

Luis Claudio Paleari Costantin

**DIMENSIONAMENTO DE TURBOCOMPRESSORES
PARA APLICAÇÃO EM MOTORES DE COMBUSTÃO
INTERNA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

Luis Claudio Paleari Costantin

**DIMENSIONAMENTO DE TURBOCOMPRESSORES PARA
APLICAÇÃO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia como requisito
parcial para a obtenção do título de Bacharel(a) em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Profa. Dra. Ana Marta de Souza

Uberlândia

2017

Luis Claudio Paleari Costantin

**DIMENSIONAMENTO DE TURBOCOMPRESSORES PARA APLICAÇÃO EM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: ____ de ____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Douglas Bezerra de Araujo

M.e Maksym Ziberov

Profa. Dra. Ana Marta de Souza

RESUMO

Esse projeto tem como principal objetivo facilitar o dimensionamento de turbocompressores para aplicações em motores de combustão interna do ciclo Otto. A utilização desses componentes tem crescido consideravelmente devido à busca por carros com motores menores, porém mais potentes e econômicos. A escolha do turbocompressor ideal, entretanto, pode ser um trabalho difícil e propício a erros. Dessa forma, foi criado um programa utilizando o software Excel para tornar essa escolha mais precisa e simples. Com o auxílio dessa ferramenta, foi possível dimensionar um turbocompressor para um modelo genérico de um motor com cilindrada total igual a 2,0L, movido a gasolina. Isso permitiu que esse motor, antes capaz de fornecer uma potência de aproximadamente 157 cv, fornecesse uma potência próxima de 200 cv, ambas em uma velocidade de rotação de 5000 RPM. Esse trabalho permite que pessoas possam dimensionar um turbo para seu carro particular, ou que projetistas possam simplificar a escolha desse componente.

Palavras-chave: turbocompressor, dimensionamento, compressor, turbina.

ABSTRACT

This project aims to facilitate the dimensioning of superchargers to be used in Otto internal combustion engines. The use of these components has increased considerably due to the search for cars with smaller, but still more powerful and economical engines. The choice of the ideal supercharger, though, may be a hard and error-prone job. This way, a program using the software Excel was created to make this choice simpler and more precise. With the help from this tool, it was possible to dimension a supercharger for a general engine of total cylinder capacity of 2.0L, that runs on gasoline. It made possible for this engine, previously capable of providing a power of approximately 157 hp, to provide around 200 hp, both situations considering a rotation speed of 5000 RPM. This project allows people to dimension a supercharger for their own personal automobile, or for designers to simplify the choosing of this component.

Keywords: turbocharger, dimensioning, compressor, turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quatro tempos de um motor de combustão interna.....	9
Figura 2 - Ciclo Otto teórico e Ciclo Otto real.....	10
Figura 3 - Curva do torque e da potência em um motor de combustão.....	12
Figura 4 - Curva do consumo específico pela rotação para duas razões de compressão	13
Figura 5 - Compressor mecânico do tipo parafusos	14
Figura 6 - Funcionamento de um turbocompressor.....	15
Figura 7 - Curva da potência e do consumo específico para motores turbo alimentados	16
Figura 8 - Turbocompressor de geometria variável	18
Figura 9 - Relação área/raio da turbina	18
Figura 10 - Corte de um mancal de rolamento.....	20
Figura 11 - Diâmetros de indução e descarga de uma turbina e um compressor	20
Figura 12 - Mapa de eficiência do compressor	22
Figura 13 - Mapa de eficiência da turbina.....	24
Figura 14 - Mapa de eficiência do compressor Garrett GT4508R	27
Figura 15 - Ponto de operação localizado no mapa de eficiência do compressor GT4508R.....	28
Figura 16 - Ponto de operação localizado no compressor GT3076R.....	29
Figura 17 - Ponto de operação do compressor para os valores desejados.....	30
Figura 18 - Pontos de trabalho no mapa de eficiência do compressor	31
Figura 19 - Mapa de eficiência da turbina GT2056	33
Figura 20 - Interface do programa para realização dos cálculos.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para o cálculo do fluxo necessário	25
Tabela 2 - Parâmetros do cálculo da pressão absoluta	26
Tabela 3 - Parâmetros do cálculo do fluxo de ar admitido pelo motor	32

LISTA DE SÍMBOLOS

T_b - torque do motor
 η_v - eficiência volumétrica
 η_t - eficiência térmica
 ρ_a - massa específica do ar
 V_d - cilindrada total
 A/F - razão ar combustível
 Q_{HV} - poder calorífico do combustível
 T_f - perdas por atrito
 P - potência
 N - velocidade de rotação do motor
 SFC - consumo específico
 $\dot{m}_f$ - vazão mássica de combustível admitido
 D_i - diâmetro de indução
 D_d - diâmetro de descarga
 W_a - fluxo de ar necessário
 HP - potência desejada
 $BSFC$ - consumo específico de combustível de eixo
 MAP_{req} - pressão absoluta
 R - constante dos gases
 T_m - temperatura do coletor de admissão
 VE - eficiência volumétrica
 P_{2c} - pressão real no coletor de admissão
 P_{1c} - pressão entre o compressor e o filtro de ar
 P_{amb} - pressão ambiente
 ΔP_{loss} - restrição do coletor de admissão
 r_c - relação de pressão
 Q_c - fluxo corrigido
 m_{asp} - massa de ar aspirada
 PR - razão de pressão da turbina
 EGT - temperatura dos gases de escape
 Q_{adm} - fluxo de ar admitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	9
2.1.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO	10
2.2 DESEMPENHO	10
2.3 MOTORES SOBREALIMENTADOS	13
2.3.1 TURBOCOMPRESSORES	14
2.3.1.1 COLETOR DE ESCAPAMENTO.....	16
2.3.1.2 VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO	16
2.3.1.3 VÁLVULA DE ALÍVIO.....	17
2.3.1.4 INTERCOOLER	17
3 DIMENSIONAMENTO.....	17
3.1 NOÇÕES INICIAIS	18
3.2 PARÂMETROS IMPORTANTES	21
3.3 MAPA DE EFICIÊNCIA DO COMPRESSOR.....	22
3.4 MAPA DE EFICIÊNCIA DA TURBINA	23
3.5 ESTUDO DE CASO	24
3.5.1 DIMENSIONAMENTO DO COMPRESSOR	24
3.5.2 DIMENSIONAMENTO DA TURBINA	31
3.6 CÁLCULOS	33
3.7 DISCUSSÃO.....	34
4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	36
5 REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

A demanda de veículos na sociedade atual busca cada vez mais motores pequenos, que possam ter rendimento máximo, emitindo menos poluentes. Ao se juntar isso com a economia de combustível, é possível encontrar um grande mercado para a utilização de turbocompressores. Utilizando esse componente, é possível fazer com que motores menores alcancem potências maiores, podendo diminuir o tamanho dos carros. É possível ainda diminuir o consumo de combustível e, consequentemente, a quantidade de poluentes lançados no ambiente. A eficiência de motores de combustão interna do ciclo Otto é relativamente baixa, e por isso um turbocompressor se torna um grande aliado na busca por melhores resultados. Esse equipamento redireciona gases de escape, a princípio não utilizados, para as pás de uma turbina, responsável por girar um compressor, que comprime o ar que entra nos cilindros do motor, garantindo uma maior pressão e assim um motor mais eficiente.

Atualmente, a indústria automotiva, através da utilização de turbocompressores, foi capaz de fazer com que motores menores desenvolvessem potências próximas ou até maiores do que motores com maior cilindrada. Vários são os modelos de automóveis que possuem motor adequado com turbo. Esses motores são o que de mais moderno pode se encontrar no mercado, e são capazes de proporcionar grandes economias e resultados no uso urbano ou em competições. Pode-se citar, por exemplo, o motor do Up! TSI, carro da Volkswagen que utiliza o sistema de turbocompressor para fornecer melhores resultados em um carro 1.0.

Muitas pessoas, na busca por um carro mais econômico e mais potente, instalam turbocompressores em seus automóveis particulares. Com isso, surgem muitos kits de turbos à venda em diversos meios.

Ao utilizar-se um turbocompressor, deve-se saber o deslocamento do motor, assim como a potência que se deseja atingir. A realidade do dimensionamento desse equipamento envolve diversos parâmetros, o que pode transformar a sua utilização de gratificante para um grande tormento. Um turbo menor poderá não dar nenhuma potência extra, enquanto um muito grande poderá causar exageros capazes de prejudicar o automóvel.

1.1 OBJETIVO

Esse projeto tem como principal objetivo, tornar mais simples o dimensionamento de turbocompressores para aplicações em motores de combustão interna do ciclo Otto e assim tornar possível que até mesmo pessoas com pouca experiência consigam compreender os parâmetros necessários para selecionar um turbo. Para esse fim, foi desenvolvido um programa, utilizando o software Excel, capaz de realizar os cálculos e assim facilitar a busca por um turbocompressor adequado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna têm função de transformar energia proveniente de uma reação química em energia mecânica através de um ciclo termodinâmico que envolve a compressão e expansão de gases. A maioria desses motores trabalha em ciclos de quatro tempos. Cada pistão requer quatro tempos e duas revoluções completas para completar um ciclo (PULKRABEK, W. et al., 2002).

1. O primeiro tempo, ou admissão, admite a mistura de ar para dentro do cilindro através da abertura da válvula de admissão, que para garantir maior massa admitida, se abre alguns instantes antes do início do movimento do pistão, e se fecha alguns instantes após o fim do movimento. O pistão é conectado à biela, que por sua vez, é conectada ao eixo virabrequim, responsável por impulsionar o movimento de rotação.
2. Em seguida, com as duas válvulas fechadas e o cilindro cheio da mistura ar combustível, acontece a compressão, o segundo tempo do ciclo, no qual o pistão sobe na direção do cabeçote do motor, comprimindo a mistura. Neste momento, com a mistura comprimida entre o cabeçote do motor e a face superior do pistão, ocorre o lançamento da centelha em motores de ignição por centelha.
3. A expansão é o próximo tempo do motor, no qual os gases a alta temperatura e pressão empurram o pistão, fazendo com que o virabrequim gire e assim produzindo a força necessária ao eixo do motor.
4. Por fim, com a câmara cheia de gases agora queimados, ocorre a abertura da válvula de exaustão e a ascensão do pistão até o ponto superior, realizando assim a exaustão dos gases e finalizando um ciclo completo. Ao fim, o conjunto cilindro-pistão está preparado para o início de um novo ciclo.

A Figura 1 apresenta os quatro tempos de um motor de combustão interna.

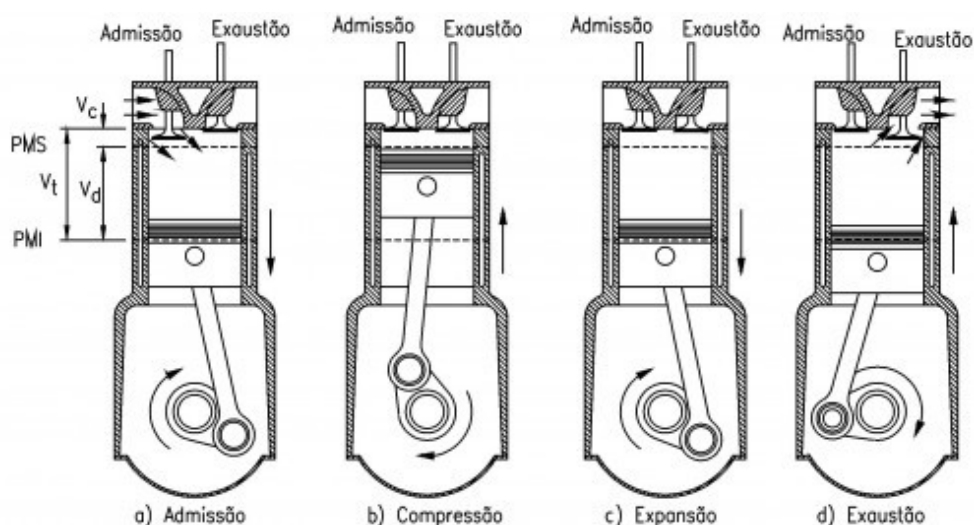


Figura 1 - Quatro tempos de um motor de combustão interna (Fonte: <http://www.culturamix.com/wp-content/uploads/2010/09/imagen-500x263.jpg>)

2.1.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO

Motores de combustão interna ciclo Otto são motores de combustão interna de ignição por centelha, isto é, a mistura ar combustível é admitida, em seguida é comprimida e inflamada por uma centelha elétrica. A Figura 2 representa os quatro tempos do ciclo Otto ideal, bem como o ciclo Otto real.

