



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica



Bruno Henrique Stanckvicius da Silva

**AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE INTERCOOLERS NO
DESEMPENHO DE UM MOTOR TURBOALIMENTADO**

Uberlândia

2019

Bruno Henrique Stanckvicius da Silva

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE INTERCOOLERS NO DESEMPENHO DE UM MOTOR TURBOALIMENTADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Marta de Souza

Uberlândia

2019

Bruno Henrique Stanckvicius da Silva

AVALIAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DE INTERCOOLERS NO DESEMPENHO DE UM MOTOR TURBOALIMENTADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Marta de Souza

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Ana Marta de Souza

Profa. Dra. Elaine Gomes Assis

Uberlândia, ____ de _____ de 2019

“A própria vida é uma prova de corridas, com um início e um fim. É o que aprendemos durante a corrida, e como aplicamos esse conhecimento, que determina se a nossa participação teve algum contributo de valor.”

Ferdinand Porsche

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo mostrar a importância da utilização dos intercoolers em um veículo sobrealimentado, bem como comparar dois diferentes tipos de intercoolers, sendo esses do tipo ar-ar e do tipo ar-água, tendo em vista a crescente utilização de motores sobrealimentados, principalmente devido à incessante busca pelo aumento da eficiência energética e diminuição da emissão de poluentes por parte das montadoras e governos. Por meio da comparação de três diferentes configurações de motores sobrealimentados, com diferentes arranjos de intercooler, mostra-se como a presença deste equipamento pode contribuir para o desempenho do motor. Apresenta-se, também, o processo de dimensionamento dos dois tipos de intercoolers mencionados, com os resultados e características de cada arquitetura sendo discutidas. Com a execução deste trabalho, observou-se que um intercooler é essencial para se obter melhores resultados de desempenho em motores sobrealimentados, além do fato de que um intercooler do tipo ar-água possibilita a utilização de uma área de troca térmica e vazão muito menores, contudo é um trocador de calor mais complexo e demanda mais cuidados do que um intercooler do tipo ar-ar.

Palavras-chave: intercooler; trocador de calor; motores sobrealimentados; desempenho de motores; eficiência energética.

ABSTRACT

This paper aimed to show the importance of using intercoolers in a supercharged vehicle, as well as comparing two different types of intercoolers, these being air-air type and air-water type, in view of the increasing use of supercharged engines, mainly due to the incessant pursuit of increased energy efficiency and decreased emission of pollutants by automakers and governments. By comparing three different supercharged engine configurations with different intercooler arrangements, it is shown how the presence of this equipment can contribute to engine performance. It also presents the design process of the two types of intercoolers mentioned, with the results and characteristics of each architecture being discussed. With the execution of this work, it was observed that an intercooler is essential to obtain better performance results in supercharged engines, besides the fact that an air-water intercooler allows the use of a much smaller heat exchange area and flow rate. However, it is a more complex heat exchanger and requires more care than an air-to-air intercooler.

Keywords: intercooler; heat exchanger; supercharged engines; engine performance; energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tempos de um motor ICE.....	15
Figura 2 – Diagramas P-v e T-s de um ciclo Otto ideal.....	15
Figura 3 - Diagrama P-v de um ciclo Otto real	16
Figura 4 - Tempos de um motor ICO	17
Figura 5 - Ciclos P-v e T-s de um ciclo Diesel ideal	17
Figura 6 - Ciclo P-v de um ciclo Diesel real	18
Figura 7 - Sistema pistão-biela-manivela de um motor.....	20
Figura 8 - Curvas características de torque e potência de um motor ICE	21
Figura 9 - Curva característica do consumo específico em função da rotação do motor.....	23
Figura 10 - Curva característica do consumo específico em função da razão de equivalência	23
Figura 11 - Representação do funcionamento de um compressor de lóbulos	26
Figura 12 - Compressor de lóbulos	26
Figura 13 - Compressor de parafuso visto em corte.....	27
Figura 14 - Compressor centrífugo visto em corte.....	28
Figura 15 - Representação esquemática de um sistema com turbocompressor	29
Figura 16 - Posicionamento das Lâminas de uma Turbina de Geometria Variável	31
Figura 17 - Exemplo de danos causados pela detonação.....	32
Figura 18 - Exemplo de danos causados pela pré-ignição.....	33
Figura 19 - Curvas de torque e potência de motores com e sem intercooler.....	34
Figura 20 - Intercooler do tipo ar-ar.....	35
Figura 21 -Sistema de turbocompressor com intercooler do tipo ar-água	37
Figura 22 - Trocadores de calor de tubo concêntrico	38
Figura 23 - Trocadores de calor com escoamento cruzado	39
Figura 24 - Trocador de calor casco e tubos com um passe no casco e um passe nos tubos	40
Figura 25 - Trocadores de calor casco e tubo. (a) Um passe no casco e dois nos tubos. (b) Dois passes no casco e quatro passes nos tubos.....	40
Figura 26 - Exemplos de trocadores de calor compactos.....	41
Figura 27 - Dados técnicos do motor EA888 da Volkswagen	43
Figura 28 - Curvas de torque e potência do motor sem intercooler	46
Figura 29 - Curvas de torque e potência do motor com intercooler mal dimensionado.....	47
Figura 30 - Curvas de torque e potência do motor com intercooler bem dimensionado	49
Figura 31 - Curvas de potência do motor para os 3 casos estudados	50
Figura 32 - Curvas de torque do motor para os 3 casos estudados	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados técnicos de alguns motores com e sem intercooler	34
Tabela 2 - Dados do motor sem intercooler	47
Tabela 3 - Dados do motor com intercooler mal dimensionado	48
Tabela 4 - Dados do motor com intercooler bem dimensionado	49
Tabela 5 - Vantagens e desvantagens de um intercooler ar-ar	59
Tabela 6 - Vantagens e desvantagens de um intercooler ar-água.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

W_i	Trabalho Indicado
p	Pressão
V	Volume
MEP	Pressão Média Efetiva
P_i	Potência Indicada
N	Velocidade do Virabrequim do Motor
SFC	Consumo Específico de Combustível
\dot{m}_c	Vazão Mássica de Combustível
P	Potência
η_t	Rendimento Térmico
Q_{HV}	Poder Calorífico
\dot{m}	Vazão Mássica
λ	Relação Ar/Combustível
D	Diâmetro
ρ	Densidade Específica
Re	Número de Reynolds
μ	Viscosidade Cinemática
n	Eficiência Isentrópica
γ	Razão Entre Calores Específicos
ϵ	Eficiência
T	Temperatura
C	Capacitância Térmica
C_p	Calor Específico à Pressão Constante
C_r	Razão Entre Capacitâncias Térmicas
q	Calor
NUT	Número de Unidades de Transferência
A	Área
U	Coeficiente Global de Transferência de Calor

SUMÁRIO

1. Introdução	11
2. Revisão Bibliográfica	13
2.1. Motores de Combustão Interna	13
2.1.1. Motor de Ignição por Centelha	14
2.1.2. Motores de Ignição por Compressão (ICO)	16
2.2. Desempenho de Motores	18
2.2.1. Torque (T)	19
2.2.2. Potência (P)	20
2.2.3. Consumo Específico (SFC)	22
2.2.4. Melhora do Desempenho	24
2.3. Sobrealimentação	25
2.3.1. Compressor Mecânico	25
2.3.1.1. Compressores de Deslocamento Positivo	25
2.3.1.1.1. Compressor de Lóbulos	25
2.3.1.1.2. Compressor de Parafusos	27
2.3.1.2. Compressores Centrífugos	28
2.3.2. Turbocompressores	28
2.3.3. Diferenças entre Compressores e Turbocompressores	30
2.4. Intercooler	31
2.4.1. Tipos de Intercooler	35
2.4.1.1. Intercooler Ar-Ar	35
2.4.1.2. Intercooler Ar-Água	36
2.5. Trocadores de Calor	37
2.5.1. Tipos de Trocadores de Calor	38
3. Metodologia	42
3.1. Importância da Utilização de um Intercooler	42
3.2. Dimensionamento Intercooler Ar-Ar	44
3.3. Dimensionamento Intercooler Ar-Água	44
4. Resultados e Discussões	46
4.1. Importância do Intercooler	46
4.2. Dimensionamento de um Intercooler Ar-Ar	52
4.3. Dimensionamento do Intercooler Ar-Água	56
4.4. Análise de Intercoolers Ar-Ar e Ar-Água	57

5. Conclusão	60
6. Referências Bibliográficas.....	62

1. Introdução

Atualmente, há um grande esforço por parte dos governos para diminuir as emissões de poluentes de todos os tipos, o que inclui a poluição decorrente dos automóveis. Isso pressiona cada vez mais as montadoras para produzirem carros mais eficientes e que liberem menores quantidades de gases poluentes. Com isso, uma grande tendência do setor é o downsizing, que nada mais é do que a utilização de motores de menor volume, porém com a adição de um turbocompressor.

Esses veículos sobrealimentados possuem uma maior eficiência energética, gerando números de torque e potência similares aos de motores aspirados de volume muito maior, consumindo menos combustível e proporcionando uma melhor queima do combustível, o que também ajuda na liberação de menos poluentes.

Há também pessoas que buscam aumento de desempenho em seus carros e optam por instalar um turbocompressor em seu carro aspirado, ou até mesmo colocar uma turbina maior em um carro que já é sobrealimentado de fábrica.

Independentemente do objetivo de se instalar um turbocompressor ou compressor mecânico no veículo, para que se otimize os resultados, é essencial que também seja instalado um intercooler para resfriar o ar de admissão após o mesmo ter passado pelo compressor, pois durante o processo de compressão o ar tem seu volume específico elevado, o que diminui a eficiência volumétrica do motor, prejudicando assim que os objetivos desejados com a sobrealimentação sejam atingidos.

No entanto, existem basicamente dois diferentes tipos de intercoolers que podem ser utilizados para o mesmo fim, que são os intercoolers do tipo ar-ar em que o ar da admissão é resfriado pelo ar atmosférico, fruto do escoamento cruzado proporcionado pelo deslocamento do veículo, e os intercoolers do tipo ar-água, em que o ar de admissão é resfriado por um escoamento de água bombeada por um sistema fechado.

O objetivo deste trabalho foi demonstrar a importância da utilização de um intercooler em um motor sobrealimentado e comparar os dois tipos de intercoolers apresentados, tratando de suas vantagens e desvantagens.

Para mostrar a importância da utilização de um intercooler, foi simulado o funcionamento de um motor sobrealimentado em um software específico para este fim, considerando três diferentes configurações de intercooler, sendo uma sem a

presença de intercooler, e foram analisados os dados de desempenho originados por cada configuração discutida.

Já para a comparação das duas construções possíveis de intercooler, foram realizados o dimensionamento de um intercooler do tipo ar-ar e foi utilizado o mesmo método para se dimensionar um intercooler do tipo ar-água. Após isso, foram comparados os resultados e feita a análise da viabilidade de cada construção.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Motores de Combustão Interna

Motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas que convertem energia química, oriunda da reação de combustão de um combustível, em energia mecânica.

Apesar de existirem diversas configurações e tipos de motores de combustão interna, todos seguem o seguinte princípio de funcionamento:

- ar e combustível em quantidades ideais recebem energia para dar início à reação química de combustão;
- a energia química resultante da combustão de ar e combustível realiza trabalho sobre um sistema mecânico;
- o trabalho mecânico proveniente do motor é transmitido para um sistema de transmissão ou convertido em outra forma de energia.

Em veículos automotores, os dois principais tipos de motores de combustão interna utilizados são o MCI de ignição por centelha (ICE) e o MCI de ignição por compressão (ICO). Os princípios de funcionamento de cada um desses motores, juntamente com algumas de suas particularidades serão explicitados a seguir.

Tanto no motor ICE quanto no ICO, existem quatro tempos de funcionamento. Em motores alternativos, que são os utilizados na grande maioria dos veículos, no primeiro tempo ocorre a admissão do ar para dentro do cilindro por meio do movimento do pistão do ponto morto superior (PMS), até o ponto morto inferior (PMI). Ao realizar esse movimento, cria-se vácuo dentro do cilindro e com a abertura das válvulas de admissão, o ar preenche o cilindro.

O volume existente entre o PMI e o PMS é denominado de cilindrada. A cilindrada de todos os cilindros juntos é igual à cilindrada do motor. Ou seja, a cilindrada do motor é a quantidade total de ar admitida pelo motor após duas voltas do virabrequim.

No segundo tempo, as válvulas de admissão se fecham e o pistão se desloca do PMI para o PMS, comprimindo assim o ar que foi admitido no primeiro tempo. O espaço entre o PMS e o cabeçote é denominado de câmara de combustão.

Quando no terceiro tempo, ocorre a ignição da mistura ar e combustível. O processo de ignição é o que mais difere um motor ICE de um motor ICO e as diferenças entre eles serão melhor explicadas posteriormente. No entanto, quando da

ignição, o pistão é empurrado do PMS até o PMI. Esse movimento acontece com uma pressão média efetiva (PME) que é a grande responsável pelo trabalho mecânico do motor, e está fortemente relacionada ao desempenho do mesmo.

No quarto tempo, as válvulas de escape se abrem e o pistão se desloca do PMI até o PMS, fazendo com que os gases resultantes da combustão sejam expulsos do cilindro. Após chegar ao PMS, as válvulas de escape se fecham e então um novo ciclo é iniciado.

De forma resumida, os quatro tempos de um motor de combustão interna são:

- 1º Tempo: Admissão;
- 2º Tempo: Compressão;
- 3º Tempo: Explosão;
- 4º Tempo: Exaustão.

O movimento de deslocamento dos pistões dentro do cilindro é controlado pelo movimento rotativo do virabrequim e transmitido para o pistão por meio das bielas, as quais transformam o movimento rotativo do virabrequim em movimento alternativo dos pistões. Para a realização dos quatro tempos, o virabrequim dá duas voltas completas, ou seja, gira 720°.

Já a abertura e o fechamento das válvulas são realizados pelo eixo de comando de válvulas, o qual atua por meio de um sistema de cames e seguidores. O movimento do eixo de comando de válvulas, por sua vez, é coordenado pelo movimento do virabrequim. Para transmitir o movimento entre esses dois componentes, é utilizado um sistema de polias e correia dentada ou corrente.

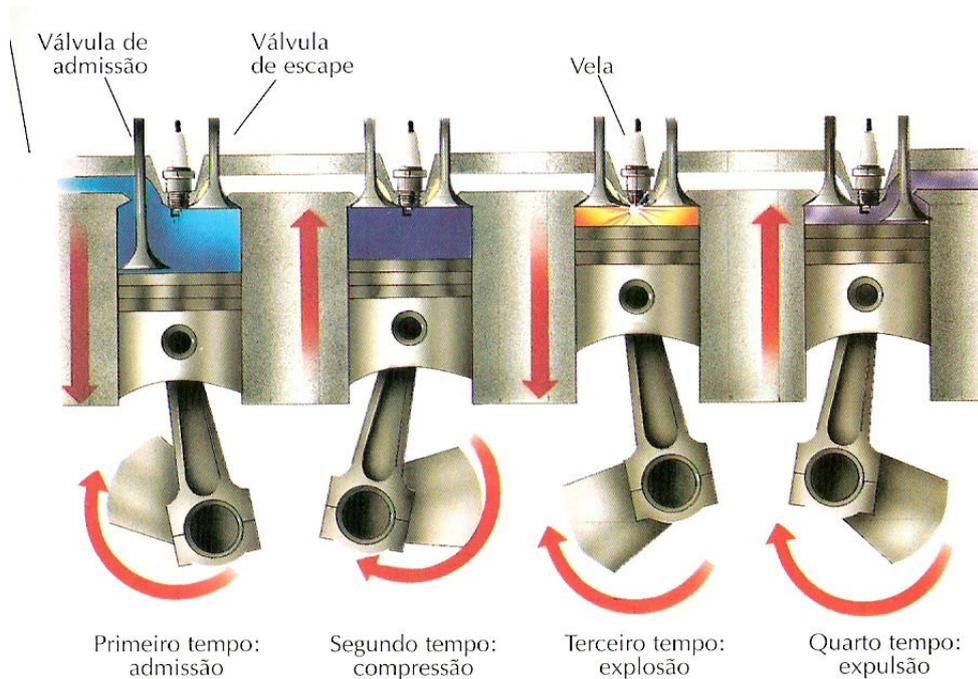
2.1.1. Motor de Ignição por Centelha

Também conhecidos como motores Ciclo Otto. Nesse tipo de motor, o combustível é admitido juntamente com o ar durante o primeiro tempo. No segundo tempo, ar e combustível são comprimidos.

