, compensa a menor cilindrada. Além da redução de peso, o motor mais compacto também tem a vantagem de sofrer menos perda por atrito.

A introdução dos turbocompressores nos veículos da atualidade vem cada vez mais mostrando ser uma alternativa eficaz por manter-se a potência e diminuir o volume dos motores. Pode-se dizer que grande parte das montadoras apresenta pelo menos um modelo de veículo que conte com o uso de um turbocompressor em sua powertrain.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo comparar fichas técnicas de diferentes veículos automotivos, analisando o efeito do uso de turbocompressores no desempenho do mesmo. Para cumprir tal objetivo serão analisados principalmente os parâmetros torque e potência.

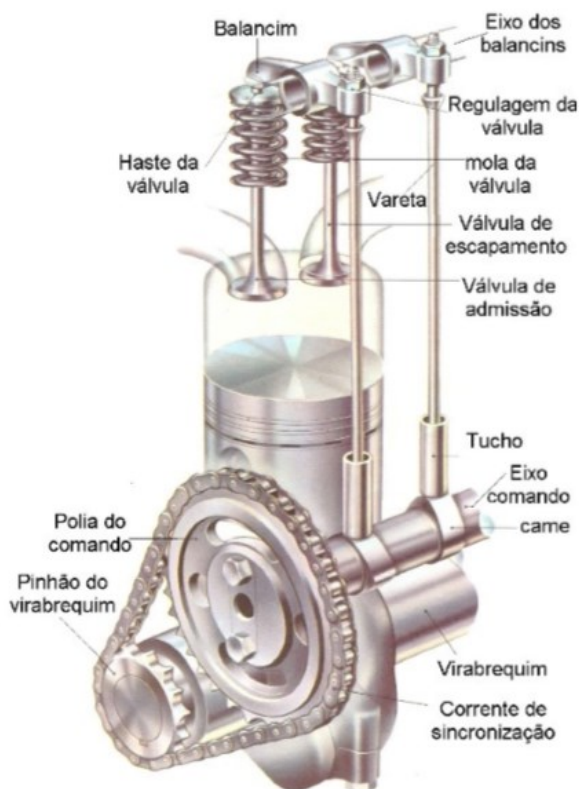
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Funcionamento do Motor ICE

Os motores de ignição por centelha (ICE) ou spark ignition (SI), são motores do ciclo Otto. Este ciclo foi idealizado pelo engenheiro alemão Nikolaus Otto que construiu o primeiro motor de combustão interna. Os motores atuais mantêm o mesmo princípio e estão em constante atualização tecnológica, buscando alcançar melhores índices de potência, consumo e emissão de poluentes. Esta máquina geradora de força motriz vem evoluindo gradativamente com o avanço da tecnologia e novos estudos aplicados a materiais e combustíveis com o objetivo de deixá-lo com uma eficiência energética cada vez melhor.

As máquinas à combustão interna do tipo ciclo Otto, são compostas de no mínimo um cilindro, contendo um êmbolo móvel (pistão) e diversas peças móveis. A figura 1, abaixo é uma representação esquemática e simplificada dos componentes de uma máquina Otto.

Figura 1. Componentes básicos motor ICE.



Fonte: Câmara. J. Motores de combustão interna, 2003

A seguir está descrito detalhadamente o funcionamento de um motor tipo Otto para cada ciclo de funcionamento. Esse ciclo descreve como funcionam os motores mais comumente usados com os combustíveis de gasolina, álcool, gás liquefeito do petróleo ou gás natural (metano) e que tem a ignição provocada por centelha em uma vela.

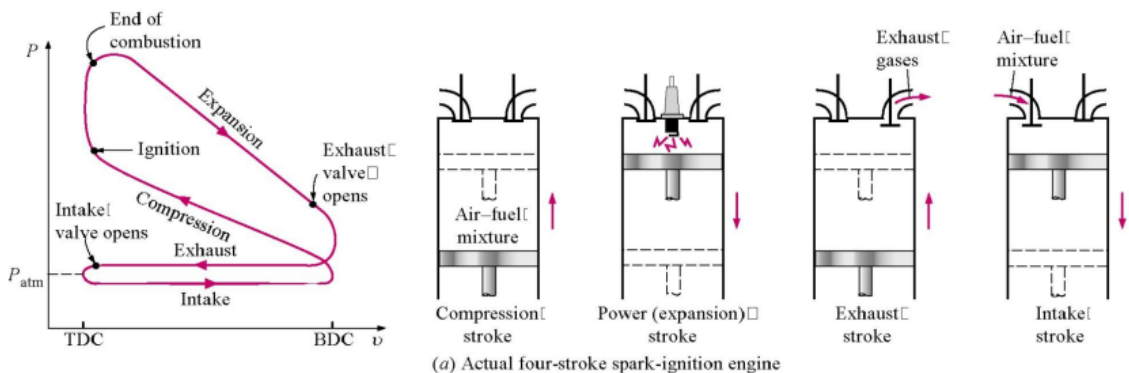
1º tempo: Admissão — Uma mistura de ar e de combustível é aspirada para o interior do cilindro do motor através da válvula de admissão que se encontra aberta. A mistura ar-combustível começa a ser formada no coletor de admissão pela introdução do combustível na corrente de ar.

2º tempo: Compressão — A mistura ar-combustível é comprimida ocorrendo uma maior integração entre as partículas de combustível e de ar. Durante este tempo o êmbolo desloca-se do ponto morto inferior para o ponto morto superior e as válvulas de admissão e de escape encontram-se fechadas. Quando o êmbolo se aproxima do ponto morto superior o sistema de ignição dispara uma centelha entre os eletrodos de uma vela que se encontra introduzida no seio da mistura.

3º tempo: Explosão ou combustão — A centelha disparada na vela provoca a ignição da mistura, deflagrando a rápida combustão da mistura previamente comprimida. Durante este tempo o êmbolo movimenta-se do ponto morto superior para o ponto morto inferior. Quando o êmbolo se aproxima do ponto morto inferior, neste tempo, a válvula de escape abre-se.

4º tempo: Escape ou Expulsão — Neste tempo o êmbolo desloca se do ponto morto inferior para o ponto morto superior enquanto a válvula de escape encontra-se aberta. Durante o tempo de descarga os gases formados no processo de combustão são varridos do cilindro para o meio ambiente.

Figura 2. Diagrama P x V do Motor ICE Real



Fonte: Termodinâmica Yunus A. Cengel e Michael A. Boles 5ed

O diagrama P x V da figura acima representa o ciclo real de um motor ICE de quatro tempos. O motor admite uma mistura ar-combustível preparada no carburador, no momento da combustão essa mistura homogênea recebe a energia de ativação para o início da combustão por uma faísca produzida na vela. Observa que a combustão não ocorre a volume constante como no ciclo Padrão ar Otto, mas durante a combustão temos grande variação de pressão para pequena variação de volume.

3.1.1 CILINDRADA

É o volume deslocado pelo motor, ou seja, é o volume que o pistão desloca dentro do cilindro ao se movimentar do ponto morto inferior ao ponto morto superior. A cilindrada total do motor nada mais é do que a cilindrada multiplicada pelo número de cilindros, como representado na equação 01.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h \cdot n}{4} \quad (01)$$

onde:

V = cilindrada, expressa em cm³, litros ou pol³;

D = diâmetro do pistão, em cm ou pol;

h = curso do pistão do PMI ao PMS, em cm ou pol;

n = número de cilindros.

3.1.2 Razão de Compressão

É a relação entre o volume existente no cilindro quando o pistão se encontra no ponto morto inferior e o volume existente no cilindro quando o pistão se encontra no ponto morto superior, através da equação 02 podemos calcular.

$$R_c = \frac{V + v}{v} \quad (02)$$

onde:

R_c = relação de compressão (adimensional);

V = cilindrada individual (de um pistão), em cm³, pol³, litros;

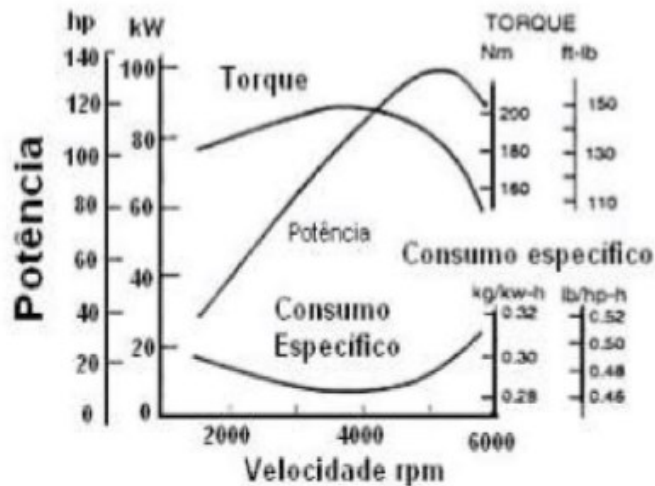
v = volume da câmara de combustão, em cm³, pol³, litros.

3.2 Desempenho

O desempenho do motor, é na maioria dos casos, indicado na forma de curvas de torque e potência que varrem a rotação de trabalho do motor. Tais curvas são na verdade, a resposta de toda a interação de mecanismos e tecnologia envolvidos durante o funcionamento da máquina térmica. Através destas se obtém a sua identidade e é então possível determinar qual a melhor aplicação ou qual aprimoramento deve ser trabalhado em determinado motor.

As propriedades torque (T), potência (W) e consumo específico (Ce), são as que serão utilizadas para o "levantamento" das curvas características de um motor de combustão interna, todas elas obtidas em função da rotação para motores em que se pode controlar a quantidade de ar e combustível admitidas (caso dos motores de automóveis). Estas curvas estão mostradas na Figura 3.

Figura 3. Curvas características de um motor



Fonte: PERUZZO, (2010)

Observando no gráfico em geral na Figura 3, no motor de combustão interna, o torque máximo é alcançado antes da potência máxima e ao passo que o torque sofre aumento com as rotações, a curva de potência cresce rapidamente até o ponto onde o torque é máximo, após este ponto o aumento da potência se dá apenas devido ao aumento da rotação até o ponto em que a potência atinge seu máximo. Com o aumento da velocidade ocorre o aumento das perdas seja pela dificuldade de enchimento completo do cilindro ou pelo atrito excessivo o que faz com que a potência cai rapidamente após seu ponto de máximo. O conhecimento da curva de torque

é de suma importância para identificar o momento mais adequado para a troca de marchas, reduzindo o consumo e aumentando a o rendimento do motor.

3.2.1 Torque

Torque é uma grandeza vetorial definida através da componente perpendicular ao eixo de rotação da força aplicada sobre um objeto, que é efetivamente utilizada para fazê-lo girar. Nos motores o torque é normalmente medido através de um dinamômetro conectado ao seu volante, e seu valor é dado pela fórmula representado na equação 03.

$$T = F \times d \quad (03)$$

Onde:

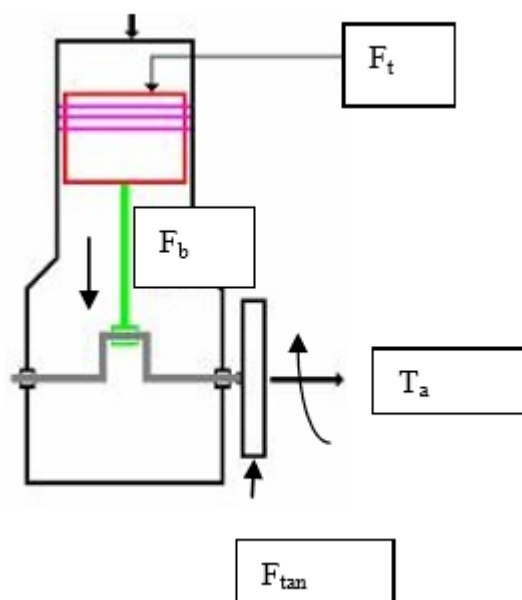
T = torque;

F = intensidade da força atuante;

d = distância perpendicular entre o eixo e a direção a força.

Como mostra a Figura 4, o conjunto pistão-biela-manivela, faz aparecer um momento instantâneo (T_a) no eixo do motor, causado pela força tangencial (F_{tan}).