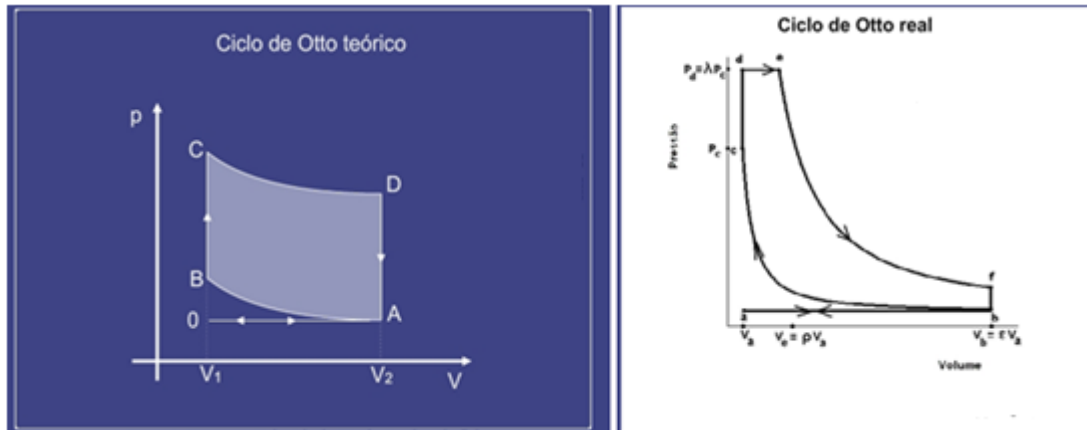


Figura 2 - Ciclo Otto teórico e Ciclo Otto real (Fonte: http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_otto.htm)

A ignição é fundamental no funcionamento de um motor do ciclo Otto. Para cada motor, existe um tempo de ignição ideal e este varia com o tamanho do motor, combustível utilizado e sua qualidade, regime de funcionamento e principalmente rotação. A potência e o desempenho do motor são influenciados diretamente pela ignição. Para garantir um bom aproveitamento da explosão, a centelha é acionada um pouco antes do pistão atingir o Ponto Morto Superior, momento em que o pistão para de subir e começa a descer. Essa referência é medida em graus antes do Ponto Morto Superior.

2.2 DESEMPENHO

A eficiência de um motor de combustão interna está diretamente relacionada ao seu desempenho. Um motor com uma alta eficiência transforma uma grande parte da energia fornecida em trabalho. Assim, um motor eficiente proporciona menor consumo específico, menor impacto ambiental e maior desempenho. Entretanto, existem muitos fatores limitantes da eficiência de um motor. As perdas acontecem graças ao atrito, transferência de calor, circuito de arrefecimento do veículo e pelo escapamento.

Um motor de ciclo Otto possui uma eficiência média de aproximadamente 30%. Isso significa que apenas 30% da energia disponível é efetivamente convertida em trabalho. Atualmente, existem inúmeros estudos que buscam aumentar essa eficiência através do entendimento do comportamento dos gases durante as etapas do processo: admissão, compressão e escapamento.

Durante a admissão, a capacidade de enchimento dos cilindros pode variar com a densidade do ar, pois quanto mais denso é o ar admitido, maior será a quantidade em massa admitida e, conseqüentemente, comprimida. Ainda, o coletor de admissão, o comando de válvulas e as próprias válvulas têm grande influência sobre a velocidade e a turbulência durante a admissão. Esses dois fatores também influenciam na quantidade de ar admitida. Pode-se afirmar ainda, que uma maior razão de compressão garantirá um maior poder de combustão e uma melhor queima. Esse processo,

entretanto, é limitado pelo fenômeno da detonação, indesejável em motores de ciclo Otto. Caso a razão de compressão seja muito alta, a mistura ar combustível entrará em autoignição, antes do lançamento da centelha, causando um trabalho negativo, ainda na subida do pistão. Por fim, o intervalo entre o fim de um ciclo e o início do outro é muito rápido em altas rotações e, portanto, a restrição na saída dos gases de escape pode interferir negativamente na entrada da nova mistura na câmara. É importante que o escapamento tenha menor restrição e a entrada da mistura seja realizada em alta velocidade, para garantir um melhor aproveitamento do ciclo do motor de combustão.

Pode-se citar, ainda, alguns métodos como a utilização de turbocompressores, chips que modificam a injeção ou avanço da ignição, naftalina e rebaixamento do cabeçote como formas de se aumentar a eficiência de um motor.

O desempenho de um motor pode ser analisado através das curvas de torque, potência e de consumo específico. Para melhor compreensão dessas curvas, alguns conceitos serão introduzidos a seguir.

O torque de um motor de combustão interna é a capacidade que ele tem de realizar trabalho. Pode-se dizer que, quanto maior o torque, maior o potencial para realização de trabalho, e portanto, melhor o desempenho do motor. Assim, procura-se garantir um maior torque através do aumento de eficiência. Isso pode ser feito de algumas diferentes formas, que serão vistas através da Equação 1 abaixo:

$$T_b = \frac{\eta_v \eta_t \rho_a V_d \left(\frac{A}{F}\right) Q_{H_v}}{4 \pi} - T_f \quad (1)$$

É possível notar que o aumento da eficiência térmica, da eficiência volumétrica, da cilindrada, da massa específica do ar ou da razão ar-combustível, garantem o aumento do torque. É possível ainda diminuir as perdas por atrito para atingir um melhor resultado.

Uma mistura homogênea e um ponto ótimo de ignição contribuem para uma combustão mais eficiente, a qual garante uma maior eficiência térmica ao motor, aumentando dessa forma o torque indicado. A densidade do ar admitido também tem grande influência, uma vez que quanto mais denso é o ar, maior a quantidade de massa de mistura ar combustível admitida.

A potência de um motor, por sua vez, refere-se ao trabalho realizado ao longo de um certo tempo, e está diretamente ligada ao torque. Além disso, o número de rotações por minuto também tem grande influência sobre a potência, portanto o motor reage de diferentes maneiras para baixas, médias e altas rotações. Isso pode ser observado através da Equação 2 que relaciona torque e potência abaixo:

$$P = 2\pi T_b \frac{N}{60} \quad (2)$$

Tanto o torque como a potência variam com a velocidade de rotação do motor. As curvas mostradas abaixo são um exemplo geral do comportamento do torque e da potência em função da velocidade de rotação de um motor de combustão interna e ignição por centelha. Na Figura 3, pode-se observar que, tanto o torque, quanto a potência são funções diretas da rotação, aumentando quando ela

aumenta. Entretanto, para rotações muito elevadas, existe grande atrito e dificuldade de enchimento dos cilindros, pois a abertura das válvulas se torna muito rápida. Assim, os indicadores de torque e potência diminuem a partir de certas velocidades.

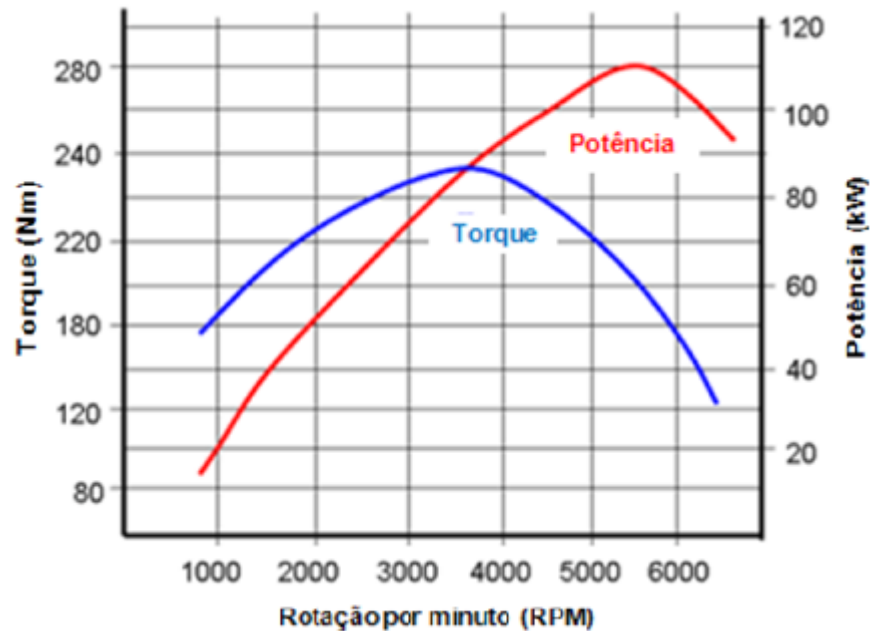


Figura 3 - Curva do torque e da potência em um motor de combustão (Fonte: <http://dicasparacarros.blogspot.com.br/2013/06/qual-diferenca-entre-torque-e-potencia.html>)

Um bom desempenho garante, também, um menor consumo específico do motor. Esse conceito se refere a eficiência de um motor para transformar combustível em energia mecânica. Ele é expresso pela quantidade de combustível que se consome para se obter uma determinada potência durante uma hora e pode ser calculado através da Equação 3.

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (3)$$

Um aumento no torque do motor pode fornecer um menor consumo específico, ou seja, menos combustível será consumido para se obter uma mesma potência. a Figura 4 representa a curva do consumo específico pela velocidade de rotação do motor, e demonstra que o consumo específico é menor em rotações médias, nas quais o torque do motor é elevado.

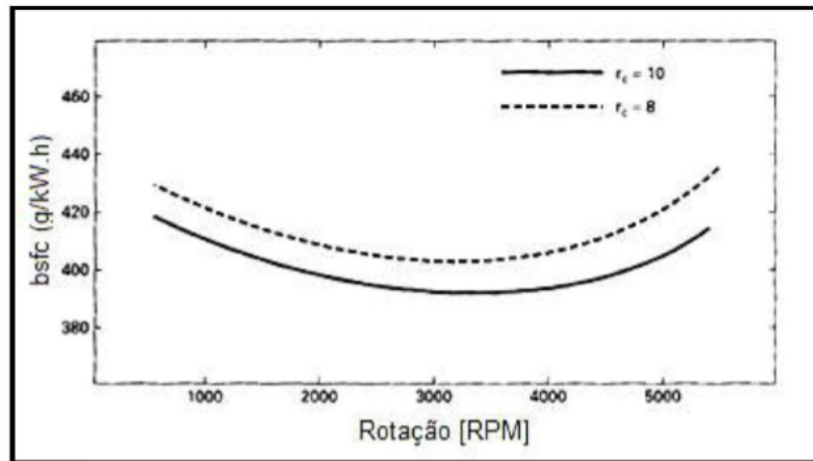


Figura 4 - Curva do consumo específico pela rotação para duas razões de compressão (Fonte: PULKRABEK, W et al. (2002) adaptada)

Uma maneira de aumentar o torque e potência de um motor de combustão interna é através da sobrealimentação, a qual permitirá ganhos de eficiência térmica e volumétrica, aumentando o torque indicado.