Para que ocorra a ignição neste tipo de motor, é necessário que uma centelha seja liberada. Com esta finalidade, há a presença de uma vela de ignição dentro da câmara de combustão. Essa vela, nada mais é do que dois eletrodos separados por uma certa distância. Ao passar uma corrente por um eletrodo, cria-se uma diferença de potencial entre os dois eletrodos, fazendo com que seja liberada uma faísca dentro da câmara de combustão. Esta faísca fornece a energia necessária para dar início ao processo de combustão.

Após a combustão, os gases são liberados no quarto tempo e um novo ciclo é iniciado.

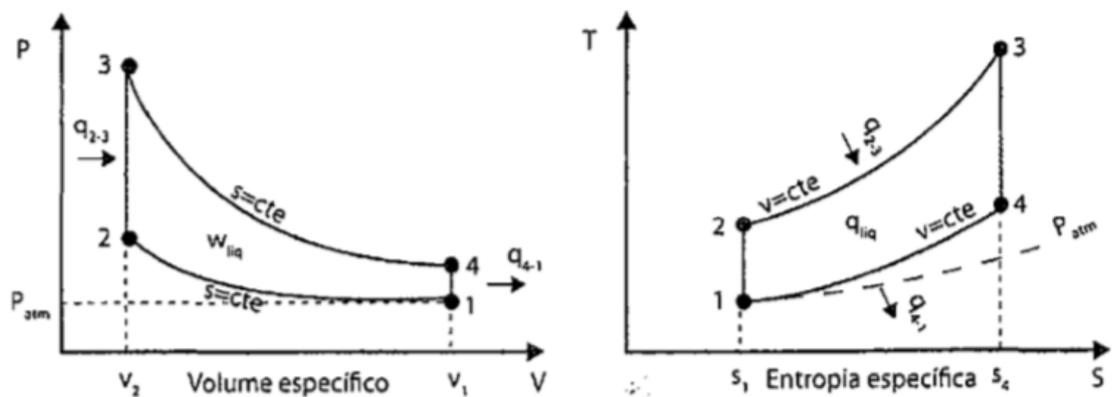
Figura 1 - Tempos de um motor ICE



Fonte: <https://abekwar.wordpress.com/2013/04/09/motores-a-pistao/>

Na figura 2, pode-se ver os diagramas Pressão-Volume Específico e Temperatura-Entropia ideais do ciclo Otto.

Figura 2 – Diagramas P-v e T-s de um ciclo Otto ideal



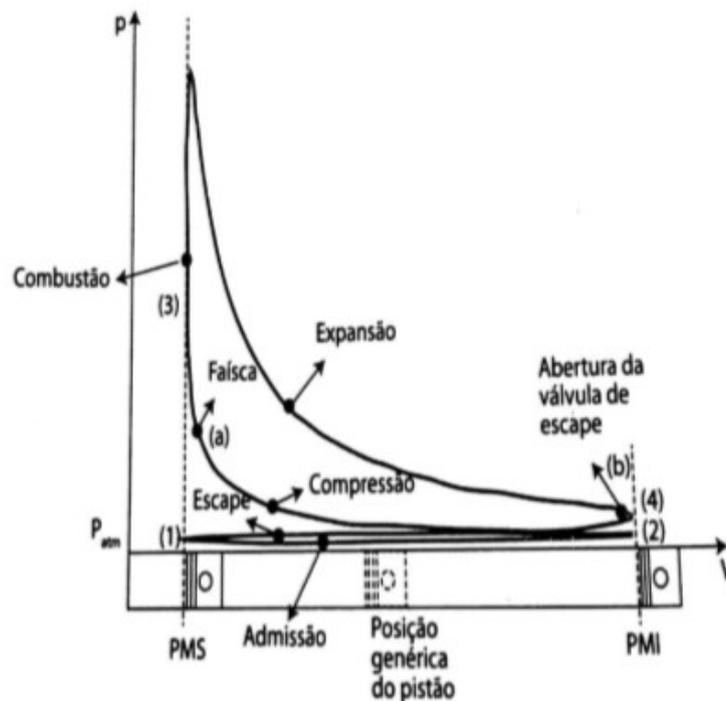
Fonte: BRUNETTI (2012)

Por meio da análise desses diagramas, pode-se verificar os seguintes processos:

- 1-2: compressão isentrópica;
- 2-3: fornecimento de calor em um processo isocórico;
- 3-4: expansão isentrópica;
- 4-1: rejeição de calor em um processo isocórico.

No entanto, devido ao tempo de abertura e fechamento das válvulas e ao processo de combustão não ser instantâneo, o diagrama real é um pouco diferente do ideal. O mesmo pode ser observado na figura 3.

Figura 3 - Diagrama P-v de um ciclo Otto real



Fonte: BRUNETTI (2012)

Os principais combustíveis utilizados nesse tipo de motor são gasolina, etanol, gás liquefeito de petróleo (GLP) e gás natural veicular (GNV).

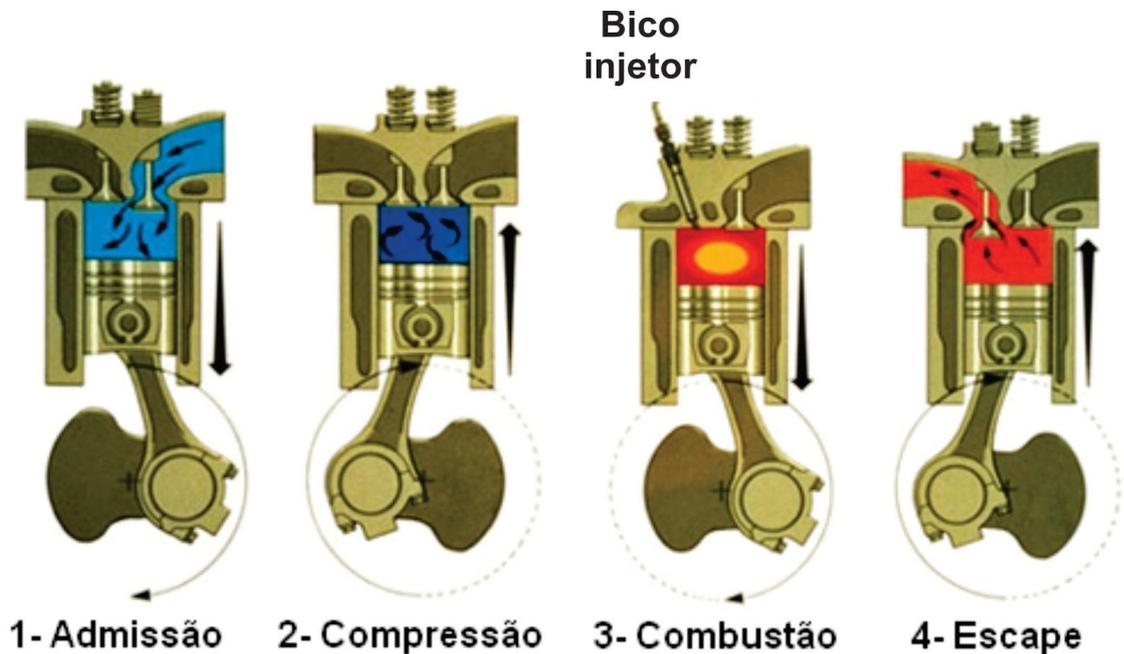
2.1.2. Motores de Ignição por Compressão (ICO)

Também conhecidos como motores Ciclo Diesel. Diferentemente dos motores ICE, no primeiro tempo do motor, é admitido apenas ar para dentro do cilindro. No segundo tempo, apenas ar é comprimido.

Quando o pistão chega no PMS, no fim do segundo tempo e início do terceiro, combustível é injetado sob alta pressão dentro da câmara de combustão. Como o processo de compressão eleva bastante a temperatura do ar, o combustível que é

pulverizado na câmara de combustão, ao entrar em contato com o ar quente, sofre a autoignição, iniciando assim o processo de combustão. No quarto tempo, os gases resultantes da combustão são expulsos do cilindro e um novo ciclo se inicia.

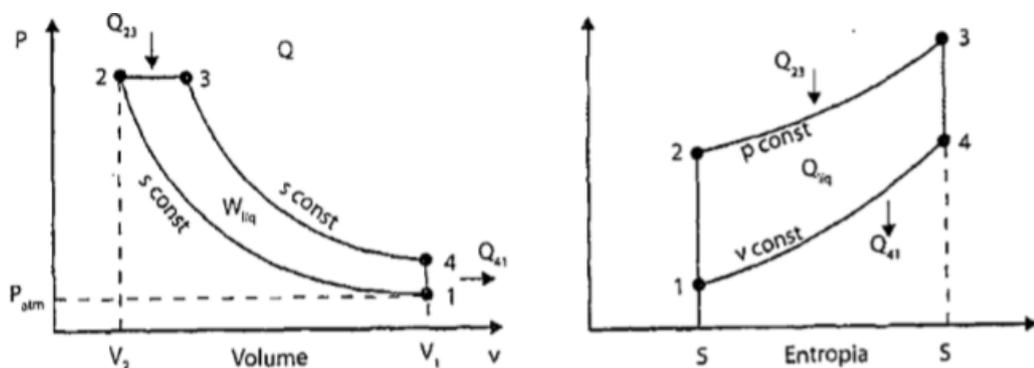
Figura 4 - Tempos de um motor ICO



Fonte: http://maquinasemotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html

Na figura 5, pode-se ver os diagramas Pressão-Volume Específico e Temperatura-Entropia ideais do ciclo Diesel.

Figura 5 - Ciclos P-v e T-s de um ciclo Diesel ideal



Fonte: BRUNETTI (2012)

Analisando os gráficos, pode-se identificar os seguintes processos:

- 1-2: compressão isentrópica;

Sempre quando se busca a melhora no desempenho de um motor, são feitas modificações que visam aumentar os dois primeiros parâmetros, ou diminuir último.

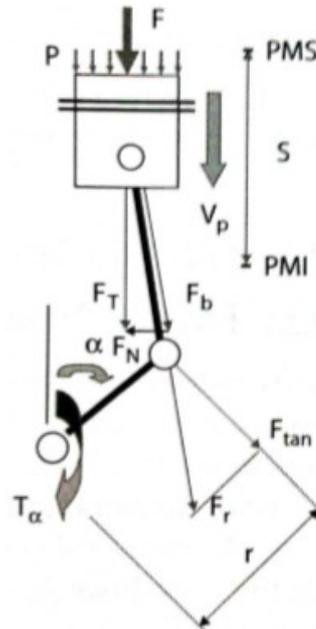
Contudo, esses parâmetros não são constantes durante o funcionamento do motor. Eles variam conforme a rotação do motor, combustível utilizado, condições do ambiente em que o veículo se encontra, fluxo de ar e combustível, entre vários outros fatores. No entanto, como o fator que mais varia durante a utilização do motor é a rotação de trabalho, podemos fixar as outras condições e estabelecer uma curva para cada um desses três parâmetros de acordo com a rotação do motor. Dessa forma, podemos definir o comportamento do veículo para cada faixa de rotação, além de achar o ponto ótimo de cada parâmetro.

2.2.1. Torque (T)

Também chamado de momento de força ou conjugado no eixo. Pode ser definido como o resultado de uma força agindo a uma certa distância e gerando um momento. Ele é gerado quando a energia proveniente da combustão empurra o pistão em direção ao PMI. Ao realizar esse movimento, o pistão empurra a biela, a qual, para conseguir se deslocar, induz uma rotação no virabrequim. No entanto, enquanto a força aplicada no pistão possui direção constante, a inclinação da biela varia com a altura do pistão. Devido a este fato, o momento gerado no virabrequim não é constante e está diretamente ligado com a posição angular da biela. Contudo, definimos o torque como o momento torçor médio gerado no eixo virabrequim.

Na figura 7, é possível ver o sistema pistão-biela-manivela representativo de um motor de combustão interna de forma a melhorar a compreensão do surgimento do torque.

Figura 7 - Sistema pistão-biela-manivela de um motor



Fonte: BRUNETTI (2012)

2.2.2. Potência (P)

De forma simplificada, podemos definir potência como a taxa de produção de trabalho, ou seja, é a taxa de trabalho proveniente da energia de combustão atuando na cabeça dos pistões.

Quando acontece a queima dos gases dentro da câmara de combustão, uma enorme quantidade de energia é gerada. Essa energia proporciona um grande aumento na temperatura dos gases, e conseqüentemente também um grande aumento da pressão. Como a pressão aumenta quase que instantaneamente e o volume continua o mesmo, os gases tendem a empurrar as superfícies que estão em contato. Com isso, os pistões são empurrados no sentido do PMI. Esse movimento do pistão devido ao aumento da pressão dos gases é o trabalho realizado sobre o motor. É esse trabalho que é o responsável por gerar o torque na árvore de manivelas.

Pode-se definir o trabalho indicado por meio da equação (1):

$$W_i = \int p dV \quad (1)$$

Com isso podemos concluir que o trabalho indicado é correspondente à área dos ciclos p-V indicados, como dispostos nas figuras 3 e 6.

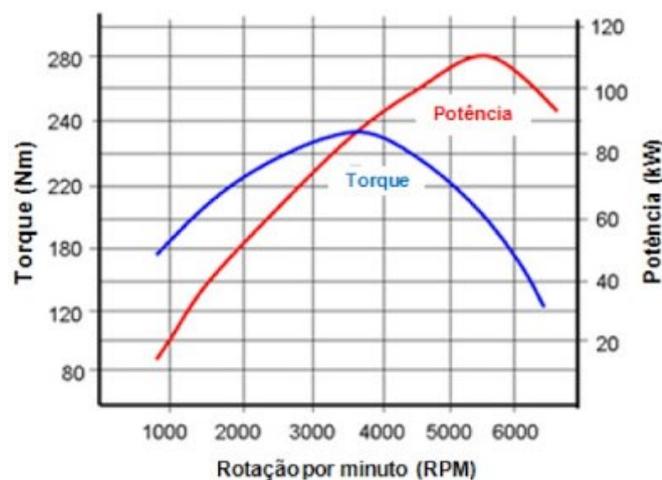
Como a potência é a taxa com que o trabalho é realizado, podemos concluir que quanto maior a rotação do virabrequim, maior será a potência produzida pelo motor, já que o trabalho estará sendo realizado mais vezes em um determinado tempo. Contudo, na prática, isso só ocorre até determinada rotação, devido à eficiência volumétrica. Quando o motor está trabalhando com uma rotação muito elevada, as válvulas de admissão e exaustão não têm tempo suficiente para abrir e fechar. Com isso menos ar é aspirado para dentro da câmara de combustão, reduzindo assim a eficiência volumétrica do motor.

Outra conclusão que poderíamos chegar é que o torque do motor deveria ser constante, porém isso também não ocorre. Como já dito anteriormente, eficiência volumétrica do motor cai em altas velocidades de rotação. Além disso, a eficiência mecânica do motor em baixas rotações é menor do que em altas rotações, pois o atrito do pistão com a camisa do cilindro é maior quanto menor for a velocidade relativa entre eles.

Devido a estes problemas supracitados, podemos concluir que o trabalho efetivo que atua nos pistões não é constante. Logo, o torque não será constante. Também podemos entender que os valores máximos de torque e potência estarão localizados em rotações intermediárias, aliando assim bons níveis de eficiência volumétrica e mecânica.

Na figura 8, pode-se ver uma curva de torque e potência característica de um motor ICE.

