

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
FATEC SANTO ANDRÉ**

Tecnologia em Mecânica Automobilística

**Diego Canesso
Vinicius Comicio Patenezi
Vladimir Aveiro Dias**

**ANÁLISE DO USO DE INTERCOOLER EM MOTORES
SOBREALIMENTADOS**

**Santo André
2018**

Diego Canesso
Vinicius Comicio Paternezi
Vladimir Aveiro Dias

**ANÁLISE DO USO DE INTERCOOLER EM MOTORES
SOBREALIMENTADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística da Fatec Santo André orientado pelo Prof. Marco Aurélio Fróes, como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Mecânica Automobilística.

Santo André
2018

C221a

Canesso, Diego

Análise do uso de intercooler em motores sobrealimentados /
Diego Canesso, Vinicius Comicio Paternezi, Vladimir Aveiro Dias. -
Santo André, 2018. – 60f.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Mecânica Automobilística, 2018.

Orientador: Prof. Marco Aurélio Fróes

1. Mecânica. 2. Veículos. 3. Motores. 4. Sobrealimentação. 5.
Ciclo Otto. 6. Eficiência energética. 7. Turbocompressor. 8. Charge
Air Cooler. 9. Performance. I. Paternezi, Vinicius Comicio II. Dias,
Vladimir Aveiro. III. Análise do uso de intercooler em motores
sobrealimentados.

629.2

LISTA DE PRESENÇA

SANTO ANDRÉ, 15 DE DEZEMBRO DE 2018

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA "ANÁLISE
DO USO DE INTERCOOLER EM MOTORES
SOBREALIMENTADOS" DOS ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA
U.E.

BANCAPRESIDENTE:
PROF. MARCO AURÉLIO FRÓESMEMBROS:
PROF. FERNANDO GARUP DALBO

PROF. CLEBER WILLIAM GOMES

ALUNOS:

DIEGO CANESSO

VINICIUS COMÍCIO PATERNEZI

VLADIMIR AVEIRO DIAS

A todos os amantes de motores e aos que buscam sempre mais conhecimento em preparações, seja para aprimorar um motor só por diversão ou para motores de veículos de competição.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores da instituição Fatec Santo André que contribuíram para a nossa formação acadêmica. Aos nossos pais e familiares que deram grande apoio durante a elaboração deste trabalho e durante todo o período para formação no curso. Aos nossos amigos e colegas da faculdade por todo suporte.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá”.

Ayrton Senna

RESUMO

A grande maioria dos motores de combustão interna Ciclo Otto funciona de forma naturalmente aspirada, ou seja, sem a utilização de artifícios para capturar uma maior quantidade de massa de ar para o motor. Porém, com o avanço da tecnologia e a necessidade por aumentar a potência do motor e ao mesmo tempo reduzir consumo e emissões, começou a se difundir a utilização de turbocompressores. No mundo das preparações a modificação de motores naturalmente aspirados para sobrealimentados é amplamente utilizada, mas nem sempre é aplicada resultando na melhor eficiência do veículo. Portanto, tomou-se como objetivo do trabalho fazer um estudo da implementação de um intercooler em um veículo adaptado para uma sobrealimentação, analisando como a densidade do ar se comporta quando pressurizado e resfriado, visando verificar as melhorias geradas e a potência ganha com o resfriamento do ar admitido.

PALAVRAS-CHAVE: Intercooler, Charge Air Cooler, Densidade do ar, Turbocompressor, Performance, Preparação Turbo, Temperatura do ar, Sobrealimentação, Eficiência.

ABSTRACT

The vast majority of Otto Cycle internal combustion engines operate naturally aspirated, without the use of artifice to capture a greater amount of mass of air to the engine. However, with the advancement of technology and the need to increase the power of the engine and at the same time reduce consumption and emissions, the use of turbochargers began to spread. In the world of preparations the modification of naturally aspirated engines to supercharged is widely used, but is not always applied resulting in the best efficiency of the vehicle. Therefore, the objective of this work was to study the implementation of an intercooler in a vehicle adapted to a supercharging, analyzing how the air density behaves when pressurized and cooled, in order to verify the improvements generated and the power gained with the cooling of the admitted air.

KEY WORDS: Intercooler, Charge Air Cooler, Air density, Turbocharger, Performance, Turbo preparation, Air temperature, Supercharging, Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Funcionamento dos 4 tempos de um MCI.....	19
Figura 2 – Componentes do sistema de admissão de um MCI.....	20
Figura 3 – Componentes do sistema de gás de escapamento.....	24
Figura 4 – Consumo específico e torque versus variação de valores de lambda em rotação e cargas constantes	26
Figura 5 – Fluxo de gases no turbocompressor	28
Figura 6 – Disposição do turbo e intercooler no funcionamento do motor	29
Figura 7 – Intercooler instalado em um veículo modificado	30
Figura 8 – Demonstração da expansão do ar pressurizado no interior do intercooler	32
Figura 9 – Intercooler do tipo ar/ar	35
Figura 10 - Corte frontal de um Intercooler ar/ar com duto retangular de labirintos brasados.....	36
Figura 11 – Intercooler do tipo ar/água do veículo Up!TSI	37
Figura 12 – Propaganda da DKW sobre a aerodinâmica de seu veículo	39
Figura 13 – Projeção computadorizada da aerodinâmica do novo Ford GT	41
Figura 14 – Veículo utilizado (Gol LS 1986) em teste no dinamômetro	44
Figura 15 – Intercooler ar/ar utilizado no veículo.....	48
Figura 16 – Gráfico de torque e potência do teste 2	52
Figura 17 – Gráfico de torque e potência do teste 3	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Efeito da temperatura na densidade do ar	22
Tabela 2 – Condutividade térmica dos materiais.....	31
Tabela 3 – Testes sem intercooler	51
Tabela 4 – Testes com intercooler	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área
Atm – Unidade atmosfera
Bar – Unidade de pressão
CAC – Charge air cooler
Cm³ – Centímetro cúbico
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
CV – Cavalo vapor
ECU – Unidade de controle eletrônico
FA – Fluido ativo
Ft³/min – Unidade de pés por minuto
G – Gramas
HC – Hidrocarbonetos
H₂O – Água
IC – Intercooler
J/ kg K – Unidade de Joule por quilos e kelvin
K – Unidade de temperatura em Kelvin
k – Condutividade térmica
Kgf/m³ – Quilograma força por metro cúbico
MAF - Sensor de fluxo de massa de ar
MCI – Motor de Combustão Interna
N – Nitrogênio
NO_x – Óxido Nitroso
Pa – Unidade de pressão Pascal
Pci - Poder calorífico inferior
PMI – Ponto Morto Inferior
PMS – Ponto Morto Superior
Pol³ – Unidade de polegada cúbica
Q – Quantidade de calor
RPS – Rotações por segundo
RPM – Rotações por minuto
TWI - Tread Wear Indicator

LISTA DE SÍMBOLOS

e – Espessura

$\Delta\Theta$ – Delta de Temperatura

Δt – Delta de Tempo

\varnothing – Diametro

λ - Lambda

$^{\circ}\text{C}$ – Graus celsius

N_i - Potência Indicada

m_a : - Vazão mássica de ar seco que escoa para dentro dos cilindros

F - Relação combustível - ar estequiométrica

η_t - Eficiência térmica do motor

η_v - eficiência volumétrica

m_e - vazão mássica de mistura fresca que escoa para dentro dos cilindros

ρ_e - densidade de mistura ar/combustível admitida para os cilindros

n - rotação do motor

V - cilindrada total do motor

V - volume

ρ_a : densidade ou massa específica do ar seco

p – pressão

R – constante específica do gás para o ar

T – Temperatura absoluta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos	16
1.2 Formato do projeto.....	17
2 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE CICLO OTTO (MCI).....	18
2.1 Funcionamento do MCI.....	18
2.2 Sistemas de admissão ar.....	19
2.3 Temperatura de admissão com influência na densidade do ar	21
2.4 Sistema de gás de escapamento	23
2.5 Mistura ar/combustível	25
3 TURBOCOMPRESSOR.....	27
3.1 Funcionamento do turbocompressor.....	27
3.2 Disposição do turbocompressor no sistema do MCI.....	28
3.3 Turbocompressor utilizado no projeto.....	29
4 INTERCOOLER	30
4.1 Funcionamento do intercooler	31
4.2 Tipos de intercooler	34
4.2.1 Intercooler do tipo ar/ar	35
4.2.2 Intercooler do tipo ar/água.....	37
4.3 Disposição no sistema de sobrealimentação	38
4.4 A relação densidade do ar x potência	41
5 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	43
5.1 Veículo de teste	43
5.1.1 Cálculos do intercooler ideal	45
5.1.2 Intercooler utilizado	48
5.2 Equipamentos utilizados para análise.....	49
5.2.1 Preparação do teste	49
5.2.2 Condicionamento para o teste.....	50
5.3 Análise dos resultados obtidos sem CAC	51
5.4 Análise dos resultados obtidos com CAC	53
5.5 Rendimento do intercooler	54
6 CONCLUSÃO	56
7 PROPOSTAS FUTURAS.....	57

7.1 Turbo e intercooler em motores naturalmente aspirados equipados com injeção multiponto sequencial	57
7.2 Monitoramento e calibração da pressão de combustível durante os regimes de lag e turbo carregando	57
8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1 INTRODUÇÃO

O mercado automotivo cresce exponencialmente, e no Brasil, o motor de combustão interna de ciclo Otto, tem sido o modelo mais utilizado para produção de veículos de passeio.

O modelo de motor Otto, vem sofrendo alterações tecnológicas dos mais variados tipos, junto com o avanço da tecnologia, e um dos conceitos mais atuais já existentes no país é o conceito de *downsizing*, motores com capacidade volumétrica menor, porém mantendo o mesmo nível (em alguns casos até com ganhos) de torque e potência, e ao mesmo tempo reduzindo drasticamente os níveis de emissões gerados pela combustão do veículo.

Afim de atingirem um ganho no nível de potência e diminuir as emissões de gases, as montadoras buscaram soluções em meios a tecnologias mais recentes, um exemplo disso, se dá pelo uso de injeção direta de combustível (antes eram usadas apenas visando alta potência e esportividade), como forma de utilização dos sistemas do ar admitido sobrealimentado, ou seja, a admissão de ar pressurizado, visa aumentar a quantidade de ar admitido, aumentando assim, a quantidade de combustível injetado.

Como toda tecnologia, os motores também passam por um processo de recaída na utilização no processo produtivo, visto que as montadoras estão utilizando cada vez mais o sistema de sobrealimentação por turbocompressor, afim de aumentar a potência e torque de seus motores.

Os motores Ciclo Otto fabricados antigamente, sofreram algumas alterações de melhorias, por conta disso, muitos proprietários de veículos preferem manter seus carros, modificando-os para uma sobrealimentação, em vez de trocar de veículo.

1.1 Objetivos

Esse trabalho tem por objetivo, realizar de primeiro momento uma análise teórica dos motores ciclo Otto, principalmente ao que se refere a parte de admissão de ar dos veículos e que tenham sido sobrealimentados por meio de um turbocompressor.

Após a esse estudo teórico, será realizada a parte prática referente a densidade do ar que é admitido no motor que tem a saída do turbocompressor ligada no coletor de admissão, e esse teste será relacionando com uma análise detalhada da utilização de um resfriador de ar, conhecido como CAC (Charge Air Cooler) ou, intercooler, responsável em fazer o resfriamento do ar que sai da carcaça do turbocompressor antes de ser admitido pelo coletor de admissão.

O principal objetivo deste trabalho é demonstrar de forma prática, por meio de testes em dinamômetro, o ganho em eficiência de um veículo modificado, através das curvas de torque e potência aferidos em dinamômetro de rolos, sendo o ganho de eficiência em performance adquirido através de um CAC.

1.2 Formato do projeto

O projeto será desenvolvido em três etapas. Na primeira, será feito um detalhamento teórico sobre a parte de escape e admissão de ar de um motor de Ciclo Otto, já fazendo uma relação dos dois processos citados com a utilização de um turbocompressor.

Na segunda parte do projeto, será realizado um estudo teórico voltado para: a análise da densidade do ar admitida pelo motor, cálculo da interferência da temperatura do ar na potência, e o correto dimensionamento de um intercooler para um carro preparado com turbocompressor.