2.3 MOTORES SOBREALIMENTADOS

A potência máxima de um motor é limitada pela quantidade de combustível que pode ser queimada de maneira eficiente dentro da câmara. Essa, por sua vez, é limitada pela quantidade de ar admitido por cilindro por ciclo. A sobrealimentação, além de promover a entrada de uma maior quantidade de ar dentro do cilindro, contribui para o aumento da pressão dentro da câmara de combustão, o que proporciona uma combustão mais eficiente, aumentando a eficiência térmica. Como a sobrealimentação implica em maiores pressões e temperaturas de combustão, ela exige um controle mais preciso da detonação. Nesse caso, o uso de sobrealimentação implica em pequena redução da razão de compressão, a utilização de um *intercooler*, assim como diferentes estratégias para os mapas de avanço de centelha e qualidade de mistura ar-combustível (HEYWOOD, J. B. et al., 1988).

Existem três principais métodos para incremento da pressão em motores. O primeiro é a sobrealimentação mecânica, a qual utiliza uma bomba ou compressor alimentados pela energia do próprio motor, para comprimir o ar. O segundo método é através da utilização de turbocompressores, onde a energia não utilizada dos gases de escape é responsável por movimentar a turbina, que aciona o compressor, comprimindo o ar. Já o terceiro método utiliza a ação das ondas criadas pelos gases de admissão e exaustão, e assim aumenta a densidade do ar. Serão discutidos apenas os dois primeiros métodos nesse trabalho.

A sobrealimentação mecânica, utiliza um compressor mecânico, podendo esse ser do tipo parafusos, exemplificado na Figura 5, lóbulos ou palhetas. Através de polias ligadas ao próprio motor, o compressor é acionado, garantindo a compressão da mistura de admissão. A rápida resposta desse tipo de compressor e o fato dele funcionar desde baixas rotações do motor são suas principais vantagens. Entretanto esse método de sobrealimentação tem, como principal desvantagem, o efeito parasita do compressor sobre o motor de combustão interna, uma vez que o compressor consome parte da potência efetiva do motor.

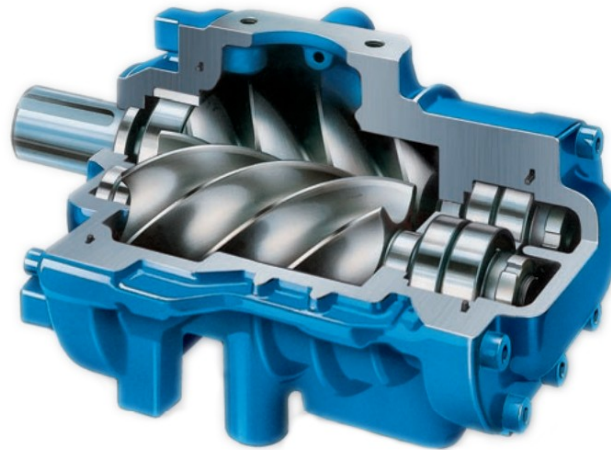


Figura 5 - Compressor mecânico do tipo parafusos (Fonte: <https://mecanicafacil-ra.blogspot.com.br/2015/10/compressor-de-parafuso-com-funcao.html>)

Dentre os compressores mecânicos utilizados, os compressores de palhetas necessitam de grande lubrificação interna, e esse óleo se incorpora ao fluxo de ar e é queimado no motor juntamente com a mistura admitida, o que pode gerar poluentes indesejáveis. O de compressor lóbulos apresenta baixo rendimento e retira muita potência do motor para seu funcionamento. Por fim, o compressor de parafusos possui altos rendimentos, entretanto é muito grande e caro, o que pode torná-lo inviável para aplicações em automóveis.

Os turbocompressores são constituídos por uma turbina e um compressor ligados por um eixo. O sistema é acionado pela dinâmica dos gases de escape, a qual gira uma turbina que fornece trabalho a um compressor centrífugo, responsável por comprimir o ar de admissão. Dessa forma o turbocompressor utiliza a energia dos gases de escape para compressão do ar, não consistindo numa carga parasita para o motor, como é o caso dos compressores mecânicos. Esse é um dos fatores que os tornam tão utilizados em motores de combustão interna. Assim, a melhor compreensão de seu dimensionamento tornou-se a principal motivação desse trabalho e esse método é destacado nos tópicos a seguir.

2.3.1 TURBOCOMPRESSORES

Turbocompressores são componentes que utilizam a pressão e temperatura dos gases de escape, energia essa que seria desperdiçada, para aumentar a quantidade de ar admitido e, conseqüentemente, a eficiência do motor. O turbocompressor é composto por uma turbina, ligada a um compressor através de um eixo e, na maioria das vezes, por uma válvula de alívio ou *wastegate* e um trocador de calor (*intercooler*) para o resfriamento do ar de admissão. Ao utilizar-se a energia dos gases de escape, é possível alterar o balanço energético do motor, e assim, aumentar sua eficiência térmica.

Diferente do compressor na sobrealimentação mecânica, o turbocompressor não consome potência do eixo do motor de combustão interna. Não existe, nesse caso, perda de energia para acionamento, sendo essa a principal vantagem do turbocompressor com relação ao compressor de acionamento mecânico.

O fluxo de escape dos gases que saem do cilindro do motor é direcionado para a turbina do turbocompressor e responsável por girar suas pás, transformando a energia de pressão em energia cinética. A turbina por sua vez é conectada ao compressor através de um eixo, fazendo com que ele também gire, e as pás do compressor comprimem o ar admitido do ambiente, aumentando sua pressão e densidade. Como a compressão do ar causa um aumento de temperatura, e esse aumento causa, por sua vez, uma diminuição da densidade (efeito oposto ao desejado), o ar comprimido passa por um *intercooler* responsável por diminuir sua temperatura. Por fim, o ar, então mais denso, é admitido nos cilindros do motor. Devido à maior quantidade de ar admitido, aumenta-se também a quantidade de combustível da mistura, elevando o torque e a potência no motor sobrealimentado. A válvula *wastegate* é responsável por garantir que o sistema não ultrapasse a pressão máxima, assim ela permite que apenas parte necessária dos gases de escape passem pela turbina, não permitindo que o sistema atinja uma pressão maior que a suportável. O ciclo de funcionamento do turbocompressor pode ser observado na Figura 6.

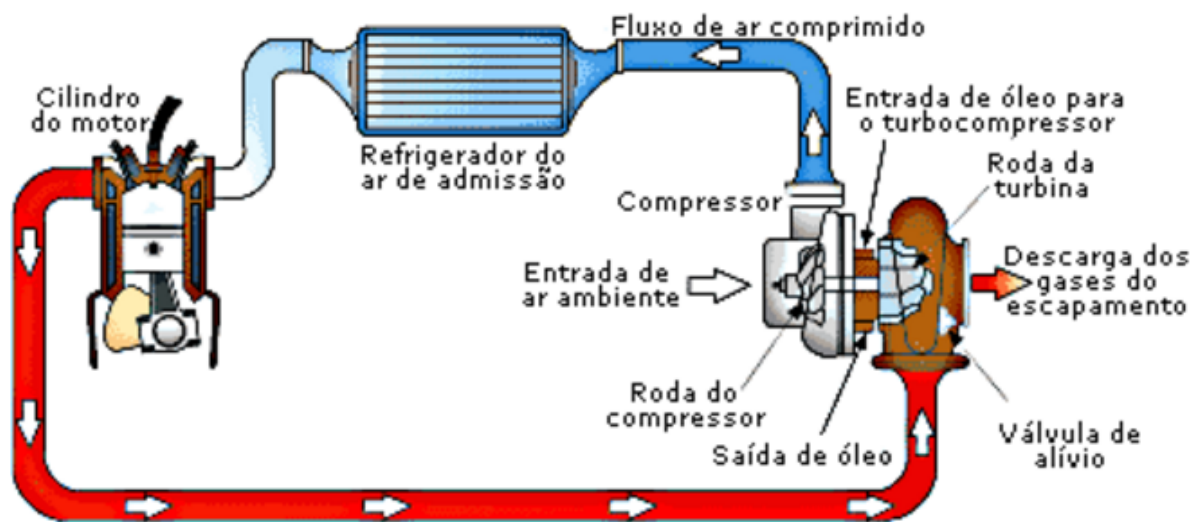


Figura 6 - Funcionamento de um turbocompressor (Fonte: <http://canalparadasolicitada.blogspot.com.br/2013/01/como-funciona-turbina.html>)

O turbocompressor opera em três diferentes fases. Quando o ar atmosférico é apenas admitido pelo motor e não é comprimido, devido a baixa energia dos gases de escape que não giram as pás da turbina, essa fase é chamada de carga parcial inferior. Em carga parcial média, o ar é comprimido pelo compressor em uma pressão próxima à atmosférica. Por fim, quando o motor opera em plena carga, o ar admitido é comprimido à máxima pressão suportada pelo equipamento.

A turbina e o compressor que compõem um turbocompressor normalmente possuem uma faixa de operação na qual é possível obter alta eficiência. Diferente do compressor mecânico, o turbocompressor opera melhor em médias e altas rotações, e não é capaz de fornecer uma resposta rápida e eficiente em baixas rotações, sendo essa a sua maior desvantagem.

Várias são as vantagens de se utilizar um turbocompressor. Dentre elas, pode-se citar o aumento do torque e, consequentemente, o aumento da potência do motor, a redução do consumo específico e a redução da emissão de poluentes. Devido à forte turbulência provocada pela velocidade do ar ao ser introduzido nos cilindros sob alta pressão, a mistura tende a tornar-se mais homogênea e a combustão mais eficiente. Isso faz com que a combustão tenha melhor rendimento e existam menos

resíduos, diminuindo a emissão de poluentes. A Figura 7 mostra o aumento em potência e diminuição do consumo específico obtidos pela utilização de turbocompressor em motores automotivos.

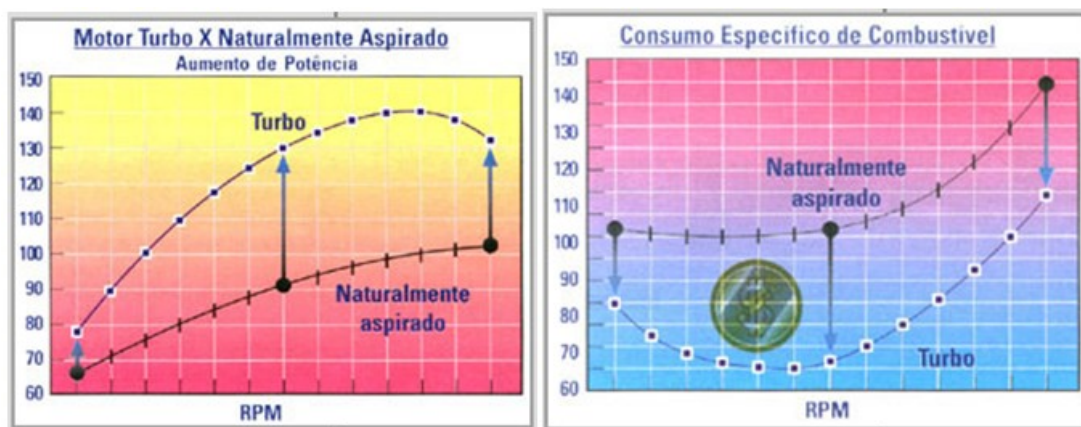


Figura 7 - Curva da potência e do consumo específico para motores turbo alimentados (Fonte: <http://www.tradiesel.com.br/vantagens.htm>)

É possível se encontrar várias opções de sistemas de turbocompressores na indústria automotiva atualmente. Existem, por exemplo, estágios de turbina de geometria variável, capazes de agregar vantagens de um turbocompressor grande ou pequeno. Todas essas possibilidades devem ser levadas em conta quando seleciona-se um turbocompressor para um motor, para, assim, maximizar sua eficiência e evitar futuros problemas. A potência que deseja-se atingir, a cilindrada total do motor, rotação, eficiência volumétrica e as condições ambientais são parâmetros iniciais para escolha de um turbocompressor.