Figura 8 - Curvas características de torque e potência de um motor ICE



Fonte: <http://dicasparacarros.blogspot.com/2013/06/qual-diferenca-entre-torque-e-potencia.html> (2013)

Como o trabalho realizado sobre o pistão depende da pressão dos gases gerados pela combustão, um outro parâmetro ligado à potência do motor muito importante quando se trata de desempenho, é a pressão média efetiva (MEP). Ela é a razão do trabalho por ciclo dividido pela cilindrada.

$$MEP = \frac{W_i}{V} \quad (2)$$

Quanto maior o MEP, maior será a potência gerada. Porém, altos valores de MEP estão relacionados com condições de trabalho extremas para o motor. É possível, então, relacionar a potência indicada com o MEP por meio da equação (3), onde N é a velocidade de rotação do eixo árvore.

$$P_i = \frac{MEP \times V \times N}{2} \quad (3)$$

2.2.3. Consumo Específico (SFC)

O consumo específico é uma medida que indica o quão bem o combustível está sendo utilizado para gerar potência. Ele é definido por meio da equação (4).

$$SFC = \frac{\dot{m}_c}{P} \quad (4)$$

Quanto menos combustível o motor estiver utilizando para gerar determinada potência, mais eficiente ele será. Portanto, o consumo específico está diretamente relacionado com a eficiência térmica do motor.

Sendo Q_{Hv} o poder calorífico do combustível, tem-se as equações (5) e (6) relacionando consumo específico e rendimento térmico.

$$\eta_t = \frac{P}{\dot{m}_c Q_{Hv}} \quad (5)$$

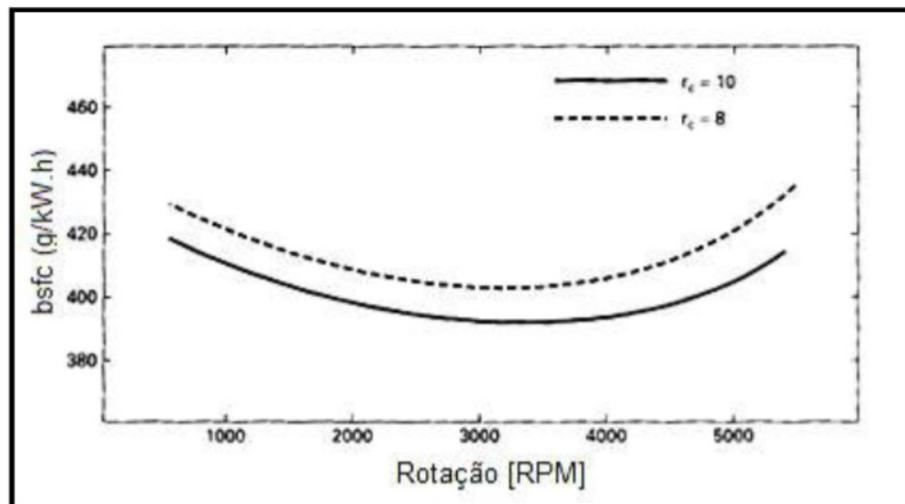
$$\eta_t = \frac{1}{SFC \times Q_{Hv}} \quad (6)$$

Assim como o torque e a potência, o consumo específico de um motor não é constante em todas as condições. Ele varia de acordo com a rotação do motor e com a razão de equivalência de ar-combustível.

Em relação a rotação do motor, o consumo específico é menor em uma região intermediária de velocidade. Na realidade, o consumo específico é o menor possível na região de torque máximo, pois é onde tem-se uma maior quantidade de trabalho sendo produzido com uma determinada quantidade de combustível.

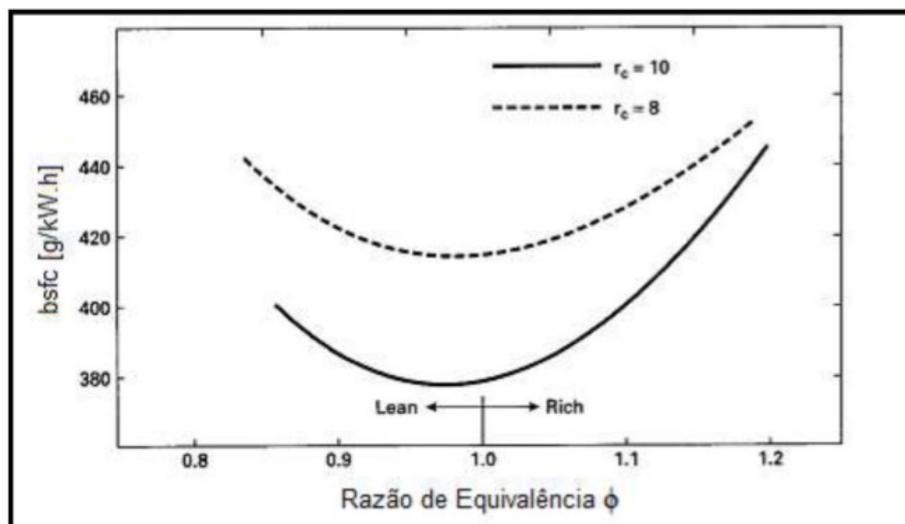
Já em relação à razão de equivalência, em um motor ICE, o consumo específico será menor para uma mistura levemente pobre, pois todo combustível injetado dentro da câmara de combustão será queimado e utilizado para a produção de potência, e ao mesmo tempo ainda estará em uma concentração próxima à estequiométrica, propiciando as condições ideais para a combustão.

Figura 9 - Curva característica do consumo específico em função da rotação do motor



Fonte: PULKRABEK (2012)

Figura 10 - Curva característica do consumo específico em função da razão de equivalência



Fonte: PULKRABEK (2012)

2.2.4. Melhora do Desempenho

Como visto anteriormente, qualquer modificação que vise uma melhora no desempenho de um motor deve se preocupar em aumentar o torque e a potência, e reduzir o consumo específico. Para alcançar esses objetivos, há diversos caminhos a se seguir.

Um caminho seria aumentar a cilindrada do motor, já que isso aumentaria o trabalho indicado. Porém, com essa técnica, se aumenta também o consumo de combustível, já que para se manter a mesma MEP, seria necessário um aumento no volume de ar e combustível.

Uma outra alternativa é utilizar comandos de válvulas variáveis, dessa forma, em altas rotações, quando o motor não tem tempo suficiente para abrir as válvulas e aspirar o ar para dentro dos cilindros, as válvulas passam a ter uma abertura maior, de forma a conseguir aspirar mais ar, sem prejudicar o torque em baixas rotações.

Também é possível alterar os mapas de injeção e ignição do carro, de forma a conseguir melhores quantidades de combustível injetado e pontos de ignição otimizados para cada condição de uso do veículo, podendo privilegiar o desempenho e o consumo no mesmo mapa, de acordo com o comportamento do motorista.

A injeção direta também é uma excelente forma de melhorar o desempenho de um motor. Com ela, o combustível passa a ser injetado diretamente na câmara de combustão por meio de bicos injetores e não mais no coletor de admissão, assim como acontece em veículos com Ciclo Diesel, fazendo com que seja aspirado apenas ar para dentro dos cilindros. Com isso, uma maior quantidade de ar consegue ser aspirada e, conseqüentemente, se consegue uma maior carga nos pistões por meio do aumento da MEP.

Utilizar filtros esportivos, os quais possuem aberturas maiores para a entrada de um maior fluxo de ar, juntamente com escapamentos com um maior diâmetro, de forma a diminuir a restrição na saída dos gases, também é uma opção. Rebaixar o cabeçote para aumentar a razão de compressão também foi uma prática muito utilizada antigamente, mas essa prática aumenta muito o risco de ocorrer detonação na câmara de combustão, diminuindo assim a vida útil do motor e eventualmente prejudicando o desempenho e consumo também.

Uma outra solução muito utilizada atualmente para aumentar a MEP, é a sobrealimentação do motor. Com a utilização de compressores mecânicos ou turbocompressores, uma maior quantidade de ar é insuflada para dentro do motor,

proporcionando uma maior carga sobre os pistões, aumentando assim o trabalho indicado, conseqüentemente aumentando o torque e a potência do veículo. Esta solução será melhor explicada na seção a seguir, já que o seu entendimento é fundamental para o foco principal deste trabalho.

2.3. Sobrealimentação

Na seção anterior ficou evidente que para se alcançar um aumento no desempenho de um motor, o melhor caminho é buscar alternativas que aumentem a MEP. E uma das melhores formas de se conseguir esse aumento é por meio da sobrealimentação do motor.

A sobrealimentação pode ocorrer por meio de um compressor mecânico ou por meio de um turbocompressor. Independentemente da forma como ela é realizada, o seu objetivo é fazer com que mais ar entre em cada cilindro.

Com mais ar entrando no cilindro, a massa de ar comprimida será maior também. Logo, a pressão dos gases ao serem comprimidos será maior do que a de um motor naturalmente aspirado de mesmas dimensões, resultando assim em uma maior MEP. Tendo uma maior MEP atuante, conseqüentemente o motor irá ser capaz de entregar uma maior potência e um maior torque.

2.3.1. Compressor Mecânico

Também chamado de supercharger, nada mais é do que um compressor que é ligado ao eixo virabrequim, normalmente por meio de uma correia, e sua velocidade é diretamente proporcional à velocidade do eixo virabrequim.

Os compressores mecânicos utilizados em veículos podem ser divididos em basicamente duas categorias: compressores de deslocamento positivo e compressores centrífugos.

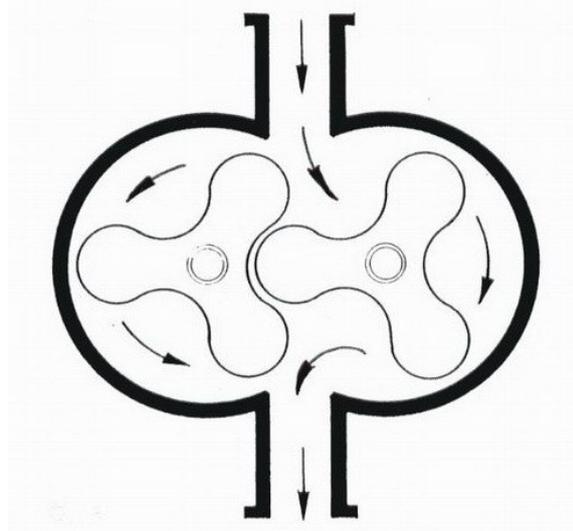
2.3.1.1. Compressores de Deslocamento Positivo

2.3.1.1.1. Compressor de Lóbulos

Conhecidos popularmente como blowers, tiveram sua criação quando os irmãos Roots procuravam uma solução para alimentar as fornalhas de siderúrgicas. Então criaram o compressor de lóbulos para solucionar o problema. Esse tipo de compressor também ficou conhecido como compressor Roots.

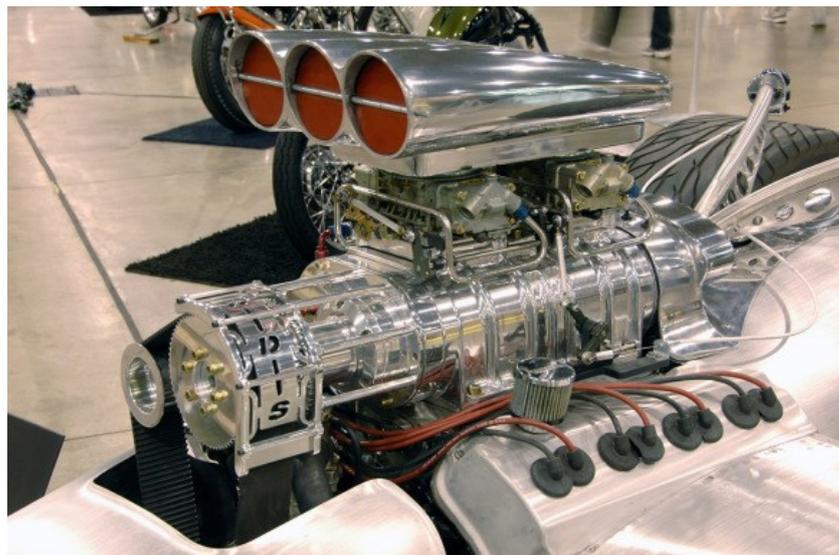
O compressor de lóbulos não aumenta a pressão do ar em si. Ele apenas funciona como um grande ventilador que direciona ar para dentro do motor. Ele é composto por dois lóbulos que giram em sentidos contrários. Os lóbulos não se tocam, mas ao girarem aprisionam o ar atmosférico entre seus lóbulos e a carcaça do compressor, e o direcionam para dentro do motor. Uma representação desse funcionamento pode ser vista na figura 11.

Figura 11 - Representação do funcionamento de um compressor de lóbulos



Fonte: <https://gearheadbanger.wordpress.com/2012/03/10/como-funciona-o-supercharger/>
(2012)

Figura 12 - Compressor de lóbulos



Fonte: <https://gearheadbanger.wordpress.com/2012/03/10/como-funciona-o-supercharger/>
(2012)

O seu efeito de compressão decorre justamente do fato de este compressor “soprar” ar para dentro do motor, fazendo assim com que a pressão do ar dentro dos cilindros aumente.

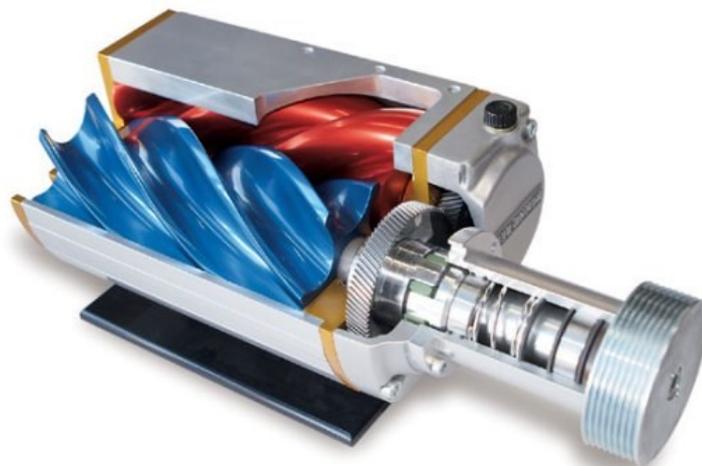
Contudo, os compressores de lóbulos possuem normalmente baixo rendimento devido às folgas existentes entre os lóbulos e por causa da recirculação do ar que ocorre entre os lóbulos e a carcaça.

2.3.1.1.2. Compressor de Parafusos

Um outro tipo de blower são os compressores de parafuso. Eles possuem bastantes semelhanças com os compressores de lóbulos, porém ao invés de possuírem rotores em formato de lóbulos, possuem dois fusos em formato de parafuso, sendo um macho e uma fêmea.

Porém, diferentemente dos compressores de lóbulos, esse tipo de compressor não aprisiona o ar entre os rotores e a carcaça, mas sim entre os fusos, e as câmaras por onde o ar vai passando vão reduzindo de tamanho de acordo com o seu giro. Devido a este fato, as folgas entre os fusos necessitam ser muito menores do as do compressor Roots, aumentando assim sua eficiência e também o seu custo de produção. Além disso, esses compressores transferem menos calor durante a compressão, aumentando assim a sua eficiência.

Figura 13 - Compressor de parafuso visto em corte



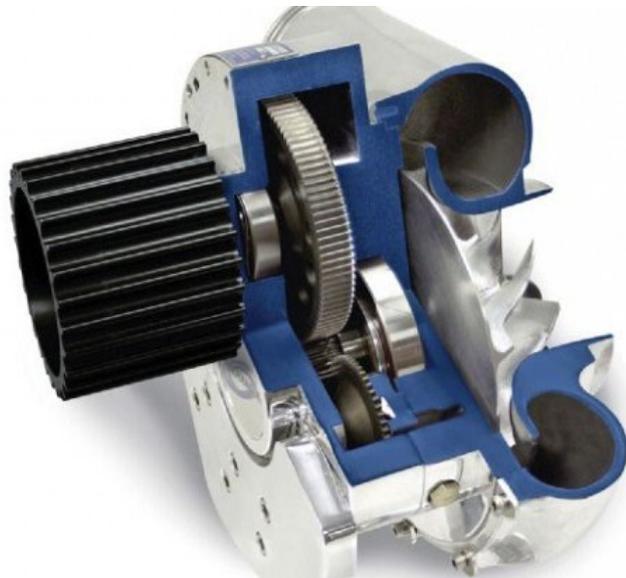
2.3.1.2. Compressores Centrífugos

Este tipo de compressor é bastante parecido visualmente com um turbocompressor. Ele possui uma engrenagem conectada ao virabrequim por meio de uma correia, a qual faz movimentar uma outra engrenagem solidária ao rotor centrífugo do compressor. O rotor, ao girar, suga ar atmosférico, o qual será direcionado para dentro do motor.