No último momento, será realizada uma análise prática para comprovação da teoria, onde será dimensionado e instalado um intercooler no sistema de sobrealimentação de um carro preparado.

O carro será testado primeiramente sem o intercooler, e testado novamente após a implantação do componente, visando gerar um relatório comparativo da utilização de um intercooler, sobre mudanças em regime de funcionamento e aumento de torque e potência.

2 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)

Este capítulo apresenta o que é e como é o funcionamento de um motor de combustão interna, demonstrando o funcionamento de dois sistemas importantes em sua aplicação que são o sistema de admissão de ar e o sistema de gás de escapamento e como a temperatura de admissão e a mistura ar/combustível fazem diferença.

2.1 Funcionamento do MCI

O Motor de Combustão Interna ou MCI é uma máquina térmica que realiza a transformação do calor gerado pela combustão da mistura ar/combustível, denominada também como “fluido ativo” (FA) no interior do cilindro, em trabalho para a movimentação dos cilindros que não estão em fase de combustão obtendo energia mecânica que será transmitida para a movimentação das rodas do veículo.

Um MCI pode ser classificado de três maneiras quanto à forma de se obter trabalho, sendo: motores alternativos, motores rotativos ou motores de impulso. Como neste trabalho será utilizado um MCI alternativo, somente se focará no seu funcionamento.

Motores alternativos são aqueles que o trabalho é obtido através da movimentação vertical para cima e para baixo de um pistão, originando quatro tempos distintos de operação no motor gerando um movimento que é transformado em uma rotação contínua pelo sistema biela – manivela. Os quatro tempos de funcionamento do motor são:

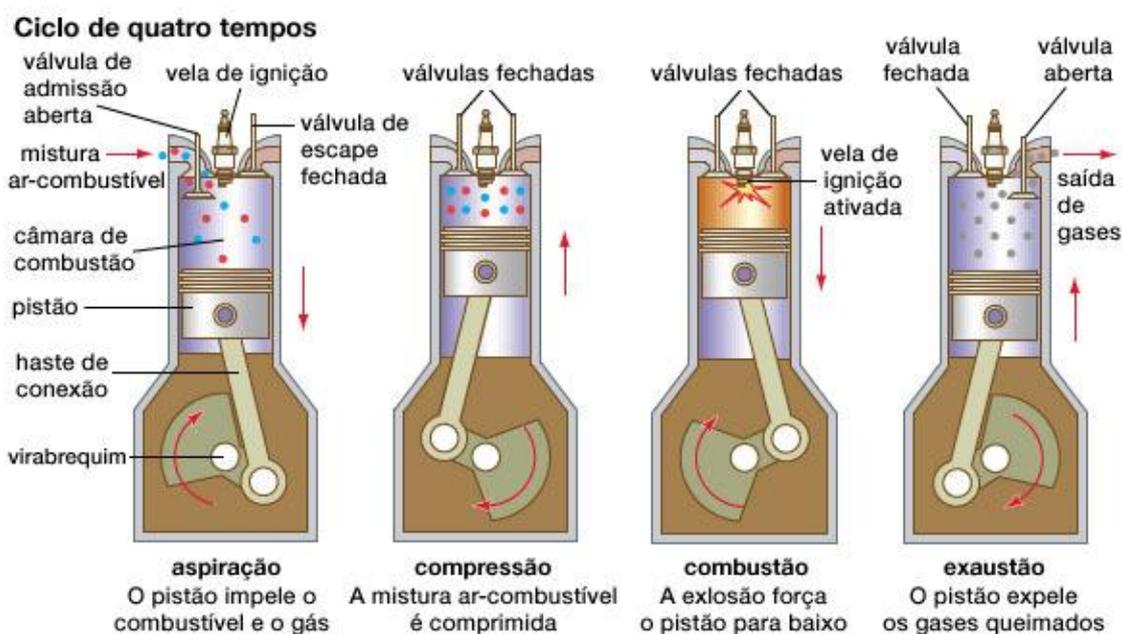
Tempo de admissão: Quando ocorre a abertura da válvula de admissão, permitindo a entrada do ar e combustível para dentro do cilindro. Proveniente da movimentação do pistão do Ponto Morto Superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI).

Tempo de compressão: Quando ocorre a compressão da mistura ar/combustível na câmara de combustão dentro do cilindro, poucos graus antes do pistão chegar ao PMS. Neste tempo a válvula de admissão e a válvula de escape encontram-se fechadas e a combustão é gerada pela centelha da vela de ignição. Tudo ocorre durante a movimentação do pistão do PMI para o PMS.

Tempo de expansão: Quando ocorre a expansão dos gases resultantes da combustão da mistura ar/combustível dentro do cilindro. Essa expansão movimenta o pistão do PMS para o PMI, essa movimentação gera o ciclo de trabalho útil devido à força aplicada no pistão.

Tempo de escape: Quando ocorre a expulsão dos gases provenientes da combustão da mistura ar/combustível de dentro do cilindro. A válvula de escape é aberta e o pistão se movimenta do PMI para o PMS empurrando os gases que saem pela válvula.

Figura 1 – Funcionamento dos 4 tempos de um MCI



Fonte: Educação automotiva.

2.2 Sistema de admissão de ar

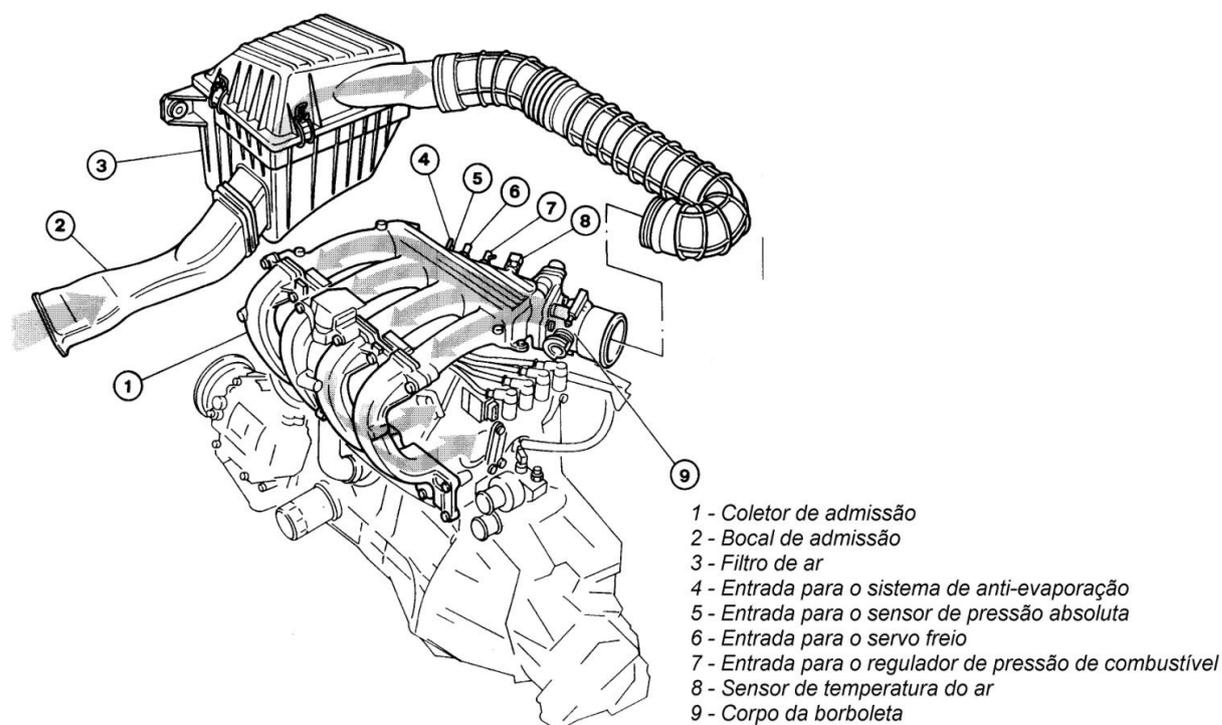
O desempenho do MCI é completamente ligado com a quantidade de ar que é admitido e encaminhado para o interior do cilindro, pelo fato de que quanto maior for a massa de ar admitida, maior será também a quantidade de combustível adicionado para a combustão da mistura.

O sistema de admissão tem alguns compromissos com o funcionamento do motor, esse sistema deve captar um ar com temperatura menor que o ar dentro do cofre do motor, filtrar o ar, controlar a quantidade de ar admitido e distribuir o ar igualmente entre todos os cilindros.

A geração do fluxo de ar para o interior dos cilindros no tempo de admissão é ocasionado em função da pressão negativa entre o coletor de admissão e o cilindro. Essa pressão é resultante do deslocamento do pistão do Ponto Morto Superior para o Ponto Morto Inferior, gerando uma depressão no interior do cilindro.

O fluxo de ar passa por alguns componentes presentes no sistema de admissão antes de entrar no cilindro. Esse sistema é originalmente constituído de um filtro de ar, corpo borboleta, coletor de admissão e os dutos que permitem a interação entre os componentes. Como é possível visualizar na figura 2.

Figura 2 – Componentes do sistema de admissão de um MCI



Fonte: EBAH – Apostila de motores de combustão interna ciclo Otto - Parte 1.

Os dutos funcionam como elementos de conexão entre os outros componentes e também possuem a função de coletar o ar em pontos de temperatura mais próxima ao ar ambiente. O filtro tem como objetivo filtrar o ar admitido, impedindo que elementos não desejáveis sejam aspirados. O corpo da borboleta controla a quantidade de ar que será admitida, sendo comandado pela Unidade de Controle Eletrônica (ECU) do veículo, e o coletor como ultimo componente desse sistema faz a distribuição do ar para os cilindros do motor.

Dentre os objetivos desse sistema um dos mais importantes é conduzir um ar com temperatura mais próxima à temperatura ambiente. Devido essa necessidade da temperatura de admissão a abertura do duto é localizada normalmente na porção inferior interna dos para-lamas, em um dos cantos do cofre do motor ou atrás das grades frontais.

2.3 Temperatura de admissão com influência na densidade do ar

A temperatura do ar na admissão é de grande importância para o funcionamento do motor, pois existe uma relação direta entre a influência da temperatura e a densidade do ar. Conforme a teoria geral da lei dos gases ideais é possível encontrar o valor da densidade do ar com base na temperatura e pressão. Conforme Brunetti (2012) a densidade pode ser expressada com base na seguinte fórmula:

$$\rho = \frac{p}{R T}$$

Onde: ρ – densidade do ar

p – pressão (Pa)

R – constante específica do gás para o ar (J/ kg K)

T – Temperatura absoluta (°C)

A constante específica para o ar é de 287,058 (J/ kg K), assim sendo necessário medir os valores de pressão (Pa) e temperatura (°C) para encontrar o valor de densidade na condição analisada.

É possível verificar a influência direta da temperatura na densidade na tabela seguinte, figura 3, onde com o aumento de temperatura a densidade diminui e com a diminuição da temperatura a densidade aumenta, os dados da figura 3 foram baseados em uma pressão ao nível do mar, sendo a pressão igual a 1 atm ou 101,325 kPa.

Tabela 1 – Efeito da temperatura na densidade do ar

Temperatura T em °C	Densidade do ar ρ em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
+35	1,1455
+30	1,1644
+25	1,1839
+20	1,2041
+15	1,2250
+10	1,2466
+5	1,2690
0	1,2922
-5	1,3163
-10	1,3413
-15	1,3673
-20	1,3943
-25	1,4224

Fonte: Adaptado pelo autor

A densidade também pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$D = \frac{m}{v}$$

Onde: D – densidade do ar (g/cm^3)

m – massa (g)

v – volume (cm^3)

De maneira que quanto maior a temperatura na admissão as moléculas do ar se expandem diminuindo a concentração delas em um mesmo volume, assim tendo uma massa menor para um volume maior. E de maneira contrária, quando há uma temperatura menor as moléculas presentes no ar irão tender a ficarem mais próximas, aumentando a presença delas em um mesmo espaço, ou seja, uma massa maior para o mesmo volume.

