UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA – FEMEC

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LUCAS HENRIQUE MENEZES DE LIMA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE *INTERCOOLER* NO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

UBERLÂNDIA – MG

2018

LUCAS HENRIQUE MENEZES DE LIMA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE *INTERCOOLER* NO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia

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

UBERLÂNDIA – MG

2018

LUCAS HENRIQUE MENEZES DE LIMA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO USO DE *INTERCOOLER* NO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia

Orientadora: Prof. M. ª Ana Marta de Souza
Coordenadora: Prof. M. ª Ana Marta de Souza

Local, ____ de _____ de___.

BANCA EXAMINADORA

_____
Profa. Dra. Ana Marta de Souza
Universidade Federal de Uberlândia

_____
Prof. Msc. Edsonei Pereira Parreira
Universidade Federal de Uberlândia

_____
Profa. Dra. Priscila Ferreira Barbosa de Sousa
Universidade Federal de Uberlândia

UBERLÂNDIA – MG

2018

Dedico este trabalho a todas as pessoas, conhecidas ou não, que, de alguma forma, contribuíram para o meu sucesso.

À minha família e amigos pela preciosa colaboração dada a este trabalho.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.”

Henry Ford

RESUMO

O atual cenário automotivo exige dos fabricantes de veículos movidos a combustão interna, mudanças que aumentem a eficiência e em contrapartida reduza o consumo de combustível. Além dessas exigências, vários países incentivam e exigem limites cada vez menores de emissões de gases poluentes, focando na preservação do meio ambiente e minimizando ao máximo os efeitos nocivos desses gases.

A redução do tamanho dos motores de combustão interna mantendo a eficiência e potência (*downsizing*) é uma alternativa viável para atender exigências mercadológicas e governamentais no que tange a performance do produto e impactos ambientais.

Este trabalho visa analisar numericamente o comportamento de motores aspirados, turbinados e turbinados com *intercooler* (ar-ar e ar-água), através do levantamento de dados simulados, demonstrando também como essa tecnologia pode contribuir para uma melhor eficiência energética em motores.

Palavras-chaves: Combustão Interna. Downsizing. Eficiência Energética. Motores. Tecnologias.

ABSTRACT

The current automotive scenario calls for more and more of the internal combustion engine manufacturers to make changes that increase their efficiency but decrease fuel consumption. In addition to these demands, governments around the world are pushing for and demanding ever-tightening limits on gas emissions from burning fuel.

Reducing the size of internal combustion engines while maintaining efficiency and downsizing is a viable alternative to meet market and government requirements regarding product performance and environmental impacts.

The aim of this work is to analyze numerically the behavior of aspirated, turbocharged and turbocharged engines with intercooler (air-air and air-water), through the data collection by simulations in order to encourage future studies in the perspective of improving the performance and improvement of the equipment. It also demonstrates how this technology can contribute to better energy efficiency in engines.

Key-words: Internal combustion. Downsizing. Energy Efficiency. Engines. Technologies.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Esquema de funcionamento de quatro tempos do motor do ciclo otto 17

FIGURA 2 Torque aplicado em sistema de poço caipira.....18

FIGURA 3 Esquema geométrico de um motor a gasolina.....19

FIGURA 4 Relação entre potência, torque e rotações por minuto 20

FIGURA 5 Curva da potência para motores turbo alimentados 21

FIGURA 6 Exemplificação de taxa de compressão 22

FIGURA 7 Curva de consumo específico para duas diferentes razões de compressão.....24

FIGURA 8 Funcionamento em corte de um turbocompressor 26

FIGURA 9 Dano em superfície sólida causada pela detonação 27

FIGURA 10 Aumento do fluxo térmico, temperatura e pressão causados pela detonação 28

FIGURA 11 Desenhos esquemático de um trocador de calor do tipo tubos cruzados 29

FIGURA 12 Representação do ciclo de sobrealimentação com uso de intercooler.....30

FIGURA 13 Foto real do posicionamento de um intercooler em um automóvel.....31

FIGURA 14 Pressão média efetiva e limites de detonação para turboalimentação em motores com ignição por centelha (ice) em função do avanço da centelha.....32

FIGURA 15 Diagrama do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine, AVL-BOOST*™.....34

FIGURA 16 Diagrama do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor*, AVL-BOOST*™.....35

FIGURA 17 Parâmetros do compressor do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor*, AVL-BOOST*™.....36

FIGURA 18 Parâmetros da turbina do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor*, AVL-BOOST*™.....36

FIGURA 19 Parâmetros do *intercooler* ar-água do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor e *intercooler, AVL-BOOST*™.....37

FIGURA 20 Diagrama do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor e *intercooler, AVL-BOOST*™.....38

FIGURA 21 Parâmetros do *intercooler* ar-ar do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor e *intercooler, AVL-BOOST*™.....39

FIGURA 22 Curvas de torque obtidas pelo software *AVL-BOOST*™.....40

FIGURA 23 Curvas de potência obtidas pelo software *AVL-BOOST*™.....42

FIGURA 24 Curvas de eficiência volumétrica obtidas pelo software *AVL-BOOST*™.....44

FIGURA 25 Comparação de desempenho entre os motores.....45

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Diferenças entre alguns parâmetros, para o motor vw at 1000 16 v turbo 32

TABELA 2 Valor máximo dos parâmetros analisados 45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREVIATURAS

MCI Motores a combustão interna

RC Razão de compressão

PMS Ponto morto superior - é a posição na qual o pistão está o mais próximo possível do cabeçote

PMI Ponto morto inferior - é a posição na qual o pistão está o mais afastado possível do cabeçote

VCC Volume da câmara de combustão (cm^3)

VD Volume deslocado (cm^3)

D Diâmetro do cilindro (cm)

L Curso do êmbolo (cm)

PME Pressão média efetiva

WC Trabalho

P Potência

SFC Consumo específico de combustível

ICO Ignição por compressão

ICE Ignição por centelha

RPM Rotações por minuto

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....X

LISTA DE TABELAS.....XI

LISTA DE ABREVIATURAS.....XII

1 INTRODUÇÃO.....16

1.1 MOTIVAÇÃO.....16

1.2 OBJETIVO.....17

2 REVISÃO DE LITERATURA.....18

2.1 MÁQUINAS TÉRMICAS E SEU FUNCIONAMENTO.....18

2.2 PARÂMETROS ESSENCIAIS PARA COMPREENSÃO DO FUNCIONAMENTO DE MOTORES.....19

2.2.1 TORQUE E POTÊNCIA.....19

2.2.2 RAZÃO DE COMPRESSÃO (RC) 22

2.2.3 RELAÇÃO AR-COMBUSTÍVEL.....23

2.2.4 PRESSÃO MÉDIA EFETIVA.....24

2.2.5 EFICIÊNCIA DO MOTOR.....24

2.3 SOBREALIMENTAÇÃO.....26

2.4 *INTERCOOLER*.....28

2.4.1 ALGUMAS DEFINIÇÕES PARA TROCADORES DE CALOR.....28

2.4.2 IMPORTÂNCIA DO *INTERCOOLER* NO PROCESSO DE SOBREALIMENTAÇÃO 29

3 METODOLOGIA.....33

3.1 DADOS BASE UTILIZADOS PARA INICIAR A SIMULAÇÃO 33

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....40

4.1 TORQUE.....40

4.2 POTÊNCIA.....42

4.3 EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA.....44

4.4 COMPARAÇÃO PERCENTUAL DE GANHOS.....45

5 CONCLUSÃO.....46

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....48

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, é perceptível o aumento da demanda da utilização de novas tecnologias para motores de combustão interna de quatro tempos por veículos comerciais e de passageiros, devido a seus benefícios: Economia de combustível, aumento de potência, maior durabilidade, menor quantidade de manutenções, dentre outras.

Observa-se um aumento nas pesquisas em tecnologia que utilizam motores capazes de aumentar o desempenho do automóvel e também deixar o menor impacto ambiental possível, diminuindo o consumo de combustível fóssil e a emissão de gás carbônico (CO_2) na atmosfera. Para isso desenvolveu-se técnicas capazes de contemplar tais demandas. Nesse contexto, tendo em vista a preocupação ambiental, a demanda de MCI mais econômicos e menos poluentes tem conduzido a busca por motores cada vez menores e mais eficientes (do inglês: Downsizing).

Essa técnica consiste em utilizar motores com menor cilindrada, mantendo a potência, o torque e a resposta ao acelerador de um motor maior, utilizando da turboalimentação para aumento do desempenho do automóvel.

Dessa forma, sobrealimentação com turbo realmente mostra-se bastante eficiente, pois aumenta a quantidade de ar dentro do cilindro, aumentando a pressão média efetiva dentro dos cilindros proporcionando, consequentemente, maiores torque e potência.

A outra vantagem apresentada é que a compressão do ar é feita às custas do trabalho fornecido por uma turbina a qual é movimentada pelos gases de escape, não consumindo potência do eixo do motor. No entanto, ao realizar a compressão, a temperatura do ar de admissão aumenta, o que pode ser prejudicial para o motor. O ar de admissão quente torna-se prejudicial para o motor tanto do ponto de vista da eficiência volumétrica, quanto do ponto de vista da eficiência térmica.

Com uso de um *intercooler*, o problema é solucionado, pois este é capaz de resfriar o ar de admissão, aumentando dessa forma a densidade do mesmo, evitando a diminuição da eficiência volumétrica. Com a entrada do ar mais frio na admissão também é possível utilizar uma maior razão de compressão, aumentando a eficiência

térmica, e ainda evitando os riscos do indesejável fenômeno de detonação. Dessa forma, o *intercooler* torna-se fundamental, representando também um aumento de desempenho além do compressor. Existem atualmente o *intercooler* ar-ar e ar-água, ambos possuem o mesmo objetivo, porém cada um deles possui suas peculiaridades.

Entretanto, tanto no mercado editorial como na esfera acadêmica é pouco difundido publicações a respeito do motor turboalimentado e seus componentes, como o aqui citado *intercooler*. Este trabalho visa, além de analisar a influência do uso de um *intercooler* no desempenho de um motor Otto turboalimentado, incentivar o estudo em futuros trabalhos na perspectiva de melhorar o rendimento e aprimorar o equipamento.

1.2 OBJETIVO

Os objetivos estabelecidos para a realização deste trabalho são:

Objetivo principal: Avaliação do melhor processo de utilização do *intercooler* em motores turboalimentados: Estudo feito a partir da compreensão da teoria de *intercoolers*, das equações clássicas de desempenho de motores com posterior análise no software AVL-BOOST™.

Objetivo Secundário: Aproximação do estudante do âmbito acadêmico e da pesquisa: Possibilidade de o estudante conhecer aspectos de pesquisa em máquinas térmicas com aprofundamento em motores, auxiliando-o a definir com mais segurança o seu futuro. Ao experimentar áreas e linhas de pesquisa, o estudante está refinando e justificando suas vocações, suas aptidões e preferências, podendo então, tomar decisões de maneira mais segura e coerente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Para o desenvolvimento do trabalho, primeiramente foi feita uma revisão bibliográfica sobre o tema. A partir dessas informações obtidas, foi dado início a parte escrita do trabalho.