Figura 4. Forças aplicadas à árvore de manivelas de um motor.



Fonte: www.fem.unicamp.br/~franklin/EM886/Exp1_motor_altern.pdf

Na Figura 4, F_t é a força total, F_b é a força na biela, F_{tan} é a força tangencial e T_a é o torque instantâneo. Embora o raio da manivela seja constante, esse momento varia com o ângulo α , que a manivela faz com relação à linha de centro do cilindro. Com o funcionamento do motor a uma dada rotação se obtém um momento médio positivo que será chamado de torque (T).

3.2.2 Potência

A potência de um motor é definida como o trabalho realizado numa unidade de tempo. (BRUNETTI, 2012). A potência é calculada através da equação 04.

$$W = \frac{F \cdot d}{t} \quad (04)$$

Onde:

W = potência;

F = intensidade da força atuante;

d = distância perpendicular entre o eixo e a direção à força;

t = tempo.

Ao contrário do torque, a potência depende da rotação do motor, ou seja, nas rotações mais altas alcança-se uma maior potência até um ponto em que, mesmo aumentando-se a rotação, a potência passa a diminuir.

Além disso, um motor de combustão interna, também pode ser definido por quatro potências:

Potência Térmica (Q) é o calor fornecido por unidade de tempo pela queima do combustível; onde: PCI é o poder calorífico inferior do combustível, ou seja, energia por unidade de massa, \dot{m}_c é a vazão em massa de combustível que o motor consome, como mostrado na equação 05.

$$\dot{Q} = \dot{m}_c PCI \quad (05)$$

Potência indicada (W_i) é a potência desenvolvida na cabeça dos pistões;

Potência de atrito (W_f) é a potência consumida pelas resistências internas do motor;

Potência efetiva (W_e) é a potência medida no eixo do motor, representado pela equação 06.

$$\dot{W}_e = \dot{W}_i - \dot{W}_f \quad (06)$$

Onde \dot{W}_e pode ser expresso em função do torque (T) e do número de rotação do motor (n), normalmente expresso em rotações por minuto ou rpm, como mostrado na equação 07.

$$\dot{W}_e = \omega T = \frac{2\pi n}{60} T \quad (07)$$

Onde ω é a velocidade angular do motor.

3.2.3 S.F.C. (Specific fuel Consumption) - Consumo Específico de Combustível

O consumo específico representa o consumo mássico de combustível por unidade de trabalho de saída. É um indicador utilizado na observação do comportamento de motores de combustão interna em diferentes regimes de funcionamento (rotação e carga) e na comparação de diferentes combustíveis.

De acordo com Heywood (1988), essa medida representa o quanto de eficiência apresenta um motor levando-se em consideração o combustível utilizado.

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P_e} \quad (08)$$

Em que SFC é o consumo específico de combustível, \dot{m}_f é a vazão mássica de combustível e P_e é a potência efetiva, é calculado através da equação 08. A potência efetiva é medida no dinamômetro e o consumo de combustível é medido de diferentes maneiras, gravimétrica ou volumetricamente (BRUNETTI, 2012 a).

Uma medida de eficiência do motor é a eficiência térmica de conversão de combustível ou eficiência térmica. De acordo com Heywood (1988), em motores de combustão interna, a eficiência térmica pode ser definida pela relação entre a potência de saída do motor pela energia de entrada do combustível. Essa medida é dada pela equação 09.

$$\eta_t = \frac{P_e}{\dot{m}_f Q_{HV}} \quad (09)$$

Em que η_t é a eficiência térmica e Q_{HV} é o poder calorífico do combustível. Deve-se notar que a energia do combustível fornecido ao motor por ciclo não é totalmente convertida em energia

térmica porque o processo de combustão real não é completo. Quando o ar presente é insuficiente para oxidar o combustível por completo, a falta de oxigênio impede a conversão total da energia combustível em energia térmica (HEYWOOD, 1988). Além disso, outros fatores como temperatura e pressão, cinética da reação, entre outros, podem influenciar a eficiência térmica.

3.2.4 Pressão Média Efetiva

O trabalho em um ciclo termodinâmico desenvolvido no fluido ativo é igual a área do ciclo desenhada pelo diagrama $P \times V$, no entanto se esse trabalho for igual ao trabalho desenvolvido por uma pressão aplicada sobre a cabeça do cilindro durante o seu curso, dizemos que essa pressão é a pressão média efetiva (PME). A pressão média efetiva é muito importante quando se quer saber a eficácia com que o motor aproveita a sua cilindrada, pois ela representa o trabalho por unidade de cilindrada, entendendo-se então, que um motor de pequena cilindrada produz pouco trabalho e que um motor de grande cilindrada produz um grande trabalho, é ainda de se esperar que motores de desempenho semelhantes tenham pressões médias semelhantes. As mesmas relações utilizadas para a potência também podem ser usadas para descrever a pressão média efetiva, desse modo, temos a possibilidade de comparar o desempenho de motores, mesmo que de tamanhos e potências diferentes. Pode-se ainda afirmar que o torque é proporcional a pressão média efetiva.

3.2.5 Eficiência Volumétrica (η_v)

É a relação entre a massa de ar que entra no cilindro durante o processo de admissão (abertura da válvula de admissão e movimento do pistão do ponto morto superior para o ponto morto inferior), e a massa de ar que ocuparia o cilindro considerando a densidade do ar a pressão atmosférica. “A eficiência volumétrica é de grande interesse como medida de desempenho do conjunto cilindro como elemento de bombeamento” (BRUNETTI, 2012).

$$\eta_v = m_{ar} / (\rho_{ar} \cdot V_d) \quad (10)$$

Onde:

m_{ar} = Massa de ar admitida no cilindro por ciclo (g);

ρ_{ar} = Densidade do ar (g/cm³);

V_d = Volume de deslocamento.

A Equação 10 mostra que a η_v é diretamente influenciada pela massa de ar inserida dentro de cada cilindro do motor a cada ciclo. Contudo, a η_v é somente um indicador teórico e que leva em consideração fatores de restrição ao fluxo. Por exemplo: filtro de ar, curvas na tubulação de admissão, borboleta de aceleração, válvulas e entre outros restritores que acabam influenciando no fluxo de ar admitido pelo motor (TYGESEN, 2009).

3.2.6 Eficiência Mecânica (η_m)

A eficiência mecânica de um motor de CI, é definida através da razão entre a potência efetiva e a potência indicada, como mostrado na equação 11.

$$\eta_m = P_e / P_i \quad (11)$$

Onde:

P_e = Potência efetiva;

P_i = Potência indicada;

Sendo o atrito o maior responsável pela variação da eficiência mecânica nos motores. Segundo BRUNETTI (2012) para verificar a potência de atrito no motor e necessário realizar com o motor de CI desligado, porém como a ausência de carga dentro do cilindro a um comprometimento no resultado fazendo assim um cálculo aproximado da eficiência mecânica.

Porém Júlio César (2013), disse que no motor de CI apenas uma parcela da energia é efetivamente disponível, sendo que 35% dessa energia é retirada na forma de calor através dos gases de escapamento, 32% na forma de calor dissipado pelo sistema de arrefecimento, 8% na perda por atritos internos decorrentes do funcionamento do motor, e somente 25% dessa energia efetivamente disponível no volante do motor.

3.2.7 Eficiência Térmica (η_t)

Um parâmetro importante na análise de um motor de CI é o rendimento global ou eficiência térmica (η_t), que demonstra a quantidade de energia do combustível que realmente

se transforma em trabalho mecânico no eixo virabrequim, representado pela Equação 12 (GIOCOSSA, 2000).

$$\eta_t = P_e / \dot{m}_c \cdot Q_{c,i} \quad (12)$$

Onde:

P_e = Potência efetiva;

\dot{m}_c = Vazão mássica de combustível (Kg/s);

$Q_{c,i}$ = Poder calorífico inferior do combustível (MJ/Kg).

Os motores de CI têm como uma das principais funções, converter em trabalho mecânico a maior parte da energia térmica liberada na queima da mistura ar/combustível dentro dos cilindros. Porém, grande parte dessa energia é perdida em forma de atrito, calor e em trabalho para movimentar os mecanismos necessários ao funcionamento do próprio motor.

3.3 Sobrealimentação

O rendimento dos motores de combustão interna ICE está diretamente relacionado ao trabalho realizado no momento da combustão da mistura ar + combustível, dessa forma a potência também é limitada pela quantidade da mistura que será queimada.

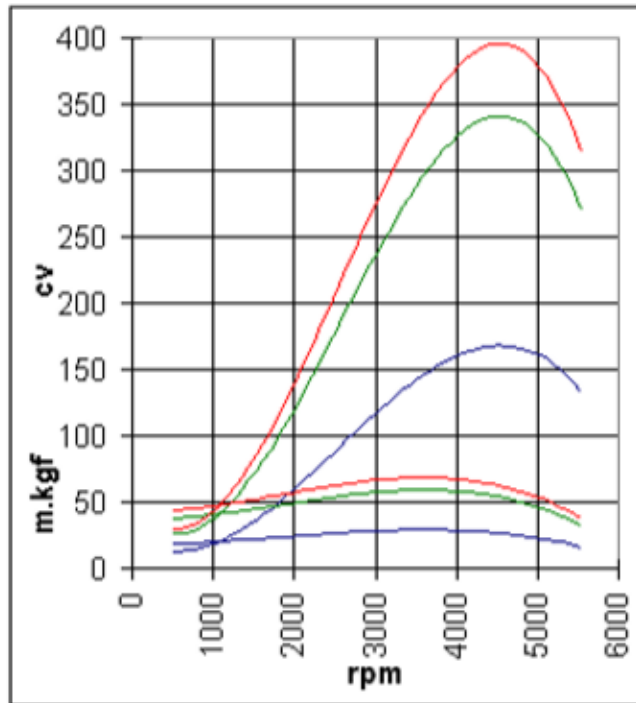
Compressores e Turbocompressores, também conhecidos como sistemas de indução forçada, são equipamentos que ajudam os motores a render mais potência. Com mais ar e combustível na câmara a queima fica mais rica e as explosões geram mais força.

Seguindo essa linha de raciocínio, um motor turbocompressor ou equipado com um compressor produz mais potência que o mesmo motor sem a sobrealimentação. Ambos têm a função de aumentar a potência do motor através do aumento da densidade do ar utilizado. O ar mais denso viabiliza a utilização de uma maior quantidade de combustível, resultando no aumento de potência. Lembrando que, além de ganho de desempenho (à partir de um mesmo motor) outra vantagem de motores sobrealimentados é a maior eficiência energética.

De acordo com o trabalho realizado por Luz, Torres e Santos (2008), pode ser conseguido um ganho de pressão de 0,41 a 0,55 bar (com pressão atmosférica de 1 bar), ou seja, é possível um ganho de 50% no fluxo de ar para o motor, o que garante ao motor um ganho de potência entre 30% e 40%. Segue abaixo na Figura 5, um gráfico que compara didaticamente o torque e

a potência de motores naturalmente aspirados (linhas azuis), sobrealimentados por turbocompressor (linhas vermelhas) e compressor mecânico (linhas verdes).

Figura 5. Gráfico de torque e potência de motores naturalmente aspirados, sobrealimentados por turbocompressor e compressor mecânico.



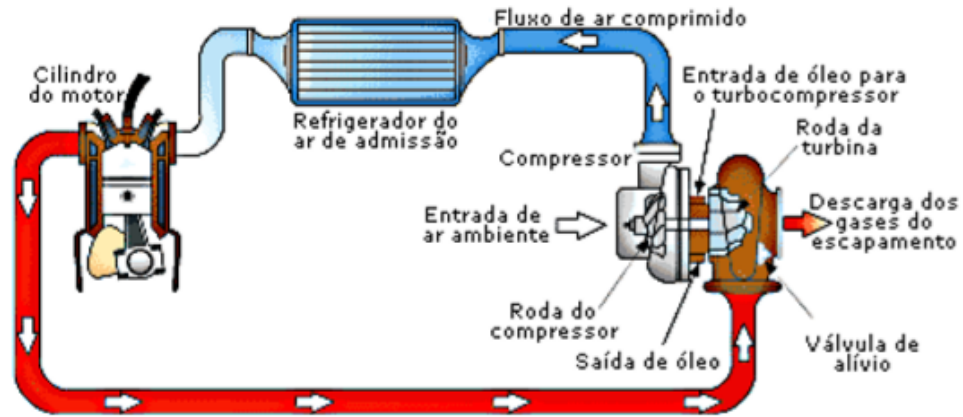
Fonte: http://www.omegacube.com.br/multimedia/materias/bestcars_consultoriodepreparacao.htm

3.3.1 Turbocompressor

A instalação de um turbocompressor nos dias de hoje, está sendo mais utilizada para obter um acréscimo de potência da ordem de 60% a 80% sobre a potência original. Segundo Pulkrabek (2003) os turbocompressores são definidos como sistema de admissão usados para aumentar a pressão do ar admitido no motor, resultando em uma maior massa de ar e combustível nos cilindros durante cada ciclo. O ar e combustível adicionais geram maior potência durante a combustão como resultado gera uma maior potência no eixo do motor.