2.4 Sistema de gás de escapamento

Em todas as aplicações para os motores de combustão interna é de suma importância a utilização de um sistema que colete os gases resultantes da combustão realizando a descarga desses de maneira correta. O sistema de gás de escapamento possui condições que devem ser cumpridas, garantindo seu bom funcionamento e do MCI, sendo:

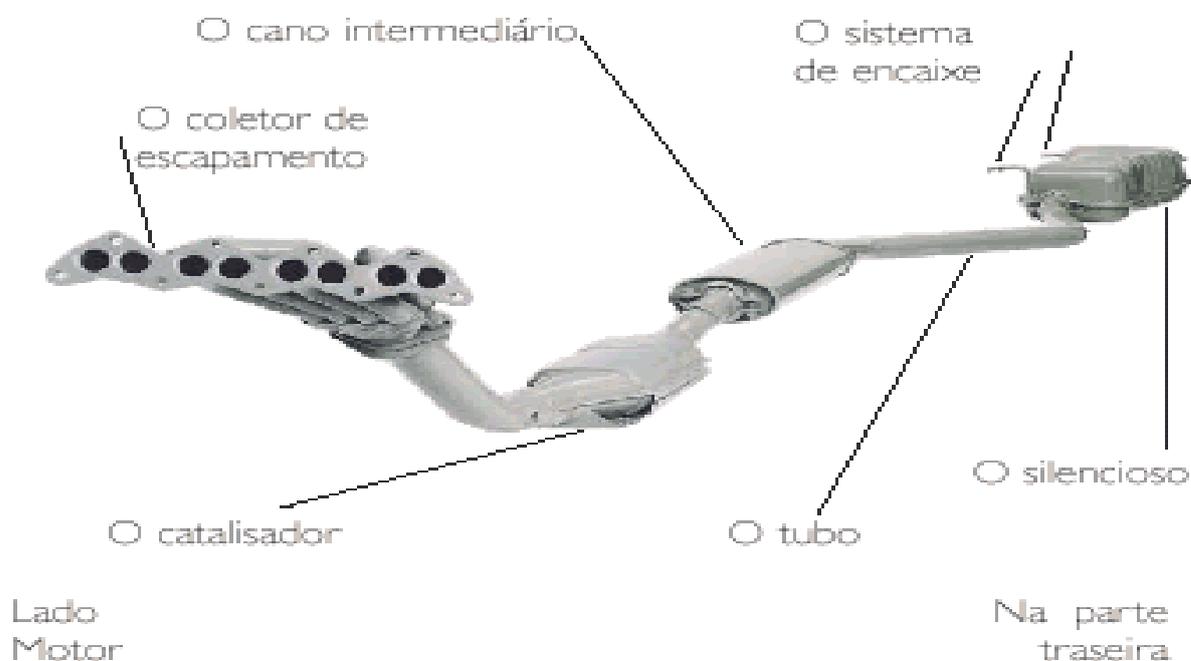
- Conduzir os gases de combustão para fora do motor
- Reduzir o ruído do fluxo do ar
- Tratar os gases da combustão
- Causar perda mínima de potência

Conforme a figura 3 o sistema de escape é constituído dos seguintes componentes:

- Coletor
- Componentes para tratamento do gás de combustão
- Componentes para absorção de som
- Sistema de tubulações que conectam os componentes

Esses componentes são geralmente fabricados com aços de alta liga devido aos esforços extremos que ocorrem no interior deste sistema.

Figura 3 – Componentes do sistema de gás de escapamento



Fonte: Arquivo de Marco Aurélio Fróes

O coletor direciona os gases de combustão dos orifícios de saída do cilindro para o sistema de escapamento. Os conversores catalíticos servem para o tratamento dos gases, transformando as substâncias do gás que são óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) em dióxido de carbono (CO_2), vapor d'água (H_2O) e nitrogênio (N).

Os silenciosos servem para uniformizar as pulsações do gás para torná-las as mais inaudíveis possíveis. Os tubos são elementos de conexão, conectando o conversor catalítico e os silenciosos.

O processo de descarregamento dos gases pode ser dividido em duas fases. A primeira é quando a válvula de escape é aberta, assim os gases saem do cilindro e se expandem para o coletor, isso ocorre devido a alta pressão acumulada dentro do cilindro. Na segunda fase, os gases que ainda se encontram no interior do cilindro são empurrados para a saída na válvula de escape devido ao movimento do pistão de PMI para o PMS.

Depois que o coletor direciona os gases da combustão, esses passam por todos os componentes do sistema, até o fim onde são expulsos para a atmosfera.

2.5 Mistura ar/combustível

A formação da mistura ar/combustível se dá através do ar ambiente e do combustível contido no tanque do veículo de forma a garantir o funcionamento do motor independente das condições de uso. A melhor relação de mistura para MCI é a qual o motor forneça a maior potência com o menor consumo de combustível, obtendo o menor consumo específico. Porém como a mistura é dependente de fatores como a densidade do ar admitida, rotação e regime de carga do motor, há situações em que o consumo específico não é o menor possível.

Segundo informa Garcia (2017), a relação da mistura ar/combustível é representada pela letra grega lambda (λ) seguindo uma proporção em massa definida pela razão entre a massa de ar e a massa de combustível, admitidos pelo motor durante o regime de admissão. Estabelecendo que quando valor de lambda é maior que 1 ($\lambda > 1$) a mistura é intitulada de pobre, quando o valor de lambda for menor que 1 ($\lambda < 1$) é intitulada de rica, e quando o valor de lambda for igual a 1 ($\lambda = 1$) a mistura é nomeada de estequiométrica. Em todos os casos é importante a homogeneização da mistura do vapor de combustível no ar garantindo uma combustão ideal, onde todo o combustível é queimado.

Além da mistura estequiométrica, são definidos quatro tipos fundamentais de mistura, sendo: limite de mistura pobre, mistura econômica, mistura de máxima potência e limite de mistura rica.

O limite de mistura pobre é definido por uma mistura com excessiva falta de combustível, dificultando a propagação da chama na câmara de combustão. Nesta situação a chama se propaga excessivamente lenta, se mantendo durante grande parte do ciclo de expansão, podendo continuar ativa até o início da admissão da mistura do próximo ciclo, gerando o superaquecimento no cilindro o que pode ocasionar a queima da mistura já no processo de admissão. É uma situação indesejada para o motor, pois o mesmo se torna instável e de difícil controle de admissão.

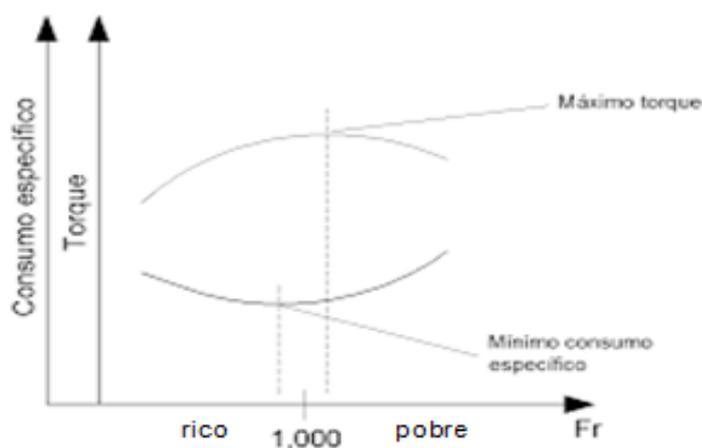
A mistura econômica é caracterizada por ser levemente pobre, em uma situação em que ocorre a combustão completa do combustível, propiciando um menor consumo de combustível. Porém esta mistura gera um elevado aquecimento da câmara de combustão e do sistema escape de gases, além da formação de NO_x . Em alguns casos é necessário fazer o enriquecimento de combustível na mistura para proteger outros componentes do motor.

A mistura de máxima potência é o contrário da mistura econômica, é uma mistura levemente rica, utilizada para garantir melhor rendimento em potência do motor havendo uma maior interação das moléculas de oxigênio com o combustível. Essa mistura pode acarretar em uma maior proporção de CO e HC no resultado da combustão.

O limite de mistura rica é a situação em que ocorre grande injeção de combustível na mistura, gerando o excesso do mesmo e dificultando a propagação da chama, pois parte do combustível não é queimado, o que resfria a câmara de combustão extinguindo a chama. Outro resultado dessa mistura que pode ocorrer é parte do combustível condensar nas paredes do cilindro e diluir o óleo lubrificante, gerando desgaste prematuro de componentes do motor. Ultrapassando esse limite de mistura pode acarretar no não funcionamento do motor.

A figura 4 mostra a variação do consumo específico de combustível e do torque do motor em função da qualidade da mistura para uma determinada rotação e carga do motor.

Figura 4 – Consumo específico e torque versus variação de valores de Lambda em rotação e cargas constantes



Fonte: FAGGI, Rodrigo, 2012.

É possível analisar através da imagem que quanto menor for o valor de consumo específico maior será o rendimento do motor. Assim o consumo de combustível não constante para cada rotação e carga do motor.

3 TURBOCOMPRESSORES

Este capítulo discerne sobre o funcionamento do turbocompressor em uma utilização em um MCI, como ocorre a admissão do ar por meio deste, seguido sobre a disposição desse componente no compartimento de proteção do motor. O turbocompressor e a disposição no veículo utilizado.

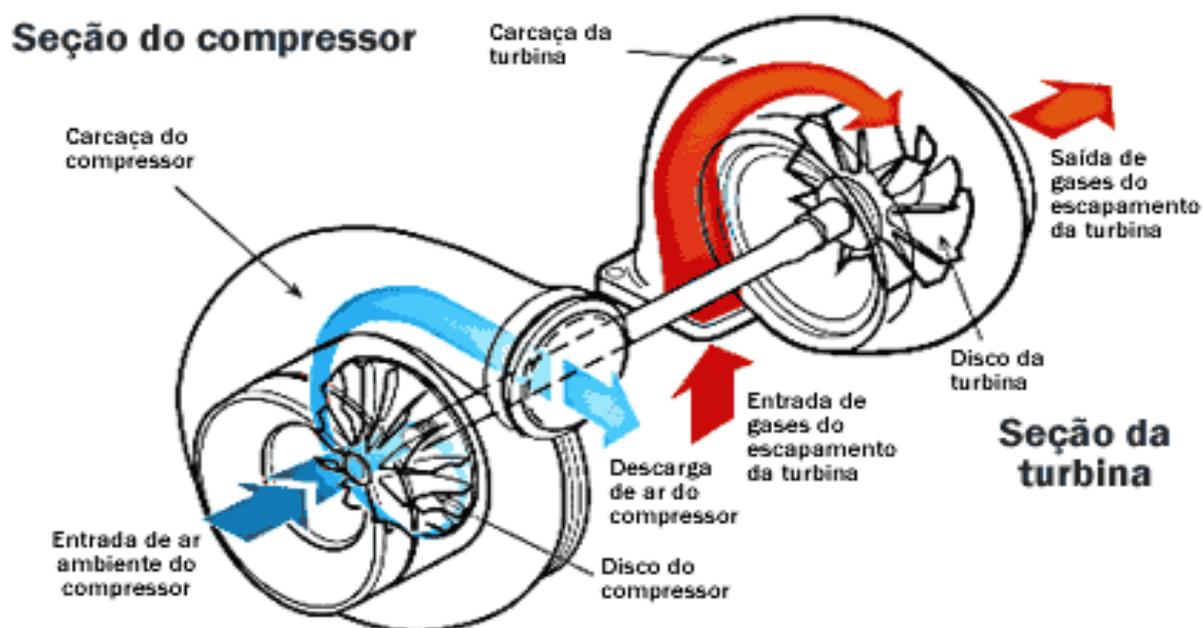
3.1 Funcionamento do turbocompressor

Os motores que são sobrealimentados apresentam características de funcionamento e rendimento diferentes de motores que são naturalmente aspirados. Os sobrealimentados apresentam valores de torque (kgf/m^3) e potência (CV) superiores quando comparados com motores de mesma capacidade volumétrica, e em alguns casos superiores a sua capacidade volumétrica. Essa diferença ocorre principalmente pela utilização do turbocompressor, que aumenta a massa de ar admitida nos cilindros do motor. O motor aspirado não possui este auxílio, sendo a quantidade de ar admitido proveniente somente pelo movimento descendente do pistão.

Um turbocompressor é um componente mecânico, que utiliza os gases que são gerados pela combustão da mistura ar/combustível, como energia para comprimir o ar que é admitido para dentro do motor, quando se comprime o ar aumenta-se a pressão do mesmo, que é admitido para os cilindros do motor do veículo.

