

Motores Térmicos

8° Semestre

4° ano

Aula 11 - Sobrealimentação

- ▶ Sobrealimentação;
- ▶ Supercompressores;
- ▶ Turbocompressores;
- ▶ Temperaturas do Compressor;
- ▶ Válvula Westgate;
- ▶ Compressor de Geometria Variável;
- ▶ Intercooler;
- ▶ Passos para a Escolha de um Turbocompressor.
- ▶ Tecnologia E-Booster
- ▶ Tecnologia E-Turbo

11. Sobrealimentação

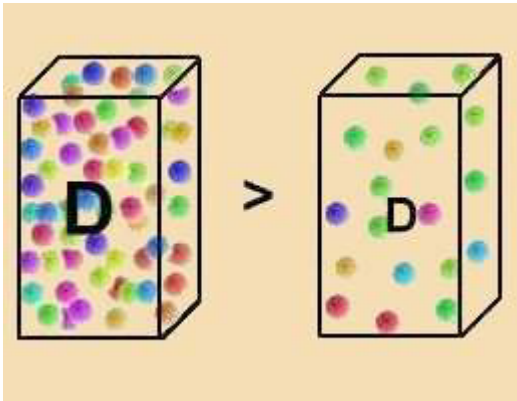
Uma das maneiras mais garantidas de se obter mais potência de um motor é aumentar a quantidade de ar e de combustível que ele pode queimar. Uma forma de se fazer isso é adicionando cilindros ou tornando maiores os cilindros existentes. Porém, algumas vezes, essas alterações não são possíveis. Um compressor pode ser uma forma mais simples e compacta de adicionar potência.

Os compressores permitem que um motor queime mais ar e combustível ao colocá-los em maior quantidade dentro dos cilindros existentes. A pressão de superalimentação típica fornecida por um compressor é de 6 a 8 libras por polegada quadrada (lb/pol^2). Como a pressão atmosférica normal é de 14,7 lb/pol^2 ao nível do mar, o turbo coloca 50% mais ar no motor.

11. Sobrealimentação

- ▶ Para uma boa lavagem do cilindro ou para se conseguir um aumento da potência do motor utiliza-se um compressor. O princípio de funcionamento do sistema de sobrealimentação basea-se na massa específica do ar, pois aumentando esta consegue-se no mesmo volume ter uma maior massa de ar.
- ▶ A sobrealimentação consiste em aumentar a concentração das partículas de ar no mesmo volume existente, isto é, no volume do cilindro.

11. Sobrealimentação



A **massa específica** de um corpo, define-se como o quociente entre a massa e o volume desse corpo. Desta forma pode-se dizer que a massa específica mede o grau de concentração de massa em determinado volume.

$$P = \frac{\eta_t \eta_v V_d \rho_{a,i} N Q_i}{2 \cdot RAC} \quad (8.41)$$

Pela Expressão 8.41, pode-se concluir que aumentando a concentração da massa $\rho_{a,i}$, a Potência do motor aumentará na mesma proporção.

11. Sobrealimentação

- ▶ A sobrealimentação pode-se conseguir através de super-compressores ou de turbo-compressores.
- ▶ A principal diferença entre um turbo compressor e um compressor é a **fonte de energia para o seu accionamento**. De algum lugar precisa de vir a energia para o funcionamento do compressor de ar. Num compressor, há uma **correia** que o conecta directamente ao motor. Desse modo, ele obtém a sua energia da mesma maneira que a bomba de água, o alternador ou a ventoinha. Um turbocompressor obtém a energia do **fluxo de gases queimados que são expelidos pelo tubo de escape**. Os gases de escape passam por uma turbina, que acciona o compressor.

11. Sobrealimentação

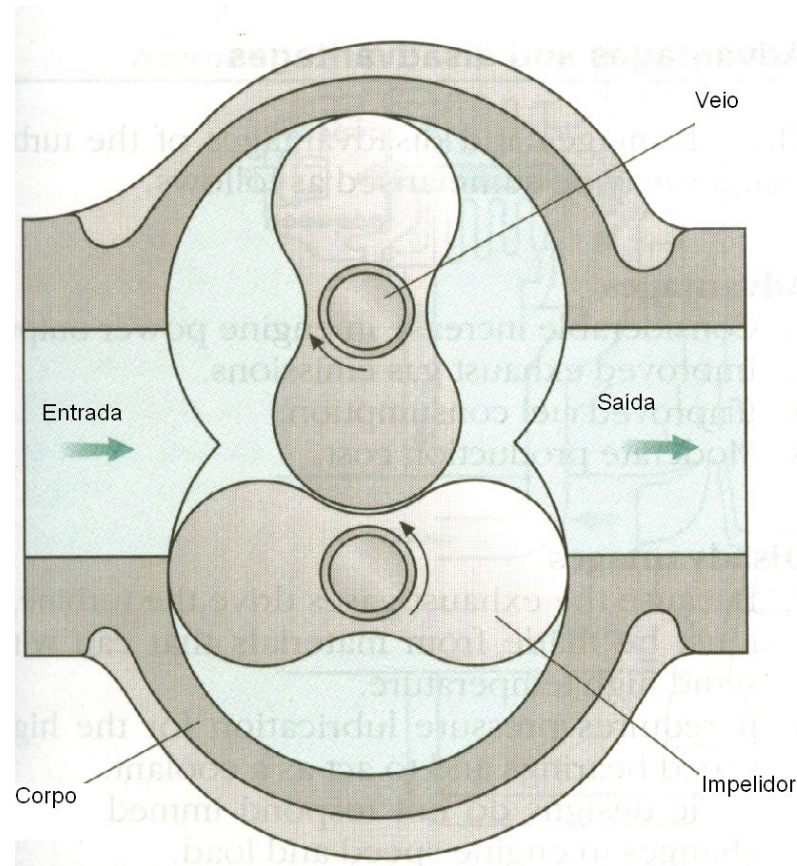
- ▶ Existem vantagens e desvantagens em ambos os sistemas.

Teoricamente um turbocompressor é mais eficiente porque utiliza a energia "desperdiçada" no fluxo de escape, isto é a entalpia dos gases queimados, como fonte de energia. Por outro lado, um turbocompressor causa um pouco de contra pressão no sistema de escape e tende a fornecer menos ar adicional até que o motor funcione em rotações mais elevadas. Os compressores são mais fáceis de instalar, mas normalmente são mais caros.

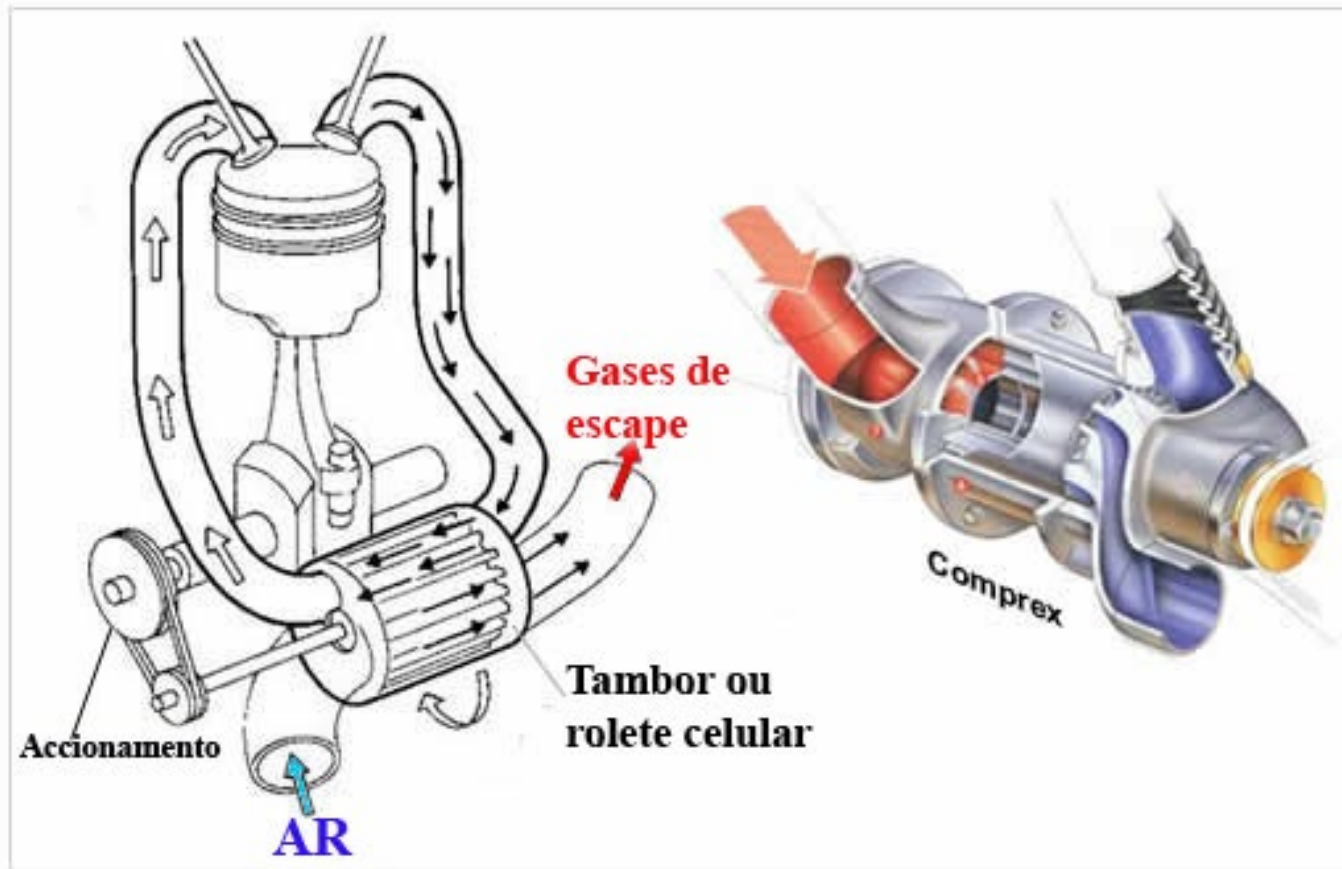
11.1 Supercompressor

- ▶ O supercompressor (também conhecido como supercharger ou blower) é um compressor de ar usado para forçar a entrada de ar nos cilindros de um motor de combustão interna. Porém, um supercompressor é ligado à cambota do motor por uma correia (geralmente dentada) e duas polias, é instalado entre o sistema de alimentação (carburador, injeção mecânica ou injeção eletrônica) e o colector de admissão. A sua finalidade é muito semelhante à do turbocompressor, mas um turbocompressor é accionado pela energia dos gases de escape gerados no motor para girar uma turbina.