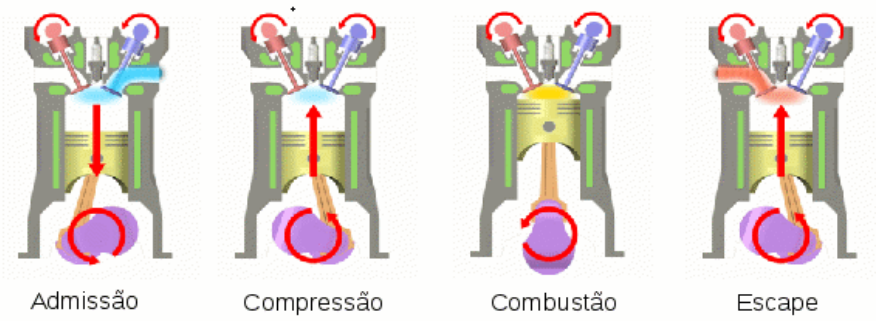
2.1 MÁQUINAS TÉRMICAS E SEU FUNCIONAMENTO

As máquinas térmicas são aquelas que transformam energia térmica em energia mecânica útil. Essa transformação ocorre através da queima de um combustível-comburente, que libera a energia química do combustível. Os componentes mecânicos recebem trabalho através de variações de pressões e volumes criadas pelo fornecimento de energia através do calor da queima (MARTINS, 2006).

Para a maioria das máquinas térmicas este comburente é o ar, para as poucas exceções, o comburente é um componente que contem oxigênio ou o mesmo na sua forma pura.

Um exemplo típico de máquina térmica, é o motor de combustão interna. Ele aproveita o aumento da pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível para imprimir um movimento rotativo ao motor, através do sistema de biela-manivela. Mas apenas uma fase da movimentação do pistão gera energia de fato, a combustão. Logo, para manter a regularidade desse sistema e fazer uma distribuição mais uniforme da potência produzida é utilizado um volante de inércia, que acumula energia cinética da fase de combustão, e a distribui de maneira uniforme nas outras 3 fases, sendo elas admissão, compressão e exaustão. A figura 1 demonstra o que foi enunciado acima:

Figura 1: Esquema de funcionamento de quatro tempos do motor do ciclo otto. (Fonte: http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAX6EAH/aditivos-utilizados-na-gasolina-oleo-diesel)

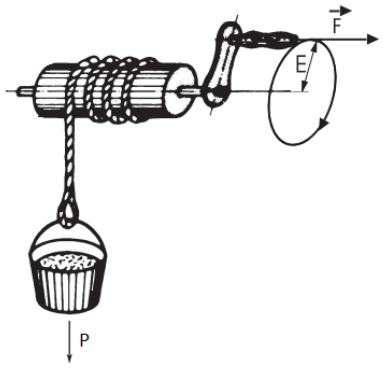


2.2 PARÂMETROS ESSENCIAIS PARA COMPREENSÃO DO FUNCIONAMENTO DE MOTORES

2.2.1 Torque e potência

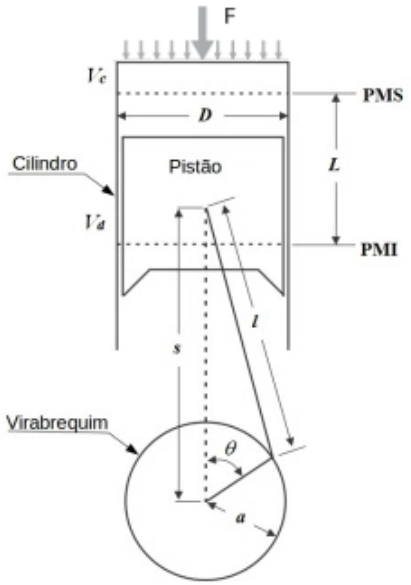
O torque no veículo é a medida do esforço necessário para girar um eixo. Um exemplo prático seria levantar um peso por um processo semelhante ao usado em poços (Figura 2) a força F que é preciso aplicar à manivela depende do comprimento E da mesma. Quanto maior for a manivela, menor será a força necessária. Se dobrarmos o tamanho E da manivela, a força F necessária será diminuída à metade. Assim, o torque é muito importante na escolha não só de veículos leves, mas principalmente de veículos de transporte, como caminhões e ônibus. Nem torque nem potência são constantes: eles variam de acordo com a rotação do motor.

Figura 2: Torque aplicado em sistema de poço caipira**.** (Fonte: Adaptado de http://www.ebah.com.br/content/ABAAABbf0AA/motores-eletricos).



Dessa forma, podemos ver que o torque é função da combustão, e seu valor depende da rotação e da carga no motor. Isso acontece porque o torque é uma força tangencial que surge devido a força resultante (“F” na Figura 3) no pistão. Esta força de pressão depende da posição angular da manivela, portanto é variável, assim, na hora da medição, trata-se do momento torsor médio positivo.

Figura 3: Esquema geométrico de um motor a gasolina. (Fonte: Adaptado de Heywood, 1988).



De forma simplificada, o torque mostra o trabalho produzido, enquanto que a potência específica a taxa com que esse trabalho é produzido (MARTINS, 2006).

O torque pode ser dado pela seguinte expressão:

$$T_b = \frac{\eta_v \eta_t \rho_a v_d (\frac{F}{A}) Q_{Hv}}{4\pi} - T_f \qquad (\mathbf{1})$$

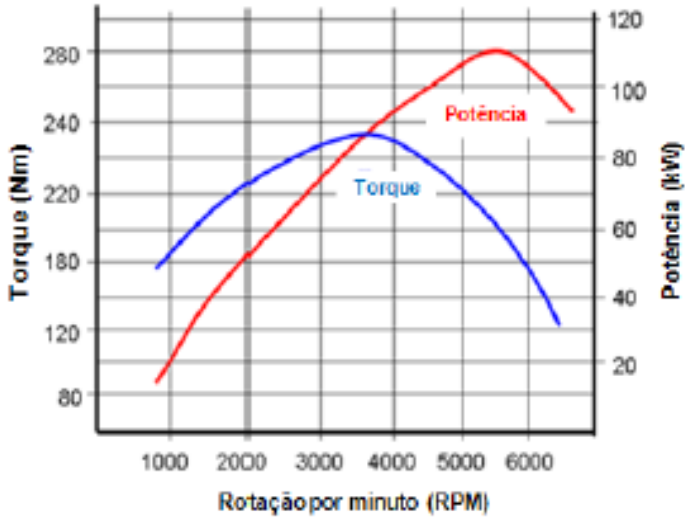
Através dessa fórmula, é possível concluir que este pode ser aumentado de várias maneiras, dentre elas, podemos destacar o aumento das eficiências térmica e volumétrica. Por ser diretamente proporcional ao torque, a potência também será acrescida quando houver um aumento nas eficiências.

Na Figura 4, é possível perceber que o comportamento das curvas de torque e potência são ambas funções da velocidade do motor. A medida que esta aumenta, as propriedades citadas, também tem seu valor aumentado. Porém, em um determinado momento (aproximadamente 3500 rpm), o motor não consegue aspirar com a mesma eficiência a mistura ar-combustível, isso acontece devido ao curto espaço de tempo para abertura das válvulas entre as

etapas do motor quando este está operando a grandes velocidades, logo a curva de torque começa a decrescer.

A potência se mantém crescente porque a rotação consegue suprir a perda de torque até um determinado ponto. A partir desse ponto, com o contínuo aumento da velocidade, as perdas por atrito passam a ser um fator determinante, então a potência também apresenta uma curva decrescente.

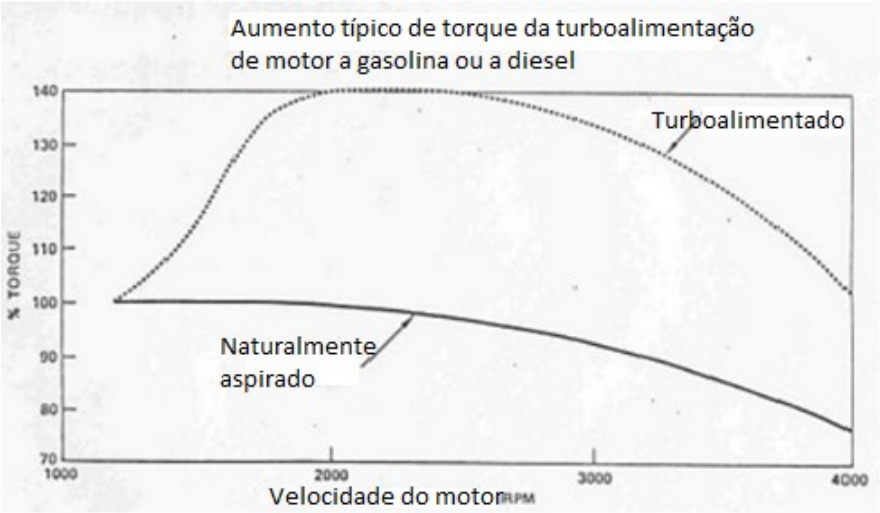
Figura 4: Relação entre potência, torque e rotações por minuto. (Fonte: http://dicasparacarros.blogspot.com.br/2013/06/qual-diferenca-entre-torque-e-potencia.html).



Outros parâmetros que devemos levar em consideração são os parâmetros geométricos, tais como a forma de construção da câmara de combustão, número de cilindros, tamanho do curso do pistão, dentre outras.

A seguir está um gráfico publicado pela Western Michigan University do ganho relativo de torque de um motor de ciclo Otto ou Diesel com adoção de sobrealimentação, provando o benefício do mesmo.

Figura 5: Curva da potência para motores turboalimentados. (Fonte: Adaptado de Western Michigan University).



A escolha dos componentes deve ser feita com critério para não afetar a dirigibilidade no trânsito, se a intenção for preparar um motor para uso em rua. Já no caso de uso em pista, algumas das preocupações perdem importância.

As vantagens da preparação turbo ficam por conta do aumento do torque disponível e do grande aumento de potência produzido pelo turbo. Mas vale ressaltar que a preparação turbo só é economicamente viável quando a pressão utilizada for maior que 0,4 kg/cm². Com pressões menores o aumento de potência não é tão satisfatório e a relação custo-benefício do motor naturalmente aspirado seria melhor.

A preparação turbo é indicada principalmente em motores de baixa cilindrada, como os de 1.000 cm^3, pois eleva o torque disponível em praticamente todos os regimes, desde que a turbina utilizada tenha sido corretamente escolhida para este fim. Turbinas muito grandes tem seu funcionamento efetivo em rotações mais altas, enquanto as menores entram em ação mais cedo, neste caso o motor se comporta como se tivesse maior cilindrada, sobretudo por causa do torque disponível em baixos giros.

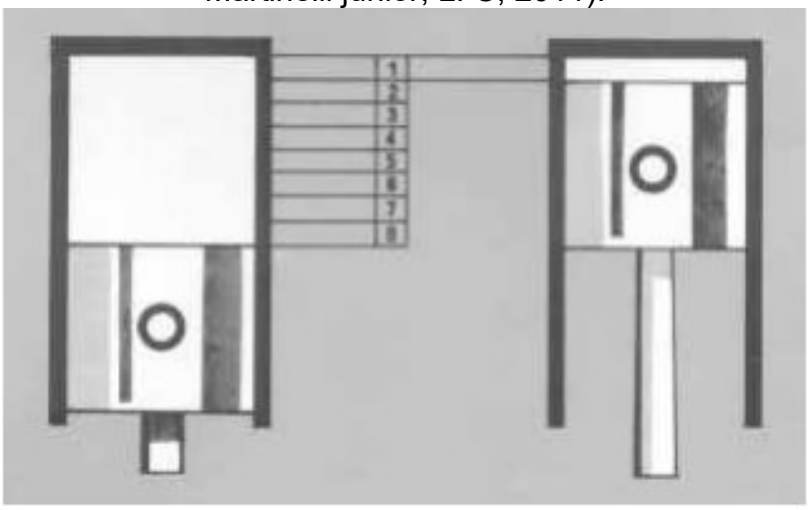
Já a especificação de motores é dada geralmente pela potência e torques máximos. O torque é medido através de um freio dinamométrico e o produto deste com a velocidade de rotação nos dá a potência efetiva.