O turbo é composto por duas partes, uma é a carcaça do compressor, que fica ligada em conjunto com o sistema de escape e a outra é a carcaça da turbina, que é ligada ao sistema de admissão de ar, além de possuir um eixo interligando as duas carcaças, este eixo possui em suas extremidades rotores com pás em formato helicoidal, que tem como objetivo impulsionar o ar pelos dutos de suas respectivas carcaças. Podemos verificar todo esse conjunto na figura 5.

Figura 5 – Fluxo de gases no turbocompressor



Fonte: Turbo center

O movimento dos rotores do turbo acontece da seguinte maneira: os gases de escape passam pelo rotor que fica na parte quente do turbo, representada pelas setas vermelhas na figura 1, dentro da carcaça da turbina, movimentando o rotor, que por ser um eixo solidário transmite seu movimento para o rotor do compressor. Quando o rotor da carcaça do compressor começa a girar, impulsiona o ar que é admitido pelo motor, forçando a passar por sua carcaça, comprimindo o ar que aumenta a pressão e velocidade que está sendo admitido.

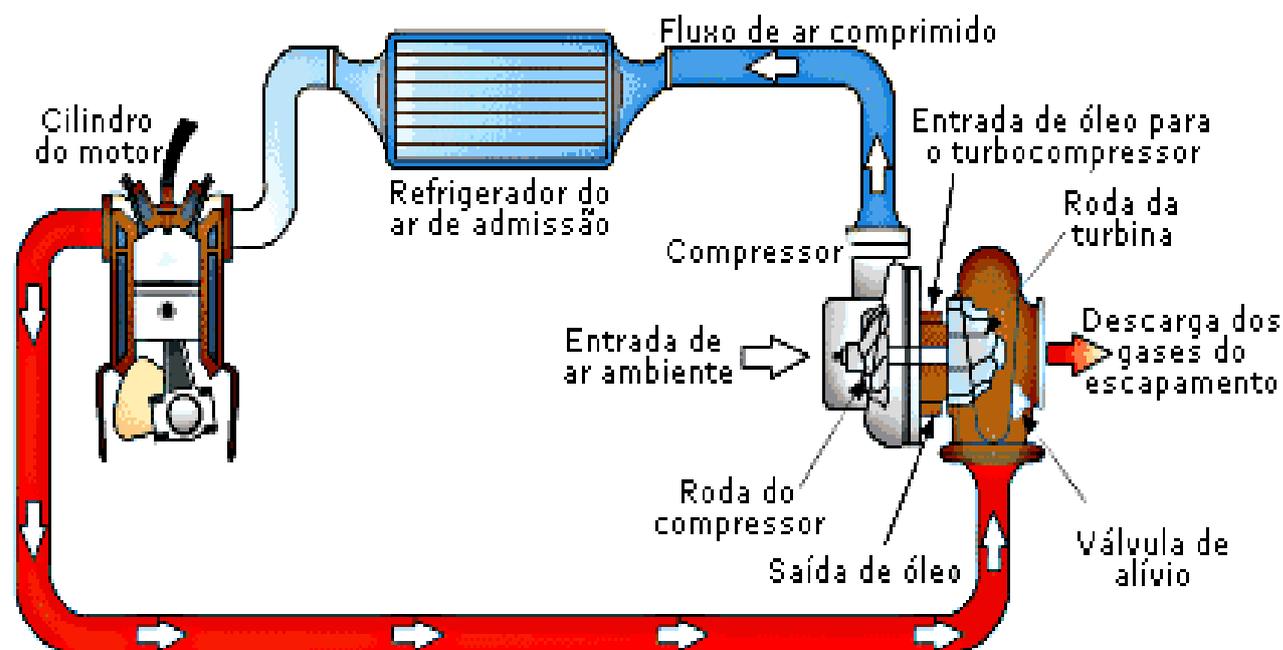
O aumento do fluxo de massa fornecido proporciona um desempenho melhorado do motor, além de reduções de emissões, economia de combustível e compensação da potência em condições de altitudes elevadas.

3.2 Disposição do turbocompressor no sistema do MCI

Os motores sobrealimentados utilizam uma disposição diferente no sistema de admissão. Nesses motores existe um componente a mais entre o filtro de ar e o coletor de admissão, o turbo. Assim o ar admitido após passar pela entrada de ar é encaminhado através da tubulação para o filtro de ar que tem como objetivo, impedir que impurezas não desejadas entrem no motor. Após o filtro, o ar é

comprimido pelo rotor do compressor, seguindo para um resfriamento no intercooler, pois a compressão do ar, devido a lei dos gases ideal resulta em um aumento da temperatura do ar que não é desejada, além da radiação de temperatura da carcaça da turbina para a carcaça do compressor, assim para um melhor rendimento do motor utiliza-se o intercooler diminuindo a temperatura, em seguida o ar é direcionado para a câmara de combustão, passando pelo processo de 4 tempos do motor (admissão, compressão, expansão e escape), após esse processo são gerados os gases de escape, resultantes da queima da mistura ar/combustível, com o fluxo dos gases de escape, ocorre o movimento do rotor da carcaça da turbina e seguem para o sistema de escape. Todo esse processo é demonstrado na figura 6.

Figura 6 – Disposição do turbo e intercooler no funcionamento do motor



Fonte:Turbo center

3.3 Turbocompressor utilizado no projeto

No veículo utilizado para os testes de comprovação dos ganhos em performance associados ao intercooler, sendo englobados a partir do capítulo 5, utiliza-se um turbocompressor com o objetivo de aumentar o fornecimento em potência e torque do motor. Assim o Volkswagen Gol 1.6 1986, originalmente com 81 CV e 12,8 kgf/m obteve mais rendimentos. Pelo fato deste veículo utilizar um

sistema de admissão por carburador, a disposição do turbo em seu sistema se difere um pouco, quando comparado com um veículo com injeção eletrônica.

4 O INTERCOOLER

A instalação de um turbocompressor, seja na fase de projeto de algum motor que saia de fábrica sobrealimentado, seja na adaptação em algum veículo naturalmente aspirado, demanda a colocação de diversos componentes adicionais para seu correto e visando seu melhor funcionamento, para ganhos de potência, torque, dirigibilidade e, nos carros downsizing, melhorar a eficiência energética do carro.

Um dos componentes que é instalado no sistema de sobrealimentação do carro é o Intercooler, figura 7, também conhecido como Charge Air Cooler na linha Diesel. Esse dispositivo, geralmente fabricado em alumínio, é instalado com a principal função de retirar calor do ar que vem pressurizado pelo turbocompressor, deixando o ar mais frio para ser admitido nos cilindros.

Figura 7 – Modelo de intercooler ar/ar para Gol e Parati 1.0 16V Turb



Fonte: SPA Turbo

4.1 Funcionamento do intercooler

O sistema de sobrealimentação, quando pressurizado, faz com que o ar admitido pelo motor esteja muito mais quente do que o padrão de um motor naturalmente aspirado. Para que esse efeito de calor diminua, após o compressor é instalado o intercooler, que nada mais é que um radiador do sistema, fazendo a troca térmica de forma cruzada (quando os fluídos não entram em contato, porém realizam interações). Geralmente, para auxiliar o processo da troca térmica, o intercooler é produzido em alumínio, pois este material tem uma boa condutividade térmica, cerca de 205 W/m K como é possível observar na figura 8, e custo inferior se comparado à outros materiais.

Tabela 2 – Condutividade térmica dos materiais

Condutividade Térmica

Material	Condutividade Térmica (W/m K)*
Diamante	1000
Prata	406,0
Cobre	385,0
Ouro	314
Latão	109,0
Alumínio	205,0
Ferro	79,5
Aço	50,2
Chumbo	34,7

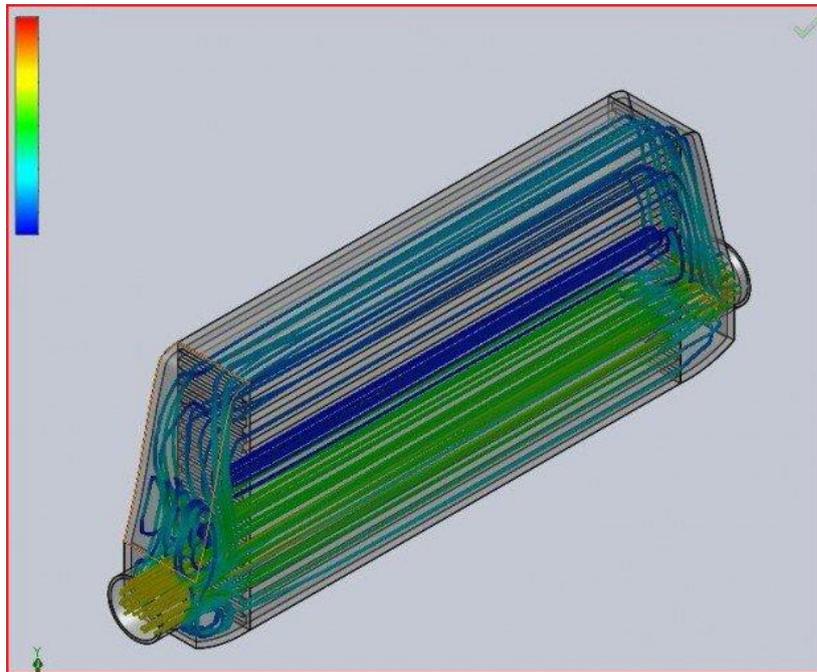
Figura: Adaptado pelo autor

Porém, como explica Bell (1997), é errado pensar que, ao se preparar um veículo com turbocompressor, é melhor ter qualquer intercooler do que deixar de ter um. Isso é uma ideia errada que a maioria dos preparadores possuem, pois como a

função do intercooler é resfriar o ar que sai aquecido do compressor, visando aumentar a densidade do ar e conseqüentemente a potência gerada, sempre que um carro for “intercoolado”, ele automaticamente será mais potente.

A questão disso é que, a tubulação de admissão, que sai da carcaça do compressor levando o ar para ser admitido, já gera uma troca térmica com o ambiente, pois seguindo a segunda lei da termodinâmica, “O calor sempre flui na direção de menor temperatura”, o que comprova a troca térmica já nos dutos. Porém, os mesmos por terem área de parede pequena, fazem com que a troca seja ineficiente. A função do intercooler nesse caso é aumentar drasticamente essa troca térmica, pois sua construção interna é feita gerando vários microdutos, que recebem o ar vindo da tubulação (área menor), colocando-o em uma área maior, e retornando o ar refrigerado a outro duto, este ligado ao corpo de borboleta ou carburador.

Figura 8 – Demonstração da expansão do ar pressurizado no interior do intercooler



Fonte: FlatOut

Com tudo isso fica a pergunta, se a troca térmica do ar vindo do compressor é boa para a potência, qual seria a desvantagem de usar um intercooler?

A resposta é, ao expandir a área dos dutos de admissão, automaticamente, é gerada uma perda de carga no ar, ou seja, se for utilizado um intercooler mal dimensionado, pode ocorrer uma perda de pressão interna de admissão, fazendo com que o efeito desejado pela instalação do turbocompressor não se concretize. Na figura 8 fica claro como o mau dimensionamento de um intercooler pode interferir no sistema. Analisando a imagem, nota-se que não existe uma divisão igualitária na passagem do ar, pois o mesmo, por efeito físico, sempre percorrerá o caminho mais fácil, ou seja, na porção inferior do componente o fluxo de ar não fará uma troca térmica eficiente, e na porção superior existe um turbilhonamento, fazendo com que se perca fluxo de carga.

Outro efeito gerado pelo mau dimensionamento do trocador de calor é o chamado “turbo lag”, que nada mais é que o atraso na resposta do turbo. Como detalha Sorokanich (2017), o turbo lag é o atraso na resposta do motor, calculado a partir do momento em que a borboleta é aberta (ou seja, a partir da ação do motorista), até o momento em que a pressurização chega no motor e ele reage. Esse atraso pode ser calculado da seguinte forma.

$$T = \frac{V}{F} \times \frac{60}{1728} \times 2$$

Onde temos:

T = Tempo de resposta do motor

V = Volume de ar admitido (pol³)

F = Quociente de vazão do ar, dependente da rotação onde a aceleração é dada (ft³/min).

A fração 60/1728 é uma razão de transformação de dados, pois a vazão está em minutos (60 segundos) e o volume em polegadas (1 pé cúbico equivale a 1728 polegadas cúbicas).

