

SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO INTERCOOLER EM MOTORES OTTO ORIGINAIS DE FÁBRICA

Anderson Moreira da Silva
andersonmsp@hotmail.com

Resumo

Este trabalho mostra o funcionamento do intercooler, trocador de calor que equipa atualmente, vários motores de combustão interna que possuem sobrealimentação. Aqui o caso estudado é de um motor Otto a gasolina, com turboalimentação e baixa cilindrada. Prova-se aqui a eficiência do equipamento, resultado de uma melhor queima de combustível na câmara de combustão, além do ganho de potência e torque equivalentes aos automóveis de maior cilindrada. Através de simulações numéricas e o uso de dados de publicações especializadas, estuda-se um automóvel que possui dois motores distintos (aspirado e turboalimentado). Espera-se chegar às conclusões para o motor equipado com o trocador de calor, além de incentivar estudos futuros sobre essas condições.

Palavras chave: turbomotores, trocadores de calor (simulação computacional), motores de combustão interna, compressores térmicos.

1. Introdução

No mercado editorial existem pouquíssimas, para não dizer raras, publicações a respeito do motor turboalimentado e seus componentes como, por exemplo, o *intercooler*. Na esfera acadêmica também há raros estudos sobre esse assunto, mas quando há, eles se dedicam em analisar o comportamento em motores Diesel, relegando os motores Otto.

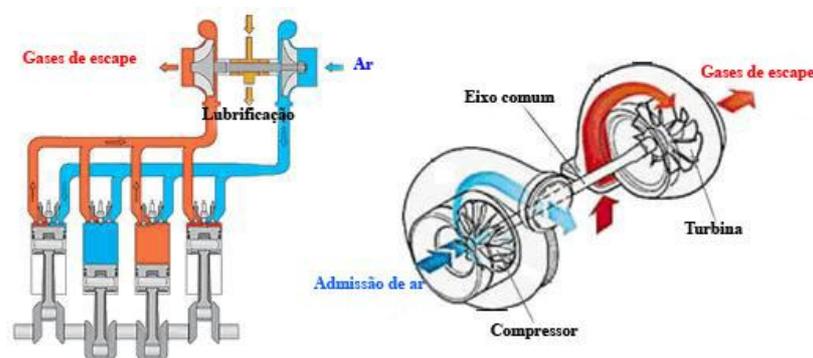
Na indústria automotiva, como a Volkswagen e a Fiat, por exemplo, ao produzir um modelo de automóvel turboalimentado, não divulgam seus dados técnicos sob a justificativa de “sigilo de fábrica”. E as empresas que fabricam o intercooler no Brasil, geralmente para motores a Diesel, produzem e especificam seus equipamentos através de dados empíricos.

Este trabalho visa, além de analisar numericamente o comportamento do intercooler num motor Otto turboalimentado, incentivar o estudo em futuros trabalhos na perspectiva de melhorar o rendimento e aprimoração do equipamento.

2. O turbocompressor e seu funcionamento

O turbocompressor é um equipamento que, no motor de combustão interna, tem a especialidade de aproveitar a energia residual ou a entalpia de fluxo dos gases de escape para mover a turbina que, ligado a um eixo, faz girar um compressor que está instalado no coletor de admissão. O compressor, por sua vez, eleva a pressão do ar e consegue que se melhore a alimentação na câmara de combustão do motor.

Figura 1. O turbocompressor e seu funcionamento.



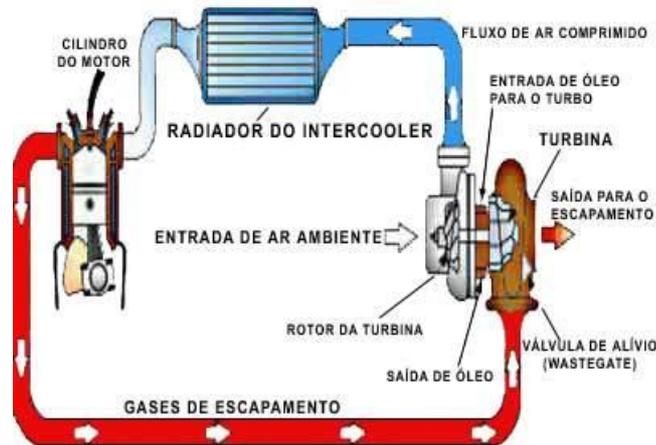
O funcionamento do turbo se dá em três fases: **a carga parcial inferior**, em que o ar é apenas aspirado pelo motor, pois o ar atmosférico não é comprimido pelo compressor devido à baixa energia dos gases de escape que não movem as pás da turbina; **a carga parcial média**, em que o ar é pré-comprimido pelo compressor por uma pressão próxima, ou pouco acima, da atmosférica, pois as pás da turbina imprimem uma rotação maior, causando assim a sobrealimentação do motor; **a plena carga**, no que o ar aspirado é comprimido a máxima pressão suportável pelo equipamento, devido ao aumento da vazão dos gases de escape ao girar a turbina e limitada pela válvula Wastegate.