2.2.2 Razão de compressão

A razão de compressão é um elemento físico-matemático presente nos motores de combustão interna, como motores de ciclo Otto, nos motores de ciclo diesel, nos motores 2 tempos, entre outros. Em todos esses, a compressão interna representa um papel fundamental no seu rendimento.

É um valor numérico adimensional que representa a relação entre o volume total existente no cilindro, quando o êmbolo está no PMI e o volume da câmara de combustão, quando o êmbolo está no PMS. Isso pode ser melhor exemplificado na Figura 6 abaixo:

Figura 6: Exemplificação de taxa de compressão. (Fonte: Adaptado de Martinelli júnior, L. C, 2011).



A razão de compressão é dada pela seguinte fórmula:

$$r_c = \frac{VD + V_{cc}}{V_{cc}} \qquad (\mathbf{2})$$

Sendo:

$$D = \frac{\pi d^2 L}{4} \qquad (\mathbf{3})$$

Onde:

- rc = Razão de compressão.
- Vcc = Volume da câmara de combustão (cm^3).
- VD= Volume deslocado (cm^3).
- D= Diâmetro do cilindro (cm).
- L= Curso do êmbolo (cm).

2.2.3 Relação ar-combustível

Segundo Heywood (1988), a máxima potência que um motor pode fornecer, é limitada pela quantidade de combustível que pode ser queimada eficientemente pelo motor. Esta por sua vez é limitada pela quantidade de ar introduzida em cada cilindro por ciclo.

Quando a relação entre o ar e o combustível é tal que todo o combustível é (ou pode ser) queimado usando todo o ar disponível, dizemos que a mistura é estequiométrica. Um motor ao qual se forneça mais combustível que o requerido pela estequiometria se diz que queima uma mistura rica, e ao contrário chama-se mistura pobre. A avaliação da riqueza ou pobreza da mistura é feita comparando-se a quantidade que se tem com o valor da mistura estequiométrica.

2.2.4 Pressão média efetiva

Um parâmetro importante na comparação entre motores é a chamada pressão média efetiva (*pme*), que é definida como o trabalho efetuado por unidade de volume varrido do motor.

Com a *pme* é possível comparar motores de cilindradas diferentes, de modo a distinguir aquele para o qual a cilindrada foi mais bem aproveitada para produção de trabalho. A *pme* pode ser escrita como função do torque ou da potência (MARTINS, 2006).

Nos motores de alimentação natural, a pressão média indicada está em torno de 10 bar quando à máxima potência. Quando o valor está muito abaixo disso, significa que o motor poderia alcançar melhor desempenho. Valores acima disso, representam carga excessiva para o motor, o qual poderá ter sua vida útil diminuída.

Por exemplo, para motores de fórmula 1 aspirados, a *pme* pode chegar a 20 bar, enquanto os mesmos, sobrealimentados, podem atingir a marca de *pme* = 40 bar. Devido a carga térmica e mecânica excessiva, os motores de fórmula 1 tem duração de algumas horas.

2.2.5 Eficiência do motor

A eficiência térmica ou eficiência térmica de conversão de combustível é uma das maneiras de se medir a eficiência de um motor. Dada pela fórmula:

$$\eta_t = \frac{W_c}{m_f \,.\, Q_{Hv}} = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{Hv}} \qquad (\mathbf{4})$$

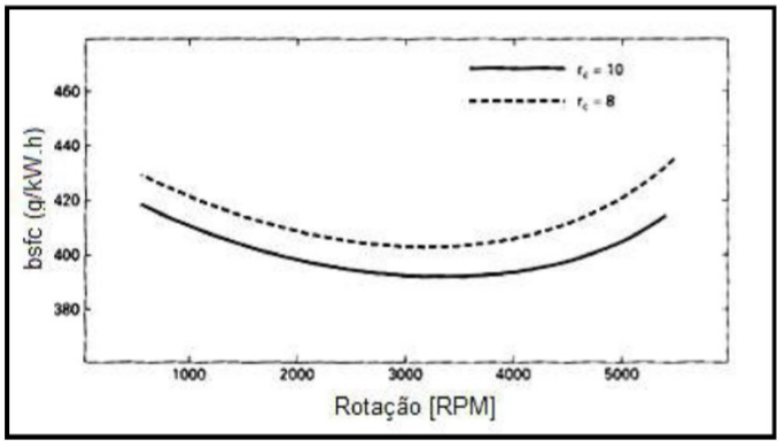
Onde ela pode ser função do trabalho (Wc) ou função da potência (P). As variáveis no denominador são respectivamente a vazão mássica de combustível admitido e o poder calorífico do combustível. Devido ao fato da combustão não ser completa, nem toda energia produzida pelo combustível se torna energia térmica.

Uma outra variável, o SFC é utilizado para medir a eficiência de um motor ao transformar a energia do combustível em trabalho líquido, e é dada pela fórmula:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \qquad (\mathbf{5})$$

A Figura 7, apresenta o consumo específico de combustível em função da velocidade de rotação, na comparação entre duas razões de compressão diferentes. Onde podemos ver na prática que se variarmos apenas a razão de compressão, aquele motor com maior razão será mais eficiente.

Figura 7: Curva de consumo específico para duas diferentes razões de compressão. (Fonte: Adaptado de Pulkrabek et.al (2002)).



Já a eficiência volumétrica, está diretamente ligada ao desempenho e potência do motor. Pois quanto maior for a capacidade de ar na entrada, mais combustível pode ser queimado, e consequentemente mais potência é produzida.

A maior dificuldade para aumento da eficiência volumétrica está no tempo disponível para levar o ar até o cilindro e nas restrições impostas pelo filtro de ar, válvula borboleta, tubulações.

Há muitas perdas de carga na passagem do ar, fazendo com que a quantidade introduzida no cilindro seja sempre menor que a ideal.

Uma das soluções para aumento de eficiência térmica e volumétrica é fazer a sobrealimentação no motor.

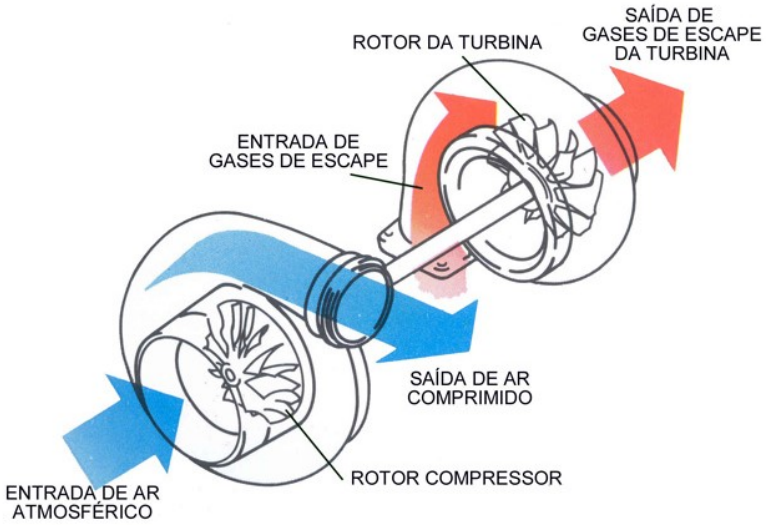
2.3 SOBREALIMENTAÇÃO

Das variáveis citadas na seção 2.2, as mais importantes são o torque, a potência e a pressão média, todas elas são proporcionais à massa de ar que entra em cada cilindro do motor.

Se comprimirmos o ar antes de sua entrada no motor, este entrará com maior densidade, permitindo que mais combustível seja injetado na câmara de combustão, aumentado assim sua potência. Este é o princípio básico dos sistemas usados para aumentar a pressão de alimentação.

Existem dois tipos de sistemas usados para aumentar a pressão de alimentação, que são: sobrealimentação mecânica e turboalimentação.

Figura 8: Funcionamento em corte de um turbocompressor. (Fonte: Garret 2012)



No primeiro tipo, sobrealimentação mecânica (*supercharging*), o compressor é acionado mecanicamente pelo próprio motor, consumindo parte da potência do mesmo, gerando o efeito parasita, que é a principal desvantagem desse método. No entanto, dependendo da aplicação dada ao motor/compressor, este pode ser bastante útil pois possui uma resposta muito rápida a mudanças sutis de aceleração devido ao fato de estar diretamente ligado ao eixo virabrequim. Os principais tipos de compressores para esta aplicação são os de palhetas, parafusos e o de lóbulos.

Já no caso dos motores turboalimentados (*turbocharging*), o compressor é movido por uma turbina, que é acionada pelos gases de escape do motor. Neste caso, o compressor e o motor não possuem ligações mecânicas, sendo este um método mais eficiente pois não consome potência produzida pelo eixo. Além disso, a utilização da energia dos gases de escape altera o balanço energético do motor, possibilitando um aumento de sua eficiência térmica.

A maior desvantagem do método de *turbocharging* é que tanto o compressor quanto a turbina possuem uma faixa ótima de operação (altas eficiências), e esta faixa é menor que a faixa de operação do motor, logo, ele operará de maneira mais efetiva em médias e altas rotações e cargas do motor.

Na prática, este é o método mais utilizado, sendo mais eficiente para motores ICO devido ao fenômeno de detonação (*knock*) apresentado nos motores ICE.

A detonação é a anomalia mais importante da combustão. Ela ocorre devido a razão de compressão exagerada, devido a pontos quentes na câmara de combustão, depósitos e carbonização, válvulas de escapamento quentes, rebarbas e asperezas, que levam a autoignição da mistura ar-combustível.

Esse fenômeno provoca aumento local das tensões, bem como um ruído característico conhecido popularmente como “batidas de pino” (*knock*), ela também pode causar erosão nas superfícies sólidas com as quais têm contato.

Na Figura 9 é demonstrado um exemplo de dano em superfície sólida causada pela detonação.

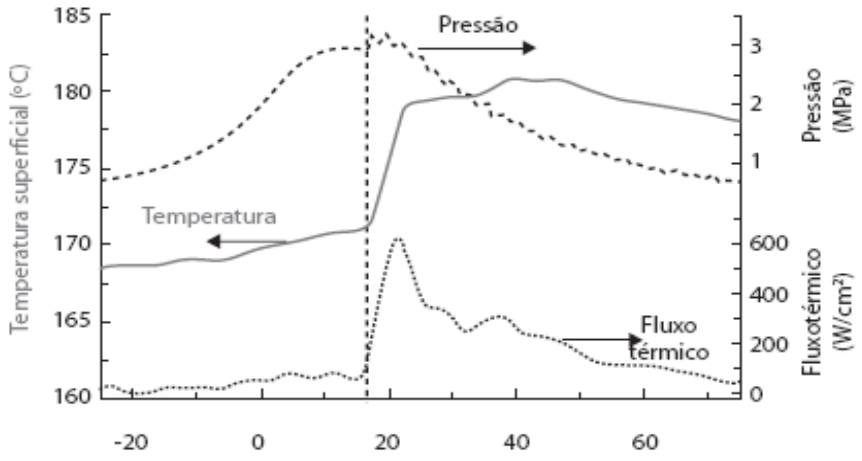
A detonação provoca um aumento do fluxo térmico para as paredes da câmara de combustão, o que ocasiona elevação local da temperatura e uma redução na eficiência do motor, assim como degradação do pistão, o que pode ser visualizado na figura anterior.