X2 é o fator de multiplicação dado pelo fluxo de ar ser dobrado ao alterar a carga de cruzeiro para plena potência.

Com esse cálculo podemos determinar a resposta do motor ao ser acelerado pelo motorista, e ao mesmo tempo podemos usar como indicativo de dimensionamento de um intercooler para o veículo.

4.2 Tipos de intercooler

Na hora do projeto de um veículo sobrealimentado, tanto original de fábrica quanto em uma preparação, quando forem realizados os estudos para determinação do melhor trocador de calor para o veículo, devemos levar em conta a forma como o calor será retirado, dependendo da demanda do sistema. Por conta disso, no mercado temos dois tipos de intercoolers.

Para fabricação dos intercoolers, dependendo do cálculo de dimensionamento, os quais serão feitos mais adiante no trabalho, como detalha da Silva (2008), tem como estrutura básica a montagem dos dutos de admissão de ar, e dentre os dutos são colocadas aletas em zigue zague (conforme foto acima), por onde o ar que vem da aerodinâmica do carro passa, gerando a troca térmica por meio do processo conhecido como condução térmica.

A condução térmica pode ser utilizada para determinar o funcionamento básico de um intercooler, pois, ao ter como característica principal o fato de realizar a troca térmica por meio das partículas, sem utilizar do transporte da matéria. O intercooler, ao realizar a troca térmica por meio do fluxo cruzado, ou seja, sem contato entre meios, demonstra perfeitamente essas regras de condutividade térmica.

Ainda utilizando das regras de condução térmica para definição de um intercooler, podemos usar para cálculo da quantidade de troca térmica realizada a fórmula desenvolvida por Jean-Baptiste Fourier. A conhecida como Lei de Fourier coloca que a quantidade de calor que atravessa um material sólido (Q) é igual às multiplicações da condutividade térmica do material (k em W/mk), área da secção transversal do componente (A em m^2), diferença de temperatura ($\Delta\theta$ em K) e tempo de troca térmica (Δt em s), e todos esses valores são divididos pela espessura da parede do componente (e em m). Com isso temos:

$$Q = \frac{K \times A \times \Delta\theta \times \Delta t}{e}$$

Ou seja, para determinação de um intercooler tipo ar/ar, é necessário se determinar primeiramente a espessura dos dutos de passagem do ar pressurizado, bem como a área transversal do intercooler, para definir a passagem de ar necessária pelas aletas para gerar o resfriamento necessário.

4.2.1 Intercooler do tipo ar/ar

O modelo de Intercooler com padrão de troca térmica ar/ar é o mais conhecido trocador de calor do mercado, principalmente no mercado de preparação. Construído em alumínio, é semelhante aos radiadores do líquido de arrefecimento, fabricado com dutos internos, por onde o ar que passa pelo turbocompressor e será admitido pelo motor percorre.

Figura 9 – Intercooler do tipo ar/ar



Fonte: Flaout

Como se pode ver na imagem acima, o intercooler tipo ar/ar segue a construção no formato com dutos, por onde ar que será admitido passa por dentro, e entre um duto e outro existem aletas em formato conhecido por serpentinado, ou seja, não seguem um padrão em linha reta e sim em zigue-zague, aletas essas por onde o ar que, seguindo a aerodinâmica do carro atravessa, fazem a condução do

calor que esquentas as paredes do duto interno pra fora do intercooler, resfriando o ar internamente.

Dentre as formas de produção dos dutos internos, como demonstra da Silva (2008), existe três tipos diferentes:

- Dutos estriados: É um padrão de eficiência de troca térmica baixa do mercado, pois seus dutos são retangulares, com bordas brasadas, e por conta disso as paredes são grossas, dificultando a condução térmica.
- Dutos com tubos expandidos: É o padrão com menor eficiência de troca térmica do mercado, pois seus tubos redondos fazem com que o ar entre em turbilhonamento, fazendo com que não tenha contato com a parede.
- Dutos retangulares com labirintos brasados: É o padrão mais eficiente em troca térmica, pois possuem paredes finas, e internamente existem aletas que tem função de fazer o ar passar o máximo possível pelas paredes, aumentando o rendimento.

Figura 10 – Corte frontal de um Intercooler ar/ar com duto retangular de labirintos brasados



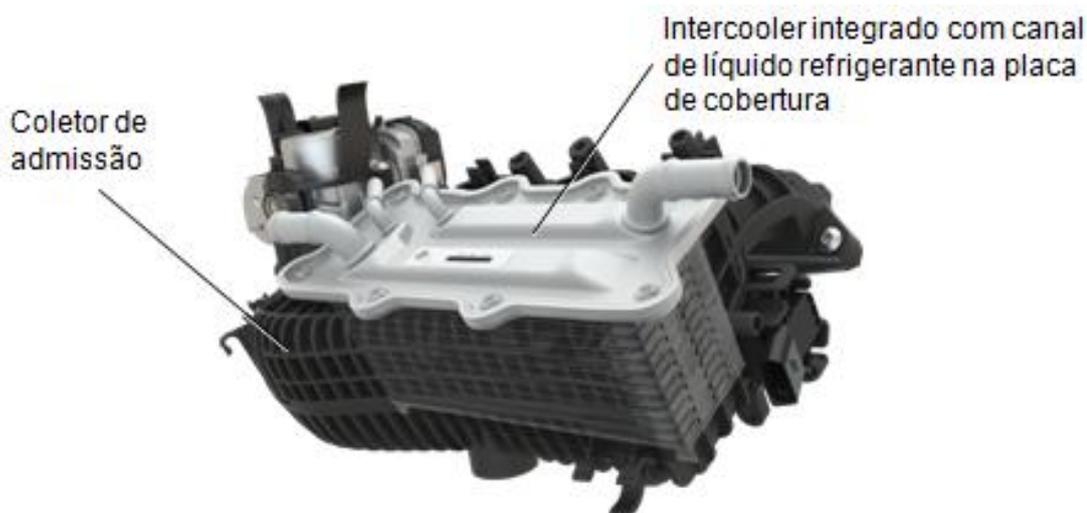
Fonte: DA SILVA, Anderson Moreira, 2008

4.2.2 Intercooler do tipo ar/água

O tipo de trocador de calor para linha de admissão de ar por troca térmica com a água é um projeto com ideal semelhante ao trocador do tipo ar/ar, porém, como se utilizado um fluido diferente, temos uma série de ganhos em relação o primeiro modelo, como detalha Passos (2017), ao se usar a água para gerar a troca térmica, temos um ganho no coeficiente global de transferência de calor, além do fato de facilitar no cálculo da troca térmica, pois a capacitância de troca térmica da água pode ser determinada conforme a quantidade de água que a bomba usada para realizar a passagem do líquido manda para o sistema.

Com esses dois benefícios em vista, conseguimos uma série de melhorias em relação aos trocadores ar/ar, como o fato de podermos diminuir o tamanho do intercooler, pois não é necessária uma grande área transversal para realizar a troca térmica, além do fato de, como o intercooler pode ter tamanho reduzido, fica mais fácil aproximar ele da admissão de ar do carro, diminuindo o tempo em que o ar leva para passar para dentro do coletor, diminuindo o tempo de resposta do sistema, ou seja, diminuindo o turbo lag citado anteriormente no trabalho.

Figura 11 – Intercooler do tipo ar/água do veículo Up! TSI



Fonte: Arquivo de Marco Aurélio Fróes

Esse modelo de intercooler, devido a seus diversos ganhos, começou a ser amplamente utilizado nos motores novos das montadoras, principalmente por

conta do padrão Downsizing, onde, para atingir níveis de emissões e potência estabelecidos no mercado, é necessário abrir mão de motores com cilindradas menores e sobrealimentação para ganhar potência. Visando um funcionamento linear com o turbocompressor, as montadoras usam o intercooler ar/água para diminuir o turbo lag do motor, e melhorar a troca térmica. Porém, intercoolers desse jeito, ao ser necessário a instalação de diversos componentes externos (bomba d'água, linha de refrigeração, reservatório para o líquido, entre outros), acaba não sendo utilizado nos projetos de preparação de veículos naturalmente aspirados com adaptação para sobrealimentação.

4.3 Disposição do intercooler integrado no sistema

O intercooler, por ser um trocador de calor por meio do contato entre um fluido e outro, de forma cruzada, ou seja, sem contato direto, apenas contato entre o material que os separa, necessita que sua disposição seja bem estudada, visando realizar a melhor troca térmica possível e ao mesmo tempo perder o mínimo possível de pressão do ar e velocidade do ar.

Essa análise da posição do intercooler é primordial principalmente para veículos que utilizem o intercooler do tipo ar/ar, pois este depende exclusivamente da capacidade de passagem de ar para realizar a troca térmica. Portanto, ao realizar o cálculo para dimensionar a capacidade de troca térmica, será necessário também realizar o cálculo da passagem de ar de acordo com a aerodinâmica do carro.

Todo veículo, por natureza, ao realizar movimento precisa vencer a resistência do ar para conseguir iniciar o seu movimento. Por isso, ao se realizar o projeto de um carro, é realizado o cálculo, dentre outras forças de resistência ao movimento, da força de resistência aerodinâmica. Com base nos conceitos obtidos nas aulas de ensaio dinamométrico inercial, essa força de resistência aerodinâmica pode ser determinada da seguinte forma:

$$FR_{ae} = \frac{\rho \times C_x \times A_f \times V^2}{2}$$

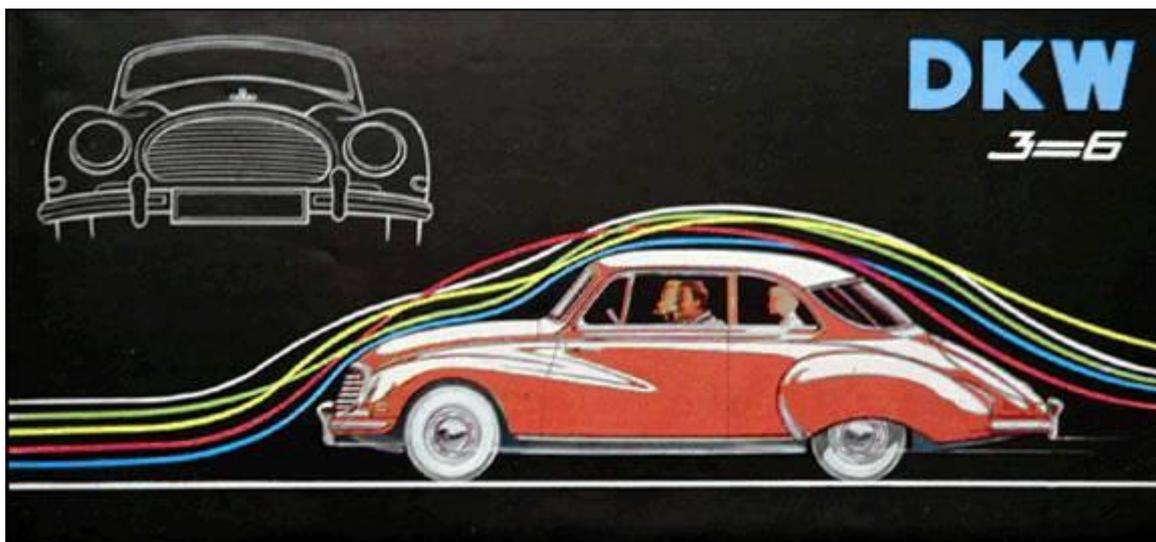
Onde temos:

- FRae: Força de Resistência aerodinâmica
- ρ : Densidade do ar (Kg/m^3)
- Cx: Coeficiente aerodinâmico do veículo
- Af: Área frontal do veículo (m^2)
- V: Velocidade do veículo (m/s)

Por essa fórmula, podemos determinar quanto de força o carro precisa fazer pra manter seu movimento “cortando” o ar, como observado na figura 12, dependendo da sua velocidade, densidade do ar ambiente e sua eficiência aerodinâmica (multiplicação da área frontal pelo coeficiente aerodinâmico).

Com a análise da força resistiva aerodinâmica, podemos realizar uma simulação de arrasto aerodinâmico realizado pelo veículo, pra verificar, de acordo com a forma do carro como o ar externo será atravessado pelo carro quando este estiver em velocidade. Essa análise de simulação, feita via softwares e via túnel de vento, têm por função analisar o comportamento do veículo aerodinamicamente, para determinar o coeficiente aerodinâmico e outras diversas informações.