Um ponto negativo da utilização de um turbocompressor frequentemente citado é o "turbo lag". Em baixas rotações, não há fluxo suficiente de gases de escape para que a turbina funcione de maneira significativa. Assim, o turbo costuma funcionar melhor em rotações a partir de 2500-3000 RPM. Após o acionamento do acelerador, a turbina demora um certo tempo até que ela possa girar suficientemente rápida para atender à demanda do motor.

Outro ponto negativo é que um motor sobrealimentado por um turbocompressor apresenta uma maior complexidade quando comparado à motores comuns. Assim, a Central Eletrônica (ECU) precisa monitorar o tempo de ignição e restringir o nível de pressão para evitar a detonação e pré-ignição.

2.3.1.1 COLETOR DE ESCAPAMENTO

O coletor de escapamento pode variar em material, design e modelo de fabricação. Ele é responsável por guiar os gases de exaustão para a turbina, evitando ao máximo a perda de calor e pressão. Seu material pode variar entre alumínio, ferro fundido, aço carbono e aço inoxidável.

2.3.1.2 VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO

Em aplicações de turbocompressores, é necessário garantir que a pressão no turbo não supere a máxima suportada. Assim, são utilizadas válvulas conhecidas como *wastegate* que desviam o ar

excedente que sai do coletor de escape para o ambiente ao invés de direcionar esse ar para o coletor de admissão. Dessa forma, a turbina para de girar, evitando que o compressor continue girando e ultrapasse a pressão de admissão desejada. Essa válvula, entretanto, aumenta o *lag*, ou atraso de resposta ao se requerer potência.

2.3.1.3 VÁLVULA DE ALÍVIO

Quando o motor está trabalhando em plena carga, se o acelerador é cessado de uma vez, isto é, ocorre o fechamento rápido da válvula borboleta, o compressor se manteria rodando em alta velocidade. Isso aumentaria muito a pressão na saída do compressor, até o fluxo de ar ser revertido, criando um efeito cíclico chamado de SURGE. Isso pode afetar o turbocompressor causando problemas no seu funcionamento. Para isso, utiliza-se uma válvula de alívio entre o compressor e a válvula borboleta, que apenas aliviará a pressão proveniente do compressor caso a borboleta se feche, evitando o SURGE.

2.3.1.4 INTERCOOLER

O *intercooler* atua entre a turbina e o coletor de admissão com a função de trocar calor e resfriar o ar que passa por essa região. O ar, ao passar próximo à turbina, se aquece demasiadamente. Assim, para garantir um processo mais seguro e de maior potência, o ar é resfriado no *intercooler*, garantindo que o ar de admissão seja mais frio e, conseqüentemente, mais denso. Isso garante maior pressão no turbo e portanto mais potência.

3 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento de um turbocompressor a ser utilizado por um motor de combustão interna deve ser feito de maneira correta, evitando problemas e aumentando a sua eficiência. As dimensões do turbocompressor podem favorecer uma faixa de rotação em relação à outra. Menores dimensões tendem a favorecer rápidas respostas em baixas rotações porém não terão vazão suficiente para alimentar o motor em altas rotações. Já um turbocompressor de maiores dimensões necessitará de muita energia proveniente dos gases de exaustão para gerar uma pressão positiva, garantindo uma resposta mais lenta, e condições desfavoráveis em baixas rotações. Entretanto, em altas rotações o turbocompressor produzirá maior potência.

Existem no mercado atualmente, turbocompressores de geometria variável. O seu funcionamento consiste no uso de pás internas que variam a área de ar admissível. Quando o motor está em baixas rotações, ele funciona como uma turbina pequena, enquanto em altas rotações ele age como uma turbina grande. A Figura 8, demonstra como as pás desse turbocompressor permanecem fechadas para baixas rotações (lado esquerdo), mas se abrem conforme o aumento da velocidade do motor para aumentar o aproveitamento da vazão de gases de escape (lado direito).

Os motores equipados com turbocompressores de geometria variável proporcionam mais suavidade no motor e melhor rendimento, entretanto, por serem mais complexos, são mais susceptíveis a problemas. Suas pás internas necessitam de mais lubrificação e estão mais sujeitas a desgaste. Por isso, em algumas aplicações, é preferível a utilização de dois turbocompressores diferentes, ao invés de um turbocompressor de geometria variável.

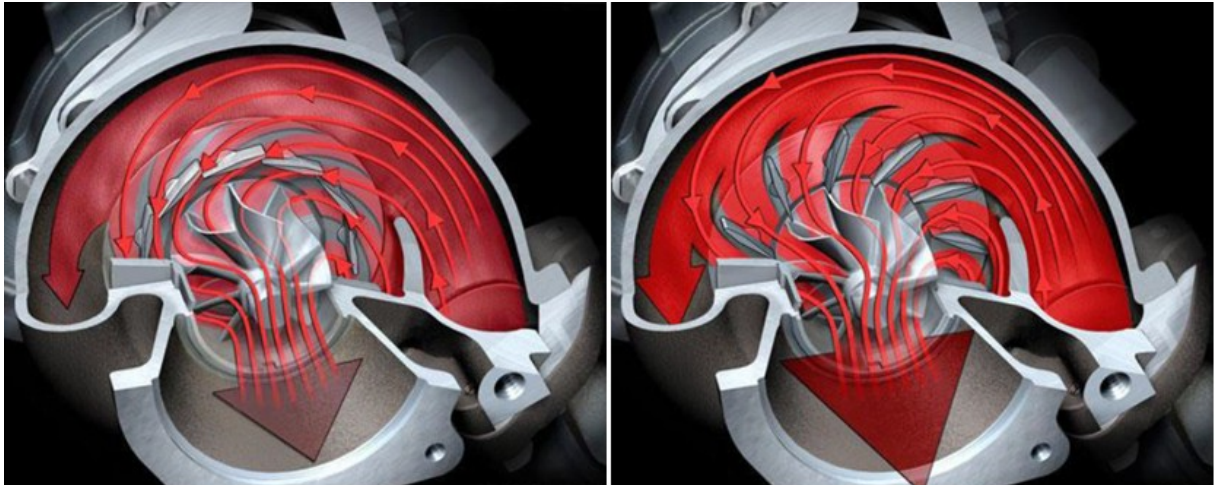


Figura 8 - Turbocompressor de geometria variável (Fonte: <https://www.flatout.com.br/tudo-sobre-turbo-como-funciona-a-geometria-variavel-compressao-e-mapas/>)

Nesse projeto, será estudado apenas o dimensionamento de turbocompressores de geometria fixa, devido sua maior fiabilidade. Para isso alguns parâmetros são de extrema importância para a escolha do turbocompressor mais adequado.

3.1 NOÇÕES INICIAIS

O tipo de utilização é muito importante na decisão de qual turbocompressor a ser utilizado. Em carros de competição, como na Fórmula 1, por exemplo, o arranque e velocidade são muito importantes enquanto para trânsito urbano, deve-se levar em conta economia de combustível e menor nível de poluição.

Um parâmetro muito importante na escolha do turbocompressor provém da relação entre a área transversal (de admissão no caso da turbina e descarga para o compressor) do rotor e o seu raio, demonstrados na Figura 9. Essa relação pode ser chamada de A/R , ou relação Área/Raio. Esse valor, apesar de existente nos compressores, é mais importante para a seleção da turbina, pois a velocidade com que os gases entram na turbina tem relação inversa à área de entrada.

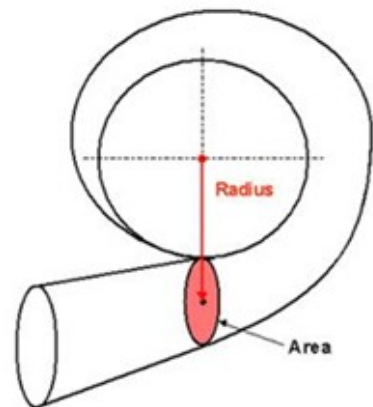
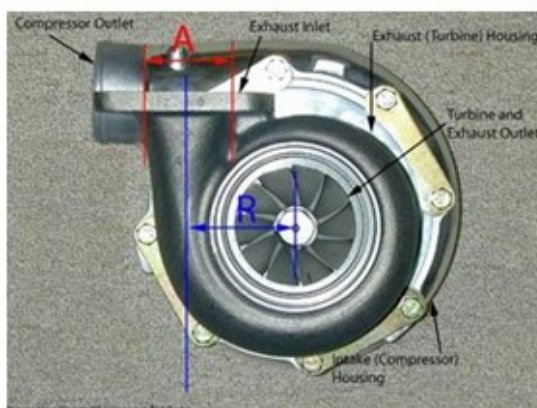


Figura 9 - Relação área/raio da turbina (Fonte: aula Prof. Eduardo Loureiro, DSc, POLI/UPE adaptada)

Quanto menor for a relação A/R para uma turbina mais rápida será a sua resposta, pois ela terá uma pequena área de entrada de gases, para um grande raio de giro. Entretanto, o seu pequeno tamanho pode inibir e até causar sufocamento do motor para altas rotações, em caso de alguma restrição.

Considerando os outros parâmetros constantes, uma maior relação A/R, oferece melhores resultados para altas velocidades do motor, sendo útil para geração de potência na faixa final de rotação. Isso ocorre pois a área de entrada dos gases é muito maior que o raio da turbina. Contudo, o movimento dos gases de exaustão se torna mais lento e causa um retardo na resposta do turbocompressor, até que ele produza potência suficiente.

Diferentes relações de A/R apenas podem ser diretamente comparadas em uma mesma família de compressores, uma vez que esse não é o único parâmetro a influenciar na capacidade de fluxo. O valor dessa relação normalmente gira em torno de um, podendo ser um pouco maior ou um pouco menor que esse valor. Sabendo que dois motores utilizam turbocompressores similares, para os quais a única diferença é o valor de A/R, é possível determinar a sua intenção de uso, como no exemplo a seguir.

1. Motor 1 com relação A/R de 0,63
2. Motor 2 com relação A/R de 1,06

O Motor 1 tem uma menor relação de A/R, o que demonstra uma tendência voltada para otimização de resposta. Em altas velocidades de rotação, esse turbo resultaria em elevada contrapressão, causando perda de potência. Seria uma utilização voltada para carros de passeio.

O Motor 2, por sua vez, utiliza uma relação de A/R maior, o que indica busca por elevados picos de potência, sacrificando os resultados em baixas velocidades de rotação. Essa aplicação é mais desejável para carros de corrida do que o Motor 1, trabalhando em elevadas velocidades na maioria do tempo.

A diminuição do atraso de resposta em turbocompressores é um grande desafio para essa tecnologia. Uma das maneiras encontradas de se fazer isso é através da redução do atrito entre o eixo que une a turbina e o compressor. Para isso, muitas vezes, são utilizados mancais de rolamentos, como apresentado na Figura 10, ao invés de mancais de deslizamento.



Figura 10 - Corte de um mancal de rolamento (Fonte: <https://www.flatout.com.br/turbocompressores-entendendo-o-basico-sobre-seu-funcionamento/>)

Outro ponto, importante na análise do compressor, é o trim. Esse valor é a razão entre o diâmetro de admissão e de descarga dos rotores, seja do compressor ou da turbina. Esses parâmetros podem ser visualizados na Figura 11.