Quaisquer fatores que aumentem a temperatura e pressão no interior da câmara de combustão tendem a favorecer a ocorrência da detonação. E a razão de compressão é um destes fatores, na medida em que seu incremento traz aumento de temperatura e pressão da mistura ao final da compressão.

A busca por maiores taxas de compressão, visando aumento da eficiência térmica, sempre é limitada pela tolerância do motor à detonação.

Figura 9: DANO EM SUPERFÍCIE SÓLIDA CAUSADA PELA DETONAÇÃO.
(Fonte: Adaptado de Martinelli, 2011).

Figura 10: Aumento do fluxo térmico, temperatura e pressão causados pela detonação. (Fonte: Brunetti, 2012.).



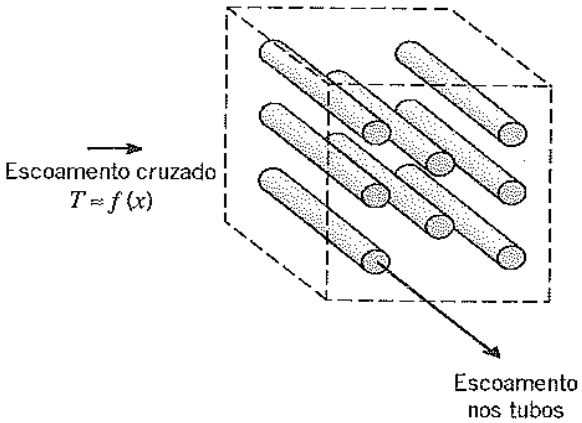
Devido às altas temperaturas e aos riscos de detonação, independentemente do método de sobrealimentação utilizado, praticamente todos os motores sobrealimentados utilizados em aplicações automotivas possuem um resfriador do ar de admissão (*intercooler* ou *aftercooler*), que nada mais é que um trocador de calor.

2.4 *INTERCOOLER*

2.4.1 Algumas definições para trocadores de calor

Tipicamente, os trocadores de calor são classificados em função da configuração do escoamento e do tipo de construção. No trocador mais simples, os fluidos quente e frio se movem no mesmo sentido ou em sentidos opostos em uma construção com tubos concêntricos (bitubular). Abaixo, na Fig.11, é possível visualizar isso.

Figura 11: Desenhos esquemático de um trocador de calor do tipo tubos cruzados. Fonte: (adaptado de Incropera, Dewitt (2008)).



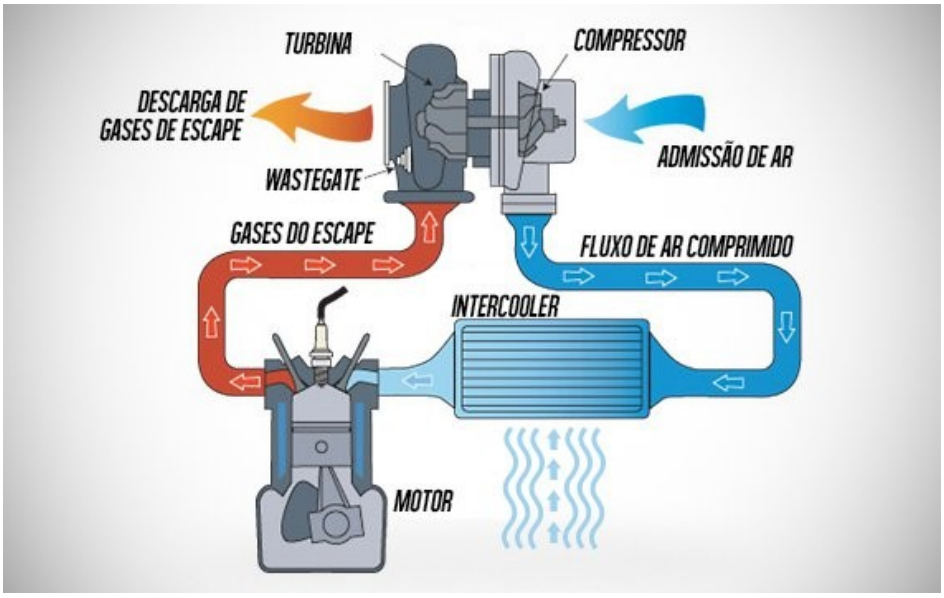
Para o *intercooler* ar-ar e ar-água presentes neste trabalho, tratam-se de trocadores de calor do tipo escoamento cruzado, onde um fluido escoa perpendicularmente ao outro. O movimento do fluido, e consequentemente sua mistura na direção transversal é possível e a variação de temperatura ocorre principalmente na direção do escoamento principal.

2.4.2 Importância do *intercooler* no processo de sobrealimentação

Durante o trabalho de compressão, ocorre um aumento da temperatura do ar. Este aumento faz com que o motor perca eficiência volumétrica, pois, devido à densidade do ar quente ser menor, não é admitida a quantidade de ar desejada, em comparação com o ar frio. Uma maneira de reduzir consideravelmente este efeito de aquecimento é utilizando um trocador de calor (*intercooler*).

A Figura 12 demonstra o ciclo de sobrealimentação com uso de *intercooler* durante esse processo.

Figura 12: Representação do ciclo de sobrealimentação com uso de *intercooler*. (Fonte: https://www.flatout.com.br/wp-content/uploads/2014/07/como-funciona-turbo.jpg).

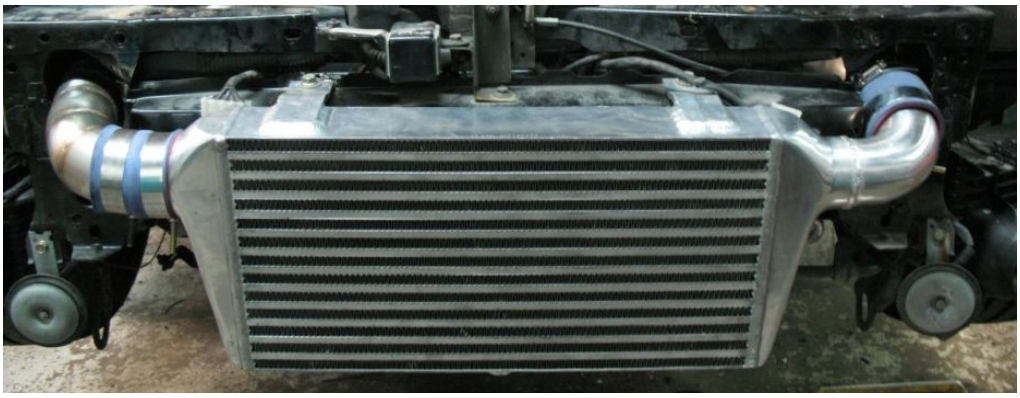


Sua estrutura básica é composta de canais, ou dutos, por onde passam ar quente vindo do compressor. Entre esses dutos existem aletas que fazem a troca do ar quente por ar resfriado, num fluxo cruzado com o ar ambiente ou com o fluido qualquer.

A seleção de um *intercooler* para um dado veículo deve ter em conta vários critérios, tais como, o espaço existente para a sua colocação, a área frontal de arrefecimento, a construção, concepção e tipo de material. No mercado existem vários formatos de dutos: estriados, com formato retangular e bordas arredondadas e brasados, parede espessa (menos eficiente na troca de calor); tubos expandidos, com tubos redondos em que o ar escoa por turbilhonamento sem que o núcleo tenha contato com as paredes do trocador de calor; retangulares e com labirintos brasados, com aletas desencontradas e paredes finas (máxima eficiência na troca de calor).

Com relação à localização do mesmo no automóvel, é recomendado que seja colocado em local com grande circulação/fluxo de ar, como na frente do veículo, ou junto à caixa de rodas (BELLS, CORKY, 1997), como demonstrado na FIG 13. Isso se mostra necessário, para que o *intercooler* possa ter uma maior eficiência na troca de calor com o ambiente.

Figura 13: Foto real do posicionamento de um *intercooler* em um automóvel. (Fonte: Adaptada de https://salaodocarro.com.br/como-funciona/motor-turbo.html);



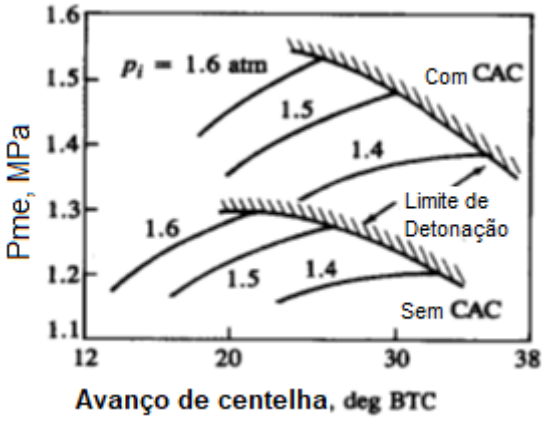
O trocador de calor reduz a temperatura do ar em relação aos valores de saída do compressor, viabilizando um aumento de densidade do ar no coletor de admissão do motor, e como consequência um aumento de sua potência.

A eficiência de um *intercooler* está entre 55% e 75% distinguindo-se pelo tipo de fluido, ar-ar ou ar-água. O primeiro caracteriza-se por ser mais simples, apresentando melhor eficiência a altas velocidades, maior confiabilidade e requer menor manutenção, assim como menor custo, utilizados em veículos comuns. Por outro lado, os *intercoolers* do tipo ar-água possuem maior eficiência a baixas velocidades, provocando menor perda de pressão do turbo, entretanto são mais utilizados para competições, pois requerem maior manutenção.

O ar resfriado ajuda a reduzir as temperaturas do processo de combustão do motor e dos gases de escapamento, trazendo benefícios significativos em termos de consumo de combustível e emissão de poluentes, além de evitar o fenômeno de detonação.

Na Figura 14, podemos observar o quanto o projeto do motor é prejudicado pelo fenômeno da detonação. Sem a utilização do *intercooler*, a razão de compressão do projeto teria de ser reduzida acarretando em uma perda de eficiência volumétrica que levaria à perda de potência, sendo necessário um motor de maiores dimensões para se alcançar a eficiência de um motor turboalimentado com *intercooler*.

Figura 14: Pressão média efetiva e limites de detonação para turboalimentação em motores com ignição por centelha (ice) em função do avanço da centelha. Fonte: (Adaptado de HEYWOOD (1988)).



A Tabela 2, mostra dados de comparação entre um motor 'VW AT 1000 16V Turbo aspirado, com turbo sem *intercooler* e com turbo com *intercooler*.

TABELA 1: Diferenças entre alguns parâmetros, para o motor VW para 1000 16V turbo. Fonte: (Adaptado de Silva, 2010).