Figura 12 – Propaganda da DKW sobre a aerodinâmica de seu veículo



Fonte: Nobres do grid

Para podermos verificar o melhor posicionamento de um intercooler do tipo ar/ar em um veículo, é necessário avaliar toda a sua aerodinâmica, podendo assim

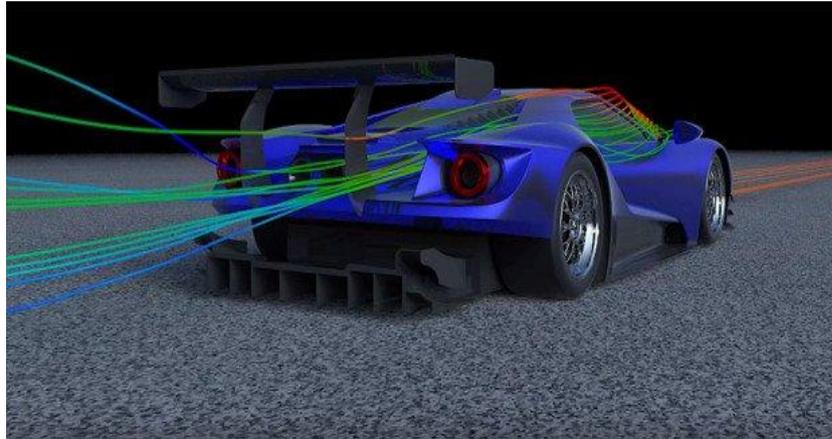
determinar por onde o ar passará com maior pressão e velocidade, ou seja, realizará a troca térmica com a admissão de forma mais rápida e fácil, fazendo com que todos os ganhos da instalação do intercooler sejam atingidos.

No mercado automotivo, tanto dos veículos projetados com sobrealimentação quanto dos preparados, o posicionamento comum do intercooler é na porção frontal do carro, principalmente em veículos com motor frontal, geralmente na porção inferior do para-choque, pois é exatamente na posição onde o veículo se encontra com a “parede” de ar, fazendo com que a maior pressão aerodinâmica se encontre naquela região.

Porém, existem diversos outros posicionamentos para o intercooler, dependendo principalmente da aerodinâmica e necessidade de troca térmica do veículo. Por exemplo, as picapes Nissan Frontier e Chevrolet S10, em seus modelos de primeira geração utilizavam o mesmo motor, fabricado pela MWM, de 2.8L Turbodiesel. Porém, a instalação do intercooler nas duas é em posições diferentes, tendo a S10 seu intercooler instalado na porção frontal, localizado atrás do radiador do arrefecimento, enquanto a Frontier tem seu intercooler instalado acima do motor, usando de uma abertura no capô pra realizar a passagem de ar pelo intercooler.

Os modelos de carros conhecidos como superesportivos, ou seja, carros que foram projetados visando o melhor desempenho possível, também contam com a instalação de seus intercoolers em outras posições, pois como geralmente são desenvolvidos com seus motores em posição central/traseira, toda a admissão de ar está na porção central/traseira do carro, por conta de seu desenho aerodinâmico, feito para atravessar o ar da forma mais fluida, se consegue com aberturas na traseira (conhecidas como entradas de ar) fazer a admissão de ar, refrigeração do motor e também pode ser instalado os intercoolers naquela região, é possível visualizar essa situação através da figura 13.

Figura 13 – Projeção computadorizada da aerodinâmica do novo Ford GT



Fonte: Flatout

Com tudo isso em vista, para conseguir a melhor troca térmica de um intercooler, além de todos os cálculos internos do intercooler, é de extrema importância para seu completo funcionamento a análise da aerodinâmica veicular, para assim determinar sua melhor localização e verificar os efeitos que sua instalação induz no funcionamento do motor.

4.4 A relação densidade do ar x potência

A potência indicada (N_i) de um motor é desenvolvida através do ciclo termodinâmico do fluido ativo, conforme Brunetti (2012), é expressa pela equação abaixo:

$$N_i = m_a F p_{ci} \eta_t$$

Onde temos:

N_i : Potência Indicada (KW)

m_a : Vazão mássica de ar seco que escoa para dentro dos cilindros (Kg)

F: Relação combustível - ar estequiométrica

p_{ci} : Poder calorífico inferior (KJ/Kg)

η_t : Eficiência térmica do motor

Assim é possível analisar que a vazão mássica de ar (m_a) é proporcional a potência indicada desde que se mantenha o mesmo combustível, uma relação combustível/ar constante e também a relação da compressão e o melhor avanço da faísca garantindo uma eficiência térmica quase constante.

Nos motores de combustão interna por centelha a variação para aumento de potência é feito através da variação de pressão de admissão, assim variando a vazão mássica de ar. Isso é possível verificar devidos aos vários tipos e dimensões de motores, como componentes para sobrealimentação.

A eficiência volumétrica do motor é definida através da relação entre a massa da mistura ar/combustível que entra no cilindro e massa que encheria o volume deslocado pelo cilindro, com a massa específica da atmosfera. Segundo Brunetti (2012), sendo representado pela fórmula abaixo:

$$\eta_v = \frac{2m_e}{\rho_e V n}$$

Onde:

η_v : eficiência volumétrica

m_e : vazão mássica de mistura fresca que escoar para dentro dos cilindros (kg)

ρ_e : densidade de mistura ar/combustível admitida para os cilindros (kg/m^3)

n : rotação do motor (rpm)

V : cilindrada total do motor (m^3)

O fator 2 é referente a um motor de quatro tempos no qual tem um tempo motor para duas voltas do virabrequim.

Como as massas de combustível, de vapor d'água e de ar seco ocupam o mesmo volume, é possível determinar que:

$$V = \frac{m_a}{\rho_a} = \frac{m_e}{\rho_e}$$

Onde:

V : volume

m_a : vazão mássica de ar seco admitido para os cilindros (kg)

ρ_a : densidade ou massa específica do ar seco (kg/m^3)

Assim, podemos substituir na equação de eficiência volumétrica, sendo escrita da seguinte forma:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a}{\rho_a V n}$$

Assim a eficiência volumétrica do motor fica determinada para qualquer condição de operação, quando determinada a \dot{m}_a através do sensor de fluxo de massa de ar (MAF) e a ρ_a .

Desta maneira é possível compreender como a densidade do ar tem influencia total na potencia de um motor, pois um ar mais denso significa mais massa de ar para o cilindro e assim baseando-se na formula de potencia indicada, o aumento da massa de ar é proporcional a potencia, significando mais potencia no motor.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

A partir deste capítulo começará o embasamento de toda a pesquisa conceitual introduzida neste trabalho até o momento. Realização de cálculos e reunião de informações para a utilização do melhor componente, no caso o que melhor satisfaça as necessidades do projeto, trabalhando de modo que permita a melhor perda de calor do ar admitido para os cilindros do motor e assim propiciar em uma maior captação de massa de ar.

O veículo utilizado terá sua performance de potência e torque analisada antes da implantação do intercooler, assim possibilitando a comparação desses dados serem confrontados com a segunda análise.

Os testes serão feitos através de um equipamento veicular próprio para esta análise, um dinamômetro de rolos, o qual permite uma análise precisa, sendo consideradas todas as perdas do sistema.

5.1 Veículo teste

O veículo utilizado nos testes é um Volkswagen Gol 1986, figura 14, modificado para sobrealimentação, utilizando uma pressão de 1,4 bar na admissão

de ar para o motor. Originalmente ele possui um motor aspirado com carburador, que fornece 81 cv de potência e 12,8 kgfm de torque. Porém após a preparação deste veículo sua performance foi alterada, evoluindo para valores muito acima do que possuía.

Figura 14 – Veículo utilizado (Gol LS 1986) em teste no dinamômetro



Fonte: Autor

Além da implantação do turbocompressor o veículo possui modificação no sistema de alimentação de combustível, não sendo mais via carburador e sim através de válvulas injetoras, monitoradas por um sistema eletrônico programável que permite um melhor controle da quantidade de combustível para a realização da combustão da mistura. Esse componente eletrônico também faz o monitoramento de temperatura e pressão de todo o sistema, possibilitando verificar as temperaturas de admissão de ar, temperatura do motor e pressão na turbina. O veículo também não possui catalisador e nem silenciadores no sistema de escape, permitindo um fluxo mais rápido dos gases para fora.

5.1.1 Cálculos do intercooler ideal

Quando se realiza um estudo para implantação de um sistema de sobrealimentação por turbocompressor em um veículo, se faz necessário também a análise de implantação de um intercooler, ou IC, para melhorar a eficiência de todo o sistema.

Porém, além de todos os estudos já demonstrados nesse presente trabalho (material de construção, tipo aplicado, troca térmica gerada, análise aerodinâmica) também se faz necessário o estudo da eficiência de troca térmica gerada, bem como o rendimento na densidade do ar que será admitido pelo motor, para assim avaliar o quanto o intercooler a ser instalado afetará na utilização do veículo turbinado.

Para realizar a análise da variação de densidade gerada pelo intercooler, deve-se avaliar a temperatura atmosférica, a temperatura pós compressão e a temperatura pós intercooler (temperatura de admissão). Com esses dados, conforme Bell (1997), temos:

$$Dai = \frac{T_o}{T_f} - 1$$

Onde:

Dai: Variação de densidade após IC (%)

To: Temperatura original (Temp. atmosférica absoluta + Temp. compressão)

Tf: Temperatura final (Temp. atmosférica absoluta + Temp. pós IC)

Com essa fórmula conseguimos verificar a mudança na densidade do ar que será admitida pelo motor, ou seja, a variação na quantidade de moléculas de ar que entrará para ser misturada com o combustível no motor.

Outra análise necessária é a da eficiência desejada para a melhor troca térmica realizada pelo IC, assim gerando o maior aumento na densidade do ar para o motor. Assim como a fórmula da variação de densidade, Bell (1997) coloca que:

$$Ei = \frac{T_{co} - T_{ic}}{T_{co} - T_a}$$

Onde:

Ei: Eficiência do intercooler (%)

Tco: Temperatura pós-compressão

Tic: Temperatura pós-intercooler

Ta: Temperatura ambiente

E por ultimo, até para comprovação de que o conceito de “qualquer intercooler é melhor do que nenhum” é errôneo, temos a análise de perda de carga interna, para garantir que a perda de pressão de compressão se mantenha entre 2 e 10 PSI (0,14 a 0,7 Bar, como é usual no Brasil), garantindo dessa forma um fluxo correto de ar da carcaça de compressão do turbocompressor para a admissão do veículo, dessa forma aproveitando o máximo em troca térmica e velocidade de fluxo, maximizando potência e torque. Com isso em mente, temos:

$$PC = 1 - \frac{Pt - P}{Pt}$$

Onde:

PC: Perda de carga (%)

Pt: Pressão total (Bar)

P: Perda de pressão (Bar)

Tendo essas três fórmulas, podemos calcular o melhor intercooler possível para cada aplicação.

Realizando alguns cálculos de verificação, tomando como dados uma temperatura atmosférica de 25°C, uma temperatura pós-compressão de 70°C, temperatura de admissão de 42°C, pressão de compressão de 1,5 Bar (21,76 PSI) e perda de carga de 0,3 Bar (4,35 PSI), temos:

$$PC = 1 - \frac{1,5 - 0,3}{1,5}$$

Realizando o cálculo, obtemos uma perda de carga de 20% do que obteríamos sem o intercooler.

Esse dado é essencial para a compreensão de como o fluxo do intercooler pode interferir no funcionamento correto do intercooler, afetando a troca térmica pelo contato com as paredes, bem como auxiliando no correto acerto da eletrônica do motor, a partir da pressão controlada pela regulação da válvula wastegate da turbina, e a pressão final chegando ao plenum da admissão.

Com esses dados e informações geradas, realizamos a análise do intercooler ideal pela eficiência. Em teoria, o intercooler ideal teria uma eficiência de 100%, então com isso conseguimos avaliar qual a temperatura final conseguiríamos obter com esse IC:

$$1 = \frac{70^{\circ}\text{C} - T_{ic}}{70^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}$$

Ao realizar esse cálculo, obtemos uma temperatura de admissão ideal de 25°C, ou seja, a temperatura de admissão precisaria ser exatamente a temperatura ambiente. Como o MCI é uma máquina térmica, ou seja, a combustão gerada em suas câmaras de combustão gera calor, sabe-se que obter uma temperatura exatamente igual a temperatura ambiente é praticamente impossível, portanto, tomamos como base um valor de admissão de 42°C

A partir disso, temos:

$$E_i = \frac{70^{\circ}\text{C} - 42^{\circ}\text{C}}{70^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}}$$

Com esses dados, obtemos o resultado de 0,622, ou seja, um intercooler com 62% de eficiência na troca térmica.