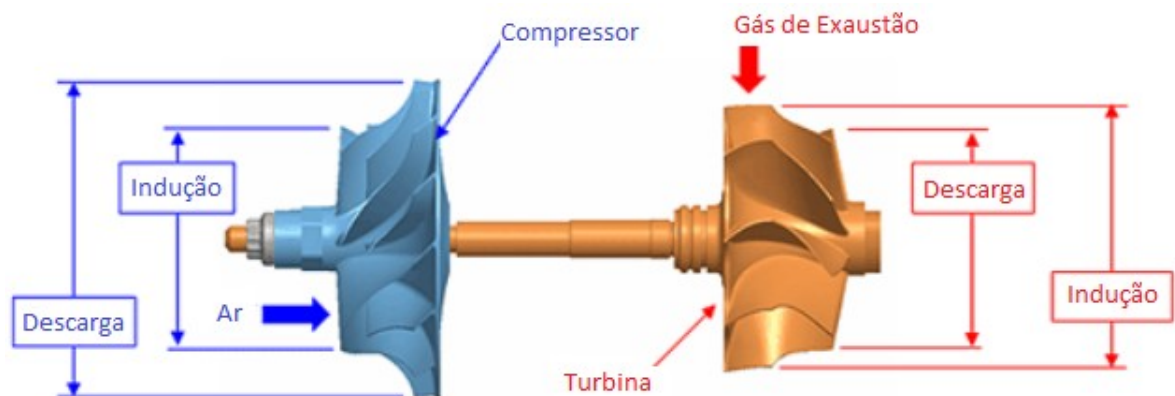


Figura 11 - Diâmetros de indução e descarga de uma turbina e um compressor (Fonte: aula Prof. Eduardo Loureiro, DSc, POLI/UPE adaptada)

O trim evidencia a capacidade de vazão para o rotor, fator esse mais importante para o compressor do que para a turbina, no qual a vazão máxima é de grande importância. A Equação 4 representa como pode ser calculado esse valor. Um trim elevado representa uma maior capacidade de vazão do rotor.

$$Trim = \frac{D_i^2}{D_d^2} * 100 \quad (4)$$

Dessa forma, para um compressor com diâmetro de indução de 61mm e diâmetro de descarga de 82 mm, por exemplo, o trim é igual a 55.

3.2 PARÂMETROS IMPORTANTES

Várias devem ser as considerações ao se escolher o turbocompressor ideal a ser utilizado. Os principais parâmetros que devem ser analisados previamente envolvem qual o combustível usado no veículo (no caso desse trabalho, álcool ou gasolina), a potência que se deseja obter, qual a cilindrada total do motor, e em qual velocidade de rotação deseja-se atingir essa potência.

Inicialmente, deve-se decidir qual a potência extra que se deseja alcançar com a utilização do turbocompressor. Com essa informação, o próximo passo é identificar o quanto de ar será necessário para atingir o resultado desejado. Para aquisição de cem cavalos de potência, o motor precisa de dez libras de ar por minuto de funcionamento. Utilizando a Equação 5, é possível calcular o fluxo de ar necessário para o motor em libras por minuto.

$$W_a = HP * \frac{A}{F} * \frac{BSFC}{60} \quad (5)$$

Em seguida, é preciso definir o valor da pressão absoluta através da Equação 6. Para isso, deve-se saber a cilindrada do motor que utilizará o turbo, uma vez que a pressão absoluta é diretamente proporcional a ela.

$$MAP_{req} = \frac{W_a * R * (460 + T_m)}{VE * \frac{N}{2} * V_d} \quad (6)$$

O próximo passo é determinar qual a influência da restrição ao fluxo que o coletor de admissão oferece. A melhor maneira de calcular essa influência é com um sistema de aquisição de dados, em bancada de testes, mas essa maneira não é muito prática. Esse valor pode variar entre aproximadamente 1 psi e 4 psi, equivalente a 0,069 bar e 0,276 bar respectivamente, e é usualmente adotado como um valor médio de 2 psi (0,138 bar). Assim deve-se adicionar 2 psi à pressão absoluta para determinar a pressão na saída do compressor, que é a pressão real no coletor de admissão, como na Equação 7.

$$P_{2c} = MAP_{req} + \Delta P_{loss} \quad (7)$$

A pressão de admissão no compressor deveria ser, em tese, igual à pressão atmosférica, de aproximadamente 1,013 bar (14,7 psi) considerando à nível do mar. Entretanto, deve-se considerar as perdas referentes ao filtro de ar e outras possíveis restrições. Usualmente utiliza-se o valor de 1 psi (0,069 bar) para esse cálculo, valor esse que deve ser subtraído da pressão atmosférica para obtenção da pressão na entrada do compressor, utilizando a Equação 8.

$$P_{1c} = P_{amb} - \Delta P_{loss} \quad (8)$$

Com esses valores, é possível se obter a razão de pressão do motor através da Equação 9.

$$r_c = \frac{P_{2c}}{P_{1c}} \quad (9)$$

O fluxo de ar necessário, juntamente com a razão de pressão, ambos possíveis de serem calculados através das equações acima, são suficientes para localização de um compressor adequado, com o auxílio dos mapas de eficiência de compressores.

3.3 MAPA DE EFICIÊNCIA DO COMPRESSOR

Para auxiliar no dimensionamento do turbo, será utilizado o mapa de eficiência do compressor, apresentado pela Figura 12. Esse mapa consiste em um gráfico circunscrito no plano cartesiano no qual o eixo horizontal representa o fluxo de ar (*Mass Flow Axis*) e o eixo vertical representa a pressão relativa (*Pressure Ratio Axis*). No plano, encontram-se as ilhas de eficiência (*Efficiency Islands*) que são responsáveis por fornecer a leitura da eficiência, indicando que, quanto menor a ilha, maior a eficiência. É importante considerar ainda, as linhas que limitam as “ilhas” à esquerda e à direita. Essas linhas são chamadas de Linha de Sobrecarga (*Surge Line*) e Linha de Estrangulamento (*Choke Line*), respectivamente.

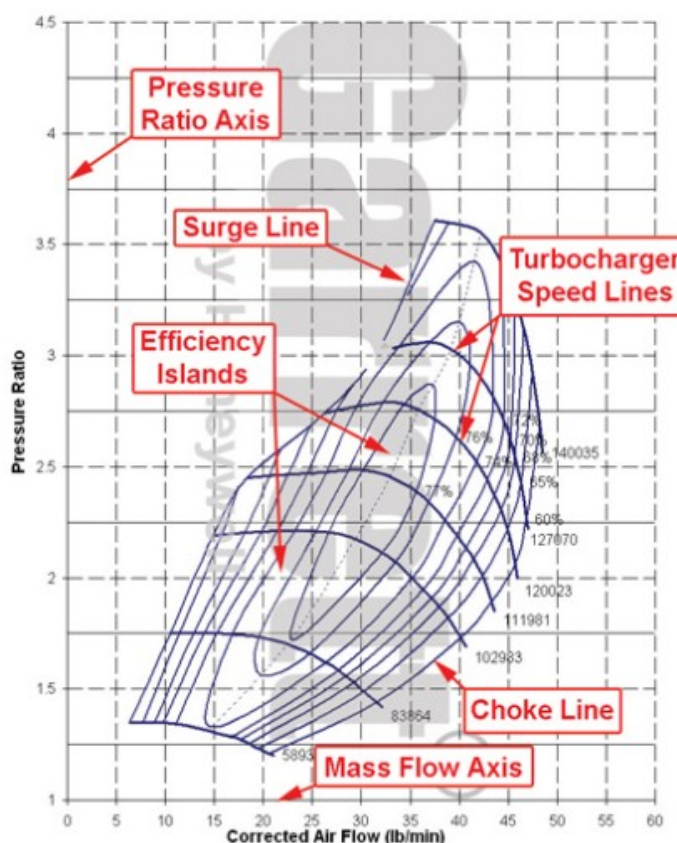


Figura 12 - Mapa de eficiência do compressor (Fonte: <https://chaodaoficina.wordpress.com/2016/01/31/turbocompressores-mapas-de-eficiencia/>)

Se o compressor operar à esquerda da Linha de Sobrecarga, fora das “ilhas” de eficiência, o compressor estará funcionando de forma instável. Isso se deve ao fluxo insuficiente que causa alta turbulência no seu interior. Esse caso pode representar um erro na escolha do turbocompressor, consistindo em um turbo maior do que o ideal para o motor utilizado. Esse efeito pode ocorrer também, quando a válvula borboleta é fechada bruscamente em um momento no qual o motor opera em plena carga, mas, nesse caso, a turbulência é apenas momentânea e pode ser evitada com uma válvula de descarga entre o compressor e a borboleta.

Em contra partida, um compressor operando à direita da Linha de Estrangulamento, representa que o seu tamanho está demasiadamente pequeno para tal aplicação. Nesse caso, o compressor é incapaz de prover o fluxo de ar necessário para o funcionamento do motor. Isso pode causar grandes aumentos de temperatura responsáveis por graves problemas ao turbocompressor.

As linhas de velocidade da turbina (*Turbocharger Speed Lines*) não são consideradas nas equações matemáticas de escolha de um turbocompressor. Entretanto, elas representam a rotação aproximada do eixo para diferentes valores de pressão de fluxo de ar e indicam sob qual faixa de rotação o turbo é mais eficiente.

3.4 MAPA DE EFICIÊNCIA DA TURBINA

A turbina utilizada por um turbocompressor converte o gás de escape do motor em energia mecânica para acionar o compressor. No geral, elas podem ser do tipo axial ou radial. A turbina do tipo axial permite a passagem do fluxo de gases apenas na direção axial. Esse tipo de turbina, no entanto, é muito pouco utilizado devido a sua maior complexidade, e na maioria das vezes seu maior tamanho e peso. A medida que elas estão se tornando menores, as turbinas de fluxo axial vem se tornando mais populares em automóveis. As turbinas de fluxo radial, por outro lado, são muito mais comuns em aplicações automobilísticas e utilizam uma tecnologia mais tradicional. Esse tipo de turbina recebe a vazão de gás radialmente, de fora para dentro. Seu tamanho e peso são reduzidos quando comparados à de fluxo axial, e por isso é a mais utilizada. Dessa forma, a segunda não será discutida nesse momento.

Existe grande dificuldade no dimensionamento de turbinas, pois os fabricantes raramente disponibilizam os seus mapa de eficiência. As variáveis necessárias para escolha de uma turbina podem apenas ser estimadas previamente à instalação do turbocompressor. Os mapas de eficiência de turbinas contam com informações referentes à energia necessária na turbina para que o compressor comece a funcionar. Assim, é possível saber qual a mínima rotação necessária do motor, para que a turbina seja capaz de fornecer energia ao compressor, para que esse comece a comprimir ar para o interior dos cilindros.

Sabendo-se o fluxo de ar admitido pelo motor em uma determinada rotação, é possível estimar o fluxo de ar que sairia pelo escape através da Equação 10. Isso porque o fluxo volumétrico após o escape do motor é maior que o inicial, devido à maior temperatura causada pela queima à alta pressão dentro do motor. Uma abstração teórica pode ser feita através da utilização da fórmula a seguir estimando o valor do fluxo dos gases de escape.

$$Q_c = \frac{m_{asp}}{PR} * \sqrt{\frac{EGT+460}{518,7}} \quad (10)$$

Após o cálculo dos parâmetros necessários para a definição do compressor a ser utilizado para alcançar a potência desejada e a sua seleção através da utilização de mapas de eficiência de compressores, é necessário saber como esse turbocompressor funcionará em baixas rotações, ou a partir de qual rotação mínima ele começará a atuar de maneira efetiva. Para isso, o compressor é desconsiderado de forma a verificar se o fluxo de ar naturalmente admitido seria capaz de fornecer energia suficiente para a turbina ser capaz de girar o compressor.