Apesar de ter o funcionamento bastante parecido com um turbocompressor, este tipo de compressor opera em velocidades muito menores do que as de um turbocompressor pois a sua velocidade depende da transmissão da velocidade de rotação do virabrequim por meio de correia e engrenagens, com sua relação de transmissão dificilmente ultrapassando o valor de 1:5.

Este fato faz com que sua capacidade volumétrica seja menor do que a de um turbocompressor de mesmas dimensões. Para compensar essa diferença de velocidades, seria necessário utilizar um rotor maior para se igualar à capacidade volumétrica de um turbo à plena carga.

Figura 14 - Compressor centrífugo visto em corte



Fonte: <https://www.flatout.com.br/sobrealimentacao-de-motores-tudo-sobre-superchargers-e-compressores-centrifugos/> (2016)

2.3.2. Turbocompressores

Além da utilização de compressores mecânicos, podemos utilizar turbocompressores para conseguir admitir mais ar para dentro do motor. Diferentemente dos compressores, que têm seu movimento gerado pela rotação do

eixo virabrequim, os turbos têm seu movimento gerado pelo movimento dos gases de escape.

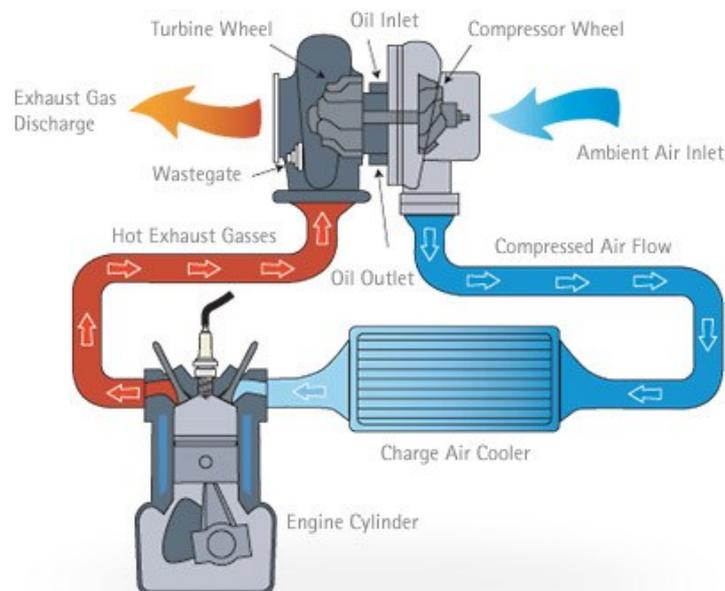
Um turbocompressor é constituído basicamente de dois rotores e um eixo ligando os rotores. Um dos rotores fica posicionado na saída dos gases de escape do coletor de descarga e funciona como uma turbina. Os gases ao saírem dos cilindros estão com uma elevada entalpia devido ao processo de combustão pelo qual passaram. Ao encontrarem uma turbina, os gases acabam acelerando-a. Esse lado do turbocompressor é conhecido como lado quente, devido às temperaturas elevadas dos gases de escape.

A turbina, ao girar, faz com que o rotor do outro lado do eixo também gire. Este outro rotor funciona então como um compressor. Como esse rotor se encontra conectado com o coletor de admissão do motor, ao girar, ele irá admitir uma grande quantidade de ar. Isso faz com que mais ar entre para dentro de cada cilindro, aumentando a MEP com que o motor trabalha.

O lado do turbocompressor que funciona como compressor é conhecido como lado frio, já que está em contato com ar a temperatura ambiente.

É possível observar na figura 15 uma representação esquemática do funcionamento de um sistema com turbocompressor. Na figura, o lado quente está representado pela cor vermelha e o lado frio pela cor azul.

Figura 15 - Representação esquemática de um sistema com turbocompressor



Como o movimento dos rotores do turbo são comandados apenas pelo movimento dos gases de escape, e não por uma transmissão mecânica de movimento, as velocidades alcançadas por este equipamento são muito altas se comparadas às alcançadas pelos compressores mecânicos.

2.3.3. Diferenças entre Compressores e Turbocompressores

Após uma breve explicação sobre esses dois equipamentos, que possuem basicamente a mesma função, é bastante válido elencar algumas diferenças entre eles. Para começar, pode-se falar sobre seu acionamento.

Os compressores necessitam estar conectados ao virabrequim para poderem operar. Isto faz com que parte da potência produzida pelo motor seja utilizada para mover o próprio compressor. Já os turbos, utilizam a energia dos gases de escape para realizar o movimento de rotação. Como essa energia seria desperdiçada de toda forma, ao ser liberada ao meio ambiente, temos que os turbocompressores são mais eficientes do que os compressores, já que utilizam uma energia que seria perdida, ao invés de roubar energia que poderia ser utilizada para transmitir movimento ao veículo.

Devido também à forma de acionamento de cada equipamento, as velocidades atingidas por um turbocompressor são muito maiores. Com isso, podemos então deduzir que um turbo de menores dimensões é capaz de produzir um aumento da MEP similar com o aumento gerado pela utilização de um compressor muito maior. Tendo a possibilidade de se utilizar um equipamento menor, o espaço necessário no cofre do motor será menor também e o peso adicionado ao veículo também será menor, favorecendo as características dinâmicas do mesmo.

A grande vantagem do compressor em relação ao turbo é a sua linearidade. Enquanto o compressor funciona desde as rotações mais baixas, já que está ligado ao virabrequim, o turbo só entra em operação a partir de uma certa rotação do motor.

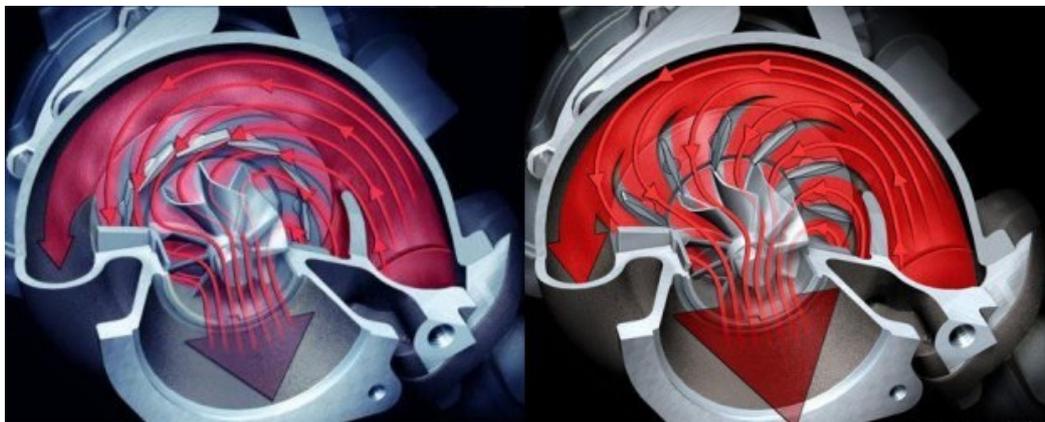
Como o eixo do turbocompressor necessita estar apoiado em mancais, é necessário vencer o torque de atrito proporcionado. Em baixas rotações, não é gerada vazão suficiente dos gases para vencer esse atrito. Além disso, quanto maior a turbina, maior o torque de atrito gerado. Porém com a utilização de turbinas menores, menor será a quantidade de ar succionada para dentro do motor e, conseqüentemente, menor será a potência gerada. O atraso no início de funcionamento da turbina é conhecido como turbolag.

Para reduzir esse atraso, uma alternativa foi passar a se utilizar mancais de rolamento ao invés de mancais de deslizamento. Com isso, o atrito foi diminuído e a turbina passou a entrar em funcionamento com rotações menores. Mas a mudança que mais contribuiu para a diminuição do turbolag foi a utilização de turbinas com geometria variável.

Esse tipo de turbina possui lâminas que mudam sua posição de acordo com a rotação do motor. Quando em baixas rotações, a vazão de ar é baixa. Então essas lâminas se fecham e deixam somente uma pequena abertura para a passagem dos gases. Ao passarem por essa abertura, os gases são direcionados de forma perpendicular às pás da turbina. Com isso, a força tangencial, que é a que gera movimento de rotação da turbina, é maior. Devido a isto, a turbina consegue girar mesmo com menores vazões de ar.

Conforme a rotação do motor vai aumentando, a vazão de gases aumenta também. Então essas lâminas vão se abrindo também para permitir que uma maior vazão de ar passe pela turbina. O posicionamento dessas lâminas pode ser visto na figura 16.

Figura 16 - Posicionamento das Lâminas de uma Turbina de Geometria Variável



Fonte: <https://www.flatout.com.br/tudo-sobre-turbo-como-funciona-a-geometria-variavel-compressao-e-mapas/> (2016)

2.4. Intercooler

As várias vantagens da sobrealimentação foram explicitadas na seção anterior, porém, um grande problema resultante desta prática pode ter passado despercebido. Ao se comprimir o ar de admissão, juntamente com o efeito do aumento da pressão, há um aumento da temperatura desse ar, devido a efeitos termodinâmicos. Além

desse aumento natural da temperatura, há uma outra parcela de calor transferido ao ar devido ao contato, e ao atrito, do ar com as peças do compressor.

Após entrar no cilindro, esse ar ainda sofre uma outra compressão, elevando mais ainda a sua temperatura. Em carros com motor ICE, onde o combustível é adicionado ao ar na admissão, e o que realmente entra nos cilindros é uma mistura de ar e combustível, esse aumento de temperatura representa um grave problema.

Ao atingir uma elevada temperatura, essa mistura pode atingir a temperatura de autoignição do combustível. Isso ocasiona o fenômeno de detonação, também conhecido popularmente como “batida de pino”, e pode gerar também o fenômeno de pré-ignição. Esses dois fenômenos são extremamente prejudiciais para o bom funcionamento e para a vida útil do motor.

Ao entrar em combustão espontânea antes do ponto programado, que seria quando o pistão estivesse se aproximando do PMS, a grande energia proveniente da detonação iria gerar uma grande contrapressão na cabeça do pistão, gerando assim um grande trabalho negativo. Desta forma, o trabalho positivo, que é o trabalho imprimido no pistão de forma a mantê-lo no mesmo sentido dado pelo virabrequim, seria menor. Com isso, uma menor potência e torque líquidos seriam entregues ao eixo de manivelas.

Além disso, essa contrapressão gerada impõe um grande esforço sobre pistões, anéis, bielas, virabrequim e mancais. Com isso, o desgaste do motor é acentuado e sua vida útil é drasticamente diminuída. A detonação também pode gerar erosão na cabeça dos pistões e até mesmo nas paredes dos cilindros.

Figura 17 - Exemplo de danos causados pela detonação

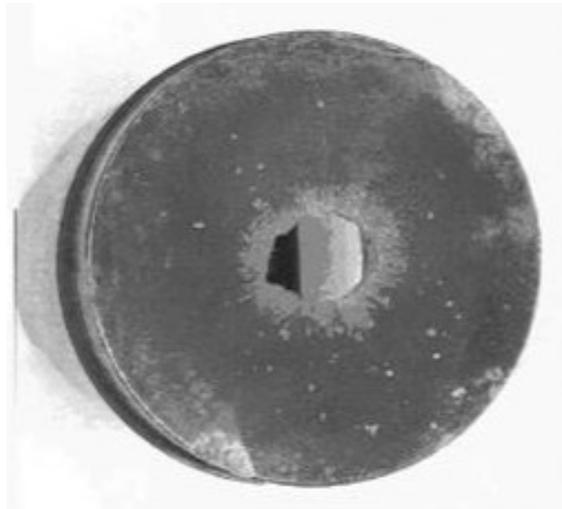


Fonte: BRUNETTI (2012)

Já a pré-ignição ocorre devido a pontos quentes dentro da câmara de combustão. Com seguidas detonações, há grandes chances do aparecimento desses pontos quentes, seja com o aquecimento das válvulas e dos eletrodos das velas, ou devido à depósitos de carbono resultantes da má combustão, resultado do fenômeno da detonação. Esses pontos quentes irão fazer com que a mistura ar-combustível entre em ignição antes da centelha ser liberada.

Ao entrar em ignição antes da hora, é gerado um aumento de pressão concentrado dentro da câmara de combustão. Em casos extremos, essa pré-ignição pode provocar a perfuração do pistão ou, até mesmo, a quebra do eixo virabrequim.

Figura 18 - Exemplo de danos causados pela pré-ignição

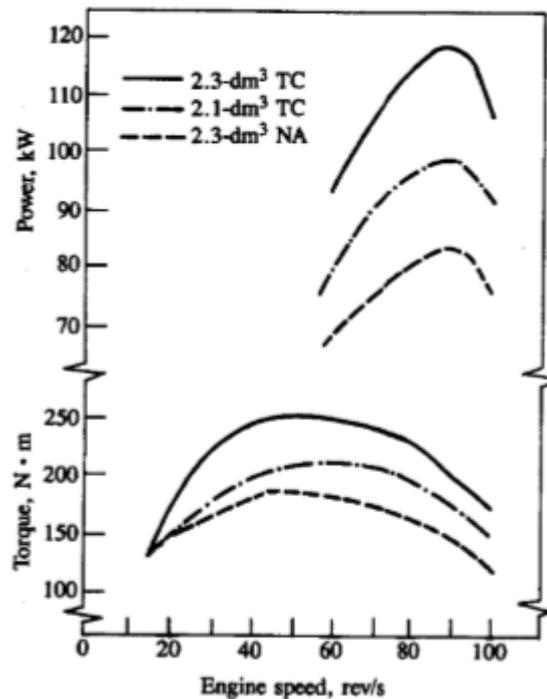


Fonte: BRUNETTI (2012)

Além dos problemas resultantes da detonação e da pré-ignição, a elevação da temperatura do ar de admissão afeta também os ganhos de desempenho resultantes da sobrealimentação.

Na figura 19 é possível visualizar a comparação de três diferentes motores, sendo um aspirado (2.3-dm^3 NA), um sobrealimentado (2.1-dm^3 TC) e um terceiro sobrealimento e com um intercooler (2.3-dm^3 TC). Na tabela 1, estão explicitados alguns dados desses motores.

Figura 19 - Curvas de torque e potência de motores com e sem intercooler



Fonte: HEYWOOD (1988)

Tabela 1 - Dados técnicos de alguns motores com e sem intercooler

TABLE 15.3
Turbocharged spark-ignition engine performance⁵²

Type	2.1-dm ³ TC	2.3-dm ³ NA	2.3-dm ³ TC/AC
Displacement, dm ³	2.127	2.316	2.316
Bore × stroke, mm	92 × 80	96 × 80	96 × 80
Compression ratio	7.5	9.5	8.7
Maximum power, kW at rev/min	98 at 5400	83 at 5400	117 at 5300
Maximum torque, N·m at rev/min	210 at 3800	184 at 2800	250 at 2900
Maximum bmep, kPa	1241	998	1356

Com o aumento da temperatura, o ar tem um aumento no seu volume específico. Devido a isso, uma menor quantidade de ar consegue entrar nos cilindros. Logo, uma menor potência será gerada com a combustão, pois há menos comburente disponível para a reação ocorrer.

Devido a todos esses problemas relacionados com a elevada temperatura dos gases de admissão, é necessário um meio para que o ar chegue à uma temperatura menor nos cilindros. Para resolver essa questão é que são utilizados os intercoolers.

O intercooler nada mais é do que um trocador de calor que tem a função de resfriar os gases da admissão antes deles chegarem aos cilindros.

Após passar pelo compressor, o ar troca uma certa quantidade de calor com as paredes dos dutos, porém essa área de troca é insuficiente para diminuir a temperatura do ar de forma significativa. O que a presença de um intercooler faz, é aumentar essa área de troca térmica. Isso é possível devido à presença de um grande número de pequenos dutos e aletas.

2.4.1. Tipos de Intercooler

2.4.1.1. Intercooler Ar-Ar

Para que o intercooler realize a troca de calor, existem dois tipos de sistemas diferentes: o intercooler do tipo ar-ar e o intercooler do tipo ar-água.