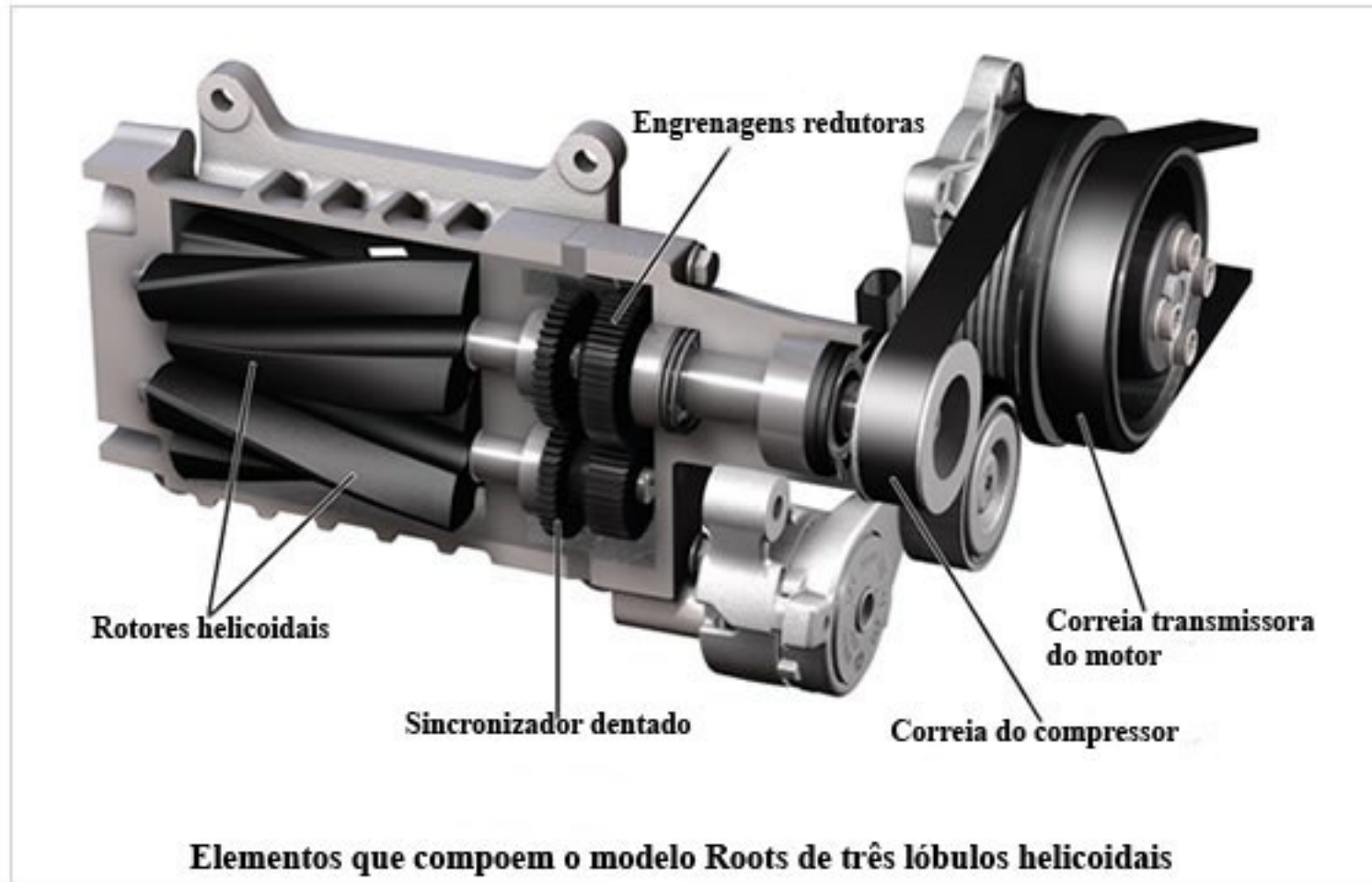
11.1 Supercompressor



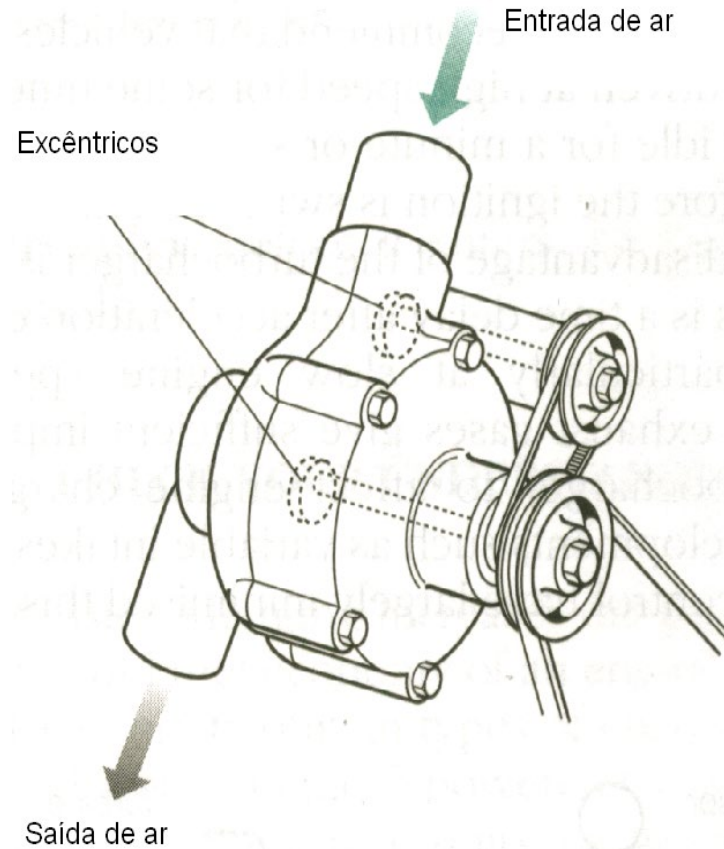
11.1 Supercompressor



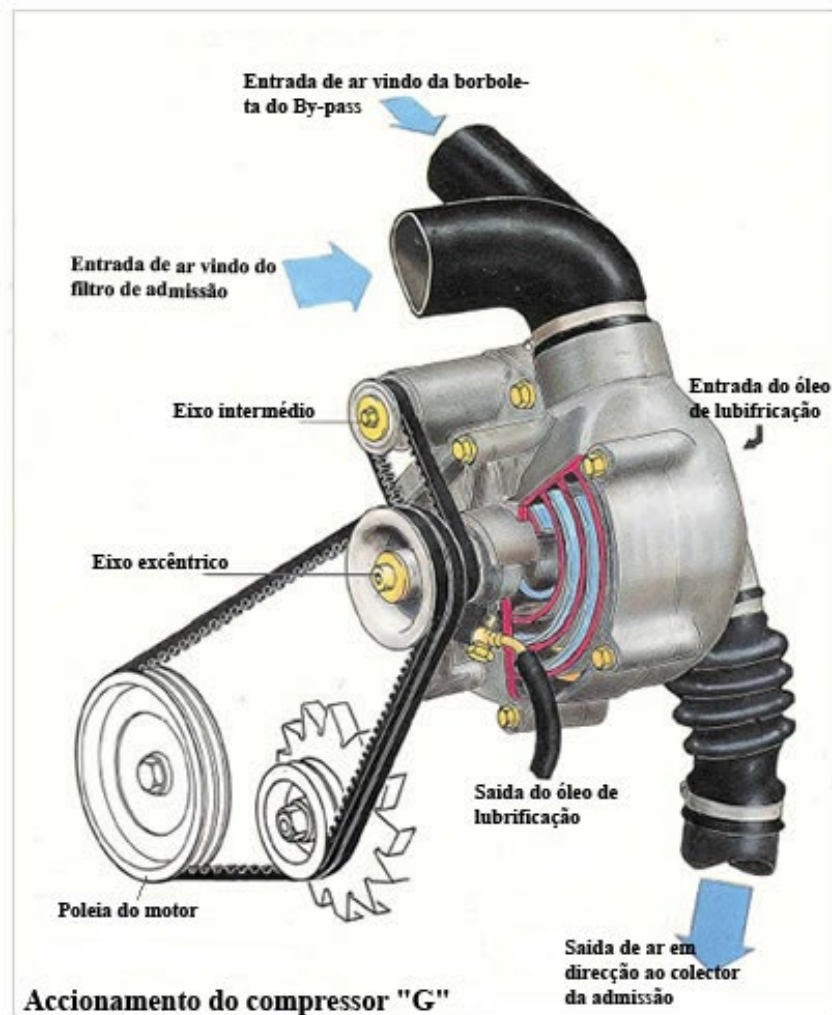
11.1 Supercompressor



11.1 Supercompressor



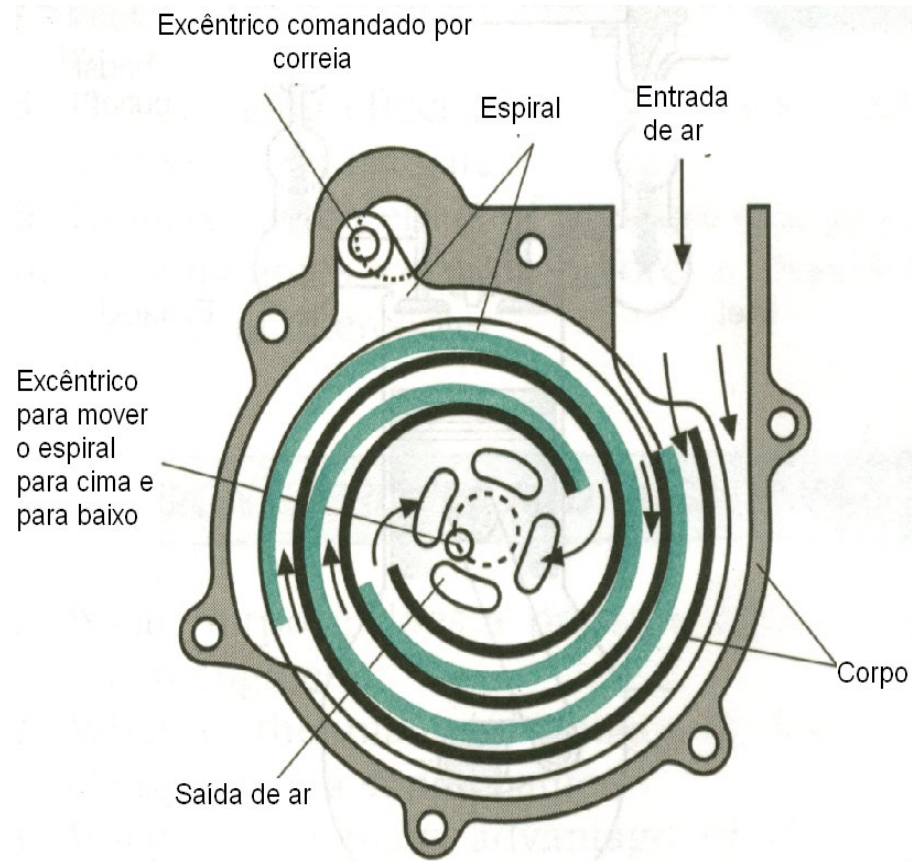
11.1 Supercompressor



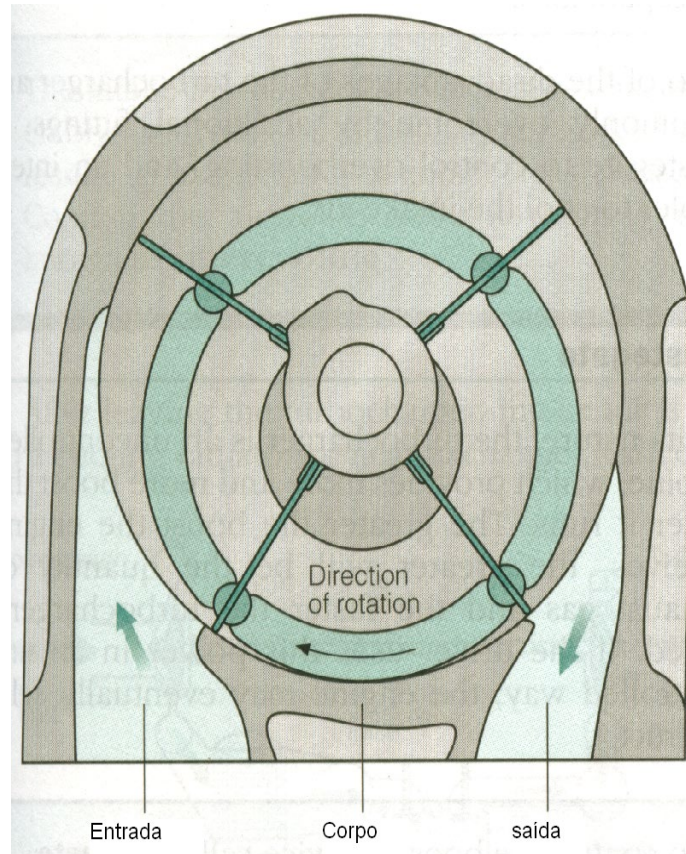
11. Turboalimentação



11.1 Supercompressor



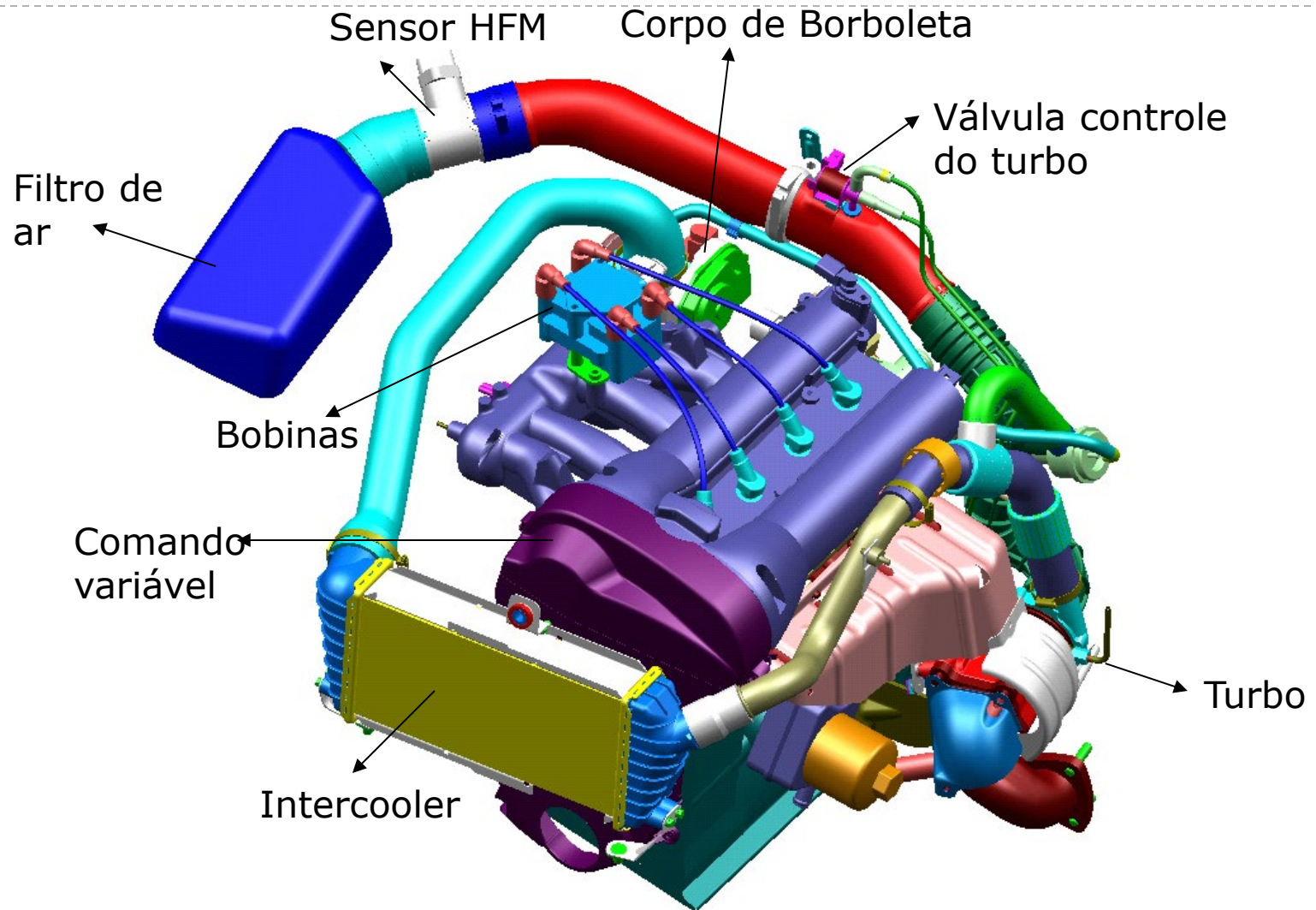
11.1 Supercompressor



11.2 Turboalimentação

Turbocompressor, superalimentador de ar e turbina são apenas alguns dos nomes mais utilizados para o sistema que foi inventado pelo suíço Alfred Büchi em 1905, na busca por melhorar a performance de motores a combustão interna. Sua primeira aplicação foi em locomotivas à gasóleo, e em 1920, a companhia norte-americana General Electric, passou a aplicar a tecnologia em aviões com motores Pratt & Whitney, evidenciando o desenvolvimento de equipamentos militares.