	Aspirado	Turbo sem Intercooler	Turbo com Intercooler
Rendimento Volumétrico (%)	83,0	86,2	86,2
Rendimento Mecânico (%)	74,2	82,4	84,0
Razão Mássica de Ar/Combustível	14,5		
Massa de Combustível Admitida por Cilindro (g)	0,0169	0,0246	
Consumo Horário de Combustível (kg/h)	12,2	16,2	
Consumo Específico Indicado (g/kW)	210,3	224,0	210,8
Consumo Específico Efetivo (g/kW)	283,5	270,1	250,1
Potência Indicada (kW/cv)	57,9/78,7	72,4/98,4	77,2/104,9
Potência Efetiva (kW/cv)	42,9/58,4	60,01/81,6	64,8/88,1
Torque (Nm)	68,3	104,2	112,5
Temperatura Máxima Atingida no Ciclo (K)	2940,4	2959,0	2985,1
Pressão Máxima Atingida no Ciclo (MPa)	8,6	9,9	12,6
Ângulo de Pressão Máxima (°)	365,0	363,0	363,0
Tempertura no Escape (K)	920	917,8	879,7

Devido à grande importância do intercooler, neste trabalho serão analisados os ganhos de desempenho oriundos da sua utilização e sua viabilidade econômica.

3 METODOLOGIA

As etapas do desenvolvimento desse trabalho consistiram em: um estudo teórico sobre o funcionamento de motores e sua relação com *intercoolers*; definições de valores e simulações com auxílio do software *AVL-BOOST™*, que oferece modelos avançados para alcançar o melhor desempenho do motor, otimizando a troca de gás, injeção de combustível/emissões, turboalimentação e acústica de duto; análise de resultados.

Este software utiliza do método de diferenças finitas explícito, isto é, os parâmetros obtidos ao se resolver as equações da dinâmica dos gases, representam uma média dos valores da seção transversal das tubulações.

Tal software nos permite fazer uma análise bastante apurada, visto que o motor pode ser criado de acordo com a necessidade do usuário, podendo ser escolhida a quantidade e característica de quaisquer elementos, como por exemplo a quantidade de cilindros, catalisadores, turbocompressores, qual a taxa de compressão (mesmo que não seja um valor realista), definir condições iniciais de operação, tempo de abertura e fechamento das válvulas, dentre outras.

Além da variedade de opções citada acima, o *AVL-BOOST™* possui resultados bastante confiáveis e bem próximos do real, o que acelera o estudo do caso, além de poupar investimento no caso de grandes empresas. Entretanto, para total eficiência nos resultados, é preciso ter grande quantidade de informações sobre todos os equipamentos utilizados.

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para fazer a comparação entre diferentes aspectos do motor, analisando dados de um motor de quatro cilindros a gasolina, além da preparação do modelo com esse software.

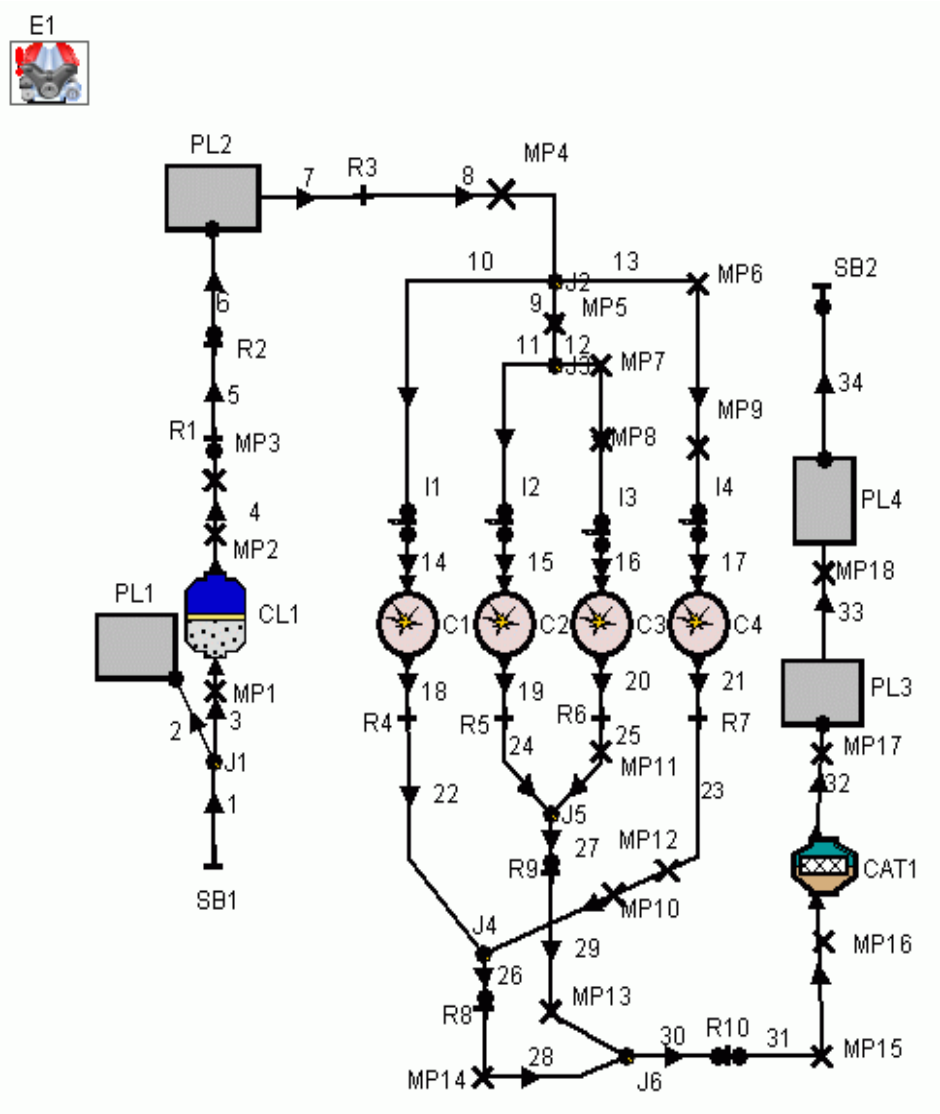
3.1 DADOS BASE UTILIZADOS PARA INICIAR A SIMULAÇÃO

Neste trabalho, foi utilizado como modelo, o motor fornecido pelo exemplo *4_Cylinder_Gasoline_Engine*, do próprio software AVL-BOOST™, que é apresentado na Fig. 15.

Este modelo consiste de: quatro cilindros, um filtro de ar, um catalisador, quatro injetores, duas fronteiras de sistema (delimitando a área do motor a ser analisada), quatro *plenum*, seis junções, dez restrições, dezoito pontos de medida e 34 conexões.

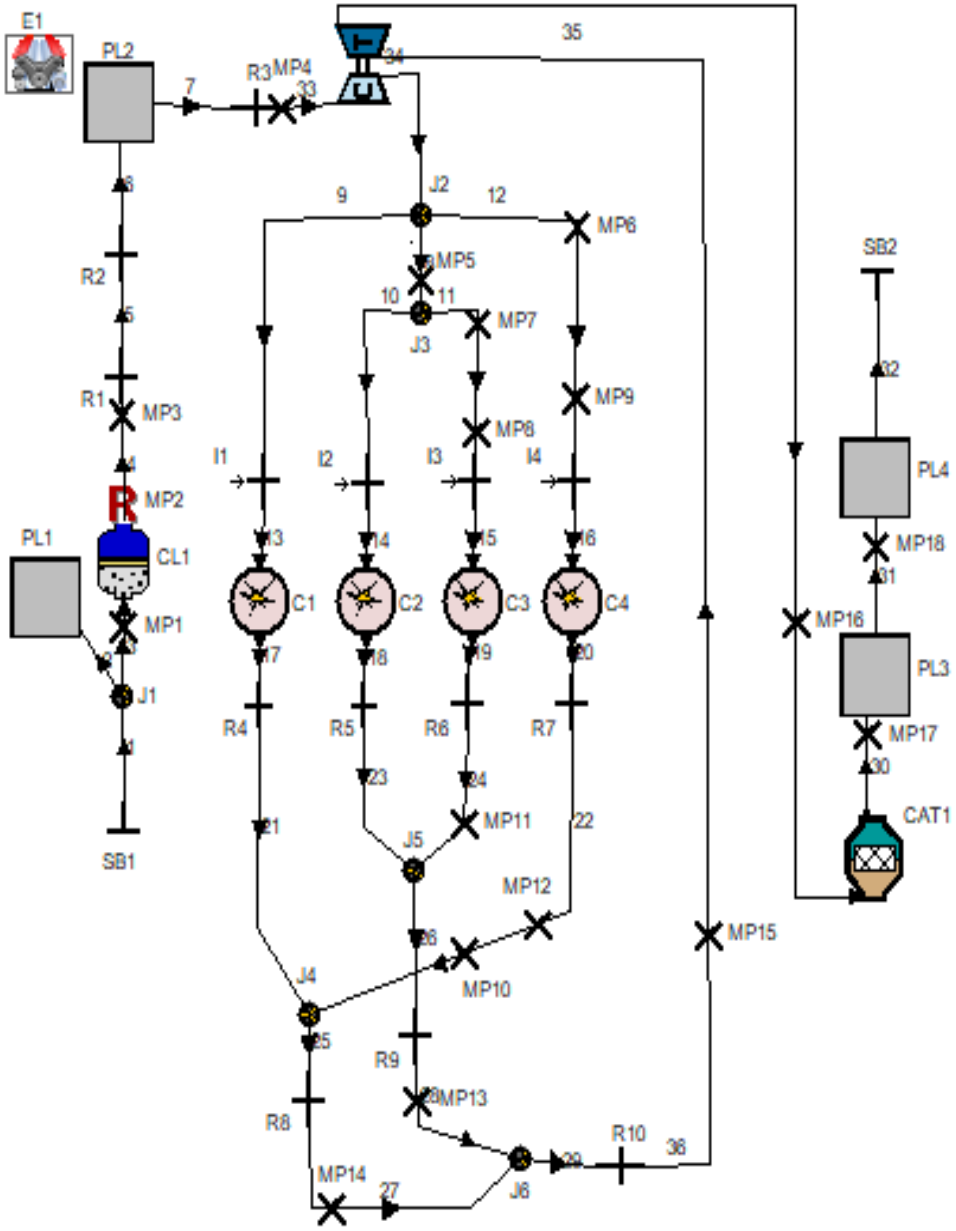
Para cada um destes equipamentos, é necessário informar condições e parâmetros de funcionamento. Tais condições foram escolhidas de acordo com o próprio manual contido no exemplo citado acima, com exceção do turbocompressor e do *intercooler,* que foram colocados posteriormente, e que tiveram suas condições de funcionamento variadas, para obtenção de conclusões acerca de qual seria a melhor opção a ser utilizada no motor de quatro cilindros em questão.

Figura 15: Diagrama do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine.* (Fonte: Software AVL-BOOST™).



Para fazer as demais comparações entre motor aspirado, turbinado e turbinado com *intercooler*, o exemplo apresentado na Fig. 15 sofreu algumas alterações e essas serão mostradas a seguir, na Fig. 16, com os parâmetros que foram utilizados.

Figura 16: Diagrama do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor.(Fonte: Software AVL-BOOST™.)