Segundo Heywood (1988) um turbocompressor - é um compressor e uma turbina em um mesmo eixo, pois é utilizado para aumentar a densidade do ar admitido pelo motor. De forma que a energia disponível no fluxo de gases de escape é usada para movimentar a turbina que por sua vez movimentar o compressor fazendo assim o aumento a densidade do fluido antes que seja admitida em cada cilindro.

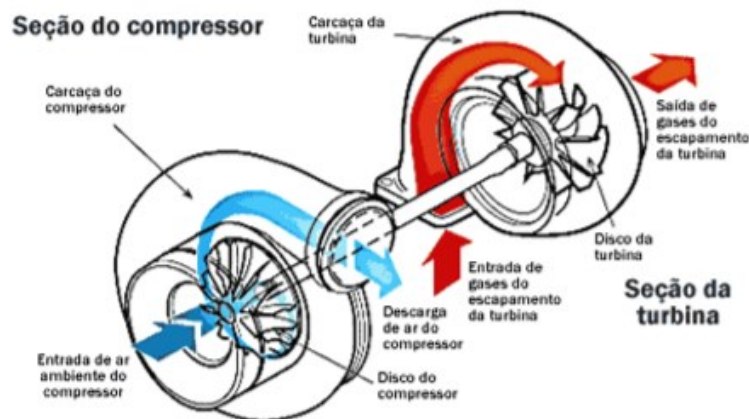
Figura 6. A instalação de um turbocompressor em um veículo



Fonte: Divulgação Garrett

A figura 6, representa o funcionamento de um turbocompressor em um veículo, onde os gases de escape movimentam a turbina, chamada de parte quente do turbocompressor, fornecendo movimento para o compressor, chamado de parte fria. O compressor aumenta a densidade do ar admitido pelo motor. Seguidamente este ar tem sua temperatura reduzida no resfriador do ar de admissão, popularmente conhecido como "intercooler", visando aumentar ainda mais a densidade do ar admitido pelo cilindro.

Figura 7. Representação do funcionamento do turbocompressor



Fonte: Divulgação da Garrett

A adaptação de um turbocompressor em um motor naturalmente aspirado é uma solução bastante aplicada, a automotiva. O motor mantém-se original e no momento que necessita por uma potência maior, ou seja, quando todo o acelerador está aberto, o turbocompressor passa a pressurizar o ar que irá para o motor, dessa maneira gerando maior potência, em relação a pressão atmosférica.

É necessário acertar o ponto de ignição e a mistura, de forma a otimizarmos o funcionamento do motor para as novas condições de uso.

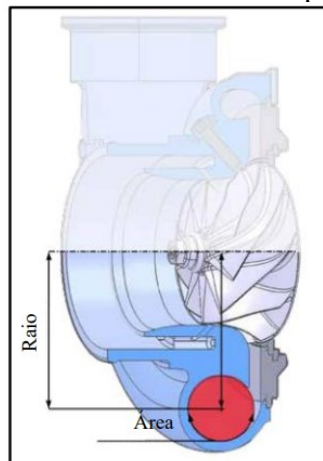
Nessa seleção é indispensável o uso dos mapas do compressor como ferramenta de dimensionamento do mesmo, onde podemos determinar a eficiência, fluxo de massa, capacidade de aumento de pressão e velocidade de turbo. A Figura 8 mostra um mapa de um compressor indicando as principais características.

A. Fatores de desempenho do turbocompressor

Um importante fator a ser definido para a escolha do turbocompressor é o A/R, o qual é uma relação de características geométricas dos componentes. O A/R é composto pela relação entre a área transversal da voluta da turbina (do compressor) dividido pelo raio do centro do rotor. A Figura 8 representa o A/R do sistema (GARRETT, 2018).

Segundo Bell (1997), o A/R é minimamente utilizado no cálculo de compressor, normalmente se utiliza na turbina. Uma relação de A/R pequena prioriza a eficiência em baixas rotações, pois mantém o fluxo na turbina, porém em altas rotações ocorre uma contrapressão no coletor de escapamento, dificultando assim o fluxo devido ao estrangulamento proveniente do pequeno A/R. Para a escolha do turbocompressor é preciso definir o A/R,

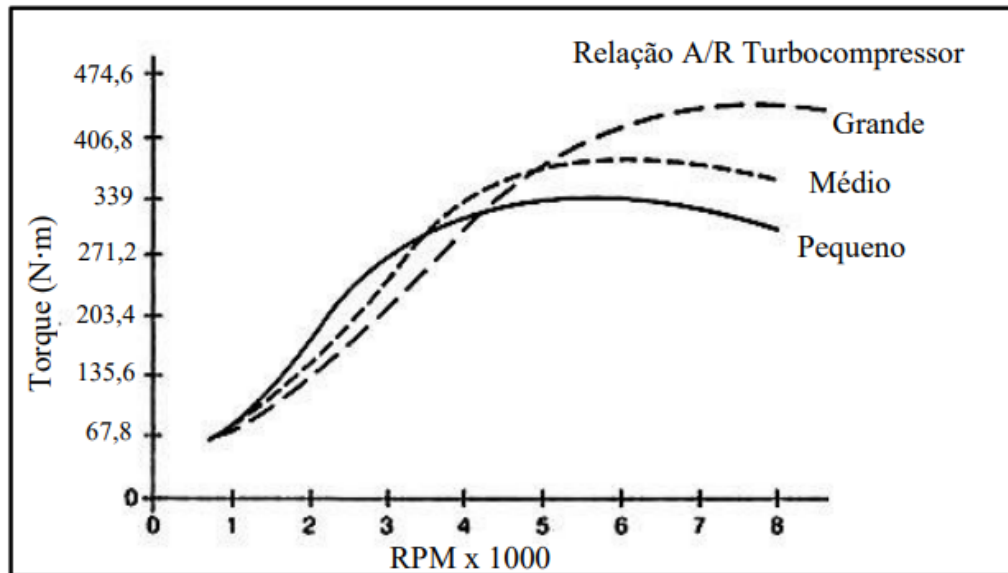
Figura 8 - A/R do turbocompressor



Fonte: adaptado de Garrett (2018)

Quando o A/R é demasiadamente grande ocorre o denominado lag, que se trata da dificuldade para que o gás de escapamento preencha toda a área da voluta, tendo então um atraso na rotação do eixo. Porém, esse mesmo A/R é desejável em motores de maior fluxo e que operem em altas rotações, pois não gera tanta contrapressão no coletor de escapamento. Isto é verificado na Figura 9 (BELL, 1997).

Figura 9 - Torque x rotação, para diferentes turbocompressores



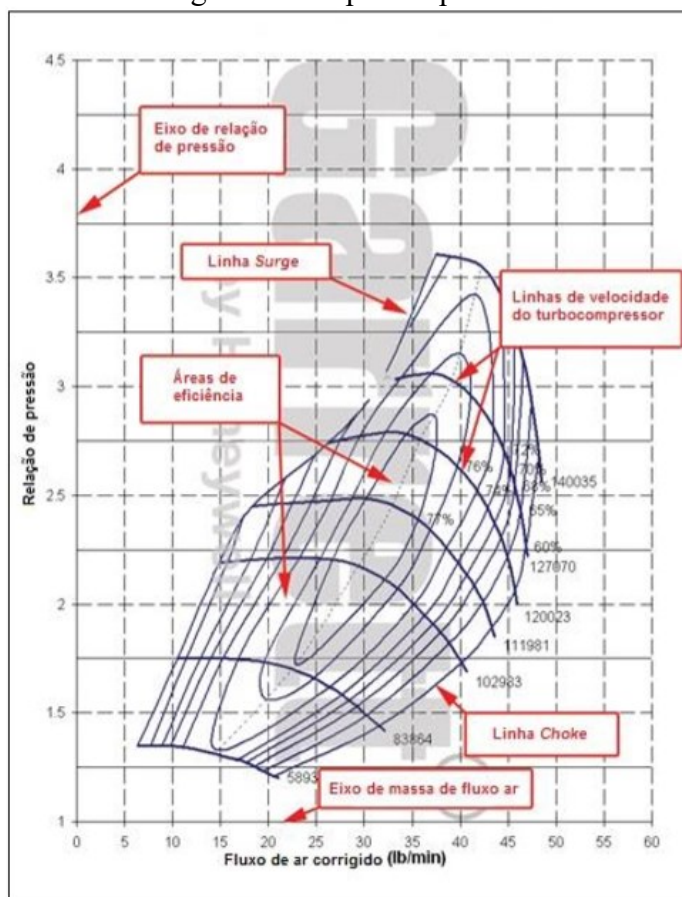
Fonte: adaptado de Bell (1997)

Para a seleção de um turbocompressor a ser instalado em um MCI, deve-se conhecer suas características construtivas, estabelecendo modos de uso do veículo. Para isso, os fabricantes do sistema turbocompressor disponibilizam mapas de rendimentos do compressor (BELL, 1997).

Os compressores utilizados no ramo automotivo são do tipo centrífugos, onde o ar entra pelo centro e é descarregado na direção radial. A seleção do compressor para a correta aplicação é feita através dos mapas de rendimento, disponibilizados pelo fabricante. Os mapas apresentam a relação entre a razão de pressões e a taxa de escoamento da massa de ar admitida (NAKANO, 2007).

Segundo Bosch (2005), ao lado esquerdo do gráfico da Figura 10 está a linha de Surge, que se refere à instabilidade do compressor ou também chamado de fluxo mínimo. Isso ocorre devida à alta pressão de descarga do compressor e baixo fluxo de ar. Conforme Nakano (2007), esta instabilidade na vazão de ar e o ruído resultante é conhecido como ressonância, muito danosa aos mancais e ao próprio eixo do turbo compressor. Normalmente essa faixa é evitada instalando uma válvula de alívio ao se fechar a borboleta, evitando assim que a inércia do sistema faça a pressão aumentar de maneira significativa.

Figura 10. Mapa compressor.



Fonte: Garrett by Honey Well, modificado

Esse mapa é definido por dois eixos, onde o eixo das abcissas representa o fluxo de ar e o eixo das ordenadas representa a razão de pressão relativa. A leitura deste gráfico é feita principalmente em função das Ilhas de Eficiência, que por sua vez são áreas irregulares de formato oblongo que representam as condições sob as quais o compressor é mais eficiente: quanto menor a ilha, maior a eficiência.

Além disso, existem as linhas que delimitam as ilhas a esquerda e a direita chamadas de Surge Line e Choke Line, onde a Surge Line localizada à esquerda das ilhas representa um limite que quando ultrapassado fazem o compressor operar de maneira instável devido ao fluxo de ar deficiente e a alta turbulência gerada, o que por sua vez pode levar ao desgaste prematuro ou inutilização do compressor. Esse fenômeno pode acontecer por dois motivos, o primeiro, e mais grave, é a utilização de um compressor demasiadamente grande para a demanda de ar necessária ao motor; já o segundo é menos nocivo, e ocorre quando o motor está operando à plena carga e o fluxo de ar é interrompido pelo brusco fechamento da borboleta de aceleração.