Seguindo a lógica da inexistência da possibilidade de uma troca térmica 100% eficiente, seguimos com nossos dados para determinar a variação na densidade na admissão do MCI.

Importante ressaltar que, para a análise da densidade, é necessário a transformação para temperatura absoluta, ou seja, teremos a temperatura em Kelvin (K), fazendo com que na temperatura original o cálculo seja a temperatura de admissão somada ao acréscimo de temperatura pós-compressão (70°C – 25°C, resultando 45°C), bem como na temperatura final, a soma da temperatura de

admissão seja com diferença da temperatura após o intercooler (temperatura de acréscimo pós-compressão x eficiência de intercooler, ou $70^{\circ}\text{C} \times 0,622$, que resulta $27,9^{\circ}\text{C}$. A diferença é 45°C menos $27,9^{\circ}\text{C}$, que resulta $17,1^{\circ}\text{C}$).

$$D_{ai} = \frac{(273 + 25) + 45^{\circ}\text{C}}{(273 + 25) + 17,1^{\circ}\text{C}} - 1$$

Após esses cálculos iniciais e resolução da fórmula, obtemos um resultado de 0,088, ou seja, 8,8% de acréscimo na densidade do ar admitido pelo motor após a troca térmica gerada pelo intercooler.

5.1.2 Intercooler utilizado

Com base no capítulo anterior, 5.1.1. chegou-se na utilização de um intercooler do tipo ar/ar nas seguintes dimensões comerciais: 264mm altura x 339mm largura x 60mm espessura.

Figura 15 – Intercooler ar/ar utilizado no veículo



Fonte: Autor.

Este componente foi instalado atrás da grade frontal, junto ao radiador do motor de maneira a realizar a melhor troca térmica.

5.2 Equipamentos utilizados para análise

Para a realização dos testes foi necessário a utilização de alguns equipamentos para a melhor captação dos dados, permitindo a melhor análise. Os equipamentos fazem parte da instrumentação de medição do teste, permitindo análises da performance do veículo.

De início é necessário utilizar um manômetro para aferição das pressões dos pneus do eixo de tração, que deve ser de 85% da carga máxima do pneu. Durante o teste um termômetro ótico, para leitura de temperatura de pneus e temperatura do ar na entrada da turbina. Foi utilizado também o sistema eletrônico programável já instalado no veículo, sendo possível através dele, verificar os valores de temperatura do motor, temperatura de ar admitida e pressão na turbina.

O equipamento mais importante para o teste é o dinamômetro de rolos, o qual possui dois rolos para o apoio das rodas do eixo de tração, calculando através de formulas já inseridas em seu software o torque e potência do motor. Os dados captados são indicados através de um gráfico, indicando a relação de torque x RPM e potencia x RPM. Para determina a potência (cv) é relacionado o torque em um determinado regime de rotação, através da formula abaixo:

$$\text{Potência (cv)} = \frac{\text{Torque (N.m)} \times \text{Rotação (RPM)}}{7025,9}$$

5.2.1 Preparação do teste

Antes de iniciar o teste é necessário seguir algumas etapas. Primeiro o veículo foi erguido no elevador pneumático para a verificação dos pontos de apoio das cintas de segurança, a situações dos pneus foi verificada, visando a existência de elementos estranhos, profundidade dos sulcos comparando com o padrão TWI (Tread Wear Indicator), sua respectiva validade e os desgastes da banda de rolagem. Com o veiculo no solo o torque de fixação dos parafusos da roda foram

aferidos, verificando também as fixações da suspensão e dos cubos de roda e calibrando os pneus com 85% da pressão máxima aceitável do pneu.

Após essas etapas o veículo foi colocado no dinamômetro de rolos e acionado o freio de estacionamento, travando-o com as cintas de carga, cintas direcionais e sua roda traseira.

O veículo utilizado possui tração no eixo dianteiro, portanto as rodas desse eixo ficaram sobre os rolos do dinamômetro. Por fim o ventilador foi posicionado de maneira a direcionar o maior fluxo de ar para o radiador do motor.

5.2.2 Condicionamento para o teste

O condicionamento do teste é o conjunto de fatores físicos, climáticos e operacionais que colocaram o veículo na condição de ensaio permitindo a repetição do mesmo, atendendo aos requisitos para realização do ensaio. É necessário atender a três requisitos operacionais.

Requisito operacional do veículo, onde se deve verificar a pressão dos pneus, ventilação e atingir a temperatura de trabalho em marcha lenta do motor.

Requisito operacional do equipamento, onde o setup de rotação do motor e velocidade é calibrado através da polegada do aro de roda.

No caso do veículo utilizado as rodas são de 15", e pneus 195/50 R15, portanto:

$$\varnothing \text{ aro de roda} = 15''$$

$$15'' \times 25,4 = 381\text{mm ou } 0,381\text{m}$$

Para o cálculo da velocidade do veículo foi utilizado a relação da 1ª marcha (1,285 : 1) e a relação do diferencial (4,77 : 1), assim a relação total utilizada foi de 6,055. Para um setup de rotação de 2500 RPM, sendo:

$$\frac{2500 \text{ rpm}}{6,055} = 412,88 \text{ rpm} \qquad \frac{412,88 \text{ rpm}}{60} = 6,88 \text{ rps}$$

Após isso, foi calculado a altura do flanco, diâmetro dinâmico e o perímetro, sendo:

Altura do flanco = $195 \times 50\% = 0,0975\text{m}$

\varnothing dinâmico = $(2 \times 0,0975 + 0,381) \times 0,95 = 0,5472$

Perímetro = $2\pi r = 2\pi \times 0,2736 = 1,7190795\text{m}$

$1,719 \text{ m} \times 6,88 \text{ rps} = 11,827 \text{ m/s}$ ou $42,57 \text{ km/h}$

A velocidade para o início do teste necessária foi de $42,57 \text{ km/h}$, e durante todo o condicionamento deve ser utilizada a ventilação progressiva.

Como último, o requisito operacional de ensaio, a norma DIN foi a utilizada.

5.3 Análise dos resultados obtidos sem CAC

Esta análise tem como objetivo inicial capturar os dados de potência e torque do veículo na maneira que está, ou seja, somente com a inclusão do turbo.

Após a preparação do teste e o condicionamento do veículo chegou-se a dois testes, um terceiro teste foi suspenso devido a uma alta carga gerada pelo turbo, elevando a pressão a valores não controlados, impedindo a realização do mesmo, porém nos dois testes demonstrados através da tabela 3, foi possível chegar a valores muito próximos de potência e torque reais do veículo.

Tabela 3 – Testes sem intercooler

ENS	TEMP. ENT. T.	TEMP. ADM.	TEMP. MOTOR	TEMP. AMB.	POT.	RPM	TORQUE	RPM	POT. P.	RPM	% POT. P	DIST. ACEL.	F.C	POT. X F.C.	TORQ. X F.C.
1	25	71	83	25	235,7	4150	40,67	4150	9,8	4150	4,2	155	1,0625	250,43	43,21
2	25	66	85	25	244,7	4200	41,71	4200	9,58	4200	3,9	157	1,0625	259,98	44,32
MED	25	68,5	84	25	240,2	4175	41,19	4175	9,69	4175	4,04	156	1,0625	255,21	43,76

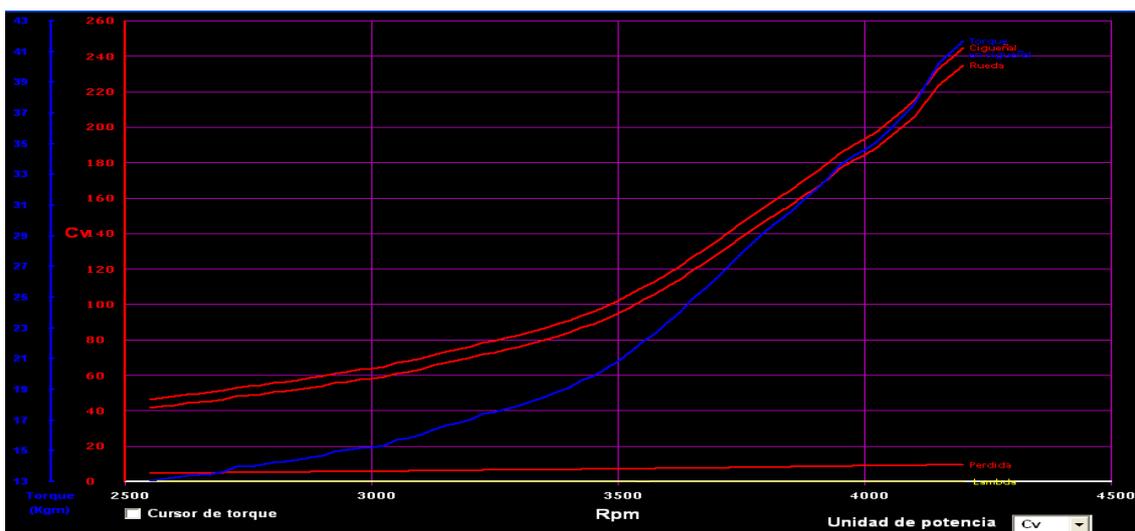
Fonte: Autor

Respectivamente cada coluna representa: ensaio, temperatura de entrada no turbo ($^{\circ}\text{C}$), temperatura de ar admitida ($^{\circ}\text{C}$), temperatura de ar ambiente ($^{\circ}\text{C}$), potência (CV), rotação (RPM), torque (Kgf \cdot m), potência perdida (CV), porcentagem de potência perdida (%) distância de aceleração (m), fator de correção (FC).

Em todos os testes a ventilação foi mantida ligada, e a temperatura de entrada do turbo foi considerada sendo a temperatura ambiente.

Dos dois testes o melhor para captação de dados foi o segundo, que gerou a seguinte curva de torque e potência, ilustrada na figura 16.

Figura 16 – Gráfico de torque e potência do teste 2



Fonte: Autor

Através desse gráfico é possível constatar que o pico de potência e torque é dado em 4200 rpm, devido ao sistema eletrônico programável que cortava a alimentação de combustível e o centelhamento das velas de ignição por segurança, pois com uma temperatura elevada de admissão de ar de 66°C a pressão no turbo era atingida rapidamente.

O aumento dessa pressão explica o valor expressivo de potência de 244,7 cv e torque de 41,71 kgfm, porém esses valores não representam eficiência nesse veículo, pois durante todo o tempo antes do pico máximo de ambos valores, toda a energia da combustão da mistura foi desperdiçada, sendo que quando a turbina carrega totalmente impulsiona o veículo, mas essa energia é perdida em milissegundos, não sendo aproveitada.

Analisando através da temperatura do ar admitida, essa teve grande influência no ensaio, pois fazendo cálculos de interpolação baseados na tabela 3, conclui-se que a densidade do ar a 66°C é de 1.028320 kg/m³, influenciando na massa de ar admitida, que para o motor de 1588 cm³, a massa de ar admitida foi de

0,0016329 kg em um ciclo, ou seja, a alta temperatura elevou a pressão do turbo, mas prejudicou no rendimento do motor que aspirava uma massa de ar baixa.

5.4 Análise dos resultados obtidos com CAC

Esta análise tem como objetivo inicial capturar os dados de potência e torque do veículo com a inclusão do CAC, verificando seu comportamento na performance do veículo.

Para esta análise chegou-se a três ensaios que tiveram valores próximos, baseados na porcentagem de potência perdida, sendo demonstrados na tabela 4.

Tabela 4 – Testes com intercooler

ENS.	TEMP. ENT. T.	TEMP. ADM.	TEMP. MOTOR	TEMP. AMB.	POT.	RPM	TORQUE	RPM	P. P.	RPM	% P.P.	DIST.	F.C	POT. X F.C.	TORQ. X F.C.
1	45	44	94	19,3	241,06	5900	34,38	4575	64,31	5900	26,7	355,6	1,0409	250,92	35,79
2	55	42	94	19,2	236,42	5850	34,44	4725	56,78	5850	24	357,6	1,0402	245,92	35,82
3	50	44	91	19,4	259,22	5850	34,43	4675	63,78	5850	24,6	351,6	1,0404	269,69	35,82
MED	50	43,3	93	19,3	245,57	5867	34,42	4658	61,6	5867	25,1	354,9	1,0405	255,51	35,81

Fonte: Autor.