O primeiro tipo é o mais simples. Se trata de um trocador de calor de fluxo cruzado onde por dentro dos tubos circula o ar que foi comprimido, e do lado de fora, circula o ar atmosférico. Esse sistema necessita que o intercooler esteja posicionado bem na frente do motor, de forma a conseguir captar uma maior quantidade de ar frio para realizar a troca de calor.

Além de mais simples, esse sistema também é mais barato de se produzir e de se manter, já que demanda menos manutenção, e por causa deste fato, também é mais confiável. Porém, o intercooler do tipo ar-ar precisa de um grande fluxo de ar frio para conseguir realizar a troca térmica, sendo mais eficiente, portanto, em altas velocidades.

Figura 20 - Intercooler do tipo ar-ar



2.4.1.2. Intercooler Ar-Água

Já o intercooler do tipo ar-água é mais eficiente, porém mais complexo. Neste trocador de calor, os dutos que contém o ar pressurizado não ficam mais em contato direto com o escoamento de ar atmosférico. Os dutos ficam em contato direto com a água.

Como a água possui uma capacitância térmica muito maior, o coeficiente global de transferência de calor será muito maior também. Com isso, é possível utilizar uma área de troca térmica muito menor para conseguir aliviar a carga térmica do ar de admissão, fazendo com que o sistema seja mais compacto do que um intercooler ar-ar.

Outra vantagem desse sistema é o fato dele proporcionar uma menor perda de pressão, já que possui um menor comprimento de tubulação. Este fato, de possuir uma menor tubulação, ajuda também a reduzir o atraso na compressão, pois com um menor volume acumulado entre o compressor e a admissão, menor será o tempo de deslocamento da onda de depressão e, conseqüentemente, menor será o tempo de resposta do compressor.

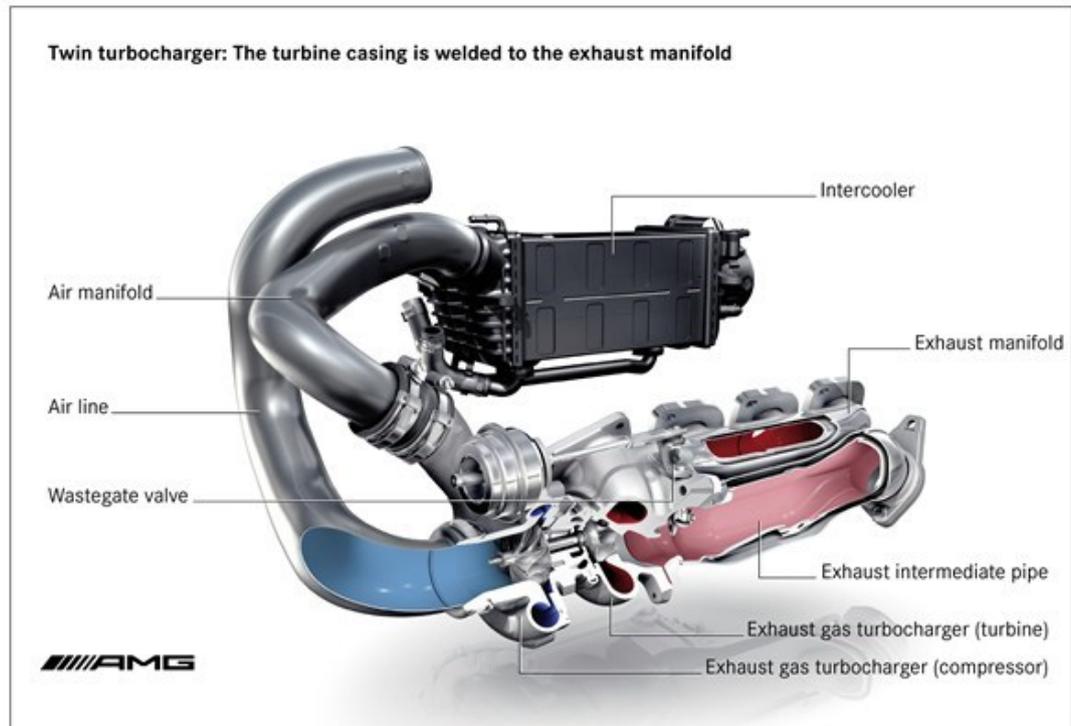
Uma outra grande vantagem é a menor influência causada pela temperatura ambiente. Como o ar troca calor com a água, que possui uma grande capacitância térmica, e esta é menos afetada por variações na temperatura, o sistema irá trabalhar melhor em dias quentes do que que um intercooler do tipo ar-ar, o qual perde eficiência nessas condições.

Além disso, o trocador de calor que utiliza água responde melhor do que o trocador ar-ar em condições de baixa velocidade, já que não depende do fluxo de ar atmosférico.

Contudo, esse tipo de intercooler é mais caro de se fabricar e de se manter. Como possui água em seu interior, é necessário um maior cuidado com a manutenção, de forma a se evitar vazamentos no motor. Esses trocadores de calor também acabam adicionando mais peso ao carro do que os trocadores a ar, pois apesar de serem mais compactos, possuem água em seu interior, sendo, portanto, mais pesados.

Além do peso da água, esse sistema necessita de mangueiras adicionais, uma bomba de água e um outro trocador de calor dedicado exclusivamente ao resfriamento da água do intercooler. Isso tudo gera um maior peso ao veículo e um maior custo.

Figura 21 -Sistema de turbocompressor com intercooler do tipo ar-água



Fonte: <http://www.eurocarnews.com/182/0/0/1941/amg-55-liter-biturbo-engine-intercooler-system/gallery-detail.html> (2010)

2.5. Trocadores de Calor

Como foi dito na seção anterior que intercoolers não passam de trocadores de calor, nada mais justo do que falar um pouco mais sobre este tipo de equipamento específico e suas particularidades.

Trocadores de Calor são equipamentos utilizados para transportar calor entre dois fluidos com temperaturas diferentes, sem que ocorra o contato direto entre os fluidos. Nesse tipo de equipamento, as formas de transferência de calor que governam são a convecção em cada fluido e a condução entre as paredes que separam os fluidos.

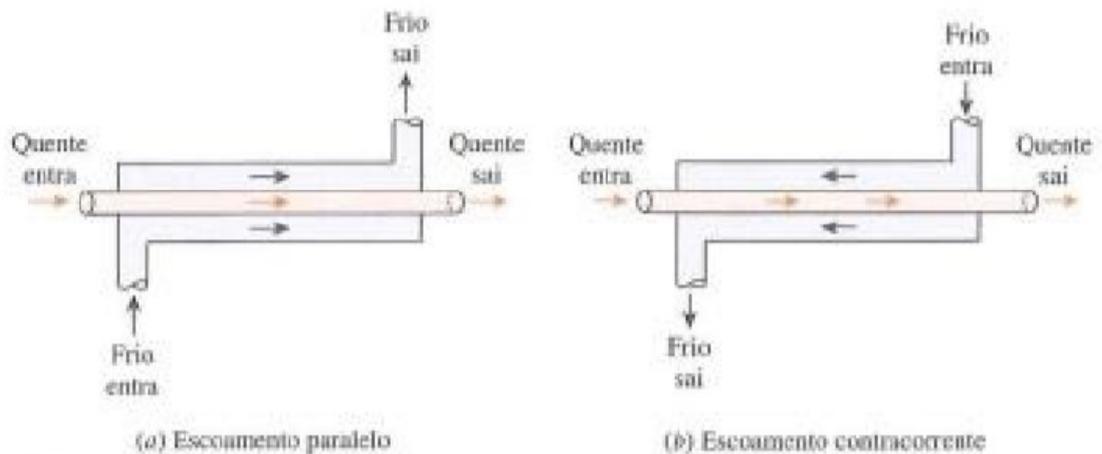
Quanto às aplicações desse equipamento, não se está limitado apenas a motores de combustão interna, apesar de todos os automóveis refrigerados à água possuírem um trocador de calor, sendo sobrealimentados ou não. Neste caso, está sendo feita uma referência ao radiador. Porém, trocadores de calor são utilizados para uma grande variedade de aplicações na engenharia, entre elas, condicionamento de ar, processos químicos e geração de potência.

2.5.1. Tipos de Trocadores de Calor

Da mesma forma que existem diversos tipos de aplicação para trocadores de calor, existem também vários tipos de construção destes equipamentos, com cada tipo tendo uma concepção distinta e aplicações preferenciais.

O tipo mais simples de trocador de calor é o do tipo tubos concêntricos, ou bitubular, onde um dos fluidos escoam por um duto, que se encontra dentro de outro duto, no qual o outro fluido escoam. Quando os fluidos quente e frio escoam no mesmo sentido, tem-se a chamada construção em paralelo, já quando escoam em sentidos opostos, tem-se a construção contracorrente.

Figura 22 - Trocadores de calor de tubo concêntrico



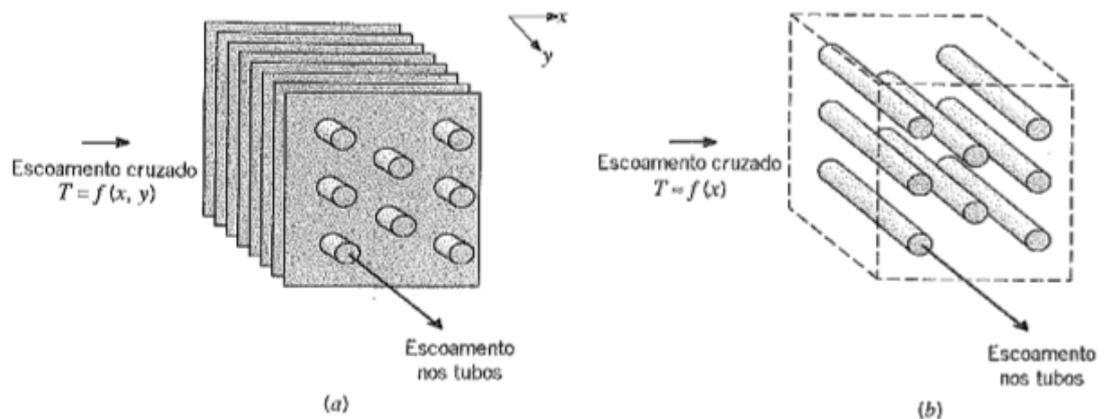
Fonte: ÇENGEL (2012)

Em outros tipos de construção de trocadores de calor, pode-se ter também o escoamento cruzado, onde um fluido escoam perpendicularmente ao outro. Um tipo de equipamento que pode apresentar esse tipo de escoamento é o trocador de calor tubular, com e sem aletas. A presença ou não das aletas, no entanto, introduz uma outra classificação de escoamento.

Quando se trata de um trocador com aletas, diz-se que o fluido está não-misturado, pois as aletas impedem o movimento na direção perpendicular do escoamento principal. Já quando o trocador não possui aletas, diz-se que o fluido está misturado, pois como não há restrições para o escoamento, é permitido também o movimento do fluido na direção transversal ao escoamento principal. A presença ou não de mistura no fluido pode ter um efeito significativo no desempenho deste trocador de calor.

Na figura 23, pode-se ver uma representação deste tipo de escoamento. No exemplo (a), tem-se um escoamento não-misturado, enquanto que no exemplo (b), tem-se um escoamento misturado.

Figura 23 - Trocadores de calor com escoamento cruzado



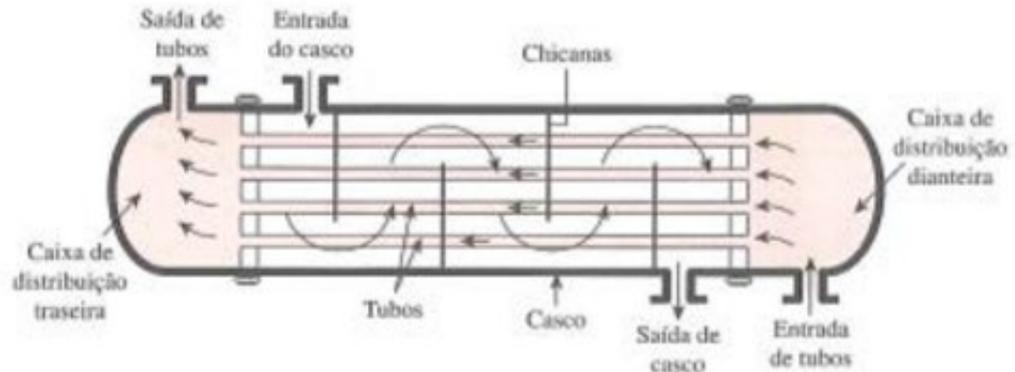
Fonte: INCROPERA (2007)

Contudo, talvez o tipo de trocador de calor mais utilizado industrialmente seja o trocador do tipo casco e tubo. Este tipo de trocador de calor possui normalmente um grande número de tubos em seu interior, podendo inclusive chegar a várias centenas. Enquanto um fluido escoar por dentro dos tubos, o outro escoar por fora, mas ainda dentro do casco. Como os fluidos estão em temperaturas diferentes, a transferência de calor ocorre por meio das paredes dos tubos.

Para aumentar o coeficiente convectivo do fluido no lado do casco, geralmente são instaladas chicanas, já que elas induzem turbulência e uma componente de velocidade na direção do escoamento cruzado. Além do aumento da eficiência na transferência de calor, essas chicanas apoiam fisicamente os tubos, reduzindo a vibração dos tubos induzida pelo escoamento, além de manter a uniformidade de espaçamento entre os tubos.

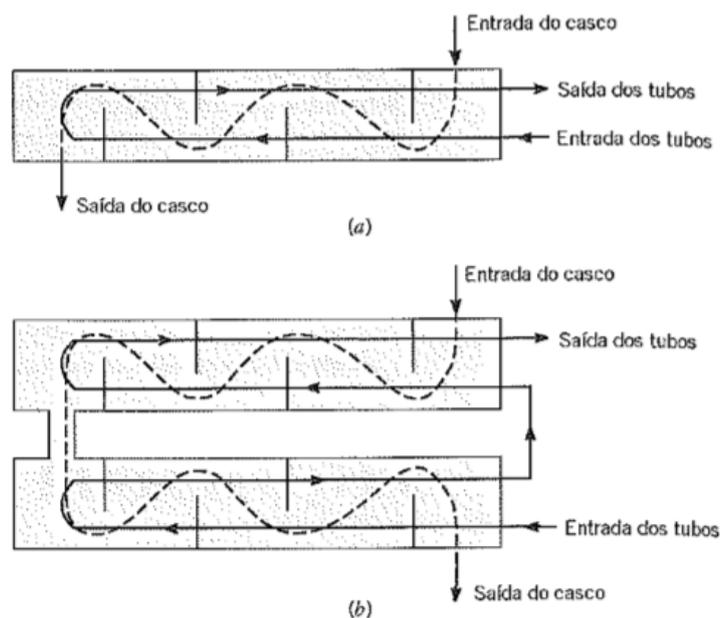
Os trocadores de calor deste tipo são classificados de acordo com o número de passes nos tubos e no casco. Em sua forma mais simples, tem-se o trocador de calor casco e tubos com um passe no casco e um passe nos tubos, como visto na figura 24. Já na figura 25, pode-se ver outras configurações deste tipo de trocador de calor com mais passes.

Figura 24 - Trocador de calor casco e tubos com um passe no casco e um passe nos tubos



Fonte: ÇENGEL (2012)

Figura 25 - Trocadores de calor casco e tubo. (a) Um passe no casco e dois nos tubos. (b) Dois passes no casco e quatro passes nos tubos



Fonte: INCROPERA (2007)

É importante ressaltar que, apesar do seu grande uso na indústria, os trocadores de calor do tipo casco e tubos não são indicados para aplicações automotivas e aeronáuticas, devido ao seu grande peso e tamanho. Nesses casos, são utilizados trocadores de calor compactos.

Trocadores de calor compactos são projetados para permitirem uma grande superfície de troca de calor por unidade de volume. Eles são utilizados quando é necessária uma grande superfície de troca de calor (maior ou igual a $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para líquidos e maior ou igual a $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para gases). Eles são normalmente usados

quando pelo menos um dos fluidos é um gás, o qual é caracterizado por ter um pequeno coeficiente de transferência de calor.