Os mapas de eficiência das turbinas podem ser analisados utilizando o fluxo corrigido calculado através da Equação 10. O mapa representado na Figura 13 corresponde à linha de eficiência de três turbinas similares, porém com diferentes valores de relação A/R. Assim, é possível verificar qual das três é mais adequada para uma determinada situação. Alguns mapas, entretanto, possuem apenas uma linha de eficiência, com a qual é possível realizar a verificação se determinada turbina é ou não apropriada. É importante notar que, nos mapas de eficiência de turbinas, pode-se observar a

partir de qual relação de pressão a turbina, e por sua vez o compressor, atuam de forma efetiva. No caso do mapa a seguir, esse valor é de pouco mais de 1,5.

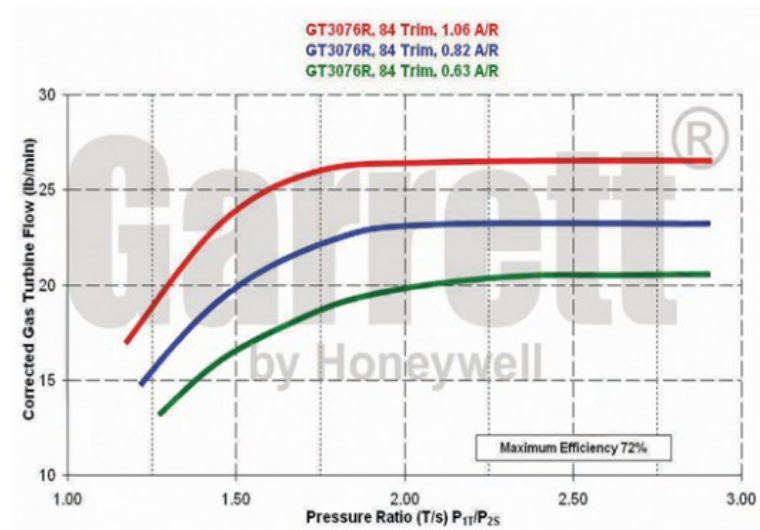


Figura 13 - Mapa de eficiência da turbina (Fonte: <https://chaodaoficina.wordpress.com/2016/01/31/turbocompressores-mapas-de-eficiencia/>)

3.5 ESTUDO DE CASO

Para facilitar o entendimento dos cálculos, será feito um exemplo com dados gerais. Um motor genérico 2.0 movido a gasolina será o ponto de partida. Esse motor desenvolve uma potência de 157 cavalos a 5000 RPM. Com a utilização do turbocompressor, deseja-se extrair 200 cavalos de potência nessa mesma velocidade de rotação. Esses são dados iniciais que dependem do motor ao qual será adicionado o turbocompressor, e pretensões de quem estiver o utilizando. Como a maioria dos mapas de compressores utilizam unidades do sistema americano, os cálculos desse estudo de caso darão prioridade para essas unidades, mas também as compararão com os sistema internacional (SI).

3.5.1 DIMENSIONAMENTO DO COMPRESSOR

O primeira etapa é o dimensionamento do compressor a ser utilizado para atingir os valores de potência desejados. Para isso, deve-se utilizar as Equações de 5 a 9 para se obter o fluxo e a razão de compressão necessários. Muitos dos valores utilizados, tratam-se de estimativas, visto que são valores que podem variar com a velocidade de rotação do motor, temperatura e pressão ambiente, entre outros. Como a intenção é facilitar o dimensionamento de turbocompressores, esses parâmetros serão estimados em valores coerentes com casos gerais, mas eles podem ser facilmente alterados nos cálculos.

- 1º Passo: Cálculo do fluxo necessário para atingir a potência desejada.

Em motores movidos a gasolina, a relação ar-combustível estequiométrica é usualmente igual a 14,6:1. Isso quer dizer que para cada 14,6 partes de ar, em peso, é necessária a queima de uma parte completa de combustível. Em motores sobrealimentados, a mistura ar combustível se torna normalmente mais rica. Assim, será adotado o valor de 12:1, ainda que em alguns casos possa variar

um pouco para mais ou para menos. Em motores movidos a etanol, por exemplo, essa relação é de aproximadamente 9:1.

O *Brake Specific Fuel Consumption* (BSFC), ou em Português, Consumo Específico de Combustível do Eixo, é outro fator que depende do combustível, e para carros sobrealimentados, movidos a gasolina, seu índice pode variar de 0,5 a 0,6 libras por HP hora. Esse índice representa a quantidade de combustível necessária para um motor fornecer 1 HP (1,0138 cavalo) de potência. Baixo consumo específico indica que o motor requer menos combustível para gerar 1 HP. Para fins de cálculo, será adotado um valor médio de 0,55 libras por HP hora (335 g/Wh). No caso do etanol, esse valor costuma ser de aproximadamente 1 libra por HP hora (608g/Wh). A fim de converter esse valor para libras por minuto, ele é dividido por 60 na Equação 6.

Com essas informações, pode-se utilizar a Equação 5 para determinar o fluxo necessário em libras por minuto, para se atingir a potência desejada. Assim:

$$W_a = \frac{200}{1,0138} * 12 * \frac{0,55}{60}$$

$$W_a = 21,70 \text{ lb/min}$$

Para facilitar a visualização dos valores utilizados para o cálculo do fluxo necessário, a Tabela 1 representa esses parâmetros nas unidades utilizadas para o cálculo, assim como nas unidades do sistema internacional (SI).

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Valor (SI)	Unidade
Fluxo necessário	W _a	21,7	lb/min	0,156	kg/s
Potência desejada	HP	200	cv	147100	W
Relação Ar/Combustível	A/F	12	-	12	-
Consumo específico de combustível do eixo	BSFC	0,55	lb/HPh	355	g/Wh

Tabela 1 - Parâmetros para o cálculo do fluxo necessário

- 2º Passo: cálculo da pressão absoluta no coletor de admissão.

Encontrado o valor do fluxo necessário para atingir a potência desejada, o próximo passo é encontrar o valor da pressão absoluta, através da Equação 6. Para isso, deve-se conhecer a constante dos gases, igual a 639,6 lbf.in/lb.°F (287 J/kgK). Já a temperatura do coletor de admissão é variável, mas costuma-se utilizar 130 °F (aproximadamente 55 °C) para aplicações que utilizam um *intercooler*. A eficiência volumétrica do motor (VE) depende do seu projeto. Motores modernos de quatro válvulas por cilindro atingem uma eficiência entre 95%-99%, contra 88%-95% em motores de duas válvulas por cilindro. Esse valor varia com a velocidade de rotação do motor, mas para esse modelo, será adotado o valor de 98%. Por fim, será utilizado o valor da cilindrada total em polegadas cúbicas, e para isso, deve-se multiplicar o seu valor em litros, no caso desse modelo, 2 litros, por 61,02.

$$MAP_{req} = \frac{21,70 * 639,6 * (460 + 130)}{0,98 * \frac{5000}{2} * 122,04}$$

$$MAP_{req} = 27,39 \text{ Psi}$$

A Tabela 2 representa os valores utilizados para o cálculo da pressão absoluta nas unidades utilizadas, bem como no sistema internacional (SI).

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Valor (SI)	Unidade
Pressão absoluta	MAP_{req}	27,39	Psi	188847,4	Pa
Fluxo necessário	W_a	21,7	lb/min	0,156	kg/s
Constante dos gases	R	639,6	lbf.in/lb.°F	287	J/kgK
Temperatura do coletor de admissão	T_m	130	°F	328,15	K
Eficiência volumétrica	VE	0,98	-	98%	-
Velocidade de rotação do motor	N	5000	RPM	83,33	Hz
Cilindrada total	V_d	122,04	in ³	2	L

Tabela 2 - Parâmetros do cálculo da pressão absoluta

- 3º Passo: cálculo da pressão na entrada e na saída do compressor.

Levando em consideração as perdas existentes entre o compressor e o coletor de admissão, é possível, agora, calcular a pressão na saída do compressor. Utilizando a Equação 7, e o valor estimado de 2 psi de perdas, tem-se:

$$P_{2c} = 27,39 + 2$$

$$P_{2c} = 29,39 \text{ Psi}$$

Em seguida, deve-se utilizar a pressão atmosférica e a Equação 8 para se encontrar o valor da pressão na entrada do compressor.

$$P_{1c} = 14,7 - 1$$

$$P_{1c} = 13,7 \text{ Psi}$$

- 4º Passo: cálculo da razão de pressão.

Com os valores da pressão na entrada e na saída do compressor, é possível encontrar a sua razão de pressão utilizando a Equação 9.

$$r_c = \frac{29,31}{13,7}$$

$$r_c = 2,15$$

Com o fluxo necessário e a razão de pressão determinados, deve-se escolher o compressor adequado para a aplicação, isto é, selecionar um turbocompressor capaz de fornecer 21,70 lb/min com uma relação de pressão de 2,15.

- 5º Passo: selecionar um mapa de eficiência de compressor adequado.

Neste modelo, será analisado, inicialmente, o mapa de eficiência de um compressor Garrett GT4508R com as seguintes especificações:

- A/R: 0,69

- Trim: 56
- Diâmetro de descarga: 108 mm

A Figura 14 representa o mapa de eficiência do compressor, para o modelo citado acima.

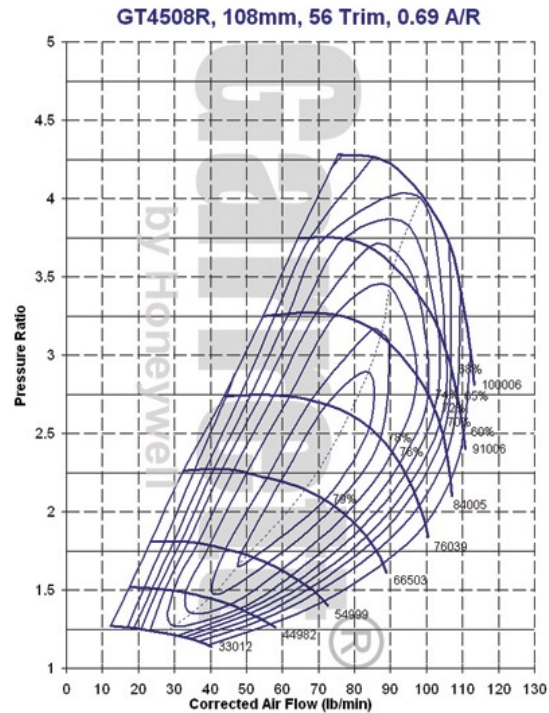


Figura 14 - Mapa de eficiência do compressor Garrett GT4508R (Fonte: <http://www.limitengineering.com/products.html>)

Com o mapa de eficiência do compressor selecionado, o próximo passo é localizar no gráfico o ponto formado pelo fluxo de ar e pela razão de compressão calculados.

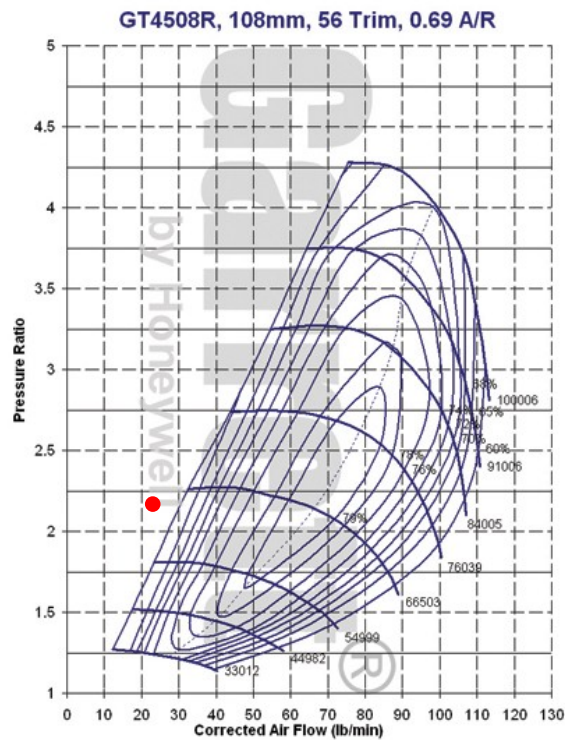


Figura 15 - Ponto de operação localizado no mapa de eficiência do compressor GT4508R (Fonte: <http://www.limitengineering.com/products.html> adaptada)

É possível observar que o ponto de operação ficou fora do mapa de eficiência do compressor, o que claramente demonstra que esse não é um dimensionamento adequado para ser utilizado nessa aplicação. O ponto ficou localizado à esquerda da linha de sobrecarga, o que indica que esse compressor é muito grande para esse caso. Manter um compressor operando nessa situação pode causar falha e fim da vida útil precoce do equipamento, por ser uma região de fluxo instável.