A direita das ilhas de eficiência, temos a choke line, que representa um limite onde a eficiência do turbo cai abaixo de 58%, sendo assim, essa linha diz respeito ao turbos menores,

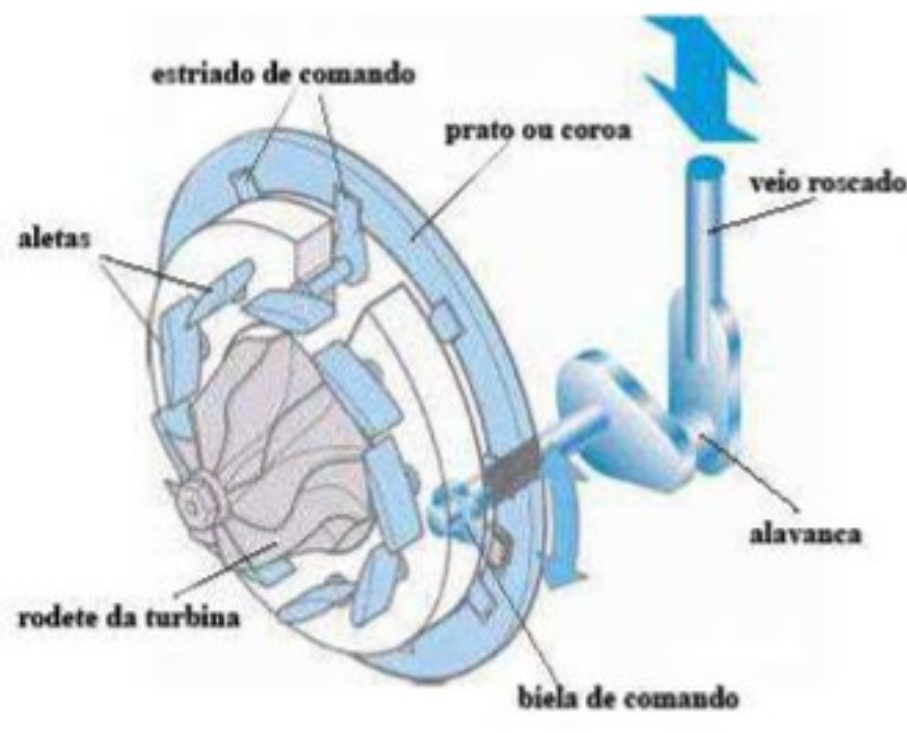
incapazes de prover o fluxo de ar necessário ao motor, que por sua vez, trabalha a elevadas rotações e temperaturas, o que pode através de contínuas repetições, inutilizar o equipamento.

Além disso existem em alguns mapas as linhas de velocidade da turbina (Turbocharger Speed Lines), que indica a rotação aproximada do eixo em diferentes faixas de pressão e fluxo de ar. Brunetti (2012) diz que a escolha adequada da turbina, é feita através de um processo iterativo até chegar a um conjunto de compressor e turbina que satisfaça as exigências do motor.

3.3.1.1 Turbocompressor de Geometria Variável

Os turbos convencionais têm o inconveniente de que a baixas rotações do motor o rodete da turbina apenas é impulsionado pelos gases de escape, pelo que o motor se comporta como se fosse atmosférico. Uma solução para isto é utilizar um turbo pequeno de baixa pressão que comece a comprimir o ar aspirado pelo motor desde rotações muito baixas, mas isto tem um inconveniente, é que a altas rotações do motor o turbo de baixa pressão não tem capacidade suficiente para comprimir todo o ar que necessita o motor, por tanto, a potência que ganhamos a baixas rotações vamos perde-la em altas.

Figura 11. Sistema de Geometria Variável.



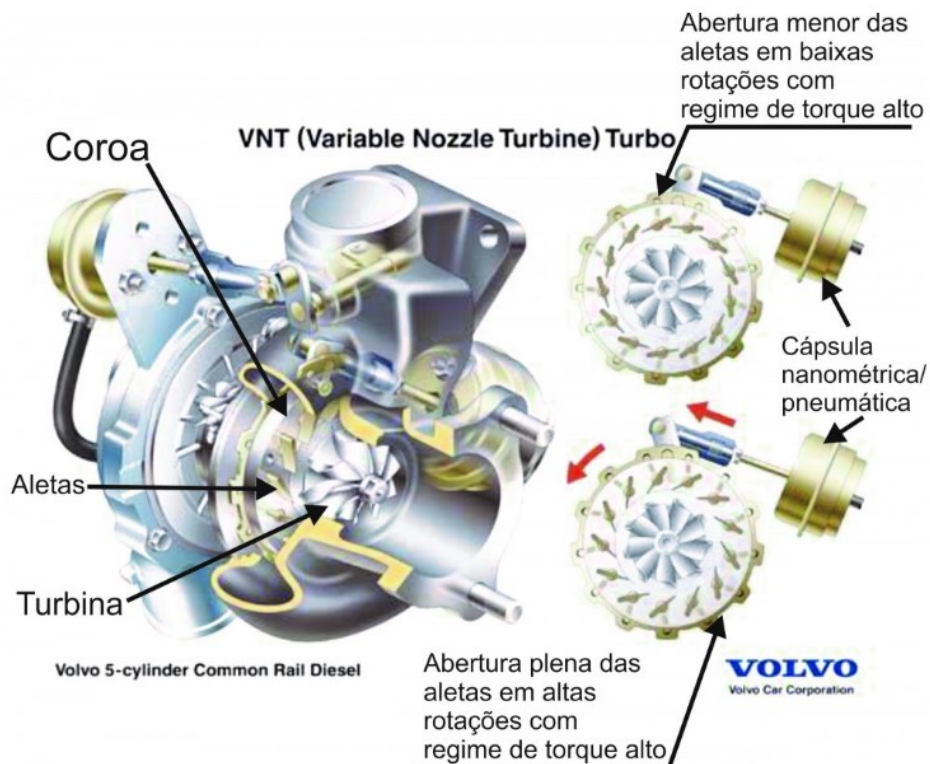
Fonte: Divulgação Borg Warner

Para corrigir este inconveniente procurou-se a solução de dotar uma mesma máquina “sopradora” da capacidade de comprimir o ar com eficácia tanto a baixas rotações como em altas, para isso desenvolveram-se os turbocompressores de geometria variável de diversos tamanhos, otimizando a curva de torque e potência.

Quando o motor está em baixas rotações de operação, a vazão gases de escape é menor, portando as palhetas permanecem mais fechadas, simulando uma carcaça de área mais reduzida, o que provoca o aumento da velocidade dos gases e aceleração da turbina e conseqüentemente um aumento da pressão de sobrealimentação, fazendo com que o torque aumente.

Quando o motor se encontra em altas rotações, o fluxo de gases de escape é maior, portanto as palhetas se abrem, permanecendo mais próxima a turbina e aumentando a área de passagem dos gases. Isso faz com que a velocidade dos gases de escape incidentes na turbina seja menor, mantendo a pressão de sobrealimentação estável e conseqüentemente um torque elevado. Como mostrado na figura 12.

Figura 12. Funcionamento turbocompressor de geometria variável segundo o regime do motor.

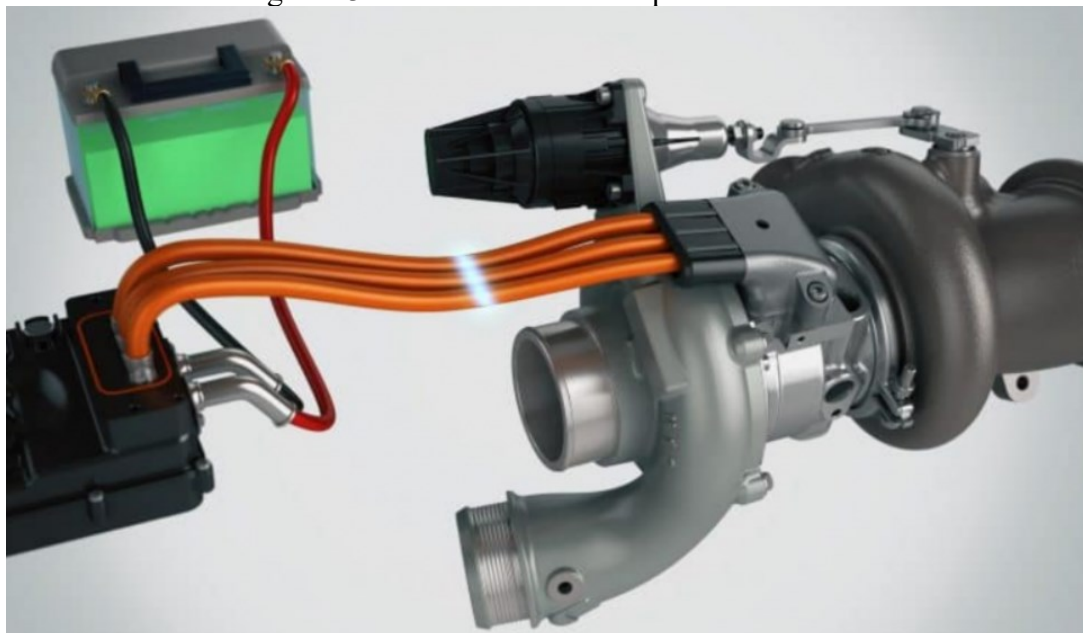


Fonte: <https://www.simplusbr.com/noticias/detalhes/simplicio-explica-turbo-compressor-de-geometria-variavel>

3.3.1.2 Turbocompressor Elétrico

Segundo a Mercedes-AMG está nos estágios finais do desenvolvimento de um sistema turbocompressor elétrico, para aproveitar os gases de escape na alimentação do motor com mais agilidade. Está sendo desenvolvido em parceria com a Garrett Motion, a tecnologia vem diretamente da Fórmula 1.

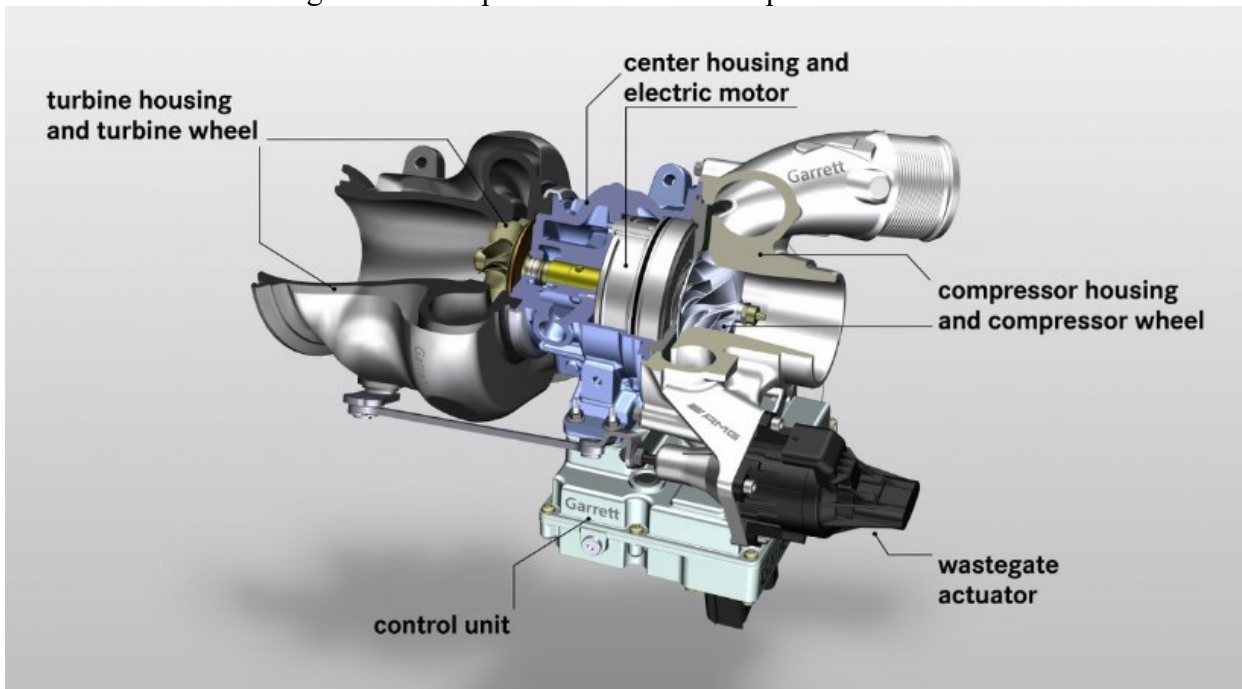
Figura 13. Sistema do turbocompressor elétrico.