Esses equipamentos são compostos por densas matrizes de tubos aletados ou placas. Os tubos podem ser planos ou circulares e as aletas, planas ou circulares. Trocadores de calor com placas paralelas podem ser aletados ou corrugados, além de poderem possuir um ou múltiplos passes. Estas configurações de trocadores de calor compactos estão exemplificadas na figura 26. Algo importante sobre estes trocadores é que, tipicamente, as seções relacionadas ao escoamento são pequenas, possuindo diâmetro hidráulico menor ou igual a 5 mm, além do escoamento ser normalmente laminar.

Figura 26 - Exemplos de trocadores de calor compactos

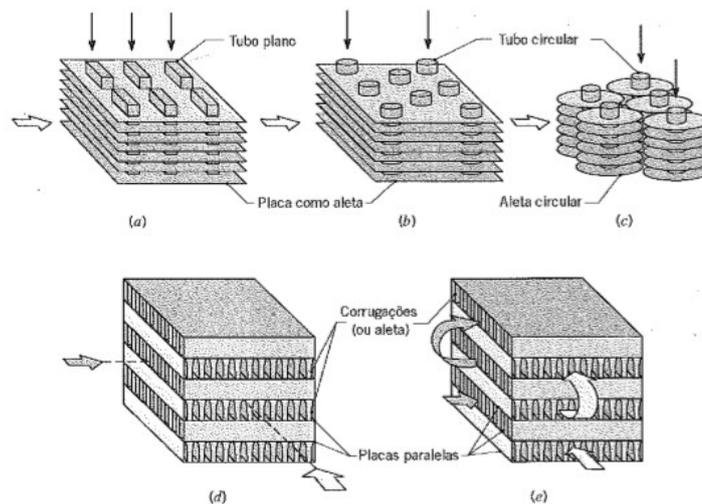


FIGURA 11.5 Núcleos de trocadores de calor compactos. (a) Tubo aletado (tubos planos, placas contínuas como aletas). (b) Tubo aletado (tubos circulares, placas contínuas como aletas). (c) Tubo aletado (tubos circulares, aletas circulares). (d) Placa aletada (passe único). (e) Placa aletada (múltiplo passe).

Fonte: INCROPERA (2007)

3. Metodologia

A metodologia deste Trabalho de Conclusão de Curso consistiu basicamente dos seguintes tópicos:

- O primeiro passo foi dedicado a demonstrar a importância da utilização de um bom intercooler em um motor sobrealimentado.
- Posteriormente, passou-se ao processo de dimensionamento de um intercooler do tipo ar-ar adequado para determinado motor, com a utilização de equações de desempenho de motor, transferência de calor e termodinâmica.
- Com o tópico anterior, foi possível realizar o mesmo processo para um intercooler do tipo ar-água.
- Por fim, analisou-se a viabilidade de cada um desses sistemas de intercooler.

3.1. Importância da Utilização de um Intercooler

Para comparar o desempenho de um motor com e sem a utilização de um intercooler, foram analisadas curvas de torque e potência para cada arranjo de motor.

O ideal para se obter essas curvas e dados seria com a realização de testes em um dinamômetro real, com aferição dos dados antes e depois da instalação de um intercooler em um carro sobrealimentado. No entanto, devido à grande dificuldade da realização desse processo, utilizou-se um software zero dimensional que simula as aferições de um dinamômetro real.

O software utilizado para esse fim necessita de alguns parâmetros do motor, como informações do bloco do motor, cilindros, compressão, indução, exaustão e comando de válvulas e, então, o programa gera as curvas e dados de desempenho estimadas.

Portanto, para se obter os dados de desempenho, é necessário fornecer os dados técnicos de um motor, seja este qual for. Como o intuito desse tópico do presente trabalho foi apenas comparar os dados de um motor, com e sem intercooler, a escolha do conjunto motriz a ser utilizado não se faz tão relevante. No entanto, para se ter uma boa aproximação com a realidade, o ideal é que seja simulado um motor que já seja sobrealimentado originalmente.

Para esse trabalho, foi selecionado então o motor EA888 da Volkswagen, popularmente conhecido como 2.0 TSI. A escolha desse motor deveu-se a ser um

motor já utilizado há um certo tempo, em diversos modelos de carros da marca e, portanto, ser um motor de conhecimento popular. Devido a isso, há uma maior quantidade disponível de dados técnicos sobre o mesmo, apesar de informações menos tradicionais, como dados da programação do turbocompressor, ainda ser algo difícil de se obter.

Os principais dados técnicos desse motor podem ser visualizados na figura 27.

Figura 27 - Dados técnicos do motor EA888 da Volkswagen

Motor		Aspiração	
Instalação	Dianteiro	Aspiração	Turbocompressor
Disposição	Transversal	Alimentação	Injeção direta e indireta multiponto
Cilindros	4 em linha	Comando de válvulas	Duplo no cabeçote, corrente
Tuchos	Hidráulicos	Variação do comando	Admissão e escape
Válvulas por cilindro	4	Diâmetro dos cilindros	82,5 mm
Razão de compressão	9,6:1	Curso dos pistões	92,8 mm
Cilindrada	1984 cm ³	Potência máxima	230 cv a 4700 rpm
Código do motor	EA888	Torque máximo	35,7 kgfm a 1500 rpm
Peso/potência	5,73 kg/cv	Torque específico	17,99 kgfm/litro
Peso/torque	36,89 kg/kgfm	Potência específica	115,93 cv/litro
Rotação máxima	6800 rpm		

Fonte: <https://www.carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=10633>

Como no software utilizado não está disponível a configuração exata do motor, o que se buscou foi reproduzir valores de potência e torque máximos aproximados com os proporcionados pelo EA888.

Contudo, um detalhe do motor EA888 que necessita ser explicitado, é o fato de que o mesmo possui torque máximo de 35,7 kgfm já a 1500 rpm, mantendo esse valor até as 4600 rpm, e a potência máxima de 230 cv ocorre com 4700 rpm e se mantém até 6200 rpm. Esse comportamento só é possível devido a utilização de injeção direta, turbocompressor com geometria variável e acerto da programação eletrônica, detalhes que não podem ser contemplados pelo software. Tendo isso em vista, é esperado que as curvas reais e simuladas tenham formato diferentes.

Para analisar o efeito que a utilização de um intercooler tem em um motor sobrealimentado foram simulados três diferentes cenários e seus dados de desempenho comparados. Em um primeiro cenário, foi simulado um motor sem a utilização do intercooler. Posteriormente, foi configurado um motor com um intercooler mal dimensionado, gerando uma eficiência de 40%. Por fim, foi utilizado um intercooler bem dimensionado, com um rendimento de 85%.

Para esclarecer qualquer questionamento que possa surgir, para essa análise, o único parâmetro do motor que foi alterado, foi a eficiência do intercooler e a existência do mesmo, ou não. Além disso, foi considerado a utilização de um intercooler do tipo ar-ar.

Os resultados das simulações desses cenários, e a análise dos mesmos, podem ser visualizados na seção destinada a isso.

3.2. Dimensionamento Intercooler Ar-Ar

O correto dimensionamento de um intercooler é extremamente importante para diversos pontos. A sua função primordial é resfriar o ar admitido e comprimido antes que o mesmo entre nos cilindros. Com isso há ganhos de potência, devido à maior densidade do ar a uma menor temperatura, o que possibilita que uma maior massa de ar entre no cilindro, gerando uma maior pressão efetiva no pistão e, conseqüentemente, maior potência.

Além disso, o risco de pré-ignição e/ou detonação é reduzido com menores temperaturas do ar que entra no cilindro, o que é favorável à segurança e vida útil do motor, além de facilitar a utilização do ponto ótimo do ponto de ignição, o que auxilia na obtenção de maior potência.

Para se realizar o dimensionamento do intercooler ar-ar, foi calculado o fluxo de ar no core do intercooler. Com essa informação calculada, foi analisada a transferência de calor do intercooler, achando-se, por fim, a área de troca térmica necessária para o intercooler operar sobre determinada condição.

Esse processo foi possível por meio da utilização de diversas equações de desempenho de motores, termodinâmica e transferência de calor. Além disso, foi necessário assumir alguns parâmetros para que o dimensionamento fosse possível. Esses parâmetros foram escolhidos de forma a que representem da melhor maneira possível um funcionamento deste equipamento na realidade.

Todas as características dos fluidos e as equações que foram utilizadas podem ser encontradas nos livros listados nas referências bibliográficas. O dimensionamento e os resultados podem ser visualizados na seção reservada a eles.

3.3. Dimensionamento Intercooler Ar-Água

Da mesma forma que foi dimensionado um intercooler ar-ar, foi realizado o mesmo processo para o dimensionamento de um intercooler do tipo ar-água. No

entanto, como a parte de dimensionamento do core não depende do fluido que está resfriando o ar, só houve a necessidade de calcular novamente a parte de transferência de calor.

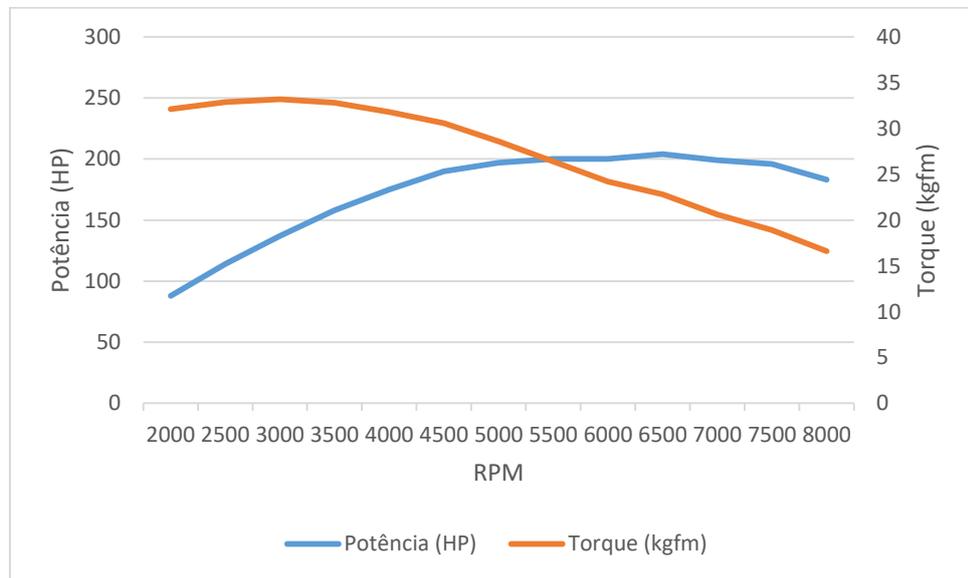
Além disso, foi considerado que o intercooler opera sobre as mesmas condições do intercooler ar-ar dimensionado. Repetindo o processo realizado anteriormente, apenas trocando os parâmetros pertinentes e as características do novo fluido, foi possível obter a área necessária para esse intercooler e, posteriormente, comparar com a referente ao intercooler ar-ar.

4. Resultados e Discussões

4.1. Importância do Intercooler

Como dito anteriormente, para a realização desta parte do trabalho foi escolhido o motor EA888 2.0L da Volkswagen. As curvas e dados desse motor simulado no software utilizado são apenas aproximados com os dados divulgados, mas cumprem bem o propósito de comparação. Com esses dados de entrada, foi possível então se obter as curvas de torque e potência deste motor sem a utilização de um intercooler, o que pode ser visto na figura 28.

Figura 28 - Curvas de torque e potência do motor sem intercooler



Fonte: elaborado pelo autor

Na tabela 2, pode-se visualizar os dados de potência e torque para cada rotação do motor.

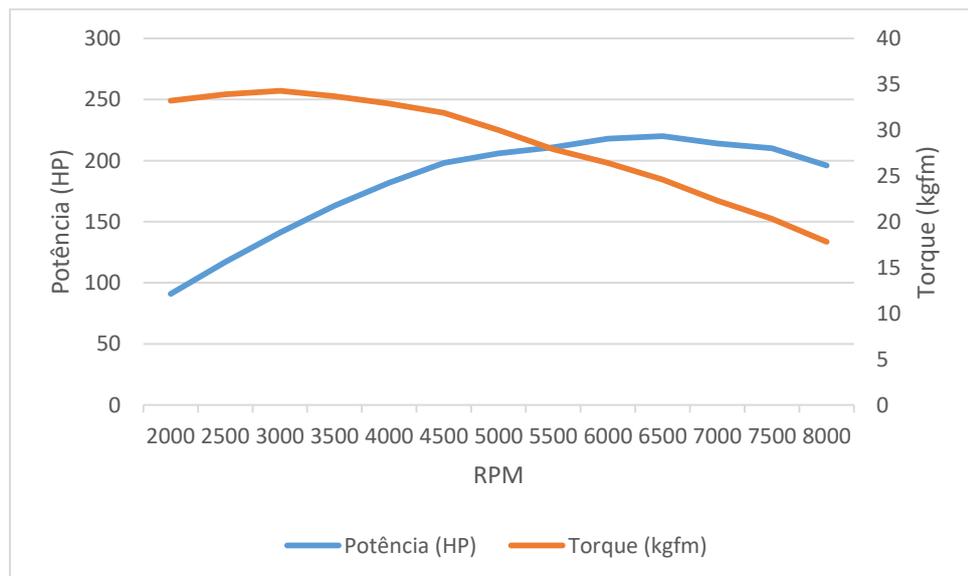
Tabela 2 - Dados do motor sem intercooler

RPM	Potência (HP)	Torque (kgfm)
2000	88	32,1
2500	114	32,9
3000	137	33,2
3500	158	32,8
4000	175	31,8
4500	190	30,6
5000	197	28,6
5500	200	26,4
6000	200	24,2
6500	204	22,8
7000	199	20,6
7500	196	18,9
8000	183	16,6

Com todos esses dados em mãos, passa-se agora à simulação do mesmo motor, apenas com a adição de um intercooler mal dimensionado, ou seja, um intercooler que não tem capacidade para conseguir resfriar de forma satisfatória o ar comprimido, gerando uma eficiência estimada de 40%. O procedimento apresentado aqui será o mesmo utilizado para o primeiro caso, do motor sem intercooler.

Essa nova configuração gera os dados que podem ser vistos na figura 29.

Figura 29 - Curvas de torque e potência do motor com intercooler mal dimensionado



Fonte: elaborado pelo autor

Apenas com a comparação das curvas, já é possível visualizar um pequeno aumento, tanto de torque, quanto de potência, o que pode ser confirmado com a análise dos valores tabelados para cada rotação do motor, que podem ser visualizados na tabela 3.

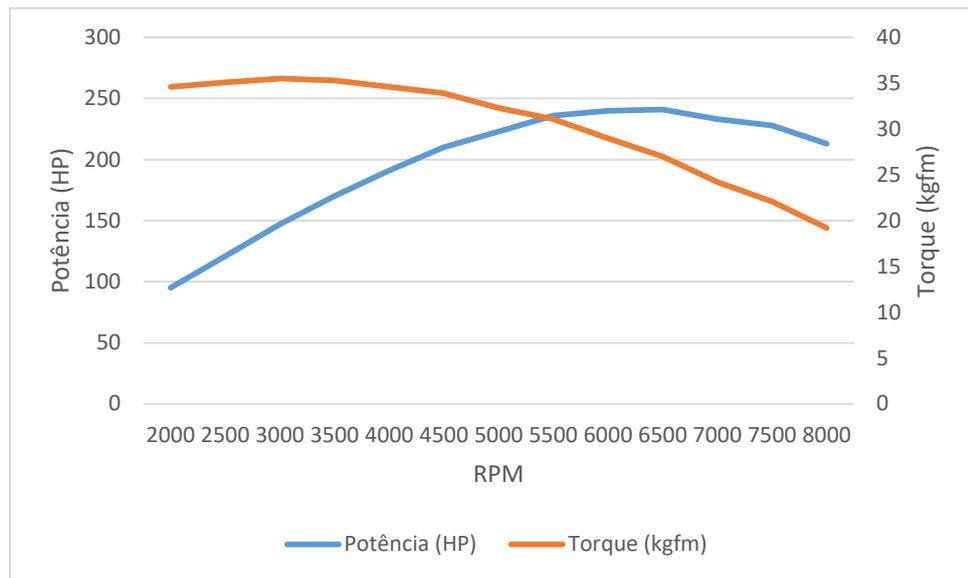
Tabela 3 - Dados do motor com intercooler mal dimensionado

RPM	Potência (HP)	Torque (kgfm)	Aumento Percentual Potência	Aumento Percentual Torque
2000	91	33,2	3,4%	3,4%
2500	117	33,9	2,6%	3,0%
3000	141	34,3	2,9%	3,3%
3500	163	33,7	3,2%	2,7%
4000	182	32,9	4,0%	3,5%
4500	198	31,9	4,2%	4,2%
5000	206	30,0	4,6%	4,9%
5500	211	27,9	5,5%	5,7%
6000	218	26,4	9,0%	9,1%
6500	220	24,6	7,8%	7,9%
7000	214	22,3	7,5%	8,3%
7500	210	20,3	7,1%	7,4%
8000	196	17,8	7,1%	7,2%
		Média =	5,3%	5,4%

Analisando os dados da tabela, pode-se ver que o aumento percentual médio de potência foi de 5,3% para essa configuração de motor, porém com um pico de 9,0% de ganho na velocidade de 6000 rpm, com menores ganhos em baixas rotações. O comportamento é o mesmo para os valores de torque, com aumento percentual médio de 5,4% e pico de 9,1% na velocidade de 6000 rpm, com menores ganhos em baixas rotações.