Assim, será analisado o mapa de eficiência de um segundo compressor, o Garrett GT3076R, com as seguintes especificações:

- A/R: 0,60
- Trim: 56
- Diâmetro de descarga: 76,2 mm

Observando o ponto de operação, localizado na Figura 16, é possível notar que esse compressor é mais apropriado para essa aplicação, uma vez que o ponto se encontra localizado dentro do gráfico, apesar de distante das ilhas de maior eficiência.

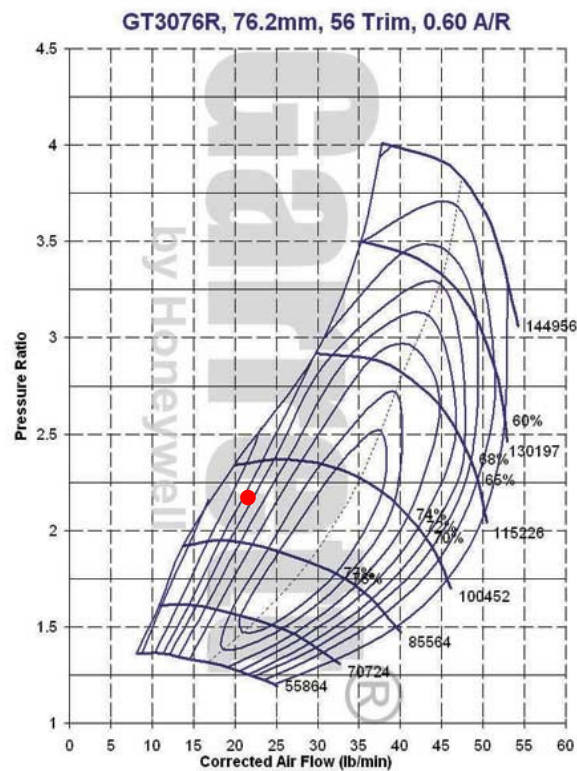


Figura 16 - Ponto de operação localizado no compressor GT3076R (Fonte: <http://www.limitengineering.com/products.html> adaptada)

Entretanto, o ponto encontra-se muito próximo da linha de sobrecarga, o que pode fazer com que o motor opere à esquerda da linha em situações de baixas velocidades de rotação. Para aplicações em que o motor opera frequentemente em altas rotações, como em corridas, esse compressor poderia ser aplicado, contudo, para uma aplicação comum, ele também não é apropriado.

Analisa-se então a Figura 17 com o mapa de eficiência de um compressor Garret GT2056:

- A/R: 0,53
- Trim: 55
- Diâmetro de descarga: 56 mm

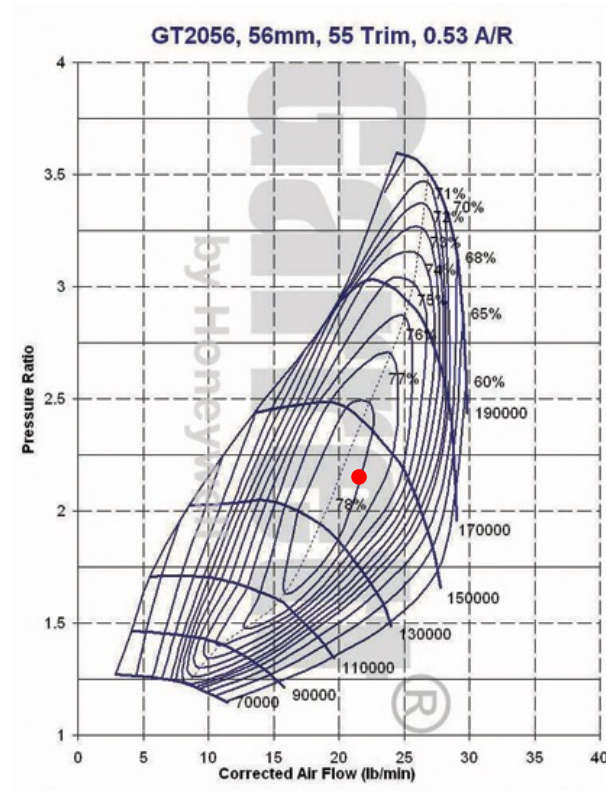


Figura 17 - Ponto de operação do compressor para os valores desejados (Fonte: <http://www.limitengineering.com/Turbos/GT2056/GT2056.html> adaptada)

Analisando o ponto encontrado no mapa, é possível notar que ele se encontra bem próximo a ilha central (local de maior eficiência), e está distante das linhas de sobrecarga e de estrangulamento. Isso mostra que esse compressor tem um tamanho bom para atingir os resultados esperados para essa aplicação.

- 6º Passo: verificar reação do compressor em menores valores de velocidade de rotação.

Embora o ponto esteja em uma localização segura do mapa, e aparentemente esse compressor parecer adequado para esse modelo, é necessário realizar uma conferência de como o compressor reagirá em casos de desaceleração do motor. Para isso pode ser utilizada a Equação 11, com um menor valor de velocidade de rotação, e assim localizar um novo ponto no mapa de eficiência do compressor.

$$W_a = \frac{MAP_{req} * VE * \frac{N}{2} * V_d}{639,6 * (460 + T_m)} \quad (11)$$

Substituindo os valores na equação e diminuindo a rotação máxima para 3000 RPM, por exemplo, obtém-se:

$$W_a = \frac{27,39 * 0,98 * \frac{3000}{2} * 122,04}{639,6 * (460 + 130)}$$

$$W_a = 13,02 \text{ lb/min}$$

Localizando no mapa de eficiência do compressor esse novo fluxo, é possível obter os pontos de trabalho representados na Figura 18.

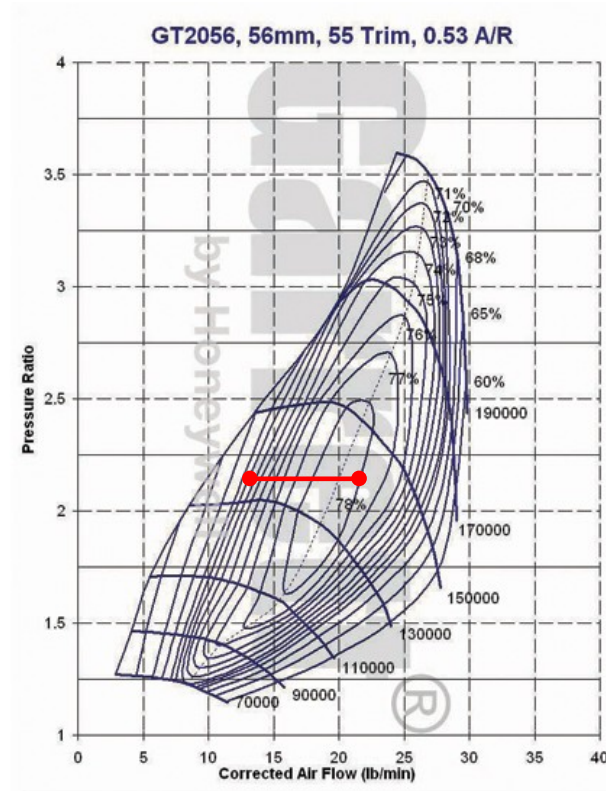


Figura 18 - Pontos de trabalho no mapa de eficiência do compressor (Fonte: <http://www.limitengineering.com/Turbos/GT2056/GT2056.html> adaptada)

Com essa análise é possível perceber que ainda que haja uma queda de 5000 RPM para 3000 RPM, o limite da linha de sobrecarga ainda permanece distante, o que garante um compressor seguro para a aplicação em questão.

3.5.2 DIMENSIONAMENTO DA TURBINA

Com um turbocompressor selecionado para o modelo analisado, é necessário verificar se o fluxo criado pelos gases de escape é suficiente para movimentar a turbina. Assim, deve-se utilizar a Equação 5 para se estimar esse fluxo em baixas rotações, e realizar a verificação. É importante que, a partir de uma rotação média de 3000 RPM, o turbo seja capaz de atuar de maneira eficiente. Logo, essa velocidade será utilizada para o teste da turbina.

- 7º Passo: cálculo do fluxo dos gases de escape.

Nesse caso, tem-se que o volume total desse motor é de 2 litros, ou 122,04 in³. Para se obter esse valor em pés cúbicos, ele é dividido por 1728 na Equação 12. Na velocidade citada de 3000 RPM, pode-se então calcular o fluxo de ar admitido pelo motor em pés cúbicos por minuto (Cfm).

$$Q_{adm} = \frac{V_d \cdot \frac{N}{2}}{1728 \cdot VE} \quad (12)$$

Substituindo os valores e considerando a eficiência utilizada anteriormente de 98%, tem-se:

$$Q_{adm} = \frac{122,04 \cdot \frac{3000}{2}}{1728 \cdot 0,98}$$

$$Q_{adm} = 108,10 \text{ Cfm}$$

Para esse valor em pés cúbicos por minuto, deve-se encontrar o valor equivalente em libras por minuto. Para isso, multiplica-se o resultado do fluxo de ar admitido por 0,076. Este é o valor da densidade do ar em libras por pé cúbico ao nível do mar e 50 °F. Assim, tem-se o valor de 8,22 lb/min de fluxo admitido de ar. Para esse valor, deve-se ainda, adicionar a massa do combustível, igual à 0,5 lb/min, totalizando uma massa total aspirada de 8,72 lb/min. Os valores desses cálculos podem ser observados de maneira mais simples através da Tabela 3.

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade	Valor (SI)	Unidade
Fluxo volumétrico de ar admitido	Q_{adm}	108,1	Cfm	183,66	m ³ /s
Fluxo mássico de ar admitido	Q_{adm}	8,22	lb/min	0,062	kg/s
Cilindrada total	V_d	122,04	in ³	2	L
Eficiência volumétrica	VE	0,98	-	98%	-
Velocidade de rotação do motor	N	3000	RPM	-	-
Fluxo ar + gasolina admitido	Q_{mis}	8,72	lb/min	0,066	kg/s

Tabela 3 - Parâmetros do cálculo do fluxo de ar admitido pelo motor

Em tese, a mesma quantidade de ar e combustível aspirada pelo motor em uma determinada rotação, deveria sair. Entretanto, a elevada temperatura que resulta da queima sob alta pressão, causa um aumento de volume dos gases. Dessa forma, a correção simula que este que esse fluxo maior se encontrava nas mesmas condições de temperatura e pressão quando foi aspirado. Trata-se de uma abstração teórica, capaz de retornar resultados práticos.