Fonte: Autor desconhecido

O destaque do novo sistema de turboalimentação, que chamamos aqui de turbo elétrico, é um motor elétrico bem fino, com apenas uns 4 cm. Ele é integrado diretamente no eixo do compressor, entre a turbina, no lado do escapamento, e o compressor, no lado do ar fresco. Este motorzinho elétrico é controlado eletronicamente e aciona o compressor antes mesmo de ele receber o fluxo dos gases de escape. A eletrificação do turbocompressor melhora significativamente a resposta imediata a partir da marcha lenta e em toda a faixa de giros do motor, segundo a marca.

Figura 14. Componentes do turbocompressor elétrico.



Fonte: <https://motorshow.com.br/turbo-eletrico-mercedes-amg-elimina-turbo-lag-com-tecnologia-vinda-da-f1/>

Assim, o turbo lag é eliminado. Como resultado, o motor de combustão responde ainda mais espontaneamente ao acionamento pedal do acelerador, garantindo mais agilidade. Além disso, a eletrificação do turbocompressor permite um torque maior a baixas rotações, e isso também aumenta e otimiza a capacidade de aceleração. Mesmo quando o motorista tira o pé do acelerador ou aciona os freios, a tecnologia do turbo elétrico é capaz de manter a pressão o tempo todo, garantindo respostas diretas e contínuas, segundo a AMG.

3.3.2 Compressor mecânico

Os compressores mecânicos são poucos difundidos no Brasil. Devido à inexistência do lag dos motores turbinados, esta técnica seria mais adequada a motores com baixa cilindrada, onde a fase aspirada não é capaz de propiciar potência para essas situações, exigindo a sobrealimentação em diversas ocasiões. Devido à construção do compressor, este não é tão eficiente quanto o compressor de um turbocompressor, porém a maior desvantagem do compressor mecânico em relação ao turbocompressor é a fonte de energia. O compressor mecânico obtém energia do virabrequim, ou seja, “rouba” potência que seria entregue às rodas, para condições idênticas de operação. Este é o principal motivo dos motores turbo gerarem maior potência que os com compressor mecânico.

Dessa forma, o compressor mecânico é mais comum em motores grandes. No caso desses motores, custo e consumo não se aplicam ao desempenho em pista: a linearidade do compressor e a capacidade de atingir toda sua capacidade de torque e potência mais cedo são consideradas a prioridade máxima.

Portanto existem vários tipos de compressores mecânicos, todos baseados no aumento da eficiência volumétrica, entre eles podemos citar os compressores tipo lóbulos (Roots), os do tipo parafuso (Lysholm), os do tipo palheta, os do tipo G, e os do tipo centrífugo.

3.3.2.1 Compressor Centrífugo

Este tipo de compressor centrífugo, como o próprio nome já indica, utiliza um compressor centrífugo semelhante aos encontrados nos turbocompressores. Ele estaria num meio termo entre os sopradores, devido a sua linearidade, e os turbos pela sua eficiência de compressão. A sua configuração normalmente conta com uma polia que move o eixo principal. Este eixo possui uma engrenagem que move outra menor que está ligada ao rotor. Abaixo, na Figura 15 é possível observar um compressor desse tipo.

Figura 15. Compressor centrífugo.



Fonte: motoresnanet.blogspot.com/2010/09/compressor-centrifugo.html

Geralmente os compressores centrífugos apresentam boa eficiência volumétrica, chegando a 93%, necessitando de um torque de acionamento baixíssimo.

3.3.2.2 Compressor de Lóbulo (Roots)

Os compressores do tipo lóbulos, mais conhecidos como compressores do tipo Roots são os mais utilizados na indústria. Esse tipo de compressor é composto de dois rotores contendo dois, três ou quatro lóbulos que se entrelaçam entre si, mas que nunca se tocam. À medida que os lóbulos entrelaçados giram, o ar preso nos espaços existentes entre eles é carregado entre o lado de entrada e o lado de saída. Grandes quantidades de ar são movidas para o coletor de admissão e "acumuladas", criando-se uma pressão positiva como mostrado na Figura 16.

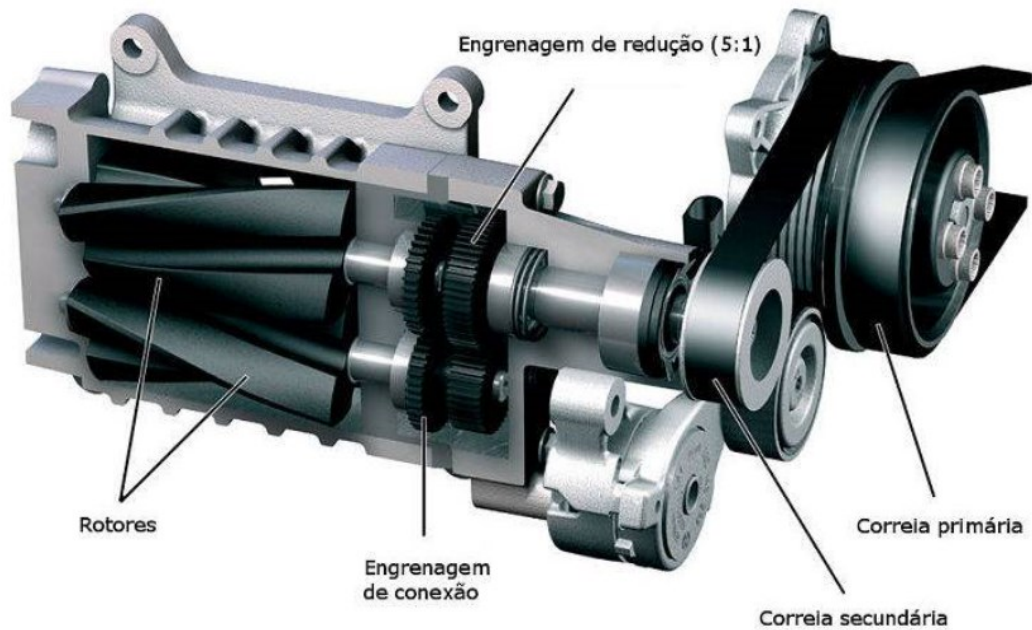
Figura 16. Funcionamento Roots.



Fonte: <https://www.ebah.com.br/content/ABAAe57IAK/tipos-compressores>

Os compressores Roots em geral são grandes e ficam na parte de cima do motor. No entanto eles são os menos eficientes dentre os compressores por duas razões: acrescentam mais peso ao veículo e sopram o ar em jatos discretos, em vez de um fluxo uniforme e contínuo. Na figura 17 é possível observar um compressor do tipo Roots, bem como o sistema de montagem do mesmo.

Figura 17. Esquema de montagem do compressor Roots.



Fonte: <https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/por-que-os-superchargers-estao-desaparecendo/>

De acordo com Jim Middlebrook, o compressor tipo Roots oferece um desempenho razoável a baixas pressões (sobrepessão de 5 a 6 PSI em uma atmosfera de 14,7 PSI), podendo apresentar uma boa eficiência volumétrica, mas já em altas pressões, metade da potência de entrada do compressor seria para produzir calor, o que indicaria uma eficiência adiabática na ordem de 50% ou menos. O trabalho sobre sobrealimentação de automóveis realizado por Pinto e Valente, mostra que em um compressor que trabalha com rotores de 2 lóbulos, para se gerar uma sobrepessão de 0,6 bar é preciso uma potência para acionamento do compressor igual a 12,2 cv, já para um rotor de 3 lóbulos necessitasse somente de 8 cv. Em geral o rendimento do compressor Roots não é alto, chegando no máximo 50% ou pouco acima disso, onde a altos regimes de rotação do motor produz altas temperaturas no compressor, que faz cair ainda mais o rendimento, além disso, quando em baixas rotações de operação tendem a “pulsar”. Esse tipo de compressor (apesar de ser usado em motores de pequeno porte) é indicado para motores de grande cilindrada, que necessitem de baixa pressão de sobrealimentação, pois são capazes de gerar grande volume de ar e trabalhar vários anos sem necessitar de qualquer tipo de manutenção.

3.3.2.3 Compressor Tipo Parafuso (Lysholm)

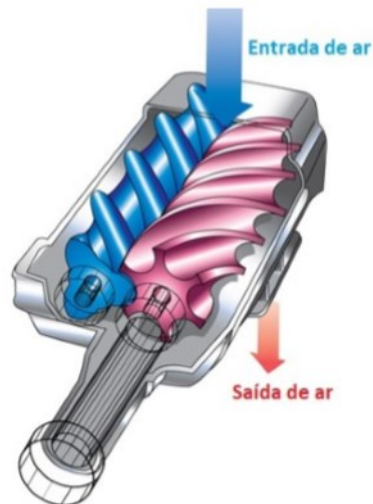
Esse tipo de compressor apresenta rendimento altos, de até 90%, entretanto é muito grande e caro (Brunetti, 2012). Abaixo, na Figura 18 é mostrado um compressor desse tipo.

Figura 18. Compressor Parafuso.



Fonte: <https://project-cerberus.com/2010/05/31/mecanica-supercharger/>

Figura 19. Funcionamento do Compressor Parafuso.



Fonte: <http://auto.howstuffworks.com/supercharger3.htm>

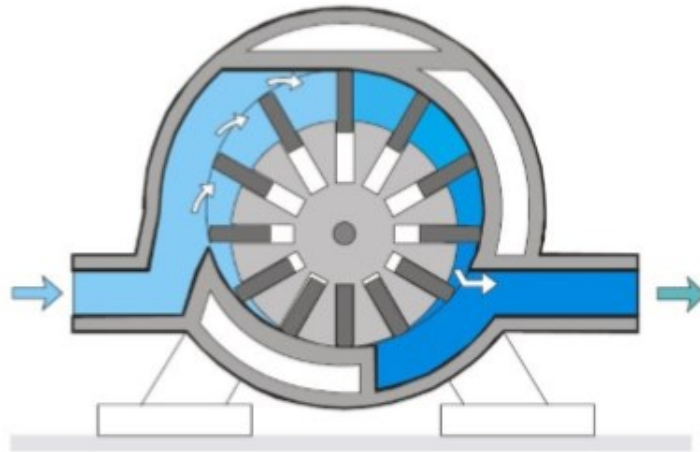
Diferentemente dos compressores tipos roots, o ar é comprimido para dentro da carcaça do rotor. Isso porque os rotores possuem uma redução de diâmetro cônica, fazendo assim que o espaço fica cada vez menor à medida que o ar se move do lado de entrada para o lado da saída. Como os espaços vão encolhendo, o ar é espremido para dentro de um volume menor. Isso torna os compressores de parafuso duplo mais eficientes, porém seu custo é maior

porque os rotores em forma de parafuso exigem mais precisão no processo de fabricação. Alguns tipos de compressores de parafuso duplo ficam por cima do motor como o compressor Roots.

3.3.2.4 Compressor Tipo Palheta

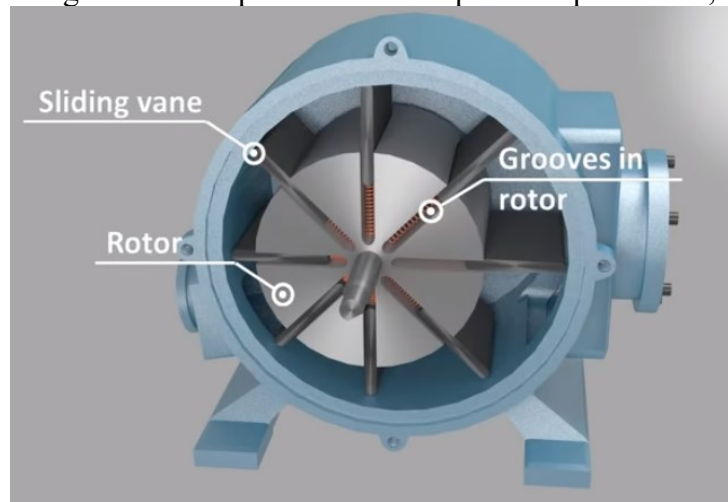
Esse compressor se mostra eficiente volumetricamente, porém, tem como desvantagem a lubrificação interna, que é necessária para a lubrificação das palhetas móveis, fazendo assim que o lubrificante se misture ao ar e seja queimado no motor. A Figura 20 mostra um esquema desse tipo de compressor.