Analisando, agora, o último cenário, tem-se o mesmo motor funcionando com um intercooler bem dimensionado, o qual gera uma eficiência de 85%. Sob essa configuração, tem-se as curvas de performance apresentadas na figura 30.

Figura 30 - Curvas de torque e potência do motor com intercooler bem dimensionado



Fonte: elaborado pelo autor

Inicialmente, é possível ver um grande aumento de potência, além de um certo aumento do torque também. Novamente, para confirmar essa tendência, passa-se para a análise dos dados de acordo com a rotação do motor, dados mostrados na tabela 4.

Tabela 4 - Dados do motor com intercooler bem dimensionado

RPM	Potência (HP)	Torque (kgfm)	Aumento Percentual Potência	Aumento Percentual Torque
2000	95	34,6	8,0%	7,8%
2500	121	35,1	6,1%	6,7%
3000	147	35,5	7,3%	6,9%
3500	170	35,3	7,6%	7,6%
4000	191	34,6	9,1%	8,8%
4500	210	33,9	10,5%	10,8%
5000	223	32,3	13,2%	12,9%
5500	236	31,1	18,0%	17,8%
6000	240	29,0	20,0%	19,8%
6500	241	27,0	18,1%	18,4%
7000	233	24,2	17,1%	17,5%
7500	228	22,1	16,3%	16,9%
8000	213	19,2	16,4%	15,7%
		Média =	12,9%	12,9%

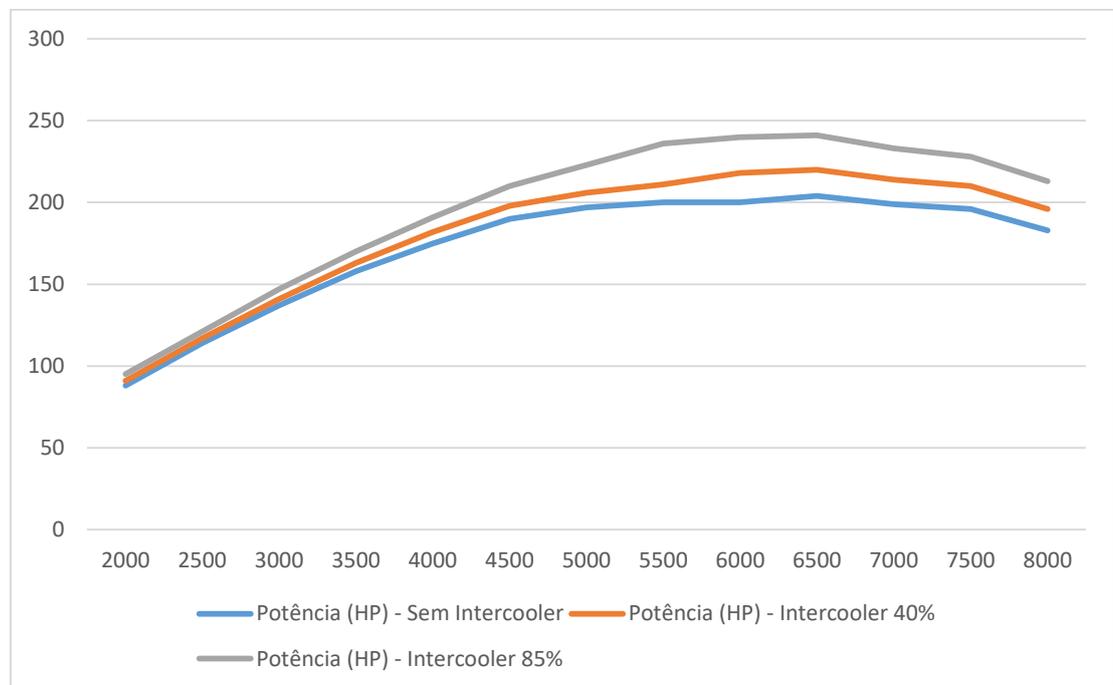
Para este caso, o aumento percentual médio, tanto de potência quanto torque, foi de 12,9% em relação ao mesmo motor sem intercooler. Novamente, picos de aumento de potência e torque ocorreram na velocidade de 6000 rpm, sendo esses de

20,0% e 19,8%, respectivamente. Também são observados ganhos menores em baixas rotações, assim como na configuração com um intercooler mal dimensionado.

Realizando uma análise de todos os dados apresentados, é possível observar como a utilização de um intercooler bem dimensionado é importante para o bom desempenho de um motor sobrealimentado. Para facilitar a comparação entre os três cenários apresentados, agora serão mostradas algumas características dos três cenários de forma conjunta.

A primeira informação isolada é a potência em HP, a qual pode ser visualizada na figura 31.

Figura 31 - Curvas de potência do motor para os 3 casos estudados

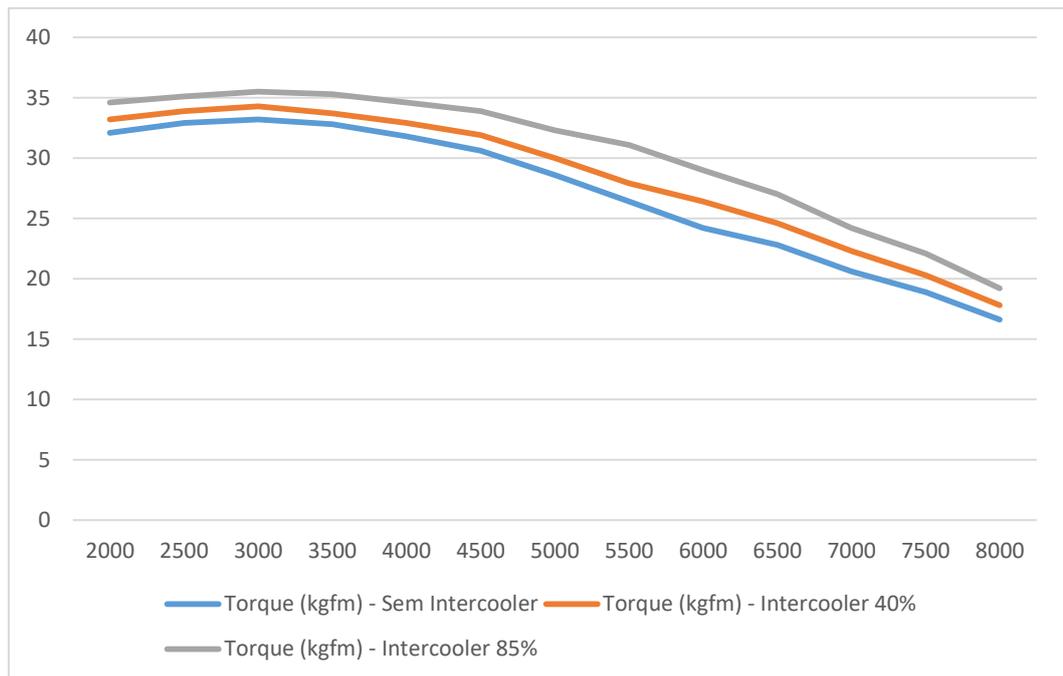


Fonte: elaborado pelo autor

Para o motor sem intercooler, tem-se que a potência máxima é a de 204HP@6500rpm. Já para o intercooler de 40% de eficiência, tem-se uma potência máxima de 220HP@6500rpm e, finalmente, para o intercooler de 85% de eficiência, tem-se a potência máxima de 241HP@6500rpm. Pode-se ver que a rotação do motor em que a potência máxima ocorre não se altera, contudo tem-se uma grande variação de valores. Comparando os extremos, pode-se verificar um aumento de 37 HP, ou 18%, apenas com a utilização de um intercooler bem dimensionado. No entanto, há aumento na potência de até 20% na velocidade de 6000 rpm.

Passando agora para o torque, os dados estão apresentados na figura 32.

Figura 32 - Curvas de torque do motor para os 3 casos estudados



Fonte: elaborado pelo autor

É possível ver que há basicamente um deslocamento da curva, mas que todas seguem basicamente o mesmo padrão. Neste caso, para o motor sem intercooler tem-se que o torque máximo é de 33,2kgfm@3000rpm. Já para o motor com intercooler mal dimensionado, tem-se um torque máximo de 34,3kgfm@3000rpm. No caso do motor com intercooler bem dimensionado, tem-se o torque máximo de 35,5kgfm@3000rpm. Mais uma vez, a rotação ótima não se altera para os três casos, apenas os valores máximos. Comparando-se os extremos, verifica-se um aumento de 2,3 kgfm, ou seja, praticamente 7%. Contudo, tem-se aumento de até 19,8% para a velocidade de 6000 rpm, apenas com a adição de um intercooler instalado corretamente.

Por meio da análise desses dois parâmetros de desempenho já é possível chegar à conclusão de que o intercooler é realmente importante quando se trata de desempenho de motores sobrealimentados.

Com o ar de admissão em uma menor temperatura, tem-se esse ar com maior densidade, fazendo com que uma maior massa de ar ocupe o mesmo espaço dentro dos cilindros, aumentando assim a eficiência volumétrica. Com mais ar dentro dos cilindros, tem-se uma maior MEP, aumentando o trabalho sobre os pistões, gerando mais torque e potência. Por isso, a utilização de um intercooler bem dimensionado se faz importante para um bom desempenho.

Comparando os resultados com os apresentados pela literatura, e apresentados na figura 19, tem-se na literatura aumento de 19,4% na potência máxima e de 19,0% no torque máximo entre os dois motores sobrealimentados apresentados. Contudo, na literatura, além da presença do intercooler, há aumento do volume do motor e da razão de compressão, além da utilização de outras tecnologias, enquanto que no exemplo aqui discutido, apenas implementou-se o intercooler.

Isso mostra que, caso se aumente a razão de compressão do motor, pode-se aumentar ainda mais os ganhos de performance. Em carros com a presença de intercooler, pode-se utilizar uma razão de compressão maior, pois como se trabalha com o ar a uma temperatura menor, o risco de ocorrer detonação ou pré-ignição é diminuído.

Portanto, pode-se afirmar que a utilização do intercooler em motores sobrealimentados proporciona ganhos de desempenho e contribui para a durabilidade do motor, sendo, portanto, um equipamento de grande valia e importante para se ter segurança na utilização de turbocompressores ou compressores mecânicos.

4.2. Dimensionamento de um Intercooler Ar-Ar

Diferentemente do que se possa imaginar, para se escolher um intercooler não é avaliado somente o quanto de calor um equipamento é capaz de retirar, sendo o que mais resfria o ar o melhor. É necessário que seja adotada uma solução de compromisso entre a capacidade de resfriamento da massa de ar e a perda de carga do fluxo que passa pelo intercooler.

Com isso em mente, é considerado que um intercooler devidamente escolhido proporcionará uma perda de pressão máxima de 3 psi, ou 0,2 bar, e ainda proporcionará uma grande retirada de calor do ar que passa por ele.

O primeiro passo então para se dimensionar o intercooler adequado, é calcular a capacidade de fluxo dos dutos internos. O ideal é que o fluxo dentro do core do intercooler parta do regime transitório, assim garantindo a maior eficiência possível, pois no momento em que houver a maior carga térmica, a interação das moléculas será grande o suficiente para dissipar o calor.

No entanto, para definir a velocidade de fluxo, também há uma relação de compromisso. Se a velocidade for baixa demais não se terá uma boa eficiência, porém

se ela for alta demais a turbulência gera grande perda de carga e até mesmo erosão no equipamento. Portanto, foi considerada uma velocidade de escoamento de 25 m/s.

Para se calcular a vazão de ar, deve-se calcular o consumo específico de combustível (SFC) primeiramente. Para isso, foi utilizada a equação (6) onde Q_{HV} é o poder calorífico do combustível em kW/kg e η_t é o rendimento térmico do motor:

Considerando que o rendimento térmico do motor é 0,32 e que o Q_{HV} da gasolina, é 12 kWh/kg, tem-se que o SFC deste motor com gasolina é 0,26 kg/kWh.

Com o consumo específico, é possível então calcular a massa de ar necessária. Para isso, foi considerada a faixa de rotação onde a potência é máxima, o que no caso simulado anteriormente de um intercooler bem dimensionado indica uma potência de 241 HP a 6500 rpm. Convertendo essa potência para kW, tem-se 179,714 kW.

Também é necessário ter em mente que a relação ar/combustível estequiométrica para a gasolina é 14,7, porém como se trata de uma condição de desempenho máximo, foi considerada uma mistura rica, ou seja, 85% da relação estequiométrica. Com isso tem-se uma relação ar/combustível de 12,495. Assim, é possível utilizar a equação (7) para calcular a massa de ar, onde P é a potência em kW e λ é a relação ar/combustível:

$$\dot{m}_{ar} = P \cdot \lambda \cdot SFC \quad (7)$$

Com isso, tem-se uma vazão de ar de 583,84 kg/h, ou 0,162 kg/s.

Contudo, é necessário saber também qual será a menor vazão. Como o menor valor de potência que se tem disponível é a relativa à rotação de 2000 rpm, ela será a utilizada. Com isso, tem-se a potência de 95 HP, ou seja, 70,8415 kW.

Essa nova configuração gera então uma vazão de 230,14 kg/h, ou seja, 0,0639 kg/s.

Com as vazões máximas e mínimas calculadas, pode-se calcular o diâmetro necessário para se obter a vazão máxima com uma velocidade de 25 m/s. Para isso, foi utilizada a equação (8), onde D é o diâmetro em metros, \dot{m}_{ar} é a vazão de ar em kg/s, V é a velocidade do escoamento em m/s e ρ é a densidade específica do ar, a qual será considerada igual a 1,18 kg/m³:

$$D = \sqrt{\frac{4\dot{m}_{ar}}{V\pi\rho}}$$

(8)

Com isso, tem-se um diâmetro de 0,108 m.

Agora, é necessário certificar que, para a menor vazão, o escoamento continua turbulento. Para isso é necessário verificar se o número de Reynolds do escoamento é maior do que 2300. O Número de Reynolds é calculado por meio da equação (9), onde Re é o Número de Reynolds e $\mu=16,04 \times 10^{-6}$ m²/s é a viscosidade cinemática:

$$Re = \frac{4\dot{m}_{ar}}{\pi\mu D} \quad (9)$$

Logo, tem-se um Número de Reynolds de 46966, mostrando que o escoamento permanece em um regime turbulento. Portanto, mesmo em baixa rotação, tem-se um escoamento eficiente.

Com o diâmetro encontrado, tem-se uma área de 0,009161 m². No entanto, devido às travessas que fazem parte do plano cruzado do intercooler, é necessário multiplicar o valor da área por 1,45, ou 45% a mais. Com isso, tem-se que a área da seção transversal do intercooler é igual a 0,01328 m².

Agora é necessário passar para a análise da transferência de calor envolvida no processo.