Para utilizar a Equação 10, são necessárias a temperatura dos gases de escape e a razão de pressão. Motores turboalimentados têm maior temperatura dos gases de escape do que motores sem sobrealimentação. Assim, para esse caso, a temperatura será considerada de aproximadamente 1000 °F (537,8 °C). A razão de pressão deve ser considerada para um motor que funciona de maneira naturalmente aspirada, sem a utilização do turbocompressor. Assim é possível verificar qual o fluxo antes do turbocompressor começar a funcionar. Nessa situação, a razão de pressão é considerada igual a 1. Logo, tem-se:

$$Q_c = \frac{8,72}{1} * \sqrt{\frac{1000 + 460}{518,7}}$$

$$Q_c = 14,62 \text{ lb/min}$$

- 8º Passo: verificar se o fluxo dos gases de escape é suficiente para movimentar a turbina.

O próximo passo, é utilizar o mapa de eficiência da turbina referente ao turbocompressor selecionado representado pela Figura 19.



Figura 19 - Mapa de eficiência da turbina GT2056 (Fonte: <http://www.limitengineering.com/Turbos/GT2056/GT2056.html>)

Analisando o fluxo calculado no mapa de eficiência da turbina, pode-se perceber que ele é bem acima da linha do gráfico, o que garante que, para uma velocidade de 3000 RPM, o fluxo de gases de escape é mais do que suficiente para girar a turbina.

O turbocompressor conta com uma válvula, chamada *wastegate*, utilizada para permitir que uma parte dos gases de escape escoe por uma passagem. Essa válvula irá garantir que a turbina não seja forçada pelo alto fluxo de gases provenientes do escape e possa funcionar a plena velocidade durante todo o tempo, garantindo a compressão de ar suficiente para o motor. Para um baixo fluxo, a *wastegate* se encontra fechada, e ela abre lentamente, controlando a quantidade de pressão que o compressor gera.

3.6 CÁLCULOS

Para tornar mais fácil a identificação dos parâmetros necessários para o dimensionamento do turbocompressor, foi criado um simples programa de cálculos na ferramenta Excel, de forma a retornar os valores corretos após a entrada dos dados do motor em questão. Dessa forma, com o auxílio desse programa, é necessário, apenas, buscar os valores retornados nos mapas de eficiência de compressor e de turbina, facilitando a escolha do turbocompressor ideal para diferentes aplicações.

Para se utilizar a planilha, quatro valores devem ser fornecidos em função de cada caso. O primeiro deles é a cilindrada do motor em litros. À seguir, deve-se especificar o combustível utilizado. Para os principais casos, mais comuns no Brasil, trabalha-se com apenas as opções gasolina ou etanol. É também necessário selecionar qual a potência desejada a ser extraída da utilização do turbocompressor. Esse valor deve ser fornecido em CV (ou cavalo vapor). Por fim, à qual rotação

deseja-se atingir tal potência, aceitando valores entre 3000 RPM (veículos de passeio e utilizações mais tradicionais) e 9000 RPM (veículos de corrida e utilizações para altas velocidades).

A Figura 20 representa interface do programa criado para realização dos cálculos. Os quadros de informações na planilha indicam onde devem ser digitados os valores de cada projeto, bem como a localização dos resultados que deverão ser usados por quem está dimensionando o turbocompressor para a aplicação.

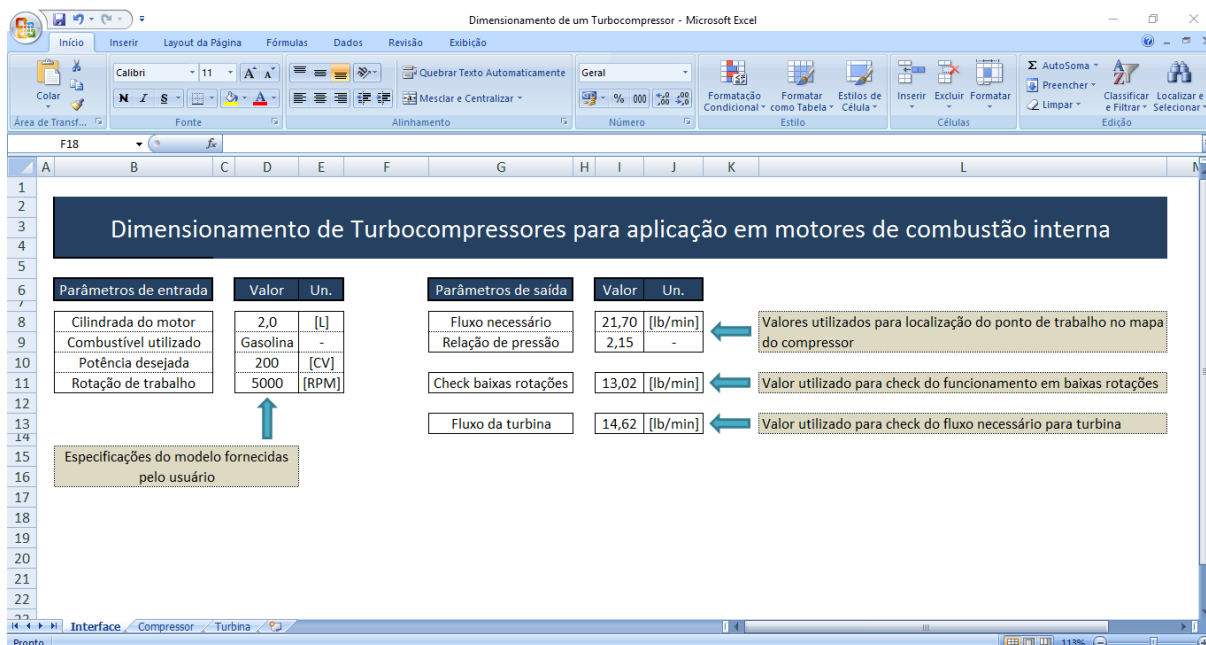


Figura 20 - Interface do programa para realização dos cálculos (Fonte: *print screen* da aplicação no sistema Windows 10)

Fornecidos os quatro valores solicitados, basta extrair os valores calculados, e localizar através deles, o melhor turbocompressor para a aplicação desejada.

Para facilitar a localização dos mapas de eficiência de turbocompressores pode-se utilizar qualquer catálogo disponível. Nesse projeto, foram escolhidos turbocompressores Garrett por se tratar de uma marca muito utilizada, que disponibiliza ao público seus mapas através de seu site.

3.7 DISCUSSÃO

O procedimento utilizado no estudo de caso desse trabalho permite o dimensionamento de um turbocompressor para utilização em conjunto com motores de combustão interna. Esses cálculos podem ser realizados quando se deseja adaptar um turbo à um motor que antes operava de maneira naturalmente aspirada. A instalação desse equipamento, entretanto, não pode ser feita de maneira negligente. Mesmo com os supostos "kits turbo" completos, alguns problemas como posição do *intercooler*, tubulações, entre outros, poderão dificultar a adaptação. Portanto, deve-se ter informações de profissionais para auxílio na instalação, uma vez que serão necessários diversos ajustes durante o uso. Muitos são os riscos caso o dimensionamento e a instalação não sejam feitos de maneira correta, podendo desde não oferecer o melhor rendimento, até causar danos às partes já existentes do carro.

Atualmente, muitos motores já saem de fábrica com sistemas de turbo compressão. Nesse caso, as montadoras realizam, além de diversos cálculos, diversos testes para seleção do turbo. Assim,

os valores utilizados para cálculos são específicos do motor em questão, o que pode garantir melhores resultados.

A utilização do turbocompressor, quando feita de maneira apropriada, garante diversos benefícios. Como observado no estudo de caso realizado anteriormente, é possível atingir um ganho próximo de 30% de potência. Além disso, o consumo específico diminui, tornando um motor sobrealimentado mais "limpo". Por outro lado, entretanto, motores que não utilizam sistema de turbocompressor de fábrica, podem ter a sua vida útil reduzida com a instalação desse componente. Isso acontece pois o turbo aumenta consideravelmente a pressão média efetiva do motor. Diferentemente de motores sobrealimentados de fábrica, esse motor não foi projetado para receber um turbocompressor, podendo haver desgastes precoces indesejáveis.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Existe atualmente, grande dificuldade no dimensionamento correto de turbocompressores para aplicação em motores de combustão interna do ciclo Otto. Diversos proprietários procuram uma solução para seus elevados gastos com combustível do veículo e falta de potência. Visando melhores resultados, muitos optam pela utilização de um turbocompressor. Esse equipamento, capaz de proporcionar um aumento de potência significativo e uma possível redução do consumo específico do veículo, vem se tornando cada vez mais popular. Muitas pessoas optam pela compra de carros que já utilizam esse sistema, enquanto outras adaptam seus próprios automóveis para utilização de turbo. Entretanto, muita discussão ocorre sobre qual o mais adequado para cada automóvel, qual o tamanho ideal, e quais resultados serão obtidos e para isso, muitos cálculos devem ser realizados.

É importante levar em consideração as dificuldades envolvendo a utilização de um turbocompressor. Diferente de um veículo com um motor mais potente, o veículo com motor sobrealimentado pode oferecer problemas como o atraso na resposta, ou turbo *lag*, oferecendo bons resultados apenas a partir de uma certa velocidade de rotação. Ainda, caso o turbocompressor não venha de fábrica, serão necessárias várias adaptações e ajustes após a instalação desse equipamento. Um motor sobrealimentado irá requerer uma complexidade maior da central eletrônica do veículo.

Tendo em vista sua popularidade e as possíveis dificuldades da sua instalação, esse projeto visa facilitar a utilização do turbocompressor. Através da facilitação dos cálculos, utilizando o programa criado na ferramenta Excel, e o maior entendimento dos mapas de compressores e turbinas, é possível, através das informações aqui apresentadas, selecionar de maneira relativamente simples e rápida, um conjunto turbocompressor conveniente para diferentes tipos de aplicações. Dessa forma, o projeto atingiu o seu objetivo, ao fornecer uma ferramenta capaz de garantir que pessoas possam fazer o seu próprio dimensionamento de turbocompressor, para as suas necessidades específicas, de maneira simplificada.

Os resultados que podem ser adquiridos através desse estudo se assemelham aos projetos realizados por preparadores de veículos. A consideração de alguns valores aproximados e médios, ao invés de valores específicos de cada motor, em cada velocidade de rotação e a não realização de testes, fazem com que os resultados obtidos sejam estimativas da realidade.

Para se trabalhar com motores específicos, utilizando todas as suas especificações e detalhes, algumas alterações devem ser feitas nos cálculos, reduzindo-se o número de aproximações, bem como alguns testes devem ser realizados. Assim, para dar continuidade a esse trabalho, o próximo passo é uma aplicação real em um automóvel através dos cálculos realizados com essa metodologia. Com isso seria possível visualizar na prática o ganho de potência, a redução do consumo de combustível, a diminuição da emissão de poluentes e possíveis problemas práticos de adaptação.

5 REFERÊNCIAS

1. ANDRE F., Turbocompressores: Mapas de Eficiência. Disponível em: <<https://chaodaoficina.wordpress.com/>>. Acesso em: 10 de Abril de 2017
2. BELL, A. GRAHAM, Modern Engine Tuning, Ed. Haynes, 2001
3. GARRETT, 2012. Disponível em: <www.turbobygarrett.com>. Acesso em: 13 de Julho de 2017
4. HEYWOOD, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988
5. LEUFVEN, O.; ERIKSSON, L.; Surge and Choke Capable Compressor Model, 2011
6. MCGRAW-HILL, V.; GANESAN E.D., Internal Combustion Engine, 1994
7. OUWENGA, D.; HOPKINS, J.; SWARTZLANDER, M. Improving Supercharger Efficiency and Capability, 2015
8. PASSOS, R. Turbocompressores: Entendendo o Básico Sobre seu Funcionamento. Disponível em: <<https://www.flatout.com.br/>>. Acesso em: 22 de Março de 2017
9. PULKRABEK, W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2ª Ed., 2002
10. SILVA, A. M. Simulação e Análise do Intercooler em Motores Otto Originais de Fábrica, 2010
11. VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard, Blücher, 4ª Ed., São Paulo, 1995