Dos três testes o que se teve melhor captação dos dados foi o terceiro, gerando o seguinte gráfico, ilustrado na figura 17.

Figura 17 – Gráfico de torque e potência do teste 3



Fonte: Autor.

Através da análise deste gráfico podemos observar oscilações anormais ocasionadas por falta de acerto do veículo. Outra observação que podemos fazer durante o teste foi a alta variação de potência perdida, que pôde ser explicada por uma manutenção antecedente ao teste onde foi feita a retirada da caixa de transmissão para a substituição da embreagem do veículo.

A potência máxima obtida foi de 259,22 cv e o torque máximo foi de 34,43 kgfm a 5850 rpm, representando valores maiores se comparada com a análise sem o intercooler.

A temperatura de admissão também teve grande influência no teste no teste, mas de maneira diferente, pois ao contrário da análise anterior em que a temperatura era de 66°C, a temperatura deste foi de 44°C, influenciando de maneira muito melhor na densidade, sendo de 1,111480 kg/m³. Assim utilizando-se a fórmula da densidade, a massa de ar admitida para o motor foi de 0,0017650 kg por ciclo, ou seja, a baixa temperatura elevou a densidade do ar admitida, melhorando no rendimento do motor que aspirava uma massa de ar maior.

5.5 Rendimento do intercooler

A partir dos dados obtidos no teste dinamométrico com o veículo de teste, pode-se verificar alguns dados essenciais para a compreensão da instalação do intercooler em veículos equipados com turbocompressores. Com esses dados, podemos também avaliar o rendimento que o intercooler instalado no veículo de teste gera para o funcionamento do mesmo.

Conforme detalhado no subcapítulo 5.1.1, a avaliação da capacidade do intercooler passa essencialmente pela análise de perda de carga, eficiência e variação na densidade do ar admitido.

Portanto, com os dados obtidos nos testes sem a instalação de um intercooler e com o intercooler, sabendo-se que o veículo fora acertado com uma pressão de compressão de 1,4 Bar (20,3 PSI) com intercooler instalado, e sem intercooler atingiu uma pressão de 1,5 Bar (21,76 PSI), obtemos uma perda de carga calculada de aproximados 0,1 Bar (1,45 PSI). A partir disso, obtemos:

$$PC = 1 - \frac{1,5 - 0,1}{1,5}$$

Ou seja, temos uma perda de carga de apenas 6,6%, o que poderia indicar um bom rendimento, já que quase não perde carga. Porém, uma das características básicas de um intercooler de bom rendimento é uma considerada perda de carga, já que gera um aumento na área interna da tubulação que segue para a admissão. Portanto precisamos avaliar a eficiência de troca térmica para garantir o rendimento do IC.

Para o calculo da eficiência, usaremos os dados médios obtidos no teste dinamométrico com CAC, ou seja, temperatura atmosférica de 19,3°C, temperatura de compressão do turbo de 50°C (pós turbina movida) e temperatura de admissão de 43,3°C. Com isso, temos:

$$Ei = \frac{50^{\circ}C - 43,3^{\circ}C}{50^{\circ}C - 19,3^{\circ}C}$$

Ao realizar esse cálculo, obtemos um valor de 0,218, ou seja, aproximadamente 22% de eficiência do intercooler.

Com esse resultado, podemos confirmar que, mesmo a perda de carga sendo baixa, o rendimento do intercooler não é alto, sendo necessária uma análise do fluxo de passagem do ar, bem como disposição no cofre do motor, pra realizar uma troca térmica maior, aumentando sua eficiência.

Pra finalizar a verificação, calcula-se a densidade gerada com essa eficiência calculada para o IC. Para o cálculo da densidade, também serão usados os dados do teste com IC instalado no veículo. Usando como base a diferença de temperatura pós-compressão/atmosférica o valor de 30,7°C e diferença pós-compressão/pós intercooler de 24°C, temos:

$$Dai = \frac{(273 + 19,3) + 30,7^{\circ}C}{(273 + 19,3) + 24^{\circ}C} - 1$$

Como resultado dessa equação, obtemos 0,212, ou seja, uma variação de densidade de apenas 2,12% do que se obteria diretamente.

Com esses três resultados obtidos, verifica-se uma melhoria de rendimento em relação ao teste sem a instalação de um intercooler, mesmo não sendo tão eficiente.

6 CONCLUSÃO

Como foi apresentado anteriormente, o intercooler é um componente instalado na linha de admissão de ar do MCI, sendo colocado entre a carcaça de compressão do turbocompressor e o coletor de admissão. O intercooler tem como principal função no sistema diminuir a temperatura do ar comprimido pelo rotor de compressão (conforme testes realizados há um ganho substancial em temperatura), fazendo com que o ar admitido chegue mais frio à câmara de combustão, dessa forma aumentando a densidade do ar admitido, e conseqüentemente o rendimento do motor, tendo um ganho de potência.

O trabalho apresentado se prestou a realizar esses testes de confirmação, visando mostrar o quanto a instalação de um intercooler pode melhorar o rendimento de um motor turbo. Com base nisso, comparando os dados de densidade do ar admitido sem intercooler no sistema ($1,028320 \text{ Kg/m}^3$) com os dados já com a instalação de um intercooler ($1,111480 \text{ Kg/m}^3$), obtivemos um aumento de 8,1% na densidade do ar, logo, um aumento de 8,1% na quantidade de ar a ser admitida pelo motor. Ganho em aproximadamente 6% em potência, passando de 244,7 cv para 259,22 cv e uma diminuição do pico de 41,71 kgfm para 34,43 kgfm porém com o intercooler o torque se manteve linear.

Porém, com os testes dinamométricos realizados, obteve-se a verificação de outra característica de um intercooler, que é a proteção gerada em relação à pressão do compressor.

Nos testes sem intercooler, pode-se observar que entorno de 3600 RPM, o torque e a potência começam a crescer rapidamente, indicando que é o momento onde a pressão do turbocompressor começou a atingir pressões positivas. Porém, o torque e a potência crescem de forma tão abrupta, que gerou destracionamento no rolo do dinamômetro, bem como, por proteção do sistema, a injeção do carro cortou o fornecimento de combustível, paralisando o teste em 4200 RPM. Enquanto no teste com intercooler, o torque e a potência também começaram a subir em 3600 RPM (momento de início da pressão positiva). Porém, o crescimento foi mais controlado, com picos de torque e potência em torno de 4800 RPM, seguindo o teste até o final em 6000 RPM.

Com esses dados, conseguimos verificar que o intercooler, por gerar um aumento interno na área do duto de admissão, ele gera uma situação semelhante à

de uma caixa de ar, gerando uma pequena perda de carga do ar, armazenando em seus dutos conforme a pressão aumenta, fazendo com que, ao contrário do teste sem intercooler, que a partir do momento que se gerou pressão positiva no compressor, foi tudo enviado direto para o coletor de admissão, o intercooler controlasse a passagem do ar pressurizado, enviando resfriado e de forma menos abrupta para o coletor, gerando melhoria de rendimento e proteção contra falhas.

7 PROPOSTAS FUTURAS

Com o amplo desenvolvimento tecnológico, foi criado para o mercado automotivo novos sistemas que garantem uma melhor eficiência para os motores. Nos motores atuais a utilização de sistemas de injeção direta e variação de válvulas de admissão e escape já é amplamente difundida.

A implementação de um sistema de sobrealimentação e resfriamento de ar comprimido, como o intercooler, poderá agregar um ganho na eficiência muito melhor para todo o conjunto do motor se este já possuir novas tecnologias, como as citadas.

Como proposta de estudos futuros, apresentamos duas sugestões:

7.1 Turbo e intercooler em motores naturalmente aspirados equipados com injeção multiponto sequencial

Considerando que na atualidade os motores downsizing, utilizam turbo e intercooler ar – água e injeção direta, cabe desenvolver estudos, ensaios de performance e de emissões para os motores ainda amplamente utilizados no formato originalmente aspirado, porém com geração mais recente de injeção multiponto sequencial fasada devidamente adaptados com turbo e intercooler no formato ar - ar.

7.2 Monitoramento e calibração da pressão de combustível durante os regimes de lag e turbo carregando

Considerando que os motores naturalmente aspirados utilizam pressão na linha de combustível para a condição de pressão negativa no coletor de admissão, ao adaptar-se o motor com turbo e intercooler, entendemos que cabe um estudo, ensaios de relação de ar lambda, performance e emissões nas condições de trabalho que transitam entre as pressões negativas e positivas no coletor de admissão durante os regimes de variação de carga que transitam da fase lag (pressão negativa no coletor) para a fase de torque máximo (pressão positiva no coletor).

Espera-se que novas pessoas tomem como interesse futuro, como o intercooler pode favorecer para o melhor rendimento em motores mais atualizados e providos de tecnologias mais completas, afim de que se possa compartilhar esse estudo à novos ideais.

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Apostila de motores de combustão interna ciclo Otto – parte 1. EBAH. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABq1sAL/apostila-motor-combustao-interna-ciclo-otto?part=11>. Acesso em: 05/03/18.

BRUNETTI, Franco. Motores de combustão interna: volume 1. 3ª edição. São Paulo: Blucher, 2012. Acesso em: 12/03/2018.

BRUNETTI, Franco. Motores de combustão interna: volume 2. 3ª edição. São Paulo: Blucher, 2012. Acesso em: 12/03/2018.

BOSCH, Robert. Manual de tecnologia automotiva. 25ª edição. São Paulo: Blucher, 2005. Acesso em: 12/03/2018.

BELL, Corky. Maximum Boost: Designing, testing and installing Turbocharger systems. 1997. Acesso em 17/04/2018.

BARROS, José Eduardo Mautone & BAÊTA, José Guilherme Coelho Estudo da transferência de calor em motores. 2006. Acesso em 19/04/2018.

CONTENSINI, Leonardo. 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: 03/03/18.

Como funciona um motor de 4 tempos. EDUCAÇÃO AUTOMOTIVA. Disponível em: <https://educacaoautomotiva.com/2017/07/06/motor-4-tempos-como-funciona/>. Acesso em: 03/03/18.

DA SILVA, Anderson Moreira Simulação e análise do intercooler em motores Otto originais de fábrica. 2008. Acesso em 17/04/2018.

FAGGI, Rodrigo. Formação de mistura ar combustível em motores de ignição por faísca a quatro tempos. 1ª edição. São Caetano do Sul, 2012. Disponível em: <https://maua.br/files/monografias/formacao-de-mistura-ar-combustivel-em-motores-de-ignicao-por-faisca-a-quatro-tempos.pdf>. Acesso em: 15/04/18

FRÓES, Marco Aurélio. Arquivos pessoais. Acesso em: 02/06/2018.

Funcionamento do motor turbo. Turbo Center. Disponível em: http://www.turbocenter.com.br/funci_mot_turbo.html. Acesso em: 05/03/18.

GARCIA, Álvaro Cesar. Análise conceitual dos turbocompressores em motores de ciclo Otto. 1ª edição. Santo André, 2016. Disponível em: <http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC351.pdf>. Acesso em: 04/02/2018.

GRAÇA, Maria. A aerodinâmica a favor do consumo. Nobres do grid. Disponível em: http://www.nobresdogrid.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=1727:a-aerodinamica-a-favor-do-consumo&catid=110:mao-na-graxa&Itemid=242. Acesso em: 05/03/18.

Intercooler ar/ar. SPA Turbo. Disponível em: <https://www.spaturbo.com.br/intercooler-ar-ar-para-gol-parati-1-0-16v-100-aluminio-spa/p>. Acesso em: 02/06/18.

PASSOS, Rodrigo. Sistemas de admissão: coletores, CAIS, filtros e roncós !. Disponível em: <https://www.flatout.com.br/sistemas-de-admissao-coletores-cais-filtros-e-roncos/>. Acesso em: 24/03/2018.

SHELQUIST, Richard. An Introduction to Air Density and Density Altitude Calculations. 2016. Acesso em: 13/06/2018.