3. O Intercooler

O intercooler é um trocador de calor compacto de fluxo cruzado em que os fluidos não são misturados (ar-ar ou ar-água). Este equipamento é o maior aliado dos motores turboalimentados, Diesel ou Otto, pois tem a função de resfriar o ar que segue para dentro da câmara de combustão.

Devido à estrutura do turbocompressor em possuir rotores que trabalham a quente (escape) e frio (admissão) montados num único eixo e próximos um ao outro, o volume da câmara de combustão é ocupado por um ar mais quente que o atmosférico, de menor densidade mássica e que resulta num menor rendimento da queima de combustível. Com o *intercooler*, o ar, após passar pelo compressor, é resfriado antes de entrar na câmara de combustão (cilindro), aumentando a sua densidade mássica. Conseqüentemente, há uma melhor queima do combustível e rendimento do motor.

Figura 2. O motor com turbocompressor e *intercooler*.



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

No mercado existem vários formatos de dutos: **estriados**, com formato retangular e bordas arredondadas e brasados, parede espessa e menos eficiente na troca de calor; **tubos expandidos**, com tubos redondos em que o ar escoar 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 para a máxima eficiência na troca de calor.

4. Estudo de caso

Dentre os vários modelos disponíveis no mercado, para exemplificar a simulação de funcionamento do motor com intercooler numericamente, escolheu-se o modelo VW Gol 1000 16V Turbo. Dentre vários atributos, pode-se destacar:

- Ser o automóvel mais vendido do país;
- O ganho de potência do motor com o acréscimo da sobrealimentação (de 62 cv no motor aspirado, para 112 cv, no turboalimentado);
- Aliada a uma alta performance, o automóvel possui baixo consumo de combustível.

4.1. Dados técnicos do motor

Dados divulgados pela Volkswagen do motor AT 1000 16V Turbo:

- Longitudinal, quatro cilindros em linha, quatro válvulas por cilindro;
- Bloco de ferro fundido em cabeçote em alumínio;
- Injeção multiponto seqüencial;
- Turbocompressor Garrett GT12: nominal a 0,4 bar (40 kPa) e pico de 1,2 bar (120 kPa);
- *Intercooler*;
- Duplo comando no cabeçote com variador de fase;
- Diâmetro X Curso: 67,1 mm X 70,6 mm;
- Taxa de compressão: 8,5:1;
- Cilindrada: 999 cm³;
- Potência máxima: 112 cv (82,38 kW) a 5500 rpm;
- Torque máximo: 15,8 kgfm (155 Nm) a 2000 rpm.

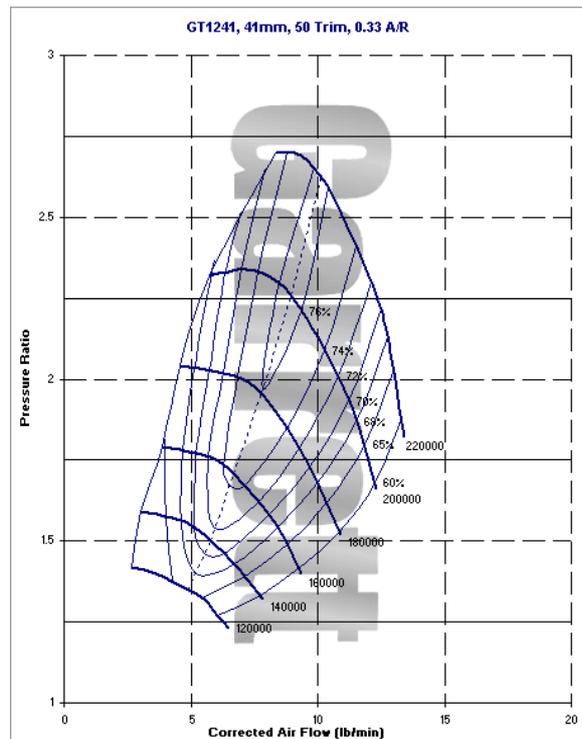
Figura 3. Motor VW AT 1000 16V Turbo.