11.2 Turboalimentação



11.2 Turboalimentação

Os turbocompressores são um tipo de sistema de indução forçada. Eles comprimem o ar que entra no motor. A vantagem da compressão do ar é que isso permite ao motor receber mais ar dentro de um cilindro - e mais ar significa que mais combustível pode ser adicionado. Obtém-se, portanto, mais potência das explosões em cada cilindro. Um motor turboalimentado produz mais potência do que o mesmo motor sem este dispositivo, o que pode melhorar significativamente a relação peso/potência do motor.

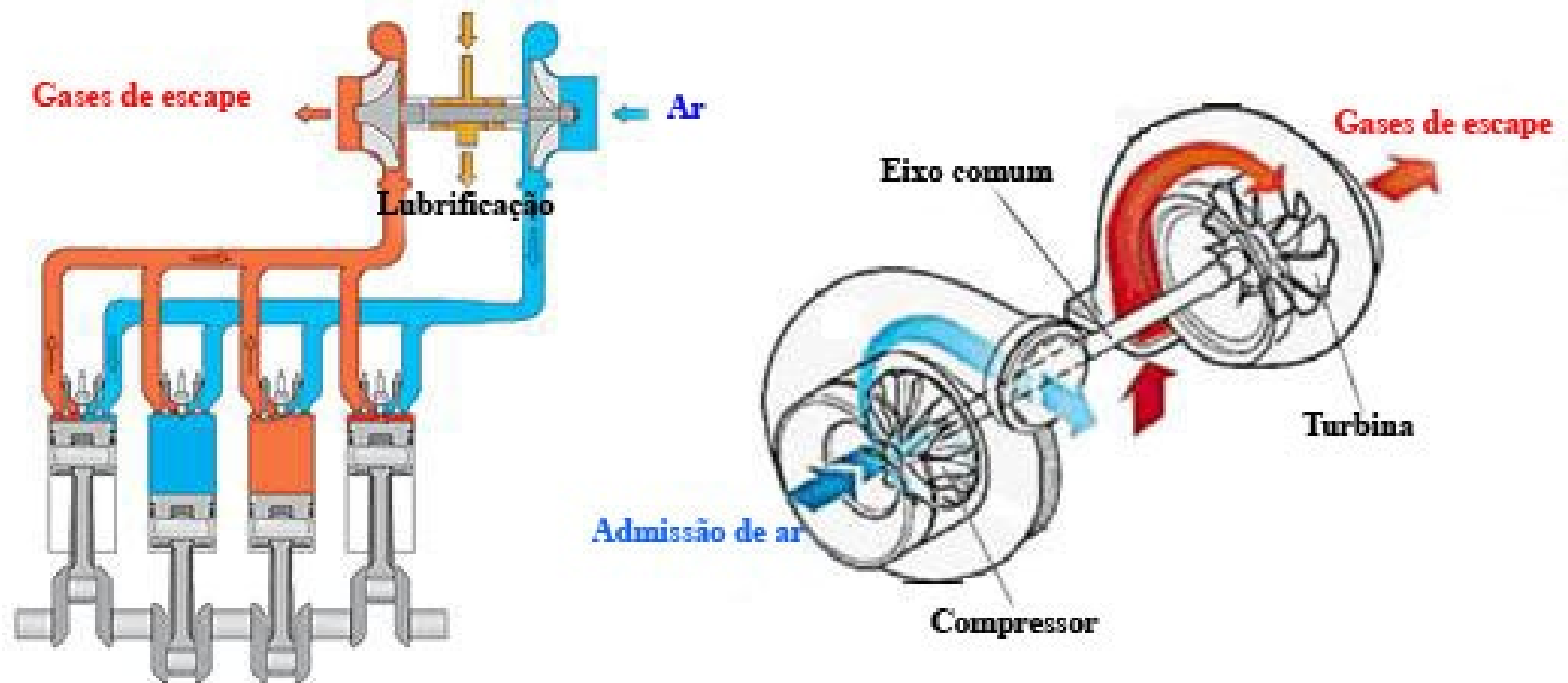
11.2 Turboalimentação

Para conseguir a compressão do ar, o turbocompressor utiliza o fluxo dos gases de escape do motor para girar uma turbina, que por sua vez, gira um compressor. A turbina no turbocompressor gira a velocidades até 200 mil rotações por minuto (rpm), aproximadamente 40 vezes mais rápida do que a maioria dos motores de automóveis, e como está ligada ao escape, as temperaturas dentro dela também são bem elevadas.

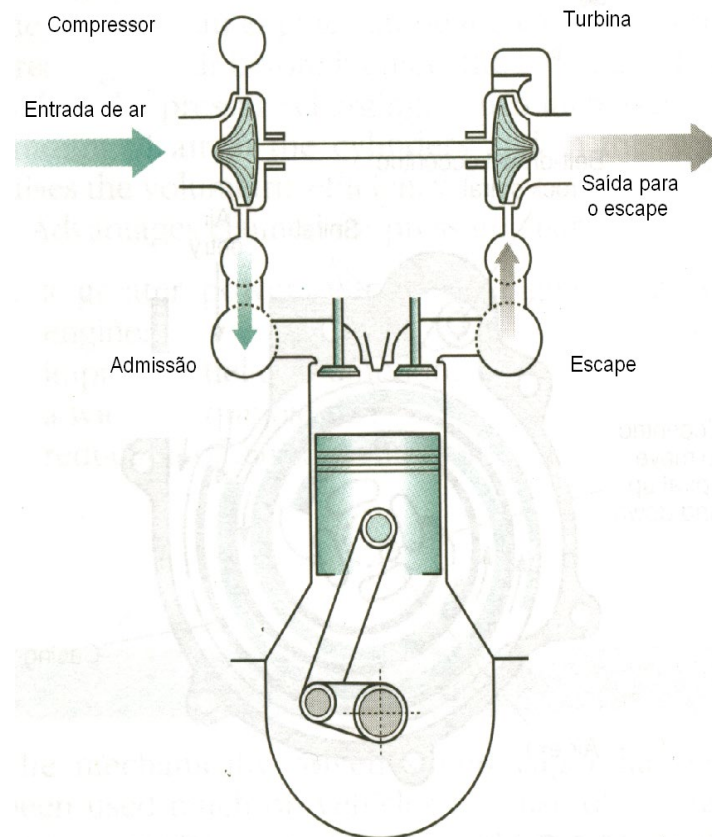
11.2 Turboalimentação

- ▶ Com a turboalimentação espera-se um ganho de 50% na potência do motor mas, por não haver eficiência na mesma proporção, é normal atingir-se um ganho de 30% a 40%.
- ▶ Uma causa da **ineficiência** vem do facto da potência para girar a turbina não ser livre. Ter uma turbina no fluxo de escape, aumenta a restrição de saída dos gases queimados o que significa que no curso de escape, o motor tem que empurrar uma contrapressão o que faz diminuir um pouco a potência.

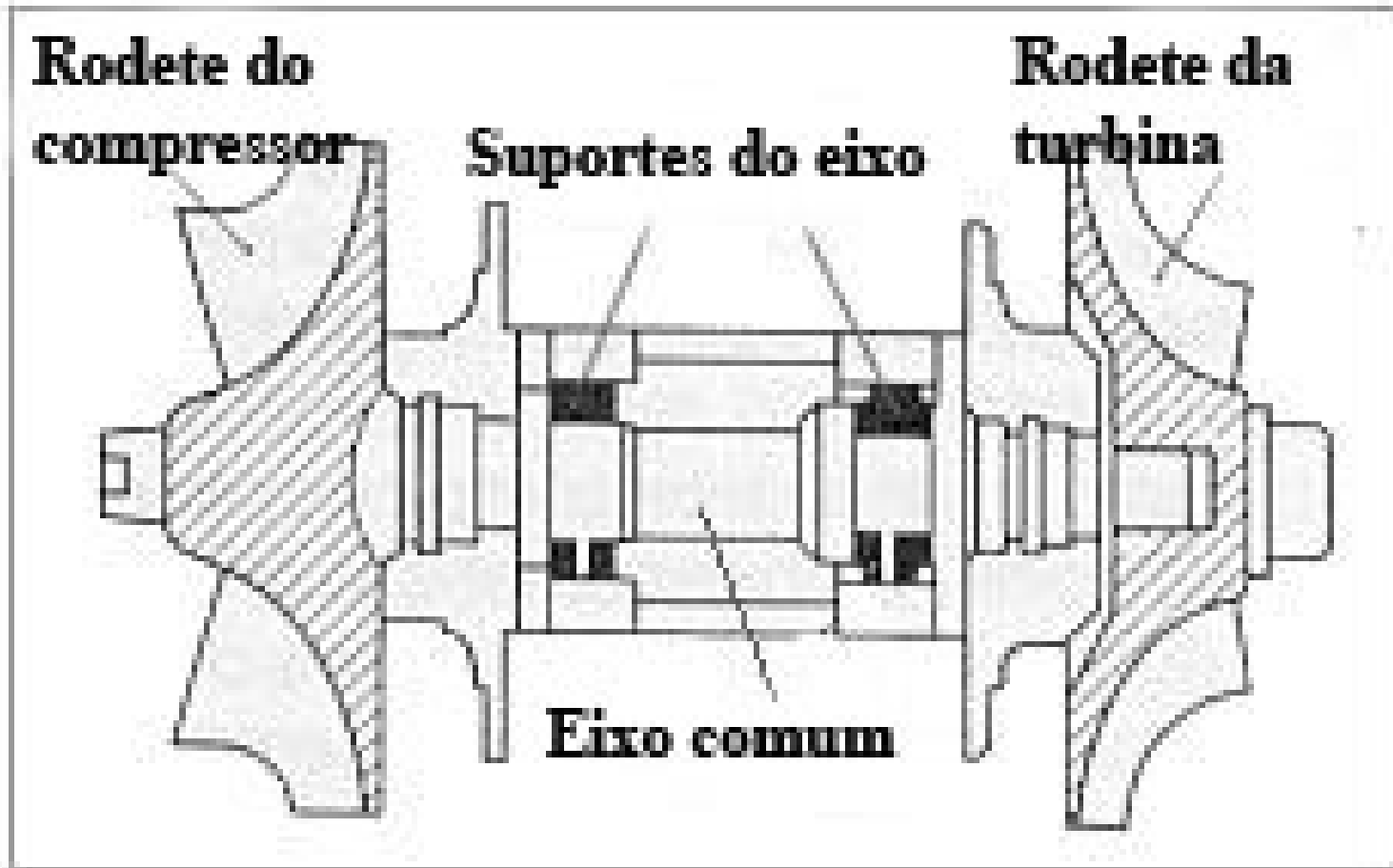
11.2 Turboalimentação



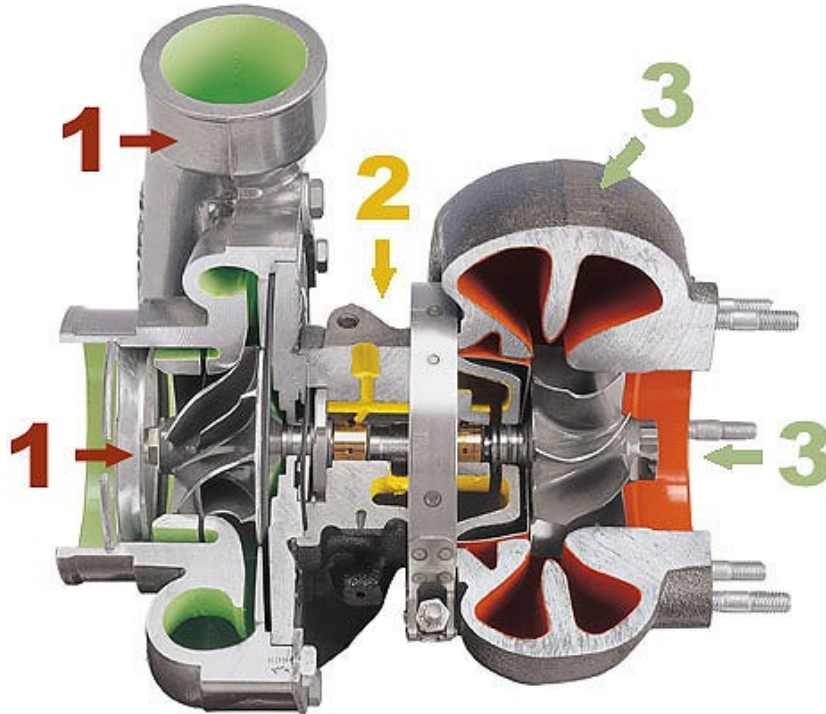
11.2 Turboalimentação



11.2 Turboalimentação



11.2 Turboalimentação



1 - Carcaça compressora e rotor do compressor: O compressor de ar centrífugo tem a função de aspirar o ar atmosférico e comprimi-lo para o interior do cilindro, chegando a atingir até três vezes a pressão atmosférica.