O primeiro passo é conhecer a temperatura de saída do ar do compressor. Para esse cálculo, foi considerado que a temperatura do ar aspirado pelo compressor está em 35 °C. Também foi considerado que a eficiência politrópica do compressor (ϵ) é igual a 0,68. Foram utilizadas as equações (10) e (11), onde n é a eficiência isentrópica, γ é a razão entre calores específicos (C_p/C_v), que para o ar é 1,4, T_1 é a temperatura de admissão do compressor e T_2 a temperatura de descarga do compressor, ambas em Kelvin, e p_1 e p_2 são as pressões de admissão e descarga do compressor, respectivamente, em kPa:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (10)$$

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \cdot T_1 \quad (11)$$

Para se utilizar essas equações, é necessário ter as pressões antes e depois do compressor, ou a razão de compressão. Nesse caso, foi considerado que P_2 é 60% maior do que P_1 . Com isso, tem-se que $T_2 = 375,40 \text{ K} = 102,25 \text{ °C}$. Essa é a temperatura de entrada do ar no intercooler.

Já a temperatura de ar frio que passa pelo intercooler é a mesma da admissão, ou seja, 35 °C . Portanto, tem-se as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, além da vazão do fluido quente. Portanto, para se calcular a transferência de calor, é necessário utilizar o Método ϵ -NUT.

O próximo passo foi calcular as capacitâncias térmicas dos fluidos quente e frio. Para isso, foram utilizadas as equações (12), (13) e (14), onde C_q é a capacitância térmica do fluido quente em kW/K, $\dot{m}_q=0,162 \text{ kg/s}$ é a vazão do fluido quente, $C_{p,q}=1,009 \text{ kJ/kg.K}$ é o calor específico à pressão constante do fluido quente, C_f é a capacitância térmica do fluido frio em kW/K, \dot{m}_f é a vazão do fluido frio, a qual foi considerada 3,5 vezes a vazão do intercooler, ou seja $\dot{m}_f=0,567 \text{ kg/s}$, $C_{p,f}=1,007 \text{ kJ/kg.K}$ é o calor específico à pressão constante do fluido frio, C_r é a razão entre capacitâncias, C_{min} é a menor capacitância térmica calculada e C_{max} é a máxima capacitância térmica calculada:

$$C_q = \dot{m}_q \cdot C_{p,q} \quad (12)$$

$$C_f = \dot{m}_f \cdot C_{p,f} \quad (13)$$

$$C_r = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (14)$$

Com isso, tem-se que $C_q = 0,163 \text{ kW/K}$, $C_f = 0,572 \text{ kW/K}$ e $C_r = 0,285$.

Agora, pode-se calcular a troca de calor máxima e a real. Neste momento, é necessário estabelecer uma temperatura de saída do ar de admissão do intercooler. Foi estabelecido que o ar sai do intercooler com temperatura de 45 °C . Para se calcular as trocas de calor, foram utilizadas as equações (15) e (16), onde q_{max} é a troca de calor máxima em kW, $T_{e,q}=375,4 \text{ K}$ é a temperatura de entrada do fluido quente, $T_{e,f}=308,15 \text{ K}$ é a temperatura de entrada do fluido frio, q é a troca de calor real em kW e $T_{s,q}=318,15 \text{ K}$ é a temperatura de saída do fluido quente:

$$q_{max} = C_{min}(T_{e,q} - T_{e,f}) \quad (15)$$

$$q = C_q(T_{e,q} - T_{s,q}) \quad (16)$$

Com isso, tem-se que $q_{max} = 10,962$ kW e $q = 9,332$ kW.

Tendo esses dados, pode-se agora calcular a efetividade do intercooler (ϵ_{int}), a qual é dada pela equação (17):

$$\epsilon_{int} = \frac{q}{q_{max}} \quad (17)$$

Logo, tem-se um intercooler com uma efetividade de 85,1%.

Com a efetividade e a razão entre capacidades calculadas, é possível calcular o Número de Unidades de Transferência (NUT). Para isso, foi considerado que o intercooler é um trocador de calor do tipo placa aletada, com escoamento considerado não misturado e o fluxo frio é um escoamento cruzado misturado. Tendo feito essas considerações, pode-se utilizar a equação (18):

$$NUT = -\ln \left[1 + \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln(1 - \epsilon_{int} C_r) \right] \quad (18)$$

Portanto, tem-se que $NUT = 3,68$ para o exemplo estudado. Agora pode-se achar a área necessária para realizar a troca térmica por meio da equação (19), onde $U = 40$ W/m².K é o coeficiente global de transferência de calor e A é a área necessária para realizar a transferência de calor, dada em m²:

$$A = \frac{C_{min} \cdot NUT}{U} \quad (19)$$

Com isso, tem-se que a área necessária é de 15,00 m².

4.3. Dimensionamento do Intercooler Ar-Água

Considerando a mesma efetividade do intercooler, ou seja, as temperaturas de entrada e saída dos fluidos são iguais às do intercooler ar-ar, foram calculadas novamente as capacidades dos fluidos. Considerando a mesma vazão de ar sob as mesmas condições, a capacidade do fluido quente não se altera. Contudo, é necessário encontrar a nova capacidade do fluido frio. Para isso, foi utilizada a

equação (13), considerando uma vazão de água igual a de ar, ou seja $\dot{m}_f = 0,162 \text{ kg/s}$ e $C_{p,f} = 4,178 \text{ kJ/kgK}$. Após isso, foi utilizada a equação (14) para calcular a nova razão entre capacidades.

Portanto, tem-se que $C_f = 0,677 \text{ kW/K}$ e $C_r = 0,241$.

Foi, então, calculado o NUT desse novo intercooler. Para isso, foi utilizada novamente a equação (18) com o novo valor de razão entre capacidades calculado. Com isso, tem-se que $\text{NUT} = 3,04$.

Considerando agora um coeficiente global $U=140 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, pode-se encontrar a área necessária para realizar a troca térmica utilizando a equação (19). Com isso, tem-se uma área necessária de $3,54 \text{ m}^2$.

4.4. Análise de Intercoolers Ar-Ar e Ar-Água

Realizando os cálculos para o dimensionamento dos dois tipos de intercoolers pode-se ver grandes diferenças entre os dois tipos de equipamento. Para uma vazão de ar de $\dot{m}_f = 0,567 \text{ kg/s}$ em um trocador de calor do tipo ar-ar, é necessária uma área de troca térmica de $15,00 \text{ m}^2$. Já para um trocador de calor do tipo ar-água, com uma vazão de apenas $\dot{m}_f = 0,162 \text{ kg/s}$, é possível realizar a mesma troca térmica com uma área de apenas $3,54 \text{ m}^2$.

É possível ver que mesmo utilizando uma vazão de ar equivalente a 3,5 vezes a vazão de água utilizada no intercooler do tipo ar-água, é necessária uma área de 4,24 vezes a deste.

Isso mostra que é possível utilizar um intercooler do tipo ar-água muito mais compacto do que um intercooler do tipo ar-ar operando sobre as mesmas temperaturas e com a mesma eficiência. Contudo, em geral, a temperatura de entrada da água é menor do que a do ar atmosférico e a temperatura do ar de admissão na saída do intercooler também é menor. Com isso, normalmente um intercooler ar-água possui efetividade maior do que a de um intercooler ar-ar, o que indica que é possível se utilizar áreas ainda menores.

Essas condições são possíveis devido ao maior potencial da água de retirar calor do ar de admissão, em comparação com o ar atmosférico, o que faz com que uma mesma capacidade térmica seja obtida com uma vazão bem menor.

Contudo, para que se possa utilizar um intercooler do tipo ar-água, são necessários componentes auxiliares, como uma bomba d'água para proporcionar o

fluxo de água necessário para o intercooler e um sistema auxiliar para resfriar a água após a mesma passar pelo equipamento. Isso tudo impõe um custo de instalação e dificuldade de engenharia muito maiores. Devido a isso, esse tipo de intercooler é mais comumente empregado em projetos originários das próprias montadoras, pois as dificuldades já são analisadas durante a fase de desenvolvimento do projeto do carro.

A título de comparação, um intercooler do tipo ar-água pode custar mais do que o dobro de um intercooler do tipo ar-ar, considerando apenas o trocador de calor. Quando se considera os demais equipamentos necessários para a instalação desse componente, esse custo se eleva mais ainda, pois trata-se de um sistema fechado que opera com água em seu interior, diferentemente do intercooler do tipo ar-ar que utiliza o ar ambiente para resfriar o ar comprimido. São necessários equipamentos auxiliares para implementar um intercooler ar-água, o que encarece a aplicação.

Esse tipo de componente também exige um grande cuidado com a manutenção, pois caso ocorra vazamentos de água do sistema, os danos ao motor do carro podem ser bastante severos, desde perda de desempenho até problemas mais sérios, como calço hidráulico e uma conseqüente quebra do bloco do motor.

Já o intercooler do tipo ar-ar, apesar de ser menos eficiente e exigir mais espaço no cofre do motor, é mais fácil de ser implementado, mesmo em veículos que não são sobrealimentados originalmente, é mais barato e exige menor manutenção.

Portanto, cada um desses tipos de intercoolers apresentam vantagens e desvantagens, e a escolha do tipo a ser utilizado depende da ponderação entre elas, além do objetivo e fase do projeto.

Nas tabelas 5 e 6 é possível ver algumas vantagens e desvantagens de cada tipo de intercooler aqui discutidos. Nessas tabelas estão resumidos os principais pontos que devem ser levados em conta na escolha do tipo intercooler a ser utilizado.

Tabela 5 - Vantagens e desvantagens de um intercooler ar-ar

Vantagens	Desvantagens
Mais fácil de instalar	Menos eficiente
Mais barato	Maior área necessária para troca térmica
Exige menos manutenção	Maior espaço necessário no cofre do motor
Menores danos em caso de falha	Menos robusto a condições ambientais
Mais leve	Maior perda de pressão
Menos peças necessárias	Maior lag do sistema

Tabela 6 - Vantagens e desvantagens de um intercooler ar-água

Vantagens	Desvantagens
Mais eficiente	Mais difícil de instalar
Menor área necessária para troca térmica	Mais caro
Menor espaço necessário no cofre do motor	Exige mais manutenção
Mais robusto a condições ambientais	Maiores danos em caso de falha
Menor perda de pressão	Mais pesado
Menor lag do sistema	Mais peças necessárias

5. Conclusão

Com a realização deste trabalho foi possível verificar que a utilização de um intercooler bem dimensionado é extremamente importante para o bom desempenho de um motor sobrealimentado. Este equipamento proporciona ganhos em diversos parâmetros relacionados ao desempenho, como o torque e a potência, assim como mostrado na literatura especializada.

No exemplo do motor simulado neste trabalho, foi possível obter-se ganhos de 37 HP na potência máxima e 2,3 kgfm no torque máximo, correspondendo a 18% e 7% de aumento, respectivamente. Contudo, analisando-se toda a faixa de velocidades do virabrequim, tem-se aumentos de até 20,0% e 19,8% na potência e no torque, respectivamente, e isso apenas com a adição de um intercooler bem dimensionado, o que são números bastante expressivos. Portanto, com isso fica demonstrado a importância deste componente em um motor sobrealimentado.

Através do processo de dimensionamento de intercoolers do tipo ar-ar e ar-água foi possível comparar estes dois tipos de trocadores de calor. Apesar de terem sido feitas várias suposições de valores e hipóteses durante esse processo, pode-se afirmar que ficou demonstrado que o intercooler do tipo ar-água é mais eficiente, pois exige uma área bem menor de troca de calor. Contudo como discutido na seção anterior, esse sistema de intercooler apresenta algumas complexidades e desvantagens, o que torna muito mais fácil e barata a utilização do intercooler do tipo ar-ar.

Portanto, cada um dos dois tipos de intercooler discutidos apresentam vantagens e desvantagens que precisam ser analisadas para a definição de qual tipo escolher. Há, portanto, alguns trade-offs na escolha do trocador de calor utilizado no projeto, não sendo assim possível afirmar que um tipo é melhor que o outro para todos os casos.

De qualquer forma, independentemente do tipo de intercooler escolhido, ficou constatado que é essencial que o mesmo seja bem dimensionado para, assim, proporcionar os resultados desejados, seja de desempenho, consumo ou segurança dos componentes.

Este trabalho, portanto, deixa como contribuição para a área dados que comprovam a importância da utilização de um intercooler em um veículo com motor sobrealimentado, a comparação de intercoolers do tipo ar-ar e ar-água, analisando

vantagens e desvantagens de cada tipo, além de mostrar uma forma de dimensionar os dois tipos de intercoolers.

Este trabalho também deixou contribuições para o autor do mesmo, como o aprofundamento na área de motores de combustão interna e transferência de calor, com foco especial em trocadores de calor.

Como sugestões para a continuidade do trabalho ficam as seguintes ideias:

- Comprovação dos resultados encontrados, por meio da aplicação desses componentes em um automóvel e realização de testes em um dinamômetro;
- Comparação dos resultados em outros modelos de motores ICE;
- Verificação dos resultados em um motor ciclo diesel.

6. Referências Bibliográficas

Auto Motors, Qual a Diferença Entre Torque e Potência. Disponível em:

<<http://dicasparacarros.blogspot.com/2013/06/qual-diferenca-entre-torque-e-potencia.html>>. Acesso em: 8 de junho de 2018.

BELL, C. **Maximum Boost: Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems**. 1ª Ed. Robert Bentley Inc., 1997.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: Volume 1**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2012.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: Volume 2**. 1ª Ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2012.

Carros na Web, Volkswagen Golf GTI 2.0 TSI. Disponível em:

<<https://www.carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=10633>>. Acesso em: 9 de novembro de 2019.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência e Calor de Massa: Uma Abordagem Prática**. 4ª Ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2011.

CONTESINI, L. Tudo sobre turbo: como funciona a geometria variável, compressão e mapas.

Disponível em: <https://www.flatout.com.br/tudo-sobre-turbo-como-funciona-a-geometria-variavel-compressao-e-mapas/>>. Acesso em: 9 de junho de 2018.

Cultura Mix, Ciclo Diesel. Disponível em: <<https://www.culturamix.com/transporte/carros/ciclo-diesel/>>. Acesso em: 8 de junho de 2018.

Euro Car News, AMG 5.5-liter Biturbo Engine Intercooler System. Disponível em:

<<http://www.eurocarnews.com/182/0/0/1941/amg-55-liter-biturbo-engine-intercooler-system/gallery-detail.html>>. Acesso em: 19 de junho de 2018.

GIBI, R. Motores a Pistão. Disponível em: <<https://abekwar.wordpress.com/2013/04/09/motores-a-pistao/>>. Acesso em: 8 de junho de 2018.

HEYWOOD, J. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hill International Editions, 1988.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência e Calor de Massa**, 6ª Ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

Máquinas e Motores Utilizados na Pesca – UFRPE, Ciclo Diesel. Disponível em:

<http://maquinasmotoresnapesca.blogspot.com/p/blog-page_21.html>. Acesso em: 8 de junho de 2018.

OEM Performance, Intercooler Universal 14 Linhas TA-Technix. Disponível em:

<<https://www.oemperformance.com/home/produto/intercooler-universal-14-linhas-ta-technix/>>. Acesso em: 19 de junho de 2018.

PASSOS, R. Sobrealimentação de motores: tudo sobre superchargers e compressores centrífugos.

Disponível em: <<https://www.flatout.com.br/sobrealimentacao-de-motores-tudo-sobre-superchargers-e-compressores-centrifugos/>>. Acesso em: 9 de junho de 2018.

PASSOS, R. Intercoolers, resfriadores e injeção de água: tudo o que você queria (e precisa) saber

sobre. Disponível em: <<https://www.flatout.com.br/intercoolers-resfriadores-e-injecao-de-agua-tudo-o-que-voce-queria-e-precisa-saber-sobre/>>. Acesso em: 9 de junho de 2018.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. 1. ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice-Hall, Inc., 1997.

VAROLI, R. Como Funciona o Supercharger?. Disponível em:

<<https://gearheadbanger.wordpress.com/2012/03/10/como-funciona-o-supercharger/>>. Acesso em: 9 de junho de 2018.

VAROLI, R. Como Funciona o Turbo?. Disponível em:

<<https://gearheadbanger.wordpress.com/2012/02/17/como-funciona-o-turbo/>>. Acesso em: 9 de junho de 2018.