5. Levantamento das características operacionais do turbocompressor

Possuindo os dados técnicos do motor divulgado pela fábrica e do modelo de turbocompressor usado, usou-se o mapa do compressor específico para o equipamento, necessário para os cálculos em que se acha a eficiência do compressor e a temperatura de saída do compressor, que será a temperatura de entrada do intercooler.

Figura 4. Mapa do compressor Garrett GT12.



Para estes cálculos iniciais, não se poderia usar o Sistema Métrico Internacional (SI), devido às unidades do fabricante do turbocompressor.

5.1. Cálculo da razão de pressão

A razão de pressão é dada por:

$$RP = \frac{P_n + P_{atm}}{P_{atm}} \quad (1)$$

Considerando p_n como a pressão nominal do turbo e p_{atm} como a pressão atmosférica (1bar= 100 kPa), a razão de pressão (1) é igual a **1,4**.

5.2. Cálculo do fluxo mássico de ar

Para o cálculo realizaram-se os seguintes cálculos:

- **Cálculo do deslocamento em polegada cúbica:**

$$CID = N_{cil} \cdot V_d \quad (2)$$

Como o número de cilindros no motor é 4 e a cilindrada é de 999 cm³, o resultado para a equação (2) foi de **243,84 pol³**.

- **Cálculo do fluxo volumétrico de ar:**

$$CFM = \frac{CID \cdot RPM \cdot EV}{3456} \quad (3)$$

Sabendo que a rotação é de 5500 rpm e considerando a eficiência volumétrica para este motor de quatro válvulas por cilindro igual a 0,96, temos (3) igual a **372,53 ft³/min**.

Assim:

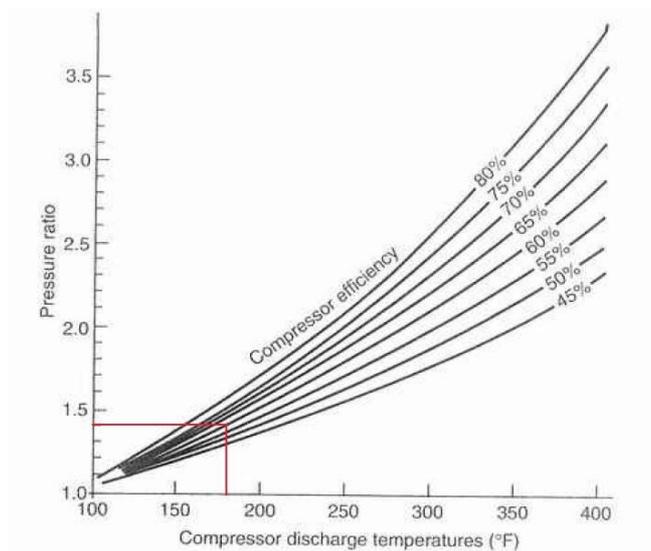
$$MFA = CFM \cdot \rho_{ar} \quad (4)$$

Considerando a densidade do ar igual a 0,076 lb/ft³, a equação (4) resulta em **28,31 lb/min**.

Como não há a intersecção entre os pontos no mapa do compressor, determinou-se que a eficiência mínima seria de 60%.

Para o gráfico de razão de pressão versus temperatura de saída do compressor, tem-se:

Figura 5. Gráfico da razão de pressão x temperatura de saída do compressor.



Pelo gráfico mostrado, a temperatura de saída do compressor encontrada foi de aproximadamente 180°F, que é igual a **82,22°C (355,37 K)**. Este resultado será a temperatura de entrada do *intercooler*.

6. Levantamento das características operacionais do *intercooler*

Usando a seguinte equação de eficiência do *intercooler*:

$$E_i = \frac{T_{ei} - T_{si}}{T_{ei} - T_{ar}} \quad (5)$$

Nos automóveis modernos, segundo *sites* de empresas especializadas em preparação de motores a eficiência do *intercooler* fica entre 65 e 75%. Para este caso, considerou-se a eficiência igual a 65% e temperatura ambiente igual a 27°C (300 K), o resultado para a equação (5) foi igual a **46,33°C** (319,47 K), que será a temperatura de admissão do ar na câmara de combustão.