2 - Carcaça central: recebe óleo lubrificante do próprio motor e serve de sustentação ao conjunto eixo da turbina e rotor do compressor que flutuam sob mancais radiais.

3 - Eixo e carcaça da turbina: a turbina centrípeta é accionada pela energia térmica dos gases de escape e tem a função de impulsionar o compressor centrífugo.

11.2 Turboalimentação



O turboalimentador é composto por um compressor de ar centrífugo, directamente ligado a uma turbina centrípeta.

O rotor do compressor e o rotor da turbina estão ligados por um eixo suportados por mancais flutuantes, alojados em uma carcaça central. O compressor centrífugo consiste de uma carcaça de alumínio e um rotor. A turbina centrípeta é formada por uma carcaça de ferro fundido e pelo eixo rotor. A carcaça central incorpora o prato do compressor, protector térmico, freios dos mancais, mancais radiais, mancal de encosto, colar centrifugo, anéis de pistão e anel de vedação.



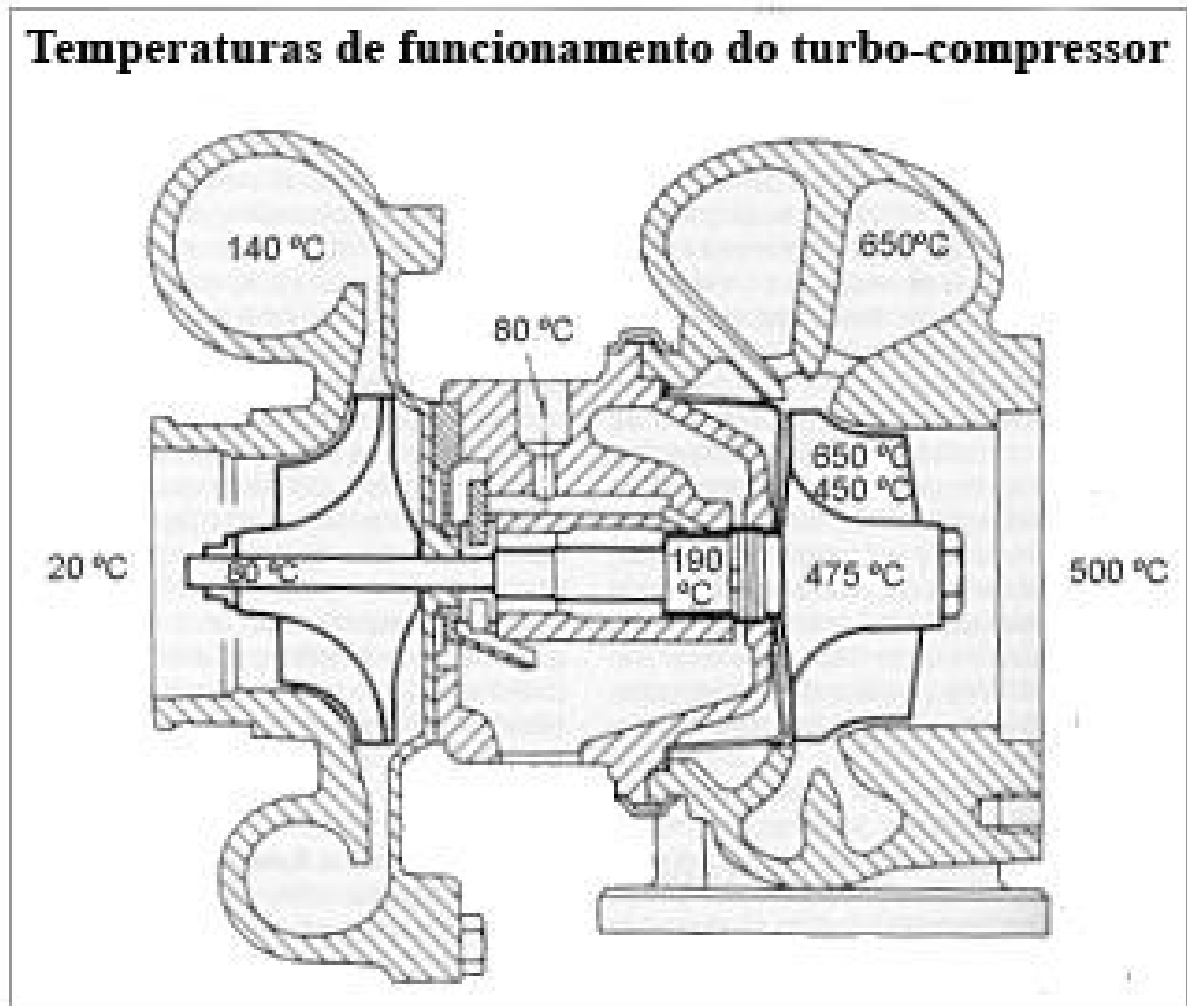
11.2.1 Temperaturas do Turbo

As temperaturas de funcionamento num turbo são muito diferentes, tendo em conta que a parte dos componentes que estão em contacto com os gases de escape pode alcançar temperaturas muito altas (650 °C a 750°C), enquanto os que estão em contacto com o ar da aspiração só alcançam 80 °C.

Estas diferenças de temperatura concentrada numa mesma peça (eixo comum) determinam valores de dilatação diferentes, o que comporta dificuldades na hora do *design* de um turbo, na escolha dos materiais que suportem estas condições de funcionamento adversas.

O turbo refrigera-se em parte pelo óleo de lubrificação e pelo ar de aspiração, cedendo uma determinada parte do seu calor ao ar que força a passagem pelo rodete do compressor. Este aquecimento do ar não é nada benéfico para o motor, já que não só dilata o ar da admissão de forma que altera a sua massa específica e por isso riqueza em oxigénio, como além disso, um ar demasiado quente no interior do cilindro dificulta a refrigeração da câmara de combustão durante o enchimento da câmara ao entrar ar a uma temperatura superior à do próprio líquido refrigerante.

11.2.1 Temperaturas do Turbo



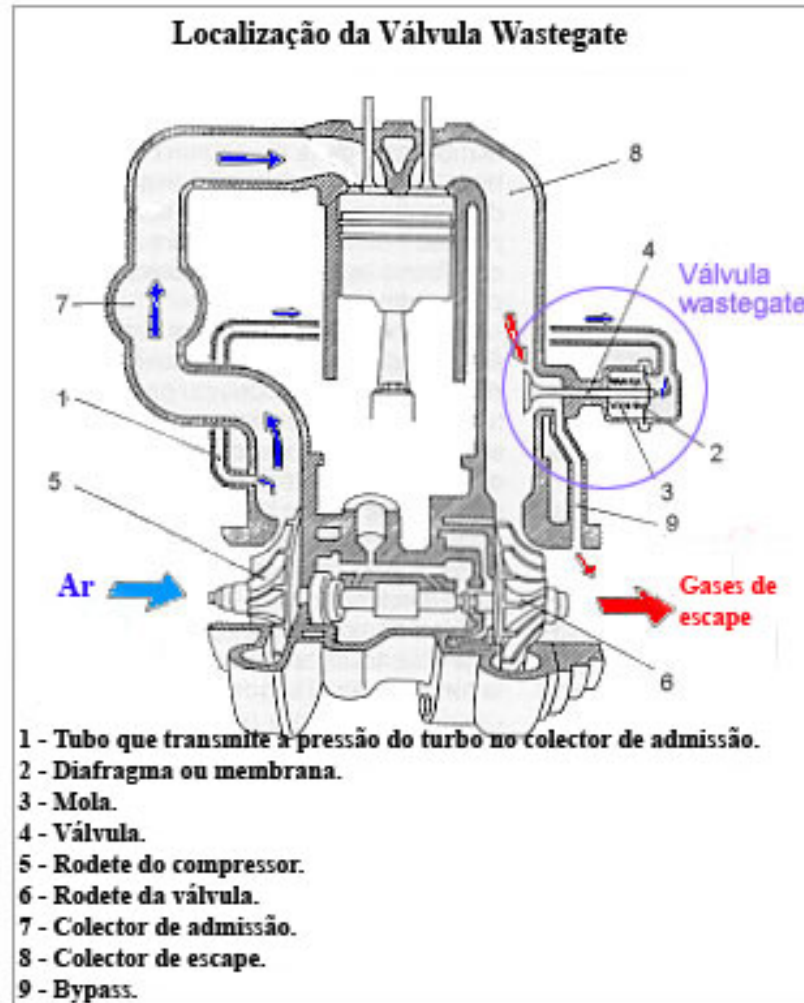
11.2.1 Temperaturas do Turbo



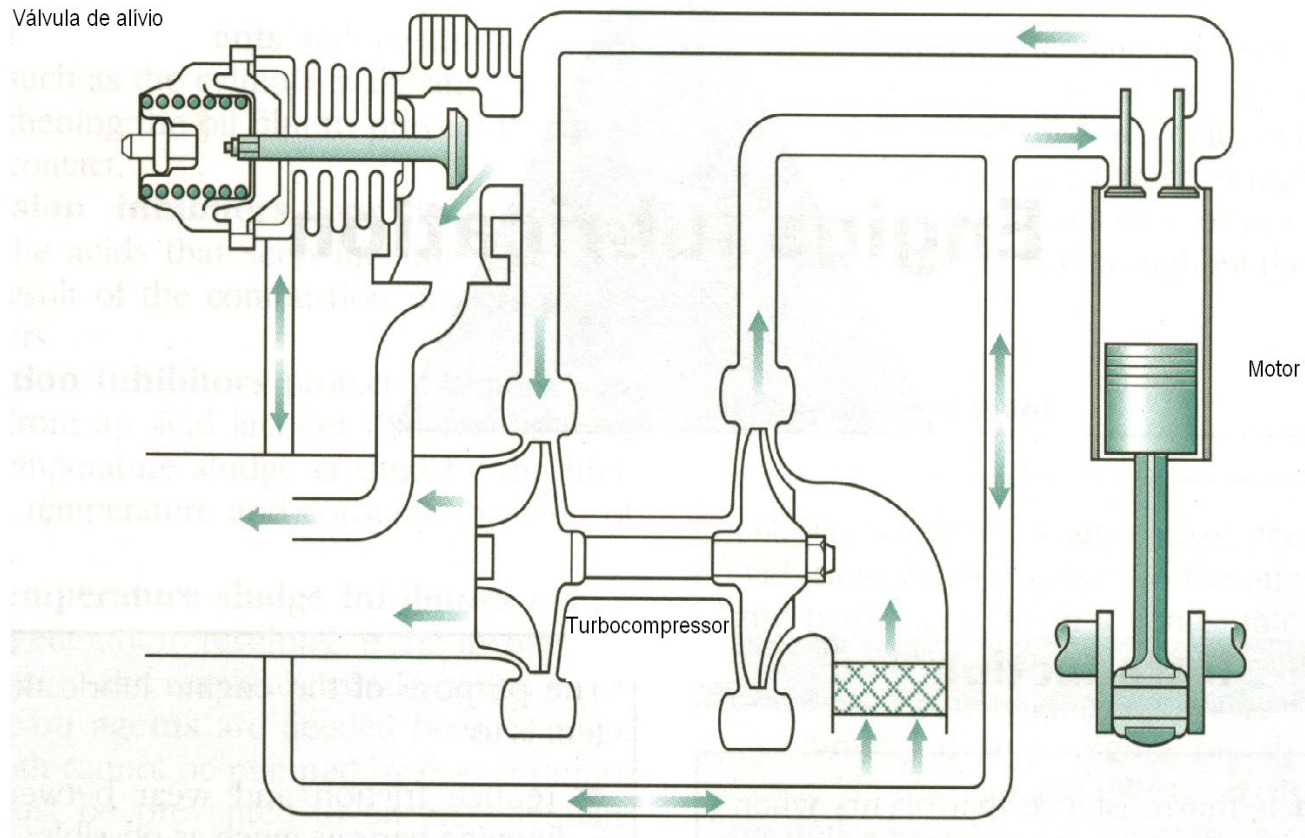
11.2.2 Válvula Wastegate

É uma válvula existente na grande maioria dos motores com turbo sem geometria variável. Esta válvula reage à pressão do turbo fazendo com que apenas uma parte dos gases de escape passe pela turbina, de modo a controlar a pressão máxima. Com menos gases a passar pela turbina, o compressor gira mais lentamente estabilizando a pressão do turbo. A Wastegate reencaminha os restantes gases para o colector de escape. Existem wastegates internas ou externas ao turbo. Normalmente quando os motores estão equipados com estas válvulas e se aumenta a pressão máxima de funcionamento, o mecanismo de actuação da wastegate pode não ser suficiente para funcionar a essas pressões e tem que se trocar a válvula. A mola do mecanismo de controlo da válvula tem um papel importante no correcto funcionamento e actuação da wastegate, daí a escolha ser bastante importante. A grande divulgação dos turbos de geometria variável que não necessitam destas válvulas para o controle da pressão faz com estas possam ser cada vez menos necessárias.