Figura 20. Compressor tipo Palheta.



Fonte: <http://industrial-automatica.blogspot.com/2010/08/compressores-neumaticos.html>

Figura 21. Componentes do compressor tipo Palheta,



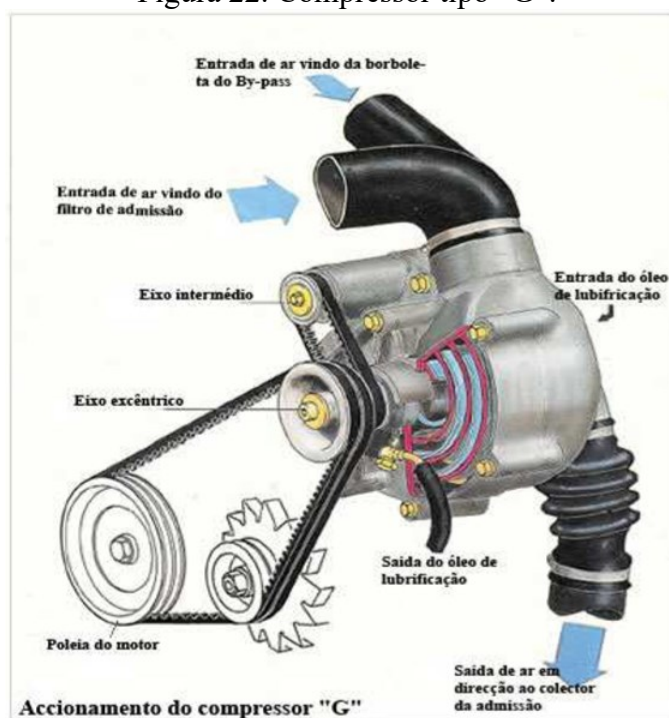
Fonte: <http://learnchannel-tv.com/pb/pneumatics/compressed-air/compressor/>

O compressor é composto por um cilindro excêntrico em relação a carcaça, onde possuem diversas palhetas nos rasgos que se prolongam em todo o comprimento do cilindro. Quando o cilindro gira as palhetas se movem ao longo do rasgo devido a força centrífuga, de modo a permanecerem sempre em contato com a carcaça. Dessa forma, devido a excentricidade do cilindro o compartimento entre as palhetas se reduz à medida que o movimento acontece, aumentando a pressão do ar. O compressor de palhetas fornece pouca vazão de ar, mas consegue altas pressões e geralmente é utilizado em motores de pequeno porte.

3.3.2.5 Compressor Tipo G (Espiral)

Esse tipo de compressor foi inventado pela francesa Creux, e os engenheiros da Volkswagen o reanimaram e perceberam que essa pressão de ar é 30% a 50% mais favorável ao torque do que os turbocompressores para os gases de escape. É formado por espirais fixas e móveis que juntas formam as câmaras de compressão em forma semelhante a letra “G”. Esse conjunto de espirais móveis não giram dentro da carcaça, mas realizam um movimento excêntrico, que suga e empurra o ar exterior contra as espirais fixas, desse modo, o ar é comprimido devido ao movimento descentralizado que causa a redução do volume da câmara. A Figura 22 mostra um compressor tipo “G” em corte.

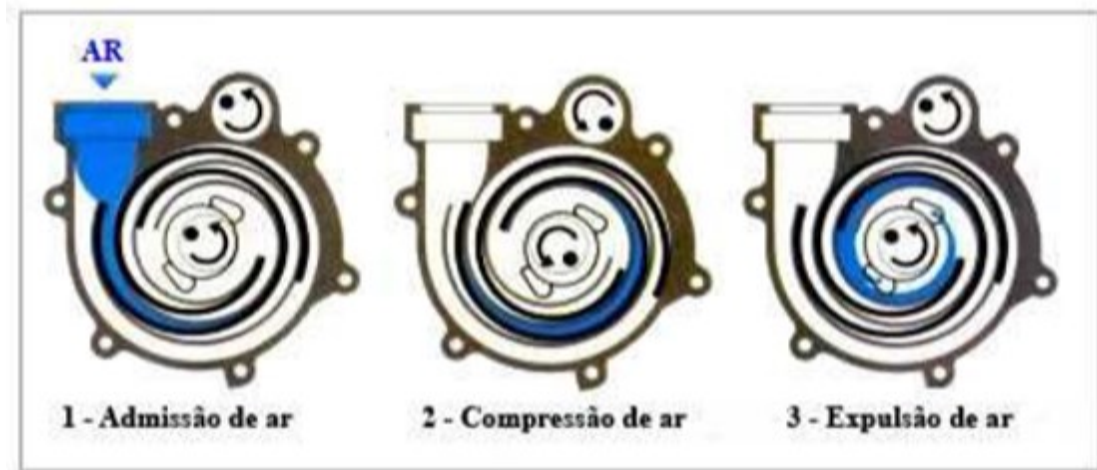
Figura 22. Compressor tipo “G”.



Fonte: http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/act_lect/SIAUT/Trabalhos%202011-12/SIAUT_2011-12_Sobrealimentacao.pdf

O compressor tipo “G” fornece altas pressões, em torno de 1,8 bar para uma pressão atmosférica de 1 bar, além disso apresenta um funcionamento mais silencioso, porém, o uso desse tipo de compressor caiu em desuso devido aos problemas de lubrificação que o mesmo apresenta.

Figura 23. Funcionamento do compressor “G”



Fonte: http://ave.dee.isep.ipp.pt/~mjf/act_lect/SIAUT/Trabalhos%202011-12/SIAUT_2011-12_Sobrealimentacao.pdf

4 METODOLOGIA

Com o objetivo de analisar mudanças no comportamento de motores de combustão interna do ciclo Otto, realizou-se um estudo em diversos veículos da atualidade com intuito de identificar parâmetros entre veículos aspirados e veículos sobrealimentados, evidenciando as vantagens e as desvantagens.



Com base a pesquisa realizada foram escolhidos veículos no mercado nacional de diferentes montadoras, porém veículos de mesma plataforma, até mesmo para melhor compreender os resultados, os principais parâmetros analisados foram o torque e a potência, na sequência o consumo, a performance e o custo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas comparações entre carros que adotaram o conceito downsizing e carros aspirados de potências similares, para ratificar as vantagens do turbo e do conceito downsizing:

5.1 Estudo de caso 1:

Tabela 1 – Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Chevrolet

| Fabricante: Chevrolet | | ONIX 1.0 2023 | | ONIX LT 1.0 TURBO 2023 | |
|-----------------------|-------------|---|---------------|---|---------------|
| | |  | |  | |
| Aspiração: | | Natural | | Turbocompressor | |
| Número de cilindros: | | 3 em linha | | 3 em linha | |
| Cilindradas: | | 999cm ³ | | 999cm ³ | |
| Razão de compressão: | | 12,5:1 | | 10,5:1 | |
| Combustível: | | Gasolina | Etanol | Gasolina | Etanol |
| Potência máxima: | | 78 cv | 82 cv | 116 cv | 116 cv |
| | | 6.400 rpm | | 5.500 rpm | |
| Torque máximo: | | 9,6 kgfm | 10,6 kgfm | 16,3 kgfm | 16,8 kgfm |
| | | 4.100 rpm | | 2.000 rpm | |
| Consumo: | Urbano: | 13,3 km/l | 9,4 km/l | 13,1 km/l | 9,1 km/l |
| | Rodoviário: | 16,6 km/l | 11,6 km/l | 16,1 km/l | 11,1 km/l |
| Velocidade máxima: | | 167 Km/h | | 187 Km/h | |
| Aceleração 0-100km/h: | | 13,3s | | 10,1s | |
| Preço: | | R\$ 75.185,00 | | R\$ 82.424,00 | |

Fonte: Autor Próprio.


A Chevrolet adotou uma estratégia conservadora para o seu primeiro motor 1.0 turbo do país: não optou pela injeção direta. Além de continuar com a injeção multiponto, o propulsor de tecnologia moderna recebeu um acerto mais antiquado que os 1.0 turbo dos rivais. Ainda assim, garantem mais eficiência e economia quando o assunto é boa entrega de aceleração com baixo gasto de combustível, ou seja, um ótimo desempenho.

Porém, a supremacia do Onix 1.0 turbo é notável. São 116 cv a 5.500 rpm, ou seja, o ganho é de 49% a mais de potência para gasolina enquanto para o etanol é de 41%, além disso temos 70% de torque a mais para a gasolina enquanto para o etanol 58%. A verdade está nos números, obviamente o resultado é surpreendente. Se levarmos em consideração a arrancada de 0 a 100 km/h, o Onix 1.0 aspirado leva 13,3 segundos. Enquanto o Turbo, faz a prova em 10,1 s.

O Chevrolet Onix 1.0 aspirado inclusive, de acordo com estudos do Inmetro e do Programa Brasileiro de Etiquetagem, foi nomeado o carro mais econômico da categoria sedã no país, com o consumo de combustível, a etanol, de 9,4 km/l na cidade e 11,6 km/l na estrada.

5.2 Estudo de caso 2:

Tabela 2 – Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Hyundai

| Fabricante: Hyundai | | HB20 1.0 2023 | | HB20 1.0 TURBO 2023 | |
|-----------------------|-------------|---|---------------|--|---------------|
| | |  | |  | |
| Aspiração: | | Natural | | Turbocompressor | |
| Número de cilindros: | | 3 em linha | | 3 em linha | |
| Cilindradas: | | 999cm ³ | | 999cm ³ | |
| Razão de compressão: | | 11,5:1 | | 10,5:1 | |
| Combustível: | | Gasolina | Etanol | Gasolina | Etanol |
| Potência máxima: | | 75 cv | 80 cv | 120 cv | 120 cv |
| | | 6.000 rpm | | 6.000 rpm | |
| Torque máximo: | | 9,4 kgfm | 10,2 kgfm | 17,5 kgfm | 17,5 kgfm |
| | | 4.500 rpm | | 1.500 rpm | |
| Consumo: | Urbano: | 13,3 km/l | 9,6 km/l | 13,4 km/l | 9,4 km/l |
| | Rodoviário: | 14,6 km/l | 10,4 km/l | 14,6 km/l | 10,6 km/l |
| Velocidade máxima: | | 161 Km/h | | 192 Km/h | |
| Aceleração 0-100km/h: | | 14,5s | | 10,7s | |
| Preço: | | R\$ 77.690,00 | | R\$ 94.790,00 | |



Fonte: Autor Próprio.

O pequeno motor 1.0 Kappa da Hyundai estreou aspirado no HB20 e mais tarde recebeu uma versão turbo. O 1.0 turbo ele é dotado de injeção direta de combustível, três cilindros,

turbocompressor e intercooler, consegue desenvolver 120 cavalos de potência, a 6.000 rpm, e 17,5 kgfm de torque, a partir de 1.500 giros, então podemos notar que, o ganho é de 60% a mais de potência para gasolina enquanto para o etanol é de 50%, além disso temos 86% de torque a mais para a gasolina enquanto para o etanol 72%. Ou seja, ele leva vantagem na prova com gasolina, uma vez que gera a mesma potência e torque com ambos combustíveis o que por si só garante bastante agilidade ao compacto, que é bem leve: apenas 1.091 kg e mantém a marca de 10,7 s com qualquer um deles. Ao menor toque no acelerador, o hatch desenvolve boa velocidade logo cedo, tamanha a sua disposição desde baixas rotações. Há a sensação que o motor está sempre “sobrando”, principalmente ao rodar na cidade. É o downsizing mostrando a que veio. Disse a fabricante Hyundai disse que em breve, o HB20 terá o 1.0 turbo com câmbio manual.