Neste exemplo, os parâmetros serão apresentados nas Figuras 15 e 16. Sendo eles:

- Tipo de cálculo: Simplified Model
- Modo de Cálculo: Waste Gate Calculation

Figura 17: Parâmetros do compressor do motor 4 tempos a gasolina do exemplo 4 cylinder gasoline engine com adição de um turbocompressor. (Fonte: Software AVL-BOOST™).

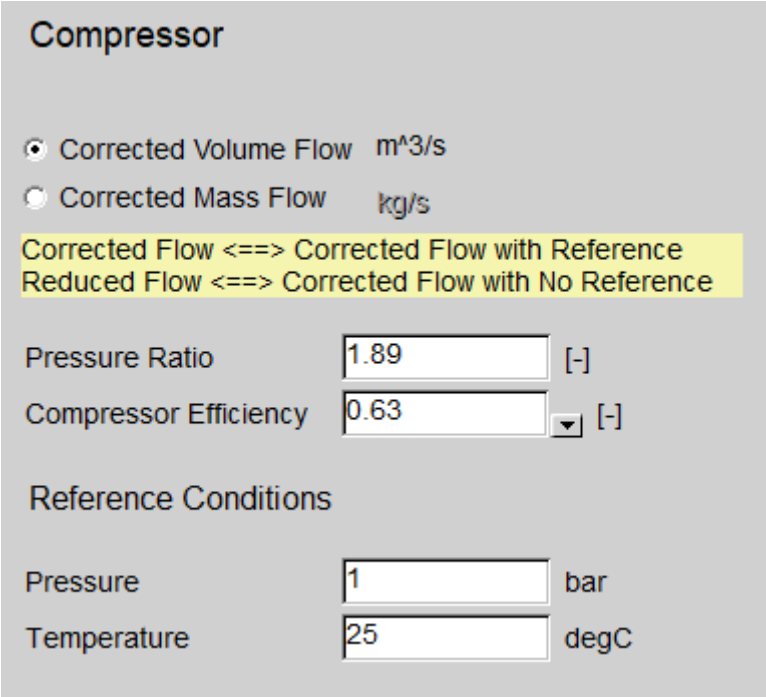
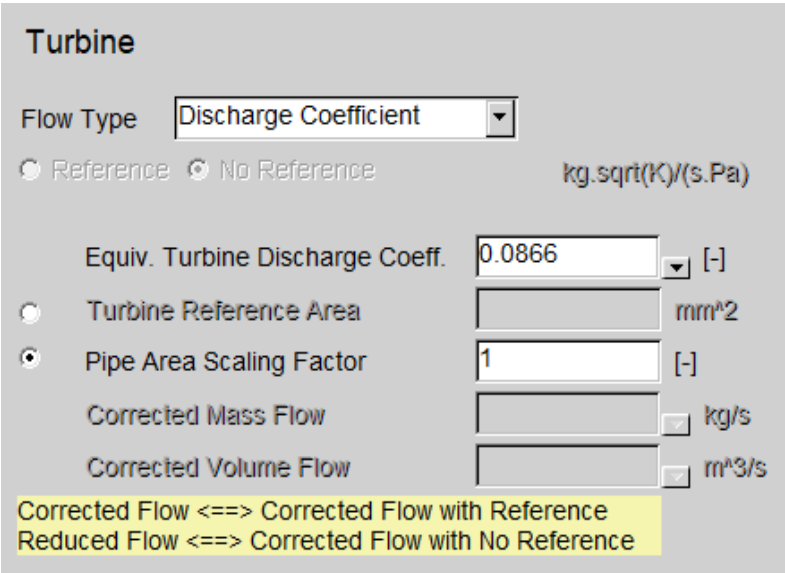
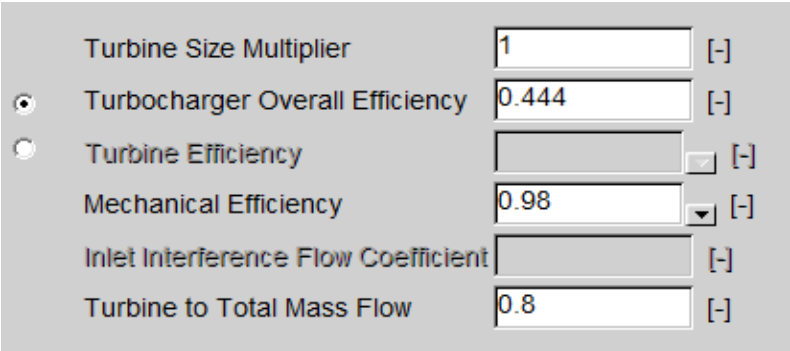


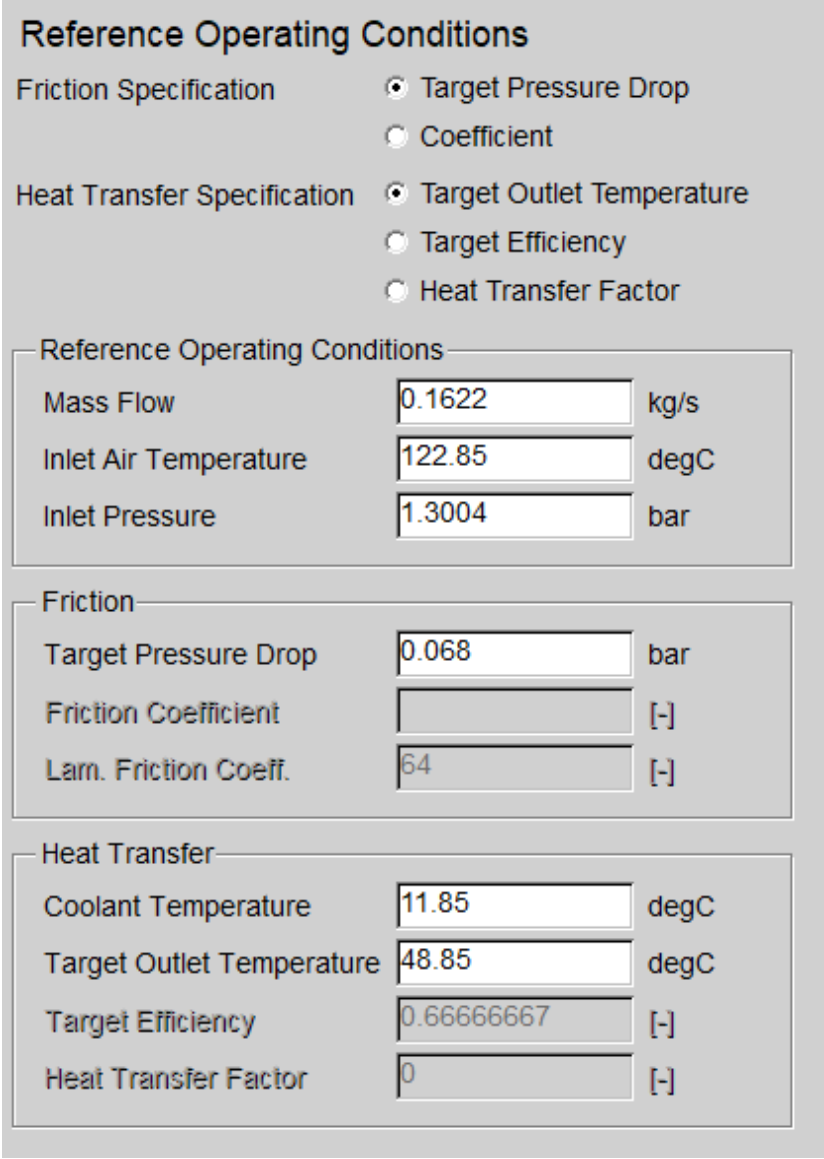
Figura 18: Parâmetros da turbina do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor. (Fonte: Software AVL-BOOST™).





Após a simulação, foi adicionado também um *intercooler* com os seguintes parâmetros:

Figura 19: Parâmetros do *intercooler* ar-água do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor e *intercooler.* (Fonte: Software AVL-BOOST™).



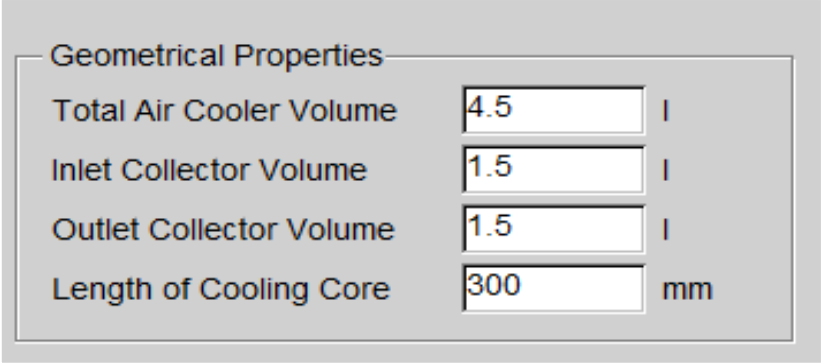
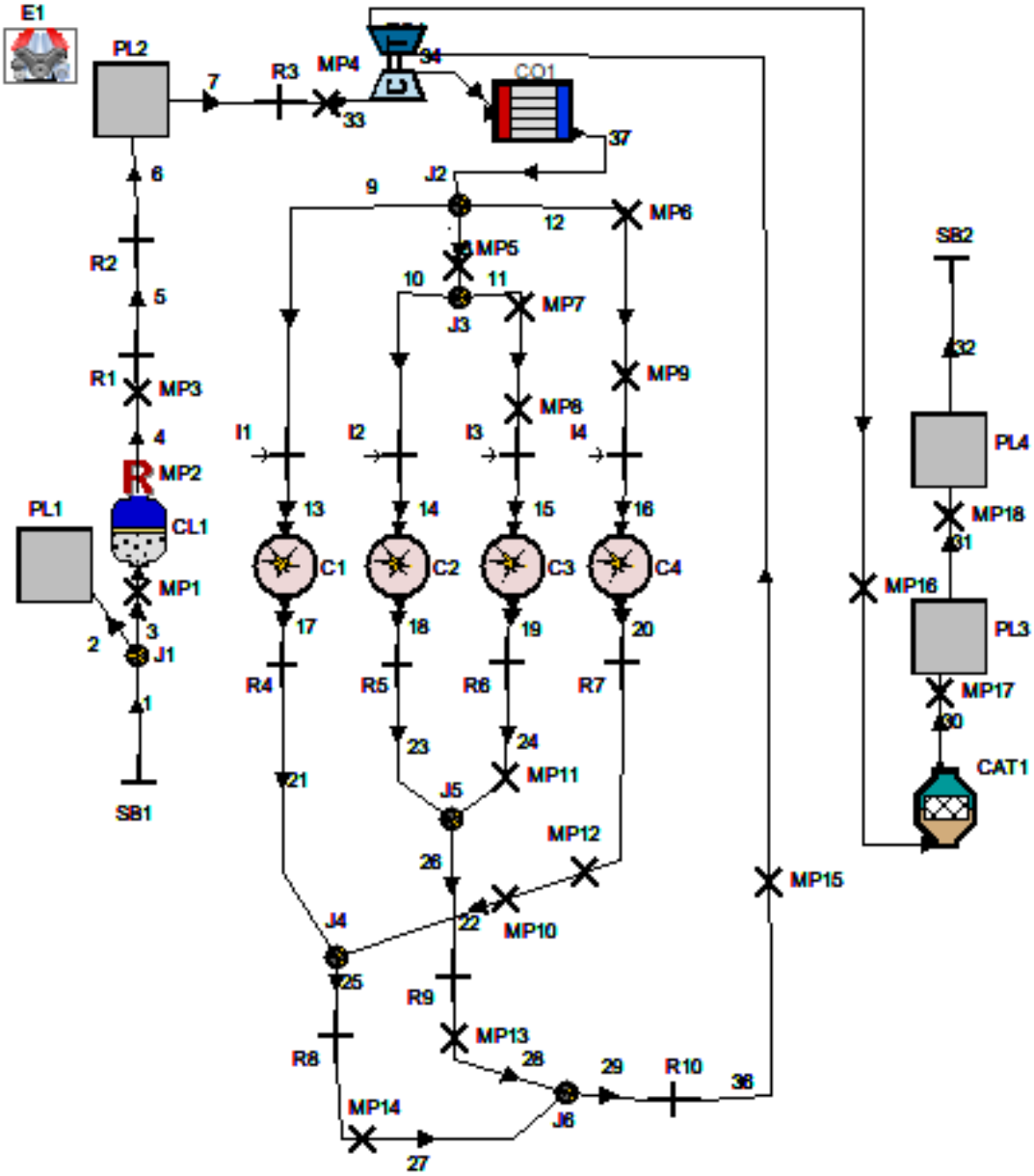