11.2.2 Válvula Wastegate



11.2.2 Válvula Wastegate

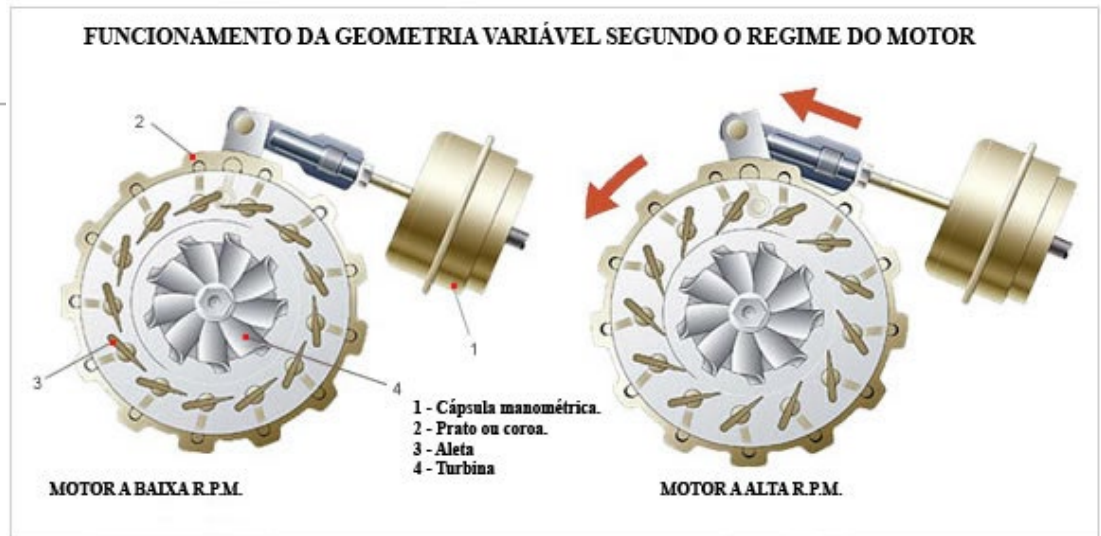
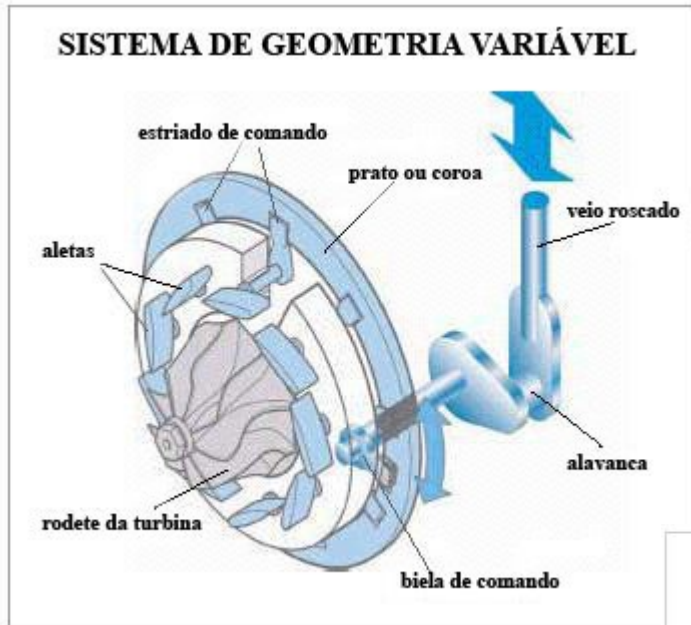


11.2.3 Turbo de Geometria Variável

O turbo VTG (Geometria Variável) diferencia-se do turbo convencional pela utilização de um prato ou coroa no qual estão montadas umas alhetas moveis que podem ser orientadas (todas em conjunto) num ângulo determinado, mediante um mecanismo de vareta e alavanca empurradas por uma cápsula pneumática, sistema parecido com o utilizado na Válvula Wastegate.

Para conseguir-se a máxima compressão do ar a baixas rotações da cambota devem fechar-se as alhetas, já que diminuindo a secção entre elas, aumenta a velocidade dos gases de escape que incidem com mais força sobre as pás do rodete da turbina (menor secção = maior velocidade). Quando o motor aumenta de rotações e aumenta a pressão no colector de admissão, a cápsula pneumática detecta-a através de um tubo ligado directamente ao colector de admissão e transforma-o num movimento que empurra o sistema de comando das alhetas, para que estas se movam para uma posição de abertura, que faz diminuir a velocidade dos gases de escape que incidem sobre a turbina (maior secção = menor velocidade).

11.2.3 Turbo de Geometria Variável



11.2.3 Turbo de Geometria Variável



1 1.3 Intercooler

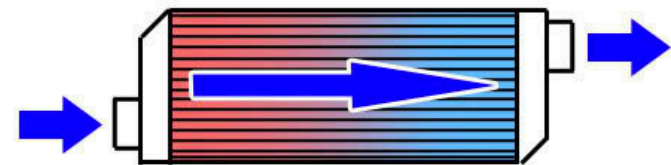
O **intercooler** é um permutador de calor. A sua utilização faz-se em motores sobre alimentados, ou seja, que utilizam turbo ou compressor mecânico.

O ar, ao ser comprimido, aumenta a sua temperatura diminuindo a sua massa específica, então a função do intercooler é diminuir a temperatura do ar comprimido, de modo a que volte a aumentar a sua massa específica.

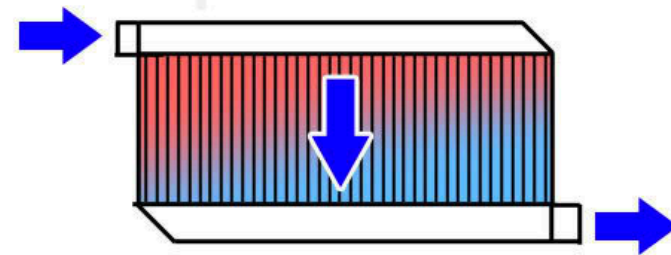
Como num certo volume de ar quente a massa específica é menor (existem menos partículas), então a quantidade de combustível injectada vai ser menor, levando a uma potência limitada, face ao mesmo volume de ar frio, visto que o a relação ar-combustível é fixa.

1.1.3 Intercooler

Deve-se considerar também que com a introdução do *intercooler* o turbo (ou compressor) ficam com um maior volume para pressurizar então o *intercooler* aumenta o *turbo lag* e causa perdas de pressão. Em peças de boa qualidade as perdas não devem ultrapassar 10% da pressão máxima. O *design* interno do *intercooler* é um factor que influencia muito na quantidade das perdas.



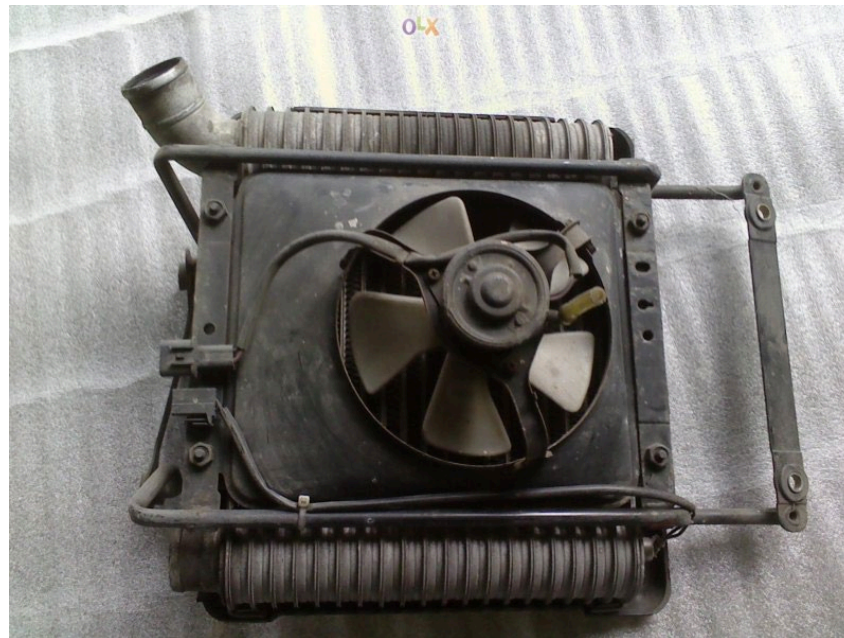
Longer distance for the air to travel between tanks -
More pressure loss.



Very short distance for the air to travel between tanks -
Less pressure loss.

11.3 Intercooler

Em geral, um bom intercooler apresenta uma eficiência maior que 70%. Um bom meio de "ajudar" o intercooler quando o fluxo de ar é baixo, é instalar-se um ventilador elétrico (ventoinha) para forçar a passagem de ar.



1.3 Intercooler

- ▶ De acordo com a lei dos gases Ideais ($Pv = mRT$) quando se faz a compressão de um gás a sua temperatura aumenta. Para um fluido perfeito, desprezando as reversibilidades, isto é para uma eficiência adiabática de 100%, a temperatura no fim da compressão é dada por:

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (11.1)$$

- ▶ Onde:
- ▶ T_1 - é a temperatura a entrada do compressor
- ▶ T_2 - é a temperatura a saída do compressor
- ▶ P_2 - é a pressão a saída do compressor
- ▶ P_1 - é a pressão a entrada do compressor

1.3 Intercooler

- ▶ Pelo facto dos compressores não serem máquinas adiabáticas ideais, estes também adicionam calor a carga, então a sua eficiência determina-se de:

$$\eta_{comp} = \frac{T_2 - T_1}{(T_2 - T_1)_{real}} \quad (11.2)$$

- ▶ Onde:
- ▶ T_1 - é a temperatura a entrada do compressor
- ▶ T_2 - é a temperatura a saída do compressor

1.3 Intercooler

- ▶ A relação das massas específicas à entrada e a saída do compressor determinam-se de :

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{P_2 \cdot T_1}{T_2 \cdot P_1} \quad (11.3)$$

- ▶ Onde:
- ▶ ρ_1 - é a massa específica à entrada do compressor
- ▶ ρ_2 - é a massa específica à saída do compressor
- ▶ T_1 - é a temperatura a entrada do compressor
- ▶ T_2 - é a temperatura a saída do compressor
- ▶ P_2 - é a pressão a saída do compressor
- ▶ P_1 - é a pressão a entrada do compressor

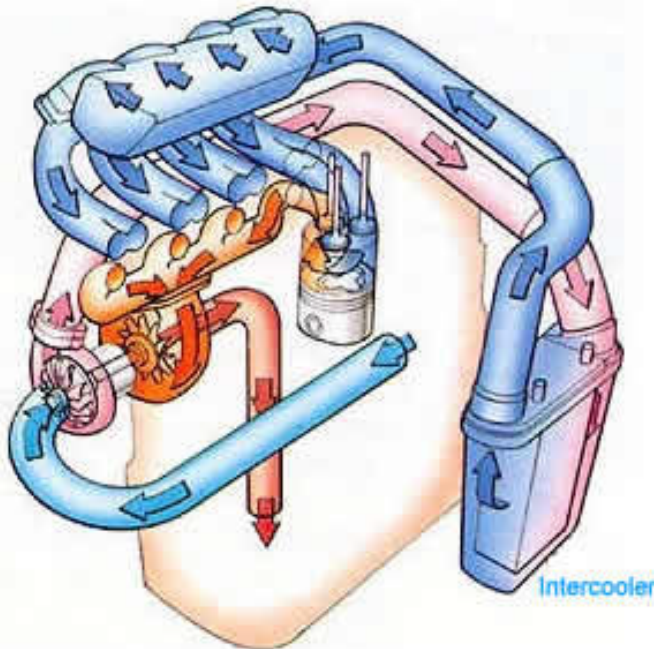
1.3 Intercooler






- ▶ A eficiência de um termopermutador de calor determina-se de:

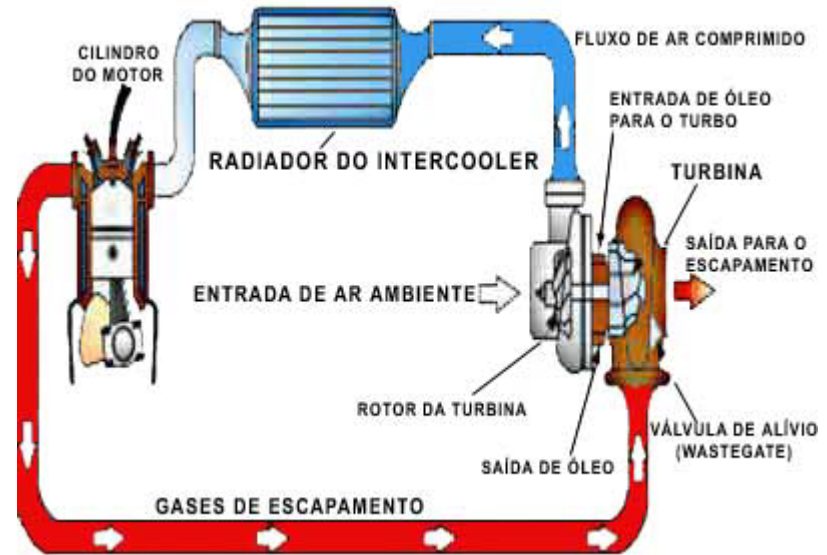
$$\varepsilon_t = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_4} \quad (11.4)$$

- ▶ Onde:
- ▶ T_2 – é a temperatura de saída do compressor;
- ▶ T_3 – a temperatura de saída do ar do termopermutador
- ▶ T_4 – a temperatura de saída do fluido refrigerante do termopermutador

11.3 Intercooler



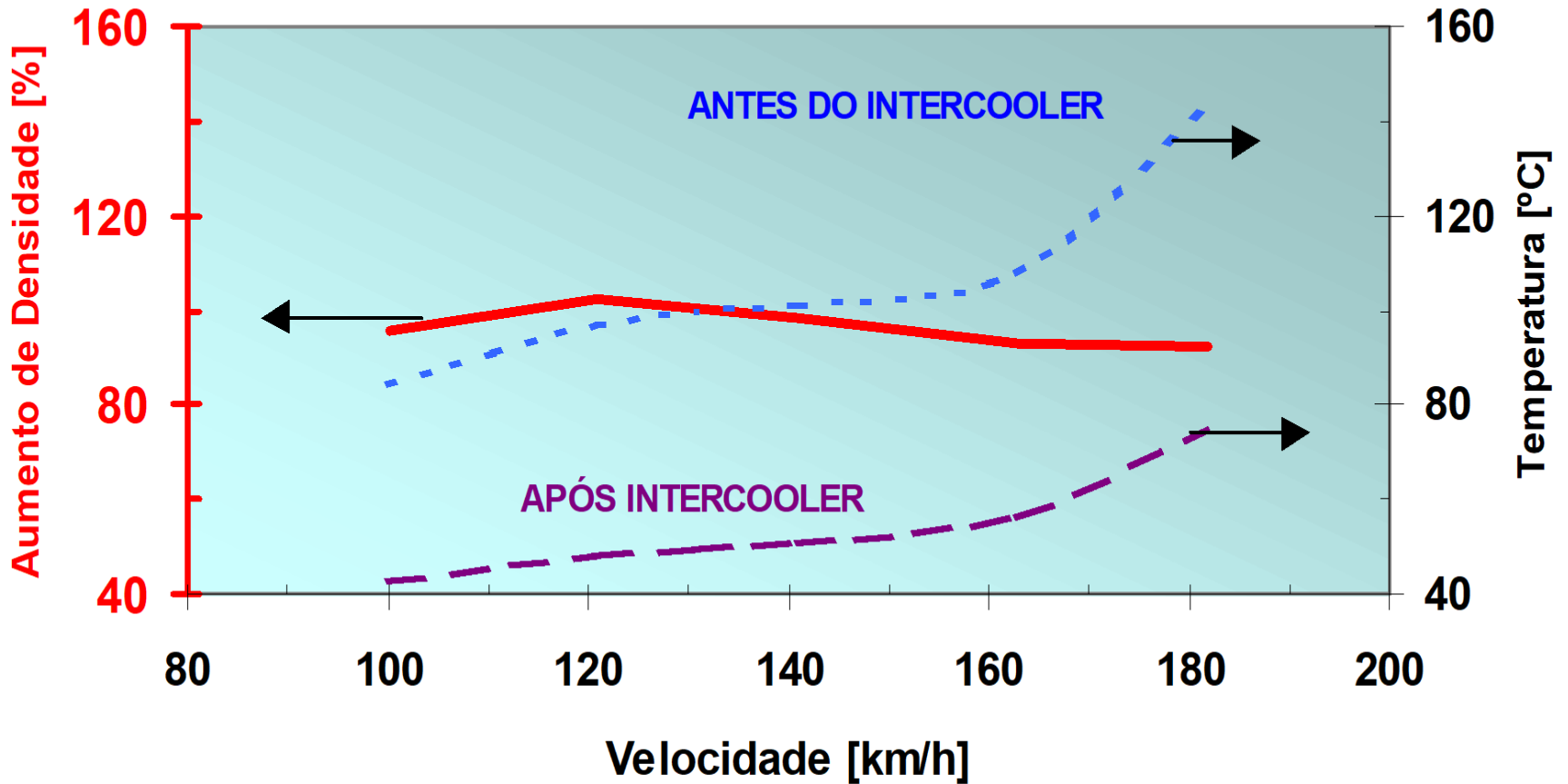
- a  Ar frio vindo do filtro de admissão de ar
- b  Ar comprimido quente saído da turbina
- c  Ar comprimido arrefecido pelo intercooler
- d  Ar quente vindo do colector de escape
- e  Ar quente do compressor para o escape



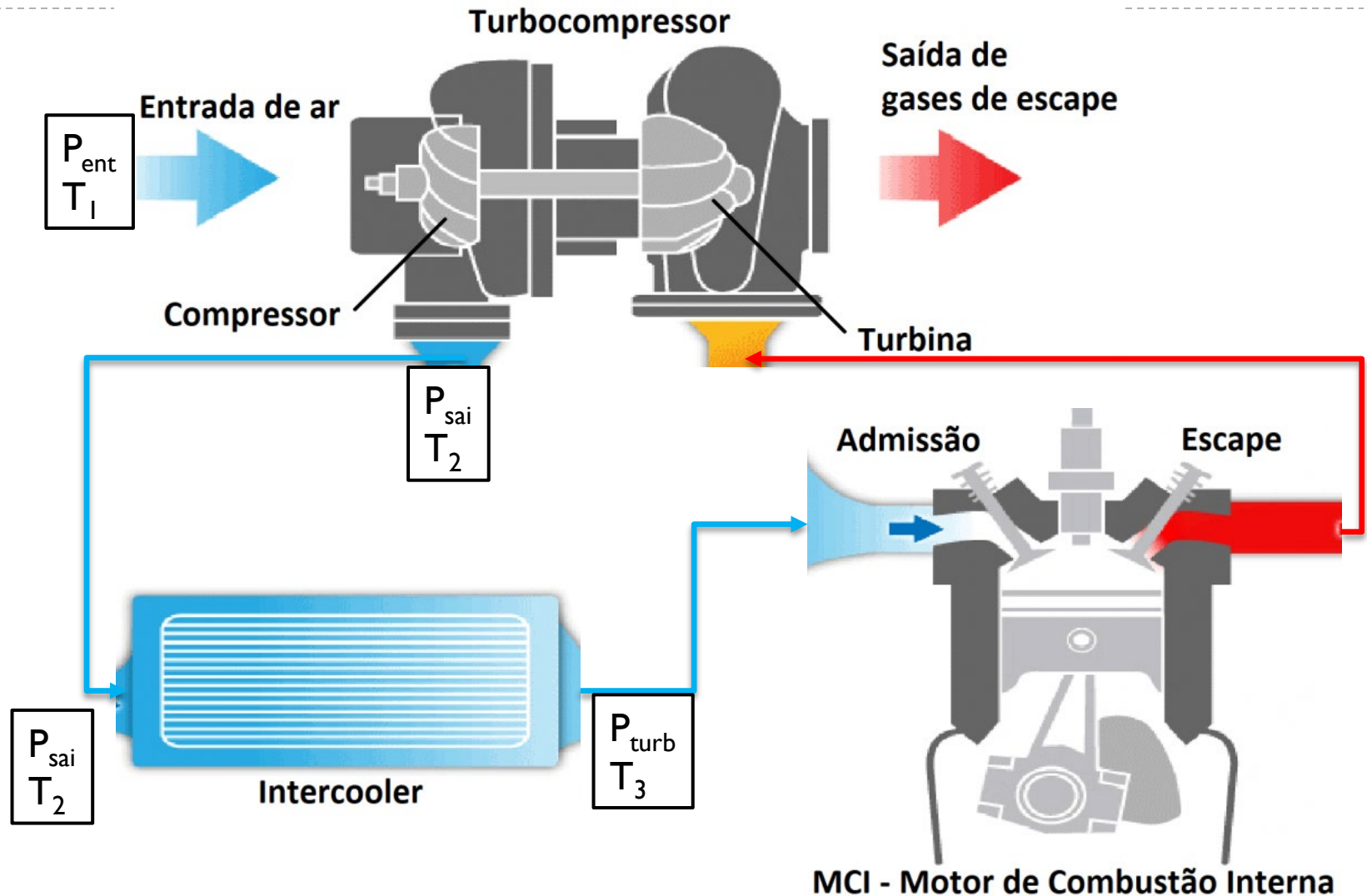


Parati Turbo 1.0 16V

Efeito do Intercooler sobre Densidade do Ar



11.4 Passos para escolha de um turbo-compressor



11.4 Passos para escolha de um turbo-compressor

1. calcula-se a razão de pressões entre a entrada e a saída do compressor pela expressão:

$$\frac{P_{tur}}{P_{ent}} = \frac{P_{ent} + P_{said} + P_{term}}{P_{ent}} \quad (11.5)$$

Onde:

P_{tur} – Pressão total de Compressão

P_{ent} – Pressão de entrada no Compressor

P_{said} – Pressão de saída do Compressor

P_{term} – Pressão das perdas no intercooler $\sim 0,8$ kPascal

11.4 Passos para escolha de um turbo-compressor

2. calcula-se a densidade do ar que sai do compressor pela expressão:

$$\rho = \frac{P_{tur}}{RT} \quad (11.6)$$

Onde:

P_{tur} – Pressão total de Compressão

T – temperatura média dos gases no compressor $\sim 80^{\circ}\text{C}$

11.4 Passos para escolha de um turbo-compressor

3 . calcula-se a massa de ar que sai do compressor pela expressão (8.29)

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_a V_d N} \Rightarrow \dot{m}_a = \frac{\rho_a V_d N \eta_v}{2} \quad (11.7)$$

Onde:

V_d – volume deslocado

N – Número de rotações da cambota do motor

2 – Para motores de quatro tempos

1 – para motores de dois tempos

ρ_a – densidade do ar (mistura)

11.4 Passos para escolha de um turbo-compressor

4 . calcula-se a massa real de ar que sai do compressor pela expressão (2.35)

$$m_{real} = m_a \cdot \frac{P_{ent}}{P_{nor}} \cdot \sqrt{\frac{T_{ent}}{T_{nor}}} \quad (11.8)$$

Onde:

P_{ent} – Pressão de entrada

P_{nor} – Pressão de norma (736,3-9,65 mmHg)

T_{ent} – Temperatura de entrada

T_{nor} – Temperatura de norma (29,4°C)

m_a – massa do ar (mistura)

11.4 Passos para escolha de um turbo-compressor

5 . Calcula-se o número real de rotações do compressor pela expressão

$$N_{real} = \frac{N}{\sqrt{\frac{T_{ent}}{T_{nor}}}} \quad (11.9)$$

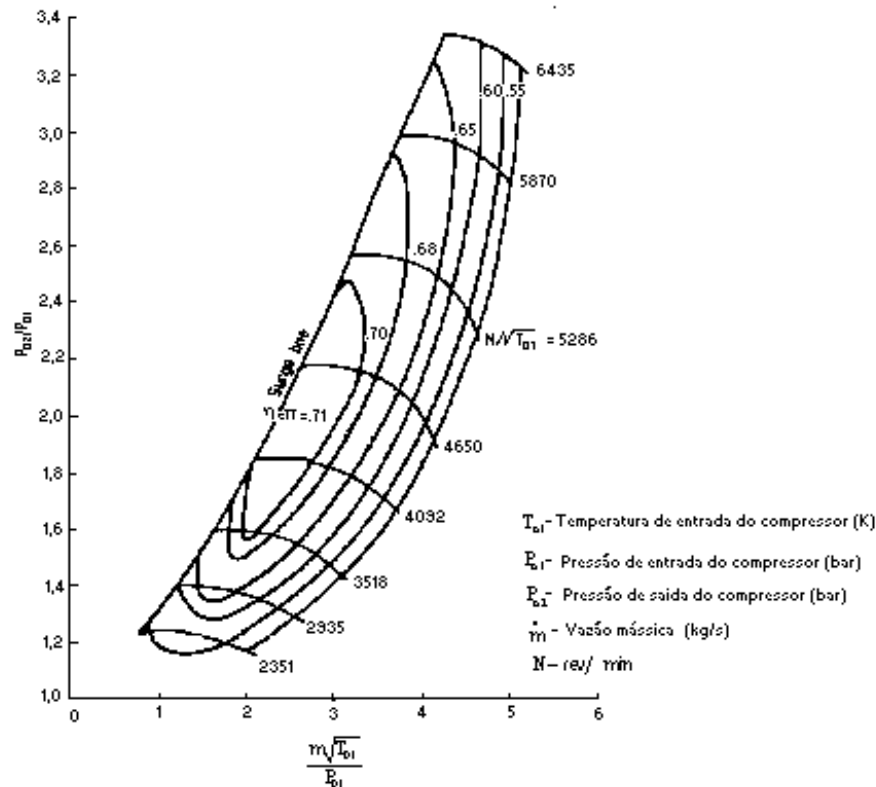
Onde:

N – Número de rotações do turbo

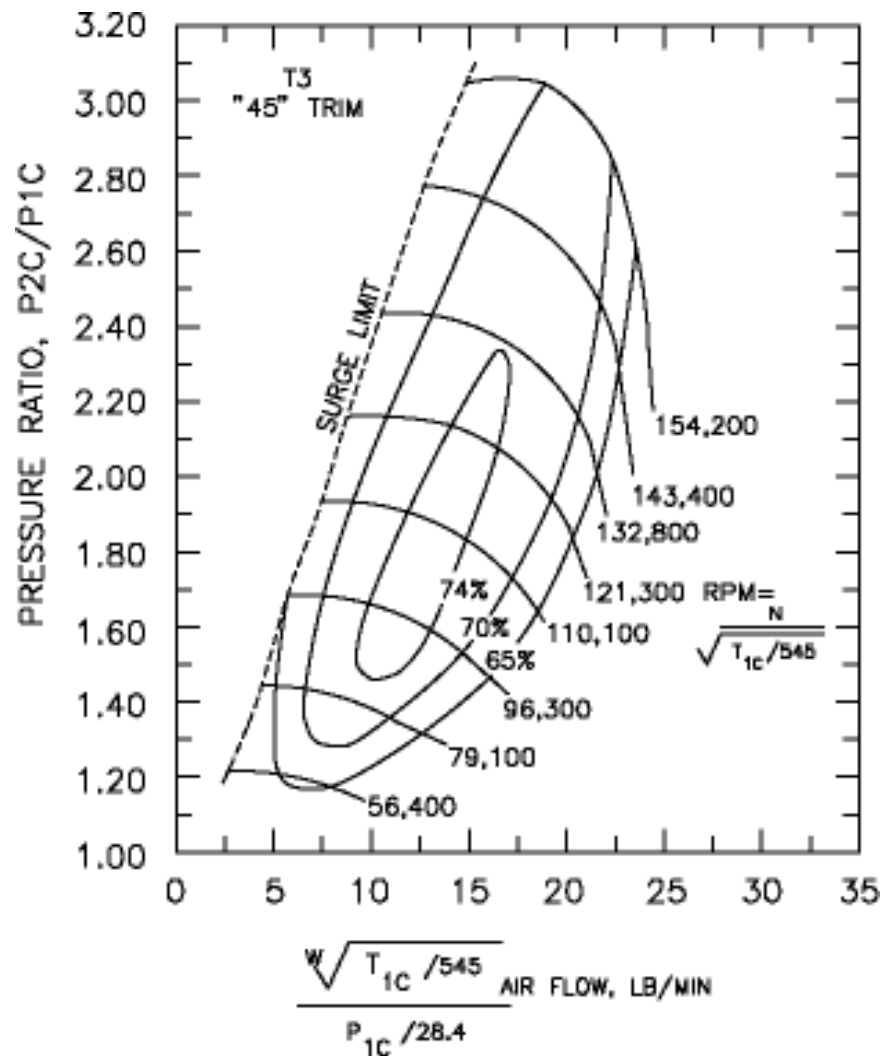
T_{ent} – Temperatura de entrada

T_{nor} – temperatura de norma

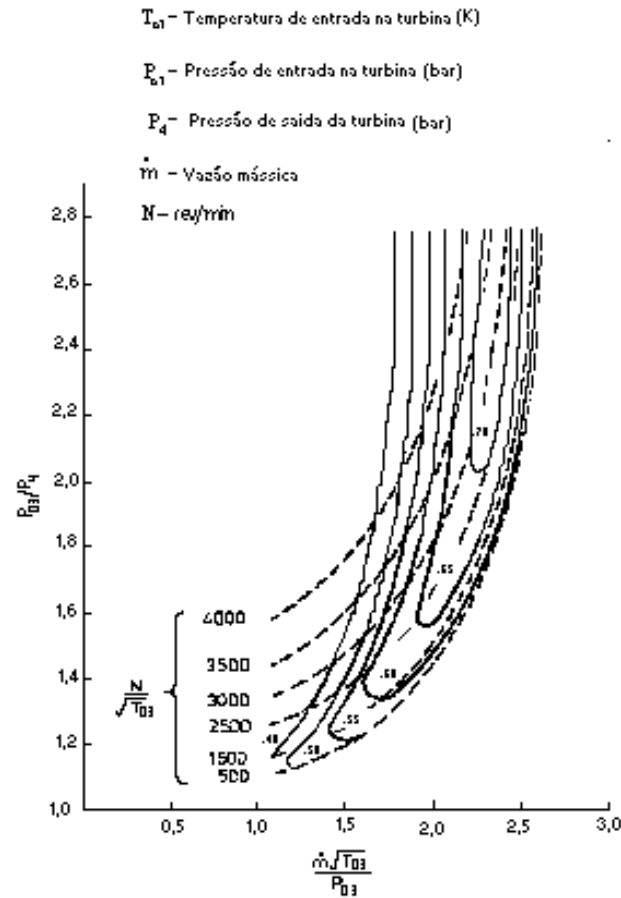
11.4.1 Mapas de Compressores



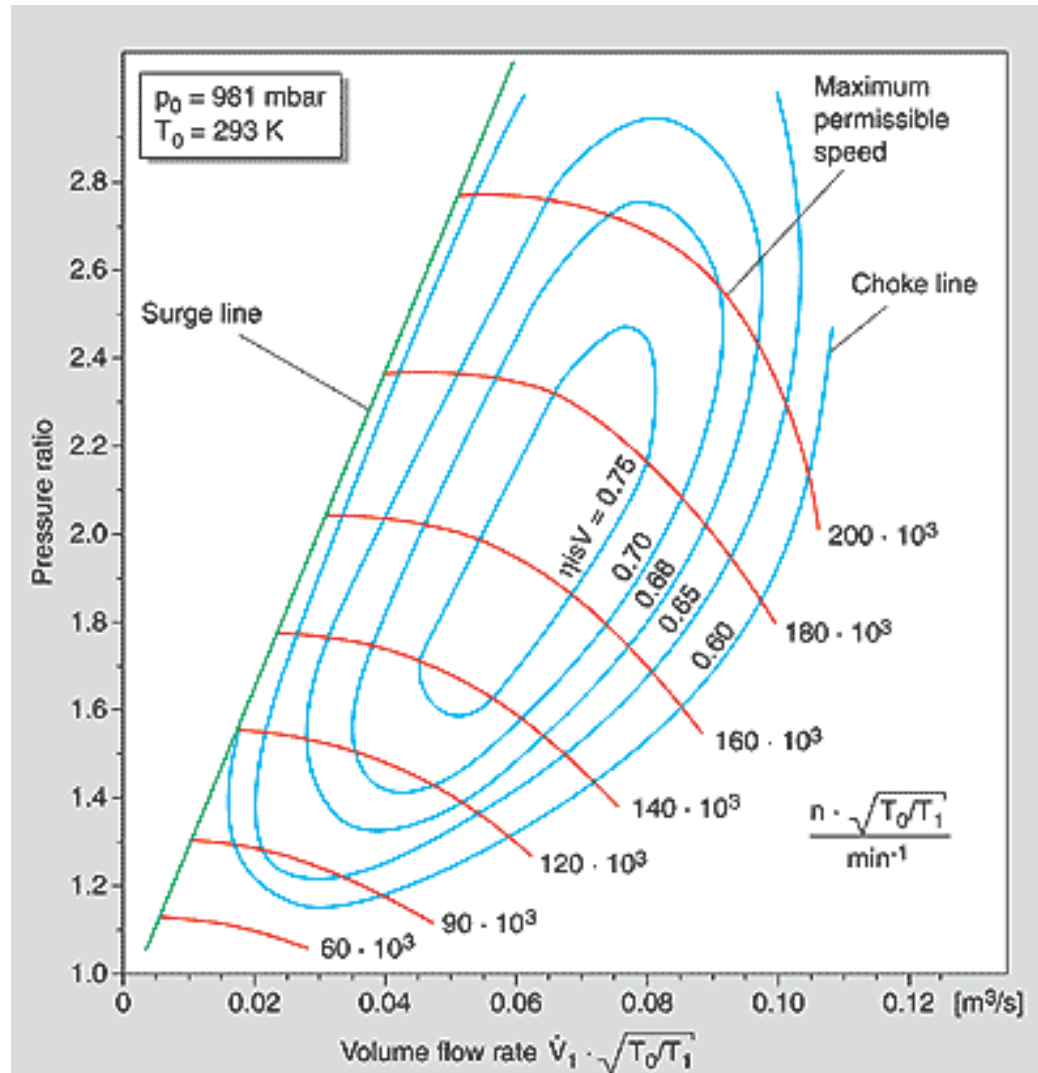
11.4.1 Mapas de Compressores



11.4.1 Mapas de Compressores



11.4.1 Mapas de Compressores



11.4.2 Linha de Pulsação

Linha de pulsação é o limite esquerdo do mapa do compressor. A operação a esquerda desta linha ocorre numa região de instabilidade de fluxo. Esta região é caracterizada pela transição da vibração suave para uma flutuante com um ruído vindo do compressor. A operação continua nesta região pode levar à danificação prematura do turbo devido à excessiva pressão de carga.

A pulsação acontece geralmente quando uma das duas situações ocorrem: A primeira e mais prejudicial é o aumento da carga que pode ser um indício de que o compressor é demasiado grande.

A pulsação geralmente também pode ocorrer quando o acelerador é fechado repentinamente depois de uma grande aceleração. Isso ocorre porque o fluxo de massa é drasticamente reduzido quando a borboleta do acelerador é fechada, mas o turbo ainda está a girar e gerar impulso o que desloca imediatamente o ponto de operação para o lado esquerdo do mapa compressor, ficando a linha do surge a direita.

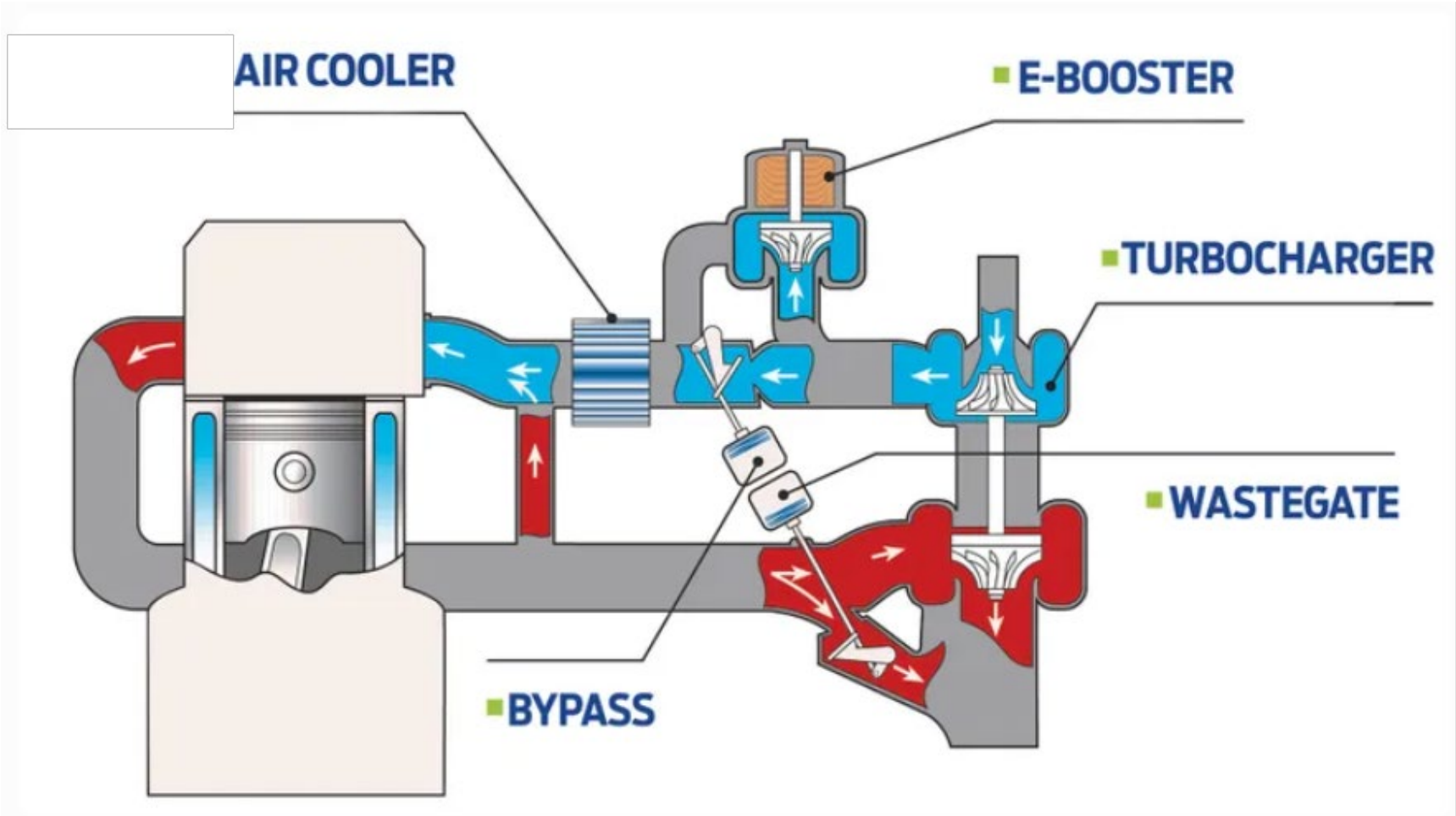
11.4.2 Linha de Choque

- ▶ A Linha de Choque, é o limite lateral direito do mapa do compressor. Para mapas Garrett, a linha é normalmente definida pelo ponto onde a eficiência do compressor cai abaixo de 58%. Além da rápida queda da eficiência do compressor abaixo desta linha, a velocidade do turbo também será próxima ou superior ao limite admissível. Se a sua operação real estiver para além desse limite, é necessário um compressor maior.