7. Modelagem e Simulação do Motor

Neste trabalho decidiu-se fazer uma modelagem computacional para simular o comportamento do motor em seu ciclo completo nos quatro tempos: admissão, compressão, combustão e escape. Simulou-se as seguintes situações:

- Motor com aspiração forçada;
- Motor com turbocompressor e sem *intercooler*;
- Motor com turbocompressor e com *intercooler*;

Para esta simulação usou-se o programa MotorIST, que é escrito originalmente em linguagem FORTRAN, desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST) de Lisboa, Portugal. Constituído de um programa principal e de subrotinas, tem como função a simulação numérica de um motor de combustão de quatro tempos, cujos resultados permitem uma análise global de funcionamento do motor, além de detalhar o seu comportamento durante os seus ciclos de compressão, combustão e escape.

8. Dados Iniciais e Resultados

Os dados iniciais para a sua simulação foram:

- Velocidade de rotação e rotação máxima;
- Razão de sobrealimentação e de com;
- Número de cilindros;
- Diâmetro e curso dos cilindros, das válvulas de admissão e de escape;
- Razão de compressão;
- Incremento de ângulo do virabrequim para os cálculos;
- Coeficiente de excesso de ar;
- Temperatura atmosférica, dos gases residuais e da mistura (ar mais combustível);
- Pressão atmosférica
- Número de átomos de carbono e de hidrogênio do combustível;
- Número de octanas do combustível;
- Avanço de abertura do escape;
- Atraso do fechamento da admissão;
- Imposição dos rendimentos volumétricos e mecânicos;
- Número de válvulas de admissão;
- Avanço de ignição imposta;
- Cálculos com dissociação;
- Tipo de motor.

Após a simulação para as três situações citadas no capítulo 6, os resultados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados de desempenhos de motores.

	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
Temperatura no Escape (K)	920	917,8	879,7

A seguir, a evolução da pressão (Gráfico 1) e temperatura (Gráfico 2) em função do ângulo de giro durante a fase da combustão.

Gráfico 1. Fase da combustão: Pressão X Giro do Virabrequim.

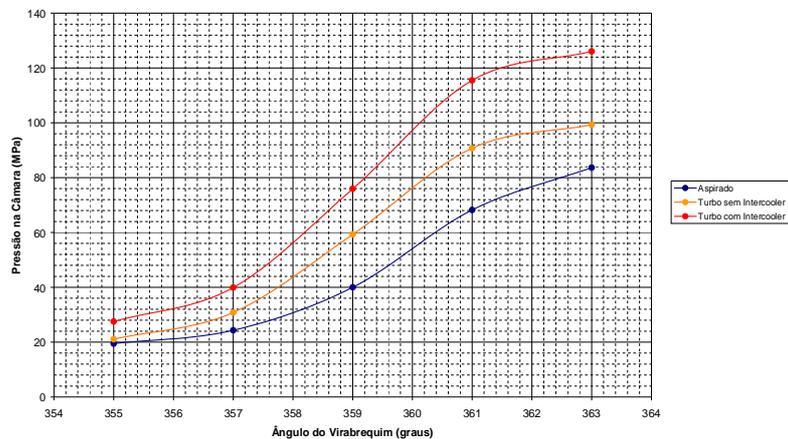
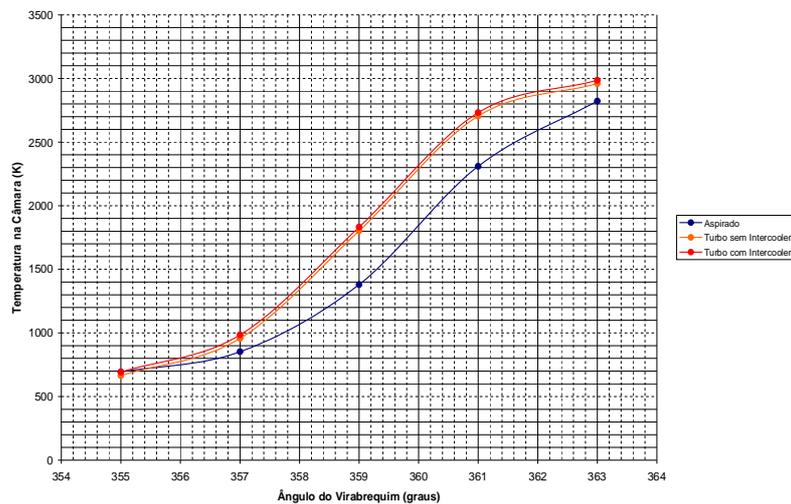


Gráfico 2. Fase da combustão: Temperatura X Giro do Virabrequim.