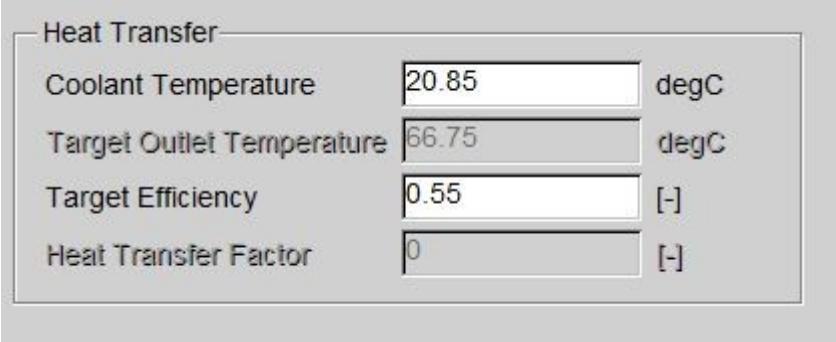
Figura 20: Diagrama do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor e *intercooler.* (Fonte: Software AVL-BOOST™).



Posteriormente, foi realizada uma simulação com o mesmo exemplo da figura acima, mudando-se apenas a eficiência do *intercooler* e a temperatura do refrigerante, como pode ser visto na próxima Fig. 21.

Tais parâmetros foram ajustados para se adequar as configurações do intercooler ar-ar, pois este possui basicamente o mesmo funcionamento do *intercooler* ar-água, diferenciando-se apenas por não ter uma troca de calor tão efetiva e ser de mais manutenção mais difícil.

Figura 21: Parâmetros do *intercooler* ar-ar do motor 4 tempos a gasolina do exemplo *4 cylinder gasoline engine* com adição de um turbocompressor e *intercooler.* (Fonte: Software AVL-BOOST™).



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

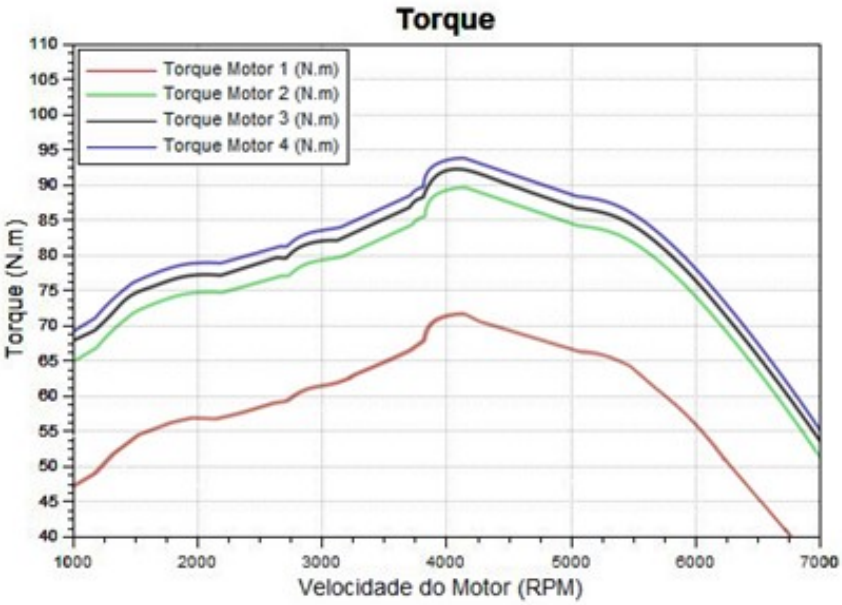
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante a realização da simulação de condições no motor quatro cilindros, bem como suas análises e discussões. Os resultados analisados após as simulações foram o torque, a potência e a eficiência volumétrica. Esses parâmetros foram escolhidos por representarem bem os ganhos do motor com a adição dos equipamentos anteriormente citados.

Nos gráficos a seguir, são exibidas as curvas características, onde Motor 1 corresponde ao motor naturalmente aspirado, Motor 2 corresponde ao motor turbinado, Motor 3 corresponde ao motor turbinado com *intercooler* ar-ar e Motor 4 corresponde ao motor turbinado com *intercooler* ar-água.

4.1 TORQUE

Como explicado na seção 2.2.1, deste trabalho, o torque é função da combustão e seu valor depende da rotação e da carga no motor, que é dado pelo aproveitamento da pressão resultante da combustão da mistura ar-combustível. Ele pode ser aumentado, por exemplo, pelo aumento da eficiência térmica e volumétrica, por serem diretamente proporcionais. No gráfico a seguir, são exibidas as curvas características do torque.

Figura 22: Curvas de torque obtidas pelo software *AVL-BOOST*™.



Através da análise da Fig. 22, pode-se levantar razões para justificar a diferença encontrada entre as curvas obtidas pelo motor naturalmente aspirado, motor turbinado, motor turbinado com *intercooler* ar-água e ar-ar. As curvas de torque obtidas pela simulação no software, a partir dos parâmetros do motor, apresentam características crescentes, até uma rotação de aproximadamente de 4000-4200 RPM.

Assim, qualitativamente, podemos dizer que após essa velocidade de rotação, as válvulas possuem pouco tempo para efetuar o trabalho, fazendo com que ele decaia.

Deve ser dito que cada motor possui uma curva própria de torque, sendo essa dependente de vários parâmetros como construção, existência de folgas, perdas mecânicas do motor, cálculo impreciso dos parâmetros etc. O que podemos analisar pelo gráfico é o deslocamento vertical sofrido pela curva de torque. Como foi anteriormente explicado na seção 2.3, com o uso do turbocompressor, a quantidade de ar enviada aos cilindros é maior, podendo assim ser utilizada uma maior quantidade de combustível, isso gera uma maior pressão efetiva, aumentando a força com que o pistão é empurrado, gerando mais torque.

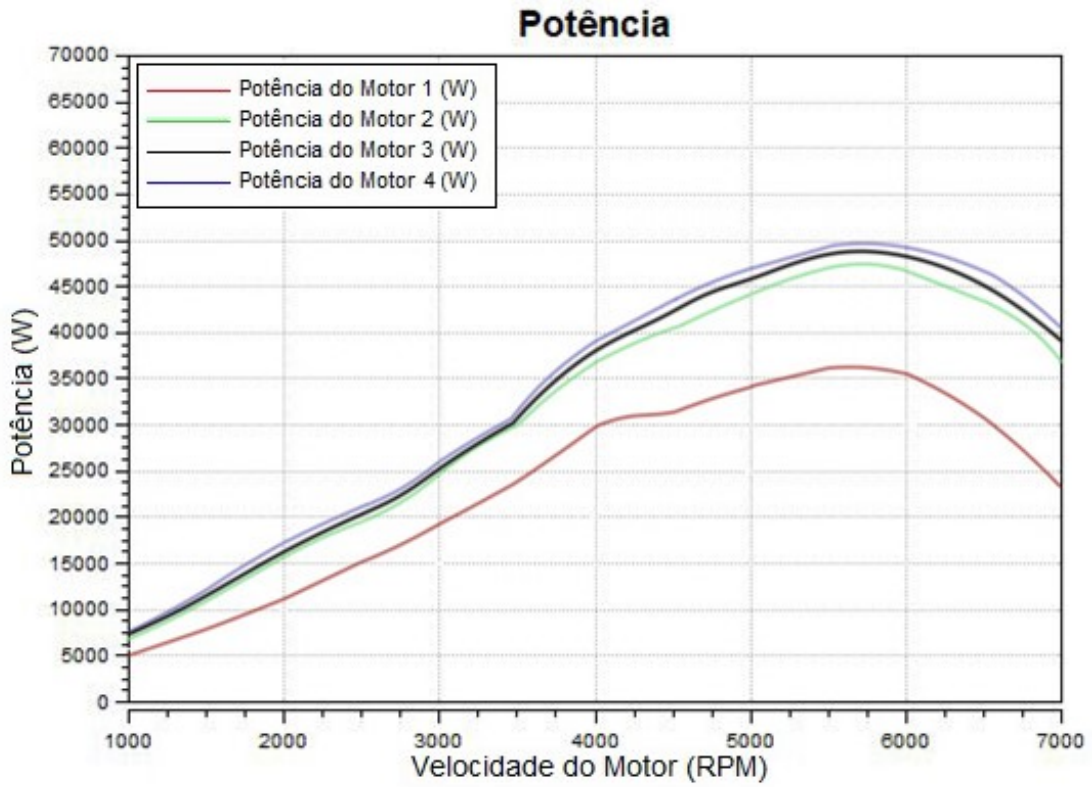
Este mesmo princípio se aplica às outras curvas, onde um resfriamento prévio do ar, fornece uma maior eficiência volumétrica. A diferença entre as curvas 3 e 4 se dá pela eficiência na troca de calor entre os fluidos ar-água e ar-ar, respectivamente.

4.2 POTÊNCIA

Como explicado na seção 2.4.2, a potência de um motor, por sua vez, se refere ao trabalho realizado ao longo de um certo tempo, e está diretamente ligada ao torque.

Além disso, velocidade de rotação do motor também tem grande influência sobre ela, portanto o motor irá reagir de maneira diferente para as altas, médias e baixas rotações. Isso pode ser observado através da Eq. 1, que relaciona torque e potência na seção 2.2.1. No próximo gráfico, são exibidas as curvas características da potência.

Figura 23: Curvas de potência obtidas *AVL-BOOST*™.



Como visto anteriormente, o comportamento da curva de potência *versus* velocidade do motor é semelhante ao do torque, já que são correlacionados.

Pela análise do gráfico, é possível notar a correlação entre o aumento da potência via instalação de um turbocompressor sem ou com *intercooler* e a RPM do motor. Isso se dá pelo fato que como um turbocompressor tem a função de aumentar a densidade da mistura admitida e por consequência a massa de mistura admitida pelo motor, como explicado na seção 2.3. Desta forma, os turbocompressores aumentam a potência de um motor através da indução positiva no coletor de admissão. Assim, além do aumento da mistura admitida, haverá um aumento na taxa de compressão dinâmica, como foi mostrado na Fig. 5.