5.3 Estudo de caso 3:

Tabela 3 – Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Honda

| Fabricante: Honda | | CIVIC EX 2021 | | CIVIC TOURING 1.5 TURBO 2021 |
|-----------------------|-------------|--|---------------|---|
| | |  | |  |
| Aspiração: | | Natural | | Turbocompressor |
| Número de cilindros: | | 4 em linha | | 4 em linha |
| Cilindradas: | | 1.997cm ³ | | 1.498cm ³ |
| Razão de compressão: | | 11:1 | | 10,6:1 |
| Combustível: | | Gasolina | Etanol | Gasolina |
| Potência máxima: | | 150 cv | 155 cv | 173 cv |
| | | 6.300 rpm | | 5.500 rpm |
| Torque máximo: | | 19,3 kgfm | 19,5 kgfm | 22,4 kgfm |
| | | 4.800 rpm | | 1.700 rpm |
| Consumo: | Urbano: | 10,5 km/l | 7,2 km/l | 11,8 km/l |
| | Rodoviário: | 13 km/l | 8,9 km/l | 14,4 km/l |
| Velocidade máxima: | | 195 Km/h | | 208 Km/h |
| Aceleração 0-100km/h: | | 10,9s | | 8,6s |
| Preço: | | R\$ 125.190,00 | | R\$ 153.444,00 |

Fonte: Autor Próprio.

A japonesa Honda sempre teve tradição em motores aspirados naturalmente de alto rendimento. O 1.5 turbo que estreou na décima geração do sedã médio repete esse conceito, mas dessa vez com turbo. Depois de testar o Honda Civic EX com motor 2.0 e câmbio CVT, a impressão era de que não havia margem para melhorar, mas aí veio o Civic Touring com motor 1.5 turbo e mostrou que tudo é possível.

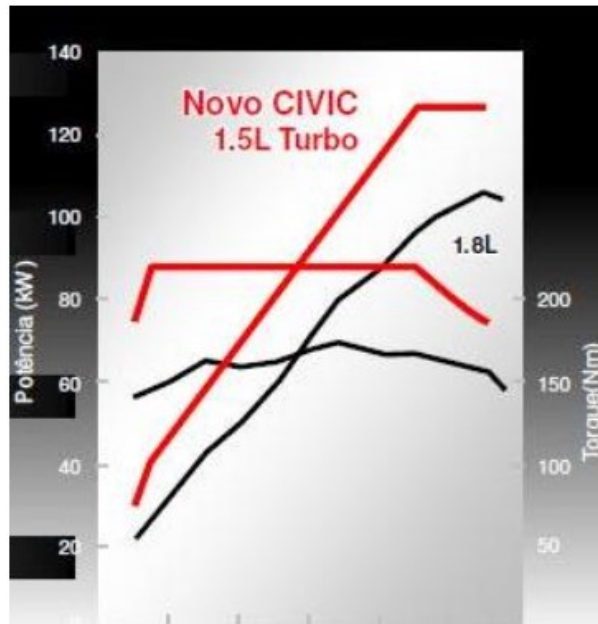
O motor do Civic 2021 na configuração Touring é, sem dúvidas, o principal chamariz deste modelo. Enquanto as demais configurações utilizam o 2.0 litros aspirado flex, o topo de linha é equipado com um 1.5 i-VTEC Turbo Earth Dream. Nesta unidade do sedã médio foi estreada apenas com um tipo de combustível a gasolina, a potência máxima é de 173 cv, entregue a 5.500 rpm, e o torque chega a 22,4 kgfm, disponível já a 1.700 rpm.

O motor sobrealimentado é a principal razão de ser do Civic Touring. com turbo e injeção direta, o 1.5 litro obteve um ganho 12% de potência a mais, e 15% de torque a mais quando comparado a versão aspirada até que não abre tanta vantagem do 2.0 aspirado, mas na prática ele deixa o sedã muito mais rápido. A aceleração de 0 a 100 km/h, por exemplo, levou apenas 8,6 segundos e a retomada de 80 a 120 km/h consumiu somente 5,1 segundos – garantia de saídas e ultrapassagens fáceis. O câmbio automático CVT também faz sua parte: extrai o melhor do motor quando exigido e o faz trabalhar sossegado em velocidade de cruzeiro, com cerca de 2,1 mil rpm a 120 km/h. Os resultados foram médias de consumo animadoras, com 11,8 km/litro na cidade e 14,4 km/litro na estrada, lembrando que o 1.5 turbo só utiliza gasolina.

Assim como nos segmentos abaixo, os sedãs médios estão migrando para as motorizações turbo, o que é um problema para o Civic. A única versão com o 1.5 turbo é a Touring, com um motor importado e que é abastecido somente com gasolina. Assim, a opção para as demais configurações segue o 2.0 aspirado. Não é um propulsor ruim, mas ele já mostra a idade em comparação aos rivais, entregando menos desempenho e um torque máximo que só aparece a 4.800 rpm

O fato mais significativo da mudança da Honda para a turboalimentação é deixar para o passado a tecnologia que deu fama à fabricante, a VTEC, a de fase e levantamento de válvulas variáveis.

Figura 24. Curva de desempenho do Honda Civic



Fonte: <https://autoentusiastas.com.br/2016/05/honda-civic-10a-gerac/>

A característica do motor está inserida na tecnologia atual de motores superalimentados por turbocompressor, de elevado torque desde as baixas rotações e se mantendo constante até à rotação que já dá potência máxima, está seguindo plana por mais 500 rpm. Se observarmos a figura acima o motor 1.5 turbo, tem aproximadamente 11% a mais de potência e 10% a mais de torque, sendo que sua capacidade de litragem é de 20% inferior ao motor 1.8 aspirado, isso é o motivo pela qual a Honda está aderindo esta tecnologia.

5.4 Estudo de caso 4:

Tabela 4 – Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Ford

| Fabricante: Ford | | FUSION SE 2.5 2017 | | FUSION TITANIUM 2.0 AWD TURBO 2017 |
|-----------------------|-------------|---|---------------|---|
| | |  | |  |
| Aspiração: | | Natural | | Turbocompressor |
| Número de cilindros: | | 4 em linha | | 4 em linha |
| Cilindradas: | | 2.489cm ³ | | 1.999cm ³ |
| Razão de compressão: | | 11:1 | | 9,3:1 |
| Combustível: | | Gasolina | Etanol | Gasolina |
| Potência máxima: | | 167 cv | 175 cv | 248 cv |
| | | 6.000 rpm | | 5.500 rpm |
| Torque máximo: | | 23,2 kgfm | 24,1 kgfm | 38 kgfm |
| | | 4.500 rpm | | 3.000 rpm |
| Consumo: | Urbano: | 8,6 km/l | 6 km/l | 8,6 km/l |
| | Rodoviário: | 12,3 km/l | 8,5 km/l | 11,7 km/l |
| Velocidade máxima: | | 195 Km/h | | 195 Km/h |
| Aceleração 0-100km/h: | | 10,5s | | 7,5s |
| Preço: | | R\$ 83.712,00 | | R\$ 105.999,00 |

Fonte: Autor Próprio.

Você pode ter estranhado o fato de a versão topo de linha ser a 2.0 e a básica, a 2.5. Embora seja menor, o motor 2.0 é mais sofisticado e potente.

A comparação é inevitável, e os números falam por si só. Fusion 2.5 Flex com injeção multiponto e comando de válvulas de admissão variável traz 175 cv e 24,1 kgfm a 4.500 rpm; enquanto o Fusion Titanium 2.0 Turbo com turbocompressor e injeção direta de combustível traz 248 cv e 38 kgfm a 3.000 rpm. Segundo a Ford, 75% da força está disponível entre 2.000 e 4.500 rotações. O propulsor adotou um novo turbocompressor pulsativo “twin-scroll” e coletor de escape integrado ao cabeçote com duas câmaras independentes.

Comparado a unidade que pode usar etanol, ele é nada menos que 42% mais potente e o que faz ainda mais diferença tem torque de 58% maior em rotações mais baixas. Na pista de testes,

o Fusion 2.5 foi mais lento que o 2.0. Nas acelerações de 0 a 100 km/h, ele obteve o tempo de 10,5 segundos, contra os 7,5 segundos conseguidos pelo 2.0

5.5 Estudo de caso 5:

Tabela 5 – Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Volkswagen (Jetta)

| Fabricante: Volkswagen | | JETTA COMFORTLINE 2.0 2015 | | JETTA HIGHLINE 2.0 Tsi 2015 |
|------------------------|-------------|---|---------------|---|
| | |  | |  |
| Aspiração: | | Natural | | Turbocompressor |
| Número de cilindros: | | 4 em linha | | 4 em linha |
| Cilindradas: | | 1.984cm ³ | | 1.984cm ³ |
| Razão de compressão: | | 11,5:1 | | 9,6:1 |
| Combustível: | | Gasolina | Etanol | Gasolina |
| Potência máxima: | | 116 cv | 120 cv | 211 cv |
| | | 5.000 rpm | | 5.500 rpm |
| Torque máximo: | | 17,7 kgfm | 18,4 kgfm | 28,6 kgfm |
| | | 4.000 rpm | | 2.000 rpm |
| Consumo: | Urbano: | 8,8 km/l | 6,1 km/l | 9,4 km/l |
| | Rodoviário: | 10,8 km/l | 7,8 km/l | 12,5 km/l |
| Velocidade máxima: | | 198 Km/h | | 241 Km/h |
| Aceleração 0-100km/h: | | 11,1s | | 7,2s |
| Preço: | | R\$ 68.687,00 | | R\$ 83.566,00 |

Fonte: Autor Próprio.

No modelo 2.0 8v a aspiração é natural e o sistema de alimentação é o convencional, os bicos injetores estão localizados no coletor de admissão, ou seja, injeta combustível dentro do cabeçote, passando pelas válvulas de admissão para atingir a câmara de combustão e a pressão de combustível nos bicos é de 4,0 bar, velho conhecido dos reparadores porque é o mesmo que equipa o Golf. A potência gerada é 120 cv com gasolina e 116 cv com álcool a 5.000 rpm e 17.7 kgfm com gasolina e 18.4 kgfm com etanol a 4.000 rpm.




Já no modelo 2.0 16 v TSI é Turbo, com duplo comando de válvulas, sendo a admissão variável, coletor de admissão com geometria variável e sistema de alimentação por injeção direta,

ou seja, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão sem passar pelo coletor nem pelas válvulas. Neste caso, ele desenvolve na gasolina 200 cv de potência a 5.100 rpm e volumosos 28,5 kgfm de torque já aos 1.700 giros, no entanto obteve um ganho de 76% de potência a mais e 55% de torque a mais quando comparado a versão aspirada.

Aliado a ele está a transmissão automatizada de dupla embreagem DSG o conjunto consegue levar o sedã a 100 km/h saindo da imobilidade em 7,2 segundos e a uma velocidade máxima de 241 km/h, segundo a Volkswagen.