9. Discussão dos Resultados

As diferenças principais entre os motores com aspiração forçada e os turboalimentados estão nos parâmetros de rendimento volumétrico e na massa de combustível admitida no cilindro, cujos valores são superiores para o motor com sobrealimentação.

Analisando especificamente os motores turboalimentados, com e sem o intercooler, vê-se que os valores de potência e torque são superiores na situação que possui o equipamento de resfriamento de ar. Superioridade 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.

10. Conclusão

Quando se compara um motor aspirado e um com sobrealimentação, para uma mesma cilindrada menor, a vantagem é superior para a segunda opção, pois há um ganho de potência e torque além do aumento de rendimento. Foi mostrado também que o ganho é ainda maior no motor equipado com intercooler, devido a um ar resfriado (de maior densidade) que entra na câmara de combustão, o que garante uma melhor queima do combustível.

11. Bibliografia

- Bell, C. "Maximum Boost: Designing, Testing and Installing Turbocharger Systems", Bentley Publishers, 1ªed, 1997.
- Incropera, F., Dewitt, D.P., "Fundamentos da Transferência de Calor e Massa", LTC Editora, 5ª ed.
- Mendes Lopes, J.M.C.; Blancard, D.; Cordeiro, A.; Mega, J.; Salgado, T. MotorIST – Simulação de um ciclo real de um motor de explosão a 4 tempos, Instituto Superior Técnico (Departamento de Engenharia Mecânica), Lisboa, Portugal, 2002.
- "Revista Engenharia Automotiva e Aeroespacial", SAE BRASIL, Ano 7, No.31, São Paulo, Brasil, pp. 24-26.
- Van Wylen, G.; Sonntag, R.; Borgnakke, C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Editora Edgard Blücher LTDA, 4ª ed.

12. Sites Relacionados

- Aj Design Software (Engine Calculator), São Paulo, SP, Brasil, disponível em http://www.ajdesigner.com/phpengine/engine_equations_cubic_inch_displacement.php, acessado em mai-2008.
- Best Cars Web Site, São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://www2.uol.com.br/bestcars>, acessado em out-2008.
- Borg Warner Turbo Systems, São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://www.turbodrive.com/pt/>, acessado em jun-2008.
- Clube Mitsubishi Portugal (Fórum), São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://clubemitsubishi.com/forum/viewtopic.php?t=446>, acessado em jun-2008.
- Garrett, São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://www.turbobygarrett.com>, acessado em abr-2008.
- Gol 16V Turbo (Blog), São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://gol16vturbo.blogspot.com/>, acessado em mar-2008.
- Icevex Performance Intercooler, São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://www.icevex.com/>, acessado em mar-2008.
- Max Cooler, São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://www.intercooler.com.br/>, acessado em nov-2007.
- The Turbo Regal Website, São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://www.gnttype.org/techarea/turbo/intercooler.html>, acessado em abr-2008.
- Xpeed Club, São Paulo, SP, Brasil, disponível em <http://www.xpeedclub.com.br>, acessado em jun-2008.

INTERCOOLER SIMULATION AND ANALYSIS IN ORIGINAL OF FACTORY OTTO ENGINES

Anderson Moreira da Silva
andersonmsp@hotmail.com

Abstract

This report shows an intercooler operation, a heat exchanger that currently equips many internal combustion engines that have over booster. Here, the studied case is a gas fuel Otto engine downsized, with turbocharger. Here it is proven better equipment efficiency, resulted from the better fuel combustion, aside the power and torque's gain. Through numerical simulations and specialized publication information, it is studied an automobile that has two different engine models (natural aspiration and turbocharged). The expected results as shown by the conclusions favor the engine equipped with the heat exchanger, besides the motivation of future studies under these conditions.

Keywords: turbo motors, heat exchangers (computational simulation), internal combustion engines, thermal compressors.