Além de maior potência comparado a um motor de mesmo tamanho e construção, os motores sobrealimentados têm a vantagem de ter uma maior faixa de alta eficiência volumétrica. Outra vantagem comparativa da utilização de motores menores sobrealimentados (menos atritos, peso etc.) com a mesma potência de motores maiores aspirados traz ganhos de consumo de combustível

em condições de utilização em baixa carga, além de obter vantagens dinâmicas devido ao menor peso específico por cavalo vapor gerado.

Por outro lado, um dos problemas apresentados é a não linearidade na entrega de potência. Esta não linearidade é atenuada pelo uso de turbos de baixa inércia, mas a resposta do motor ao acelerador não chega perto à dos motores aspirados (excetuando-se os casos onde dispositivos anti-*lag* são utilizados, que mantêm a turbina sempre girando forte) e a resposta antes que o turbo seja capaz de produzir pressão também é inferior. Outra desvantagem é que como os motores turbos demoram cerca de três vezes mais tempo que os motores aspirados para aquecer o catalisador, isso os prejudica muito nas novas regras e padrões de testes antipoluição.

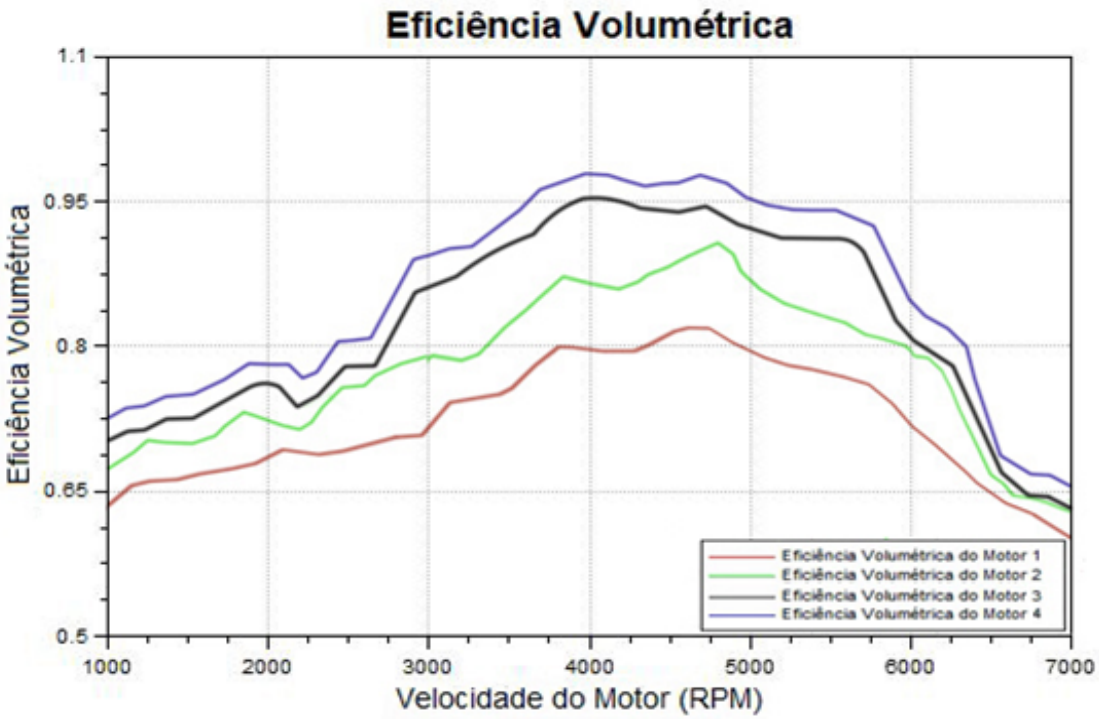
4.3 EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA

A eficiência volumétrica, como explicado na seção 2.2.5, está diretamente ligada ao desempenho e potência do motor. Pois quanto maior for a capacidade de ar na entrada, mais combustível pode ser queimado e consequentemente mais potência é produzida. A maior dificuldade para aumento da eficiência volumétrica está no tempo disponível para levar o ar até o cilindro e nas restrições impostas pelo filtro de ar, válvula borboleta, tubulações. Há muitas perdas de carga na passagem do ar, fazendo com que a quantidade introduzida no cilindro seja sempre menor que a ideal.

Essa propriedade nos permite analisar o quão eficiente está sendo o aproveitamento do ar na combustão, podendo até ser usada como comparativo entre motores de diferentes cilindradas, como mencionado na seção 2.2.5.

No gráfico a seguir, são exibidas as curvas características da eficiência volumétrica.

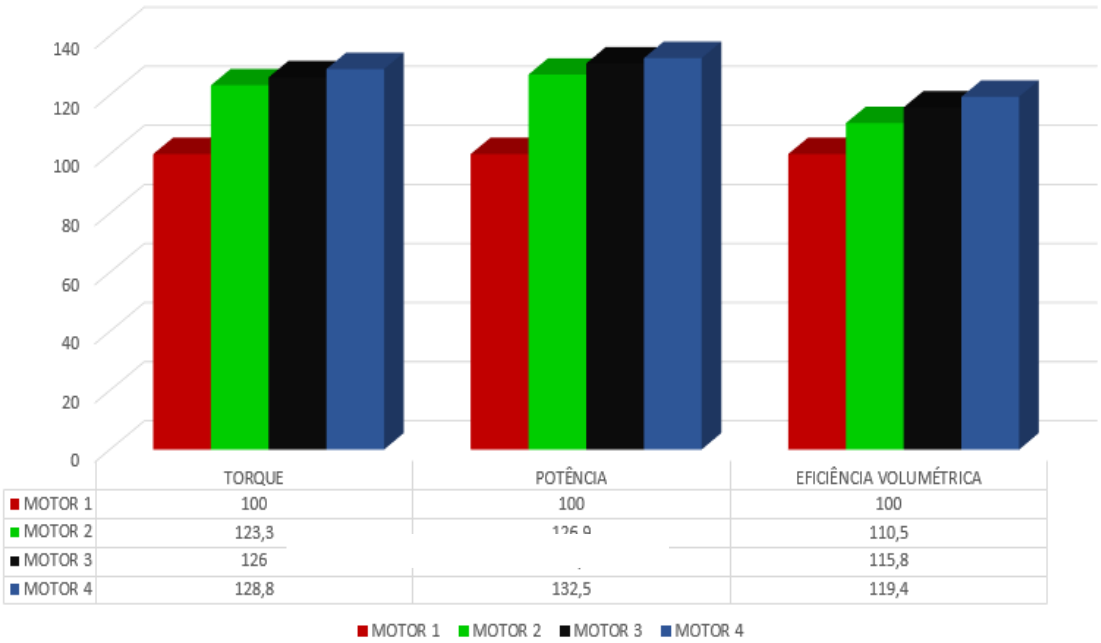
Figura 24: CURVAS DE EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA OBTIDAS, *AVL-BOOST™.*



4.4 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE OS MOTORES

A Figura 25 apresenta graficamente os percentuais de aumento de desempenho dos motores estudados. É possível verificar um ganho de aproximadamente 10,5% na eficiência volumétrica de um motor com a adição de um turbocompressor. Este ganho em eficiência volumétrica passa a ser aproximadamente 16% com a adição de um intercooler ar-ar após o turbocompressor e de aproximadamente 19% com o uso de um intercooler ar-água após o turbocompressor. A Fig. apresenta também os aumentos percentuais em torque e potência obtidos graças ao aumento da eficiência volumétrica.

Figura 25: Gráfico de barras comparativo entre os quatro motores.



	TORQUE	POTÊNCIA	EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA
MOTOR 1	100	100	100
MOTOR 2	123,3	126,9	110,5
MOTOR 3	126	[illegible]	115,8
MOTOR 4	128,8	132,5	119,4

5 CONCLUSÃO

Com a finalização deste trabalho, foi possível concluir que os parâmetros utilizados para a realização dos testes no software *AVL-BOOST*™ foram pertinentes, pois os mesmos forneceram resultados condizentes com a teoria apresentada pela literatura.

As curvas obtidas permitiram uma análise do seu funcionamento assim como valores máximos próximos ao real de cada um dos parâmetros adotados nas diversas condições de simulação.

Em trabalhos futuros, a validação quantitativa dos resultados adquiridos poderá ser melhorada após uma calibração dos parâmetros do motor no software.

A Tabela 2 apresenta os valores máximos de eficiência volumétrica, torque e potência dos motores analisados.

Tabela 2: Valor máximo dos parâmetros analisados.

	MOTOR ASPIRADO	**MOTOR TUBINADO SEM *INTERCOOLER***	**MOTOR TUBINADO COM *INTERCOOLER* AR-AR**	**MOTOR TUBINADO COM *INTERCOOLER* AR-ÁGUA**
EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA (%)	82,5	91,2	95,5	98,5
TORQUE (N X M)	73	90	92	94
POTÊNCIA (W)	37.430,2	47.507,6	48.947,3	49.580,7

Ao analisar especificamente os motores turboalimentados, com e sem *intercooler*, percebe-se a maior potência e torque na situação que possui o *intercooler* ar-água, por ele aumentar o rendimento volumétrico e otimizar o funcionamento do motor. Esse ganho é ainda maior quando se compara o motor com *intercooler* com o motor aspirado. Nos gráficos, apesar de os motores turboalimentados alcançarem a mesma temperatura durante toda a fase de combustão, a pressão dentro da câmara é maior no motor que possui o

intercooler do que a situação que não possui, devido ao aumento da densidade do ar.

Além disso, o *intercooler* permite uma maior economia de combustível e maior durabilidade para as peças do seu veículo, o que otimiza a performance do carro.

Portanto, os motores turboalimentados com adição de *intercooler* mostram-se uma opção bastante eficiente para manter os níveis de desempenho requisitados nos dias atuais, tendo em vista uma redução do consumo, bem como da poluição gerada.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Variar a quantidade de cilindros do motor de teste;
- Variar a temperatura de resfriamento do *intercooler* e analisar suas consequências no desempenho;
- Avaliação da imprecisão no cálculo dos parâmetros do motor.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELLS, CORKY, 1997, "**Maximum Boost: designing, testing, and installing turbocharger systems / by Corky Bells**", Ed Robert Bentley, Inc, 1ª ed.

GARRETT AFTERMARKET NORTH AMERICA; São Paulo, SP, Brasil. Disponível em < http://www.turbobygarrett.com/ >. Acesso em: 27 de Outubro de 2017.

HEYWOOD, J.B., **Internal Combustion Engine Fundamentals**. Massachusetts Institute of Technology, McGraw-Hill,Inc, New York, 1988.

INCROPERA, FRANK P;. DEWITT, DAVID P; BERGMAN, THEODORE L; LAVINE, ADRIENNE. **Fundamentos de Transferência e Calor de Massa**, 2008.

MARTINELLI JÚNIOR, L. C. Motores de Combustão Interna – Conceitos Básicos. 2001. (Desenvolvimento de material didático ou institucional – Material Dodático).

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2ª edição. 2006.

PULKRABEK, W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**, 2ª Ed., 2002

SILVA, A. M. **Simulação e Análise do Intercooler em Motores Otto Originais de Fábrica**, 2010

STEPHAN, R.M. "**Acionamento, Comando e Controle de Máquinas Elétricas**". 1ª edição. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2012.