5.6 Estudo de caso 6:

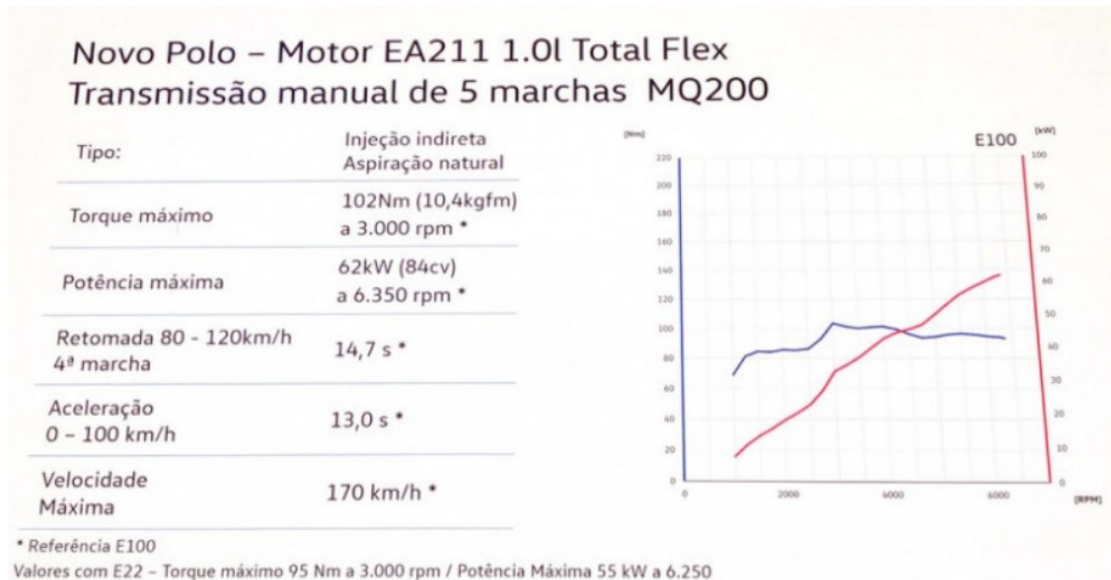
Tabela 6 – Comparativo entre veículo aspirado e sobrealimentado Volkswagen (Polo)

| Fabricante: Volkswagen | | Polo 1.0 | | Polo 1.6 | | Polo Highline 1.0 TSi 2020 | |
|------------------------|-------------|--|---------------|---|---------------|--|---------------|
| | |  | |  | |  | |
| Aspiração: | | Natural | | Natural | | Turbocompressor | |
| Número de cilindros: | | 3 em linha | | 4 em linha | | 3 em linha | |
| Cilindradas: | | 999cm ³ | | 1598cm ³ | | 999cm ³ | |
| Razão de compressão: | | 11,2:1 | | 11,5:1 | | 10,5:1 | |
| Combustível: | | Gasolina | Etanol | Gasolina | Etanol | Gasolina | Etanol |
| Potência máxima: | | 75 cv | 84 cv | 110 cv | 117 cv | 116 cv | 128 cv |
| | | 6.350 rpm | | 5.750 rpm | | 5.500 rpm | |
| Torque máximo: | | 9,7 kgfm | 10,4 kgfm | 15,8 kgfm | 16,5 kgfm | 20,4 kgfm | 20,4 kgfm |
| | | 3.000 rpm | | 4.000 rpm | | 2.000 rpm | |
| Consumo: | Urbano: | 12,9 km/l | 8,8 km/l | 12,0 km/l | 8,2 km/l | 11,4 km/l | 7,9 km/l |
| | Rodoviário: | 14,3 km/l | 10,0 km/l | 13,9 km/l | 9,5 km/l | 13,9 km/l | 9,5 km/l |
| Velocidade máxima: | | 170 Km/h | | 193 Km/h | | 192 Km/h | |
| Aceleração 0-100km/h: | | 13,0s | | 9,6s | | 9,6s | |
| Preço: | | R\$ 67.256,00 | | R\$ 72.016,00 | | R\$ 86.967,00 | |

Fonte: Autor Próprio.

Ainda sobre a montadora alemã, o Novo Polo com o motor 1.0 litro da família EA211 apareceu pela primeira vez no Volkswagen Up, e posteriormente foi oferecido no Volkswagen Gol. Esse motor é a prova que mesmo com cilindrada de 999 cm³, foi possível entregar performance comparável à motores de maior cilindrada.

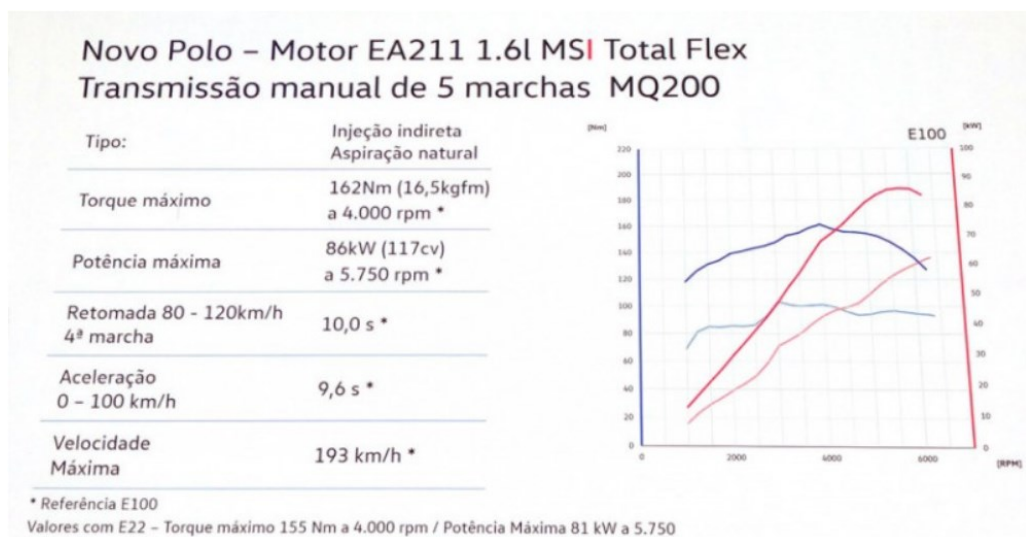
Figura 25. Curva de desempenho do Polo 1.0



Fonte: <https://www.comprecar.com.br/revista/torque-potencia-ou-cilindrada-o-que-e-mais-importante>

O Novo Polo tem potência máxima de 75 cv com gasolina e de 84 cv com etanol, ambos a 6.350 rpm. O torque máximo é de 9,7 kgfm com gasolina e 10,4 kgfm com etanol, ambos a 3.000 rpm. Se compararmos o motor 1.0 MPI da VW, com o Fiat Palio 1.4 litro ano 2010, com motor 1.4 litro de quatro cilindros, ele entregava apenas 86 cavalos de potência máxima. Com isso é possível perceber o quanto o motor EA211 é eficiente.

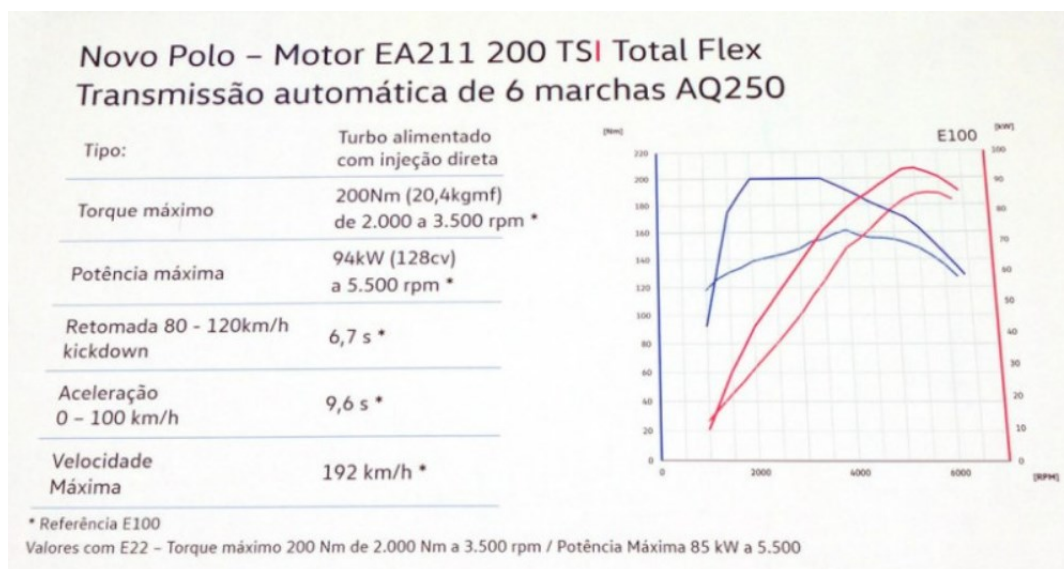
Figura 26. Curva de desempenho do Polo 1.6



Fonte: <https://www.comprecar.com.br/revista/torque-potencia-ou-cilindrada-o-que-e-mais-importante>

Já o motor 1.6 litro tem a potência máxima é de 110 cv com gasolina e 117 cv com etanol ambos a 5.750 rpm, com torque máximo de 15,8 kgfm com gasolina e 16,5 kgfm com etanol, ambos a 4.000 rpm. Se analisarmos o gráfico fica notável o quanto é melhor o desempenho do motor 1.6 quando equiparado com o motor 1.0 utilizando o mesmo combustível.

Figura 27. Curva de desempenho do Polo 200 TSI



Fonte: <https://www.comprecar.com.br/revista/torque-potencia-ou-cilindrada-o-que-e-mais-importante>

A potência máxima é de 115 cv com gasolina e 128 cv com etanol ambos a 5.500 rpm, com torque máximo de 20,4 kgfm com gasolina ou etanol ambos a 2.000 rpm. Se compararmos com os modelos anteriores podemos perceber a eficiência do motor turbo. Na figura acima no gráfico podemos notar o desempenho do motor 1.0 turbo vs o motor 1.6 aspirado se levarmos em consideração o mesmo combustível, temos aproximadamente 10% a mais de potência e 24% a mais de torque para um motor que é 60% menor que o aspirado, realmente é o turbo mostrando o motivo pelo o qual veio. Ainda os resultados seriam melhores se compararmos o motor 1.0 aspirado vs o motor 1.0 turbo, seria aproximadamente 52% a mais de potência e 96% a mais de torque, para o mesmo tipo de motor mudando apenas a sobrealimentação do sistema.

6 CONCLUSÕES

Com essa pesquisa foi possível observar as principais diferenças entre o motor convencional e o motor com turbocompressor.

Na prática, esse movimento de “*downsizing*” (redução do tamanho dos motores) e adoção do turbo traz apenas benefícios para o consumidor, uma vez que aumentando a introdução de ar no cilindro, o motor automaticamente pode ter um aumento significativo de potência, que varia em torno de aproximadamente 20%, conforme dados analisados anteriormente. A quantidade de combustível consumida por um motor turbo alimentado é aproximadamente 10% menor a do naturalmente aspirado. No que diz respeito ao meio ambiente, com menores níveis de emissões de gases.

A conclusão foi que o motor equipado com o turbocompressor se mostrou ser mais eficiente que o motor aspirado convencionalmente e a perspectiva é que as montadoras cada vez mais introduzam essa tecnologia ao mercado.

A execução deste trabalho foi de grande importância para a consolidação dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso, pois com este trabalho pôde-se entender melhor a importância de aumentar o desempenho de um motor através de um equipamento relativamente simples.

7 REFERÊNCIAS

Augusto, M.S.C., 2011. “Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis”.

Bessa, A.P., Conceição, S.V., 2011. “Sobrealimentação automóvel”.

Brunetti, F., 2012, “Motores de Combustão Interna”, Vol. 1., São Paulo: Blucher.

Brunetti, F., 2012, “Motores de Combustão Interna”, Vol. 2., São Paulo: Blucher.

Matos, T.R., 2014. “Downsizing em motores de combustão interna: uma abordagem de inovação tecnológica”.

Nakano, D.G., 2007. “Estudo sobre instalação de um turbocompressor em automóvel nacional”.

Soares, F.L.N., 2017 “Avaliação numérica do desempenho de um motor a combustão interna operando com combustível de alta octanagem”.

BELL, Corky. Maximum boost. Cambridge: Bentley Publishers, 199857.

GLEHN, Fábio Riberio von. Conceitos teóricos e aspectos práticos. 4. Ed. Goiânia. Ciclo Engenharia. 2001. v.1.

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

BOSCH, Robert. Automotive Electric Electronic Systems, 2º edição Robert Busch, 1995.

CONAMA. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 418, 25 de novembro de 2009. Publicado D.O.U, de 26/11/2009.

Turbo x Compressor. AUTO ESPORTE, Publicado em 26 de set de 2016. Disponível em:<<https://revistaautoesporte.globo.com/Noticias/noticia/2016/09/turbo-x-compressor.html>> Acesso em: 04 de maio de 2019.

Turbo x Supercharger: só um irá viver. Mas qual o melhor?.**QuatroRodas**, Publicado em 1 de mar de 2017.Disponível em: <<https://quatrorodas.abril.com.br/auto-servico/por-que-os-superchargers-estao-desaparecendo/>> Acesso em: 04 de maio de 2019.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. Termodinâmica. 5. ed. São Paulo: Mcgraw Hill, 2007

HEYWOOD, John B. Internal combustion engines fundamentals. 1. ed. [United States of America]: McGraw-Hill Education, 198.

Turbo elétrico: Mercedes-AMG elimina turbo lag com tecnologia da F1.MotorShow, Publicado em 17 de jun de 2020.Disponível em:<<https://motorshow.com.br/turbo-eletrico-mercedes-amg-elimina-turbo-lag-com-tecnologia-vinda-da-f1/>>