1 1.5 O eBooster

- ▶ O eBooster é um compressor eléctrico de alta velocidade, frequentemente usa 48V , utilizado para eliminar o "turbo lag" (atraso do turbo) em baixas rotações, aumentando instantaneamente o torque. Ele funciona de forma independente, permitindo motores menores e mais eficientes com resposta dinâmica de alto desempenho.
- ▶ Além de proporcionar um aumento instantâneo de potência, o BorgWarner eBooster pode funcionar como um compressor composto. Como o compressor mecânico e o turbocompressor estão ligados em série, as pressões das duas unidades de sobrealimentação são multiplicadas, proporcionando ainda mais potência e força ao motor.

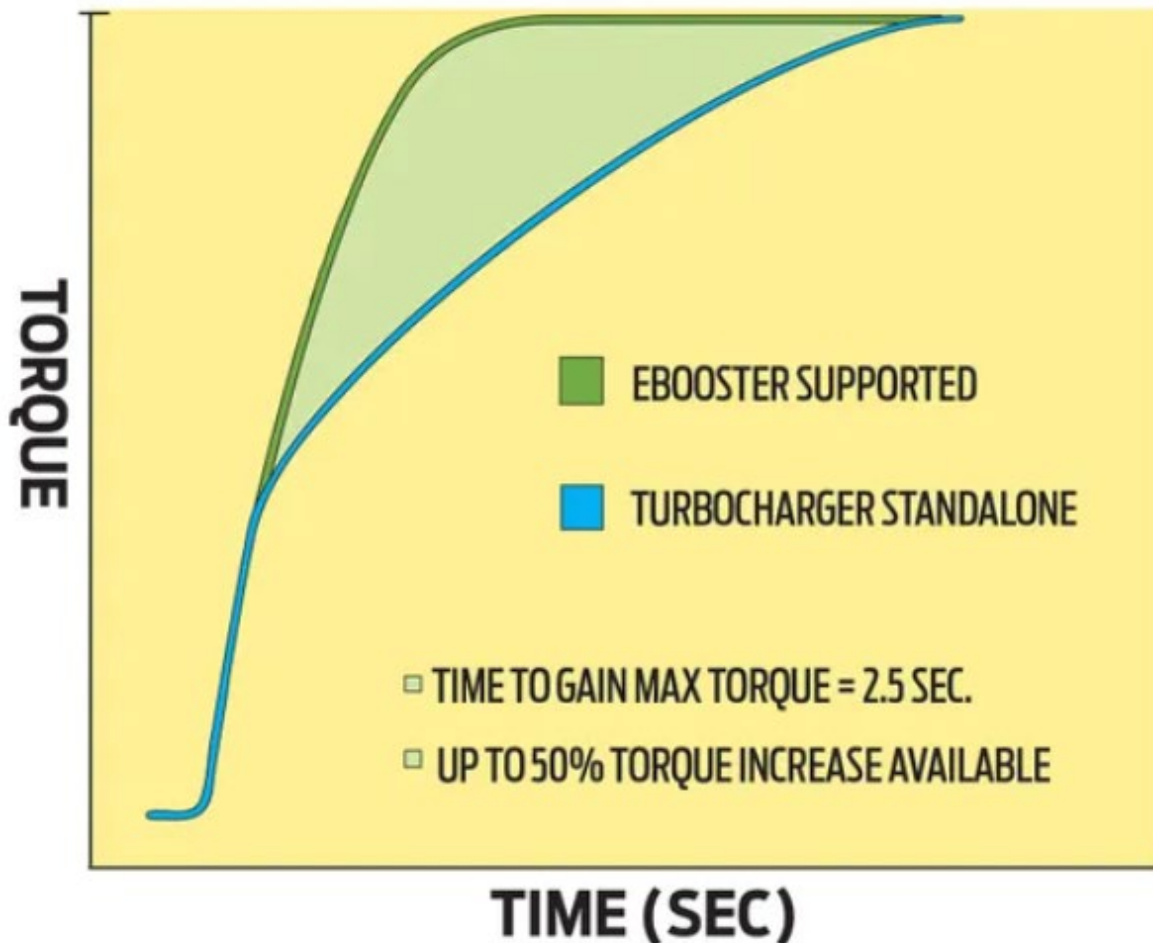
11.5. O eBooster



11.5.1 Principais Características e Benefícios do eBooster

- ▶ **Desempenho Instantâneo:** Melhora a resposta transitória do motor, fornecendo torque satisfatório em cerca de 1 segundo.
- ▶ **Funcionamento:** Accionado electricamente, ele comprime o ar e o envia para o motor, agindo como um supercompressor em baixas rotações (até ~4500 RPM) antes que o turbocompressor convencional assuma o controle.
- ▶ **Eficiência Energética:** Consome cerca de 5 kW de potência de pico e opera por curtos períodos, muitas vezes recarregando via frenagem regenerativa.
- ▶ **Aplicação:** Instalado próximo ao corpo de borboleta, após o intercooler, para receber ar mais frio e denso.

11.5.1 Principais Características e Benefícios do eBooster



Em comparação com um turbocompressor independente, um projecto de demonstração do BorgWarner eBooster atingiu o torque máximo em apenas 2,5 segundos e adicionou mais 50% de torque em toda a gama de rotações.

1.1.5.2 Vantagens do eBooster

- ▶ Resposta imediata
- ▶ Mais torque em baixa rotação
- ▶ Menor consumo e emissões
- ▶ Melhor dirigibilidade
- ▶ Ideal para híbridos e motores downsized

Sistema	Fonte	Resposta	Eficiência	Complexidade
eBooster	Elétrica	Imediata	Alta	Média
Turbo	Gases de escape	Lenta em baixa	Muito alta	Alta
Supercharger	Mecânica	Imediata	Baixa	Baixa

1 1.6 Tecnologia E-Turbo

- ▶ Ao contrário dos sistemas tradicionais movidos a gases de escape, o E-Turbo utiliza um motor eléctrico para accionar o compressor. Esta abordagem inovadora garante a optimização da eficiência e do desempenho do motor em todas as rotações. Composto por um motor eléctrico, compressor, turbina e electrónica de potência avançada, o E-Turbo fornece um fluxo de ar contínuo e eficiente para a câmara de combustão, aumentando significativamente a potência e, ao mesmo tempo, melhorando a eficiência de combustível.

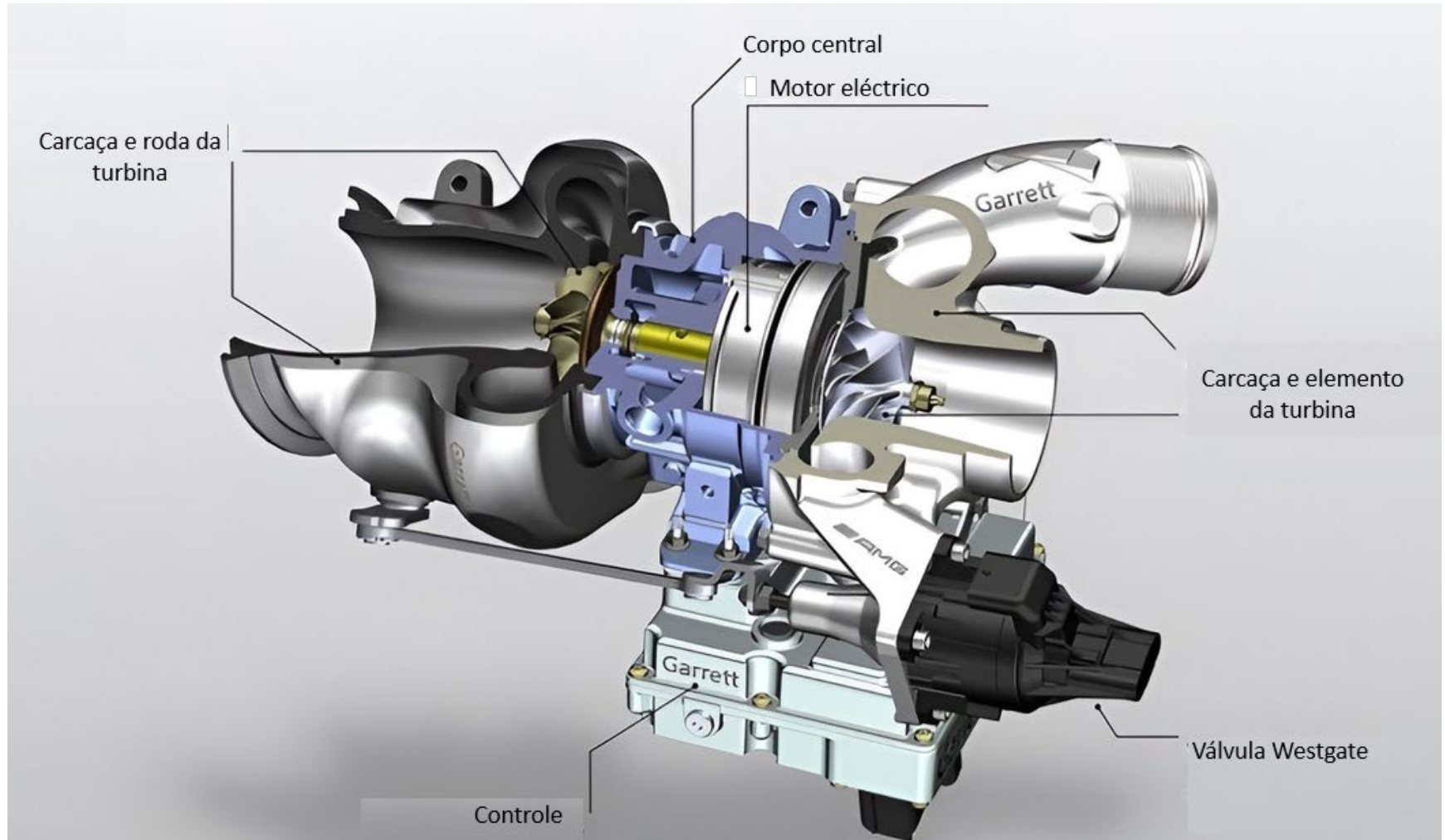
1 1.6 Tecnologia E-Turbo

- ▶ O E-Turbo é transformador porque permite maior potência nominal dos motores, eliminando as restrições de projecto do turbo em relação às baixas rotações do motor. O resultado é uma arquitectura que permite dimensionar a turbina para oferecer desempenho sem comprometer a performance em altas rotações, enquanto o motor eléctrico integrado fornece impulso instantâneo por meio do compressor em rotações mais baixas, onde há menos energia disponível dos gases de escape.

1 1.6 Tecnologia E-Turbo

- ▶ A tecnologia E-Turbo da Garrett redefine o que espera-se de veículos turboalimentados, oferecendo:
- ▶ Resposta instantânea do turbo: O E-Turbo oferece potência instantânea, oferecendo resposta imediata do acelerador.
- ▶ Eficiência de combustível superior: Ao otimizar a mistura ar-combustível em todas as rotações, o E-Turbo garante que os motores funcionem com mais eficiência, consumindo menos combustível sem comprometer o desempenho.

11.6 Tecnologia E-Turbo



1 1.6 Tecnologia E-Turbo

- ▶ Recuperação de energia : O motor eléctrico pode recuperar energia dos gases de escape, recarregando a bateria.
- ▶ Desempenho personalizável: A tecnologia E-Turbo permite um controle sem precedentes sobre os níveis de pressão e o desempenho do motor, atendendo a diversas preferências e condições de funcionamento do motor.

11.6 Tecnologia E-Turbo

