



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro  

---

Escola Politécnica

ESTUDO DO APRIMORAMENTO DE PERFORMANCE DE UM MOTOR HONDA  
COM A INSTALAÇÃO DE UM TURBOCOMPRESSOR

Leonardo Soutto Mayor de Figueiredo

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

RIO DE JANEIRO, AGOSTO DE 2013

ESTUDO DO APRIMORAMENTO DE PERFORMANCE DE UM MOTOR HONDA  
COM A INSTALAÇÃO DE UM TURBOCOMPRESSOR

Leonardo Soutto Mayor de Figueiredo

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO  
DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

---

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

---

Prof. Hélcio Rangel Barreto Orlande

---

Prof<sup>ª</sup>. Anna Carla Monteiro de Araujo

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO DE 2013

Soutto Mayor de Figueiredo, Leonardo

Estudo do aprimoramento de performance de um motor Honda com a instalação de um turbocompressor/ Leonardo Soutto Mayor de Figueiredo. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

Orientador: Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 57

1. Cálculo de parâmetros de motores. 2. Instalação de um turbo compressor. 3. Simulação computacional. I. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Mecânica. III. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por tudo que me Ele me dá e me ensina. Sem Ele os problemas que enfrentei teriam impossibilitado o projeto. Em segundo lugar ao meu pai João Sérgio de Souza Figueiredo e a minha mãe Maria Alice Soutto Mayor de Figueiredo por todo o apoio que me deram durante o curso e minha vida. Sempre me apoiaram independentemente do tipo de problema ou situação.

A todos os meus amigos que de alguma forma me ajudaram durante o projeto e todo o processo de formação: Ronald Junior, Marcio França, Rafael Chaves, Flavio Pellegrine, Bruno Werner, Walter Amazonas, Rafael Rivera, Gustavo Bittencourt, Leonardo Martins, Valéria Martins, Michele Spinola.

A todos os componentes do Fórum SAE e os Técnicos da UFRJ que sempre estiveram lá para me ajudar: Paulo César de Alencar, Luis Fernando Alves, André Vilela, Vinicius Guedes, Henrique Calil, Igor Bents, Rodrigo Sidá, Adriano Soares, Luis Otávio Pereira, Jair Mendes, Sara Souza.

Ao meu orientador Professor Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto que sempre esteve de portas abertas para me ajudar.

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o aprimoramento da eficiência e potência de um motor. Este motor é de 500 cilindradas da Honda e tem originalmente 54 cavalos de potência mecânica no volante do motor. Para se alcançar a potência desejada foi escolhido o uso de uma turbina ligada a um compressor por um eixo, aqui chamada de Turbocompressor. O primeiro passo foi projetar todos os componentes do sistema e escolher por meio gráfico o Turbocompressor mais indicado para as condições de trabalho do carro. O segundo passo foi a compra e fabricação das peças projetadas. O último passo foi a instalação de todos os componentes para o bom funcionamento do sistema. Para comprovar a vantagem de se utilizar um turbocompressor para o aumento de potência é necessário uma comparação entre o motor aspirado e o mesmo motor turbinado. Para tanto um dinamômetro de rolo foi usado. O dinamômetro usado é o da Oficina de Preparação By Lula. Adicionalmente, será comparado a potência do motor Honda 600, também aferida em um dinamômetro.

## **ABSTRACT**

This workpaper has the objective of an engine's efficiency and power enhancing. This engine is a Honda with 0,5 liters of capacity and has originally 54 horse power . To reach the desirable power it was chosen to use a turbine connected to a compressor by a shaft, named Turbocharged, The first step was to design all the system components and select, by charts, the most suitable turbocharger for the case. The second step was the purchase and manufacturing of the designed parts. The last step was the installation of all the components for the proper functioning of the system. To prove the advantage to use a turbocharger, the power was measured before the installation and after it. For that was used the dynamometer roll of the By Lula garage. Additionally, the power of a Honda 600 engine will be compared with it.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABELAS.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO TEÓRICA.....	2
2.1. Funcionamento do Motor.....	2
2.1.1. Motor a Combustão Interna Ciclo Otto.....	2
2.1.2. Motor Honda 500.....	3
2.1.3. Eficiência de um Motor.....	4
2.1.4. Restrição na Admissão.....	5
2.2. Sobrealimentação.....	5
2.2.1. A sobrealimentação.....	5
2.2.2. Funcionamento do turbocompressor.....	6
2.3. Sistema de Sobrealimentação de Ar.....	9
2.3.1. Turbocompressor.....	9
2.3.2. Coletor de Escapamento.....	10
2.3.3. Válvula Reguladora de Pressão.....	10
2.3.4. Válvulas de alívio.....	12
2.3.5. Manômetros.....	13
2.3.6. Sonda Lambda.....	14
2.3.7. Coletor de Escape.....	15
2.4. Sistema de Alimentação de Combustível.....	16
2.4.1. Módulo de Injeção.....	16
2.4.2. Bomba de Combustível.....	16
2.4.3. Bicos Injetores.....	17
2.4.4. Linha de Combustível.....	17
2.4.5. Combustível.....	17
2.4.6. Dosador de Combustível.....	17
2.5. Sistema de Ignição.....	18
2.5.1. Módulo de Ignição.....	18

2.5.2. FirePro.....	19
2.5.3. Roda Fônica.....	19
2.5.4. Ponto de Ignição.....	19
3. DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES.....	19
3.1. Potência Desejada.....	19
3.2. Cálculos Iniciais.....	20
3.2.1. Rendimento Volumétrico.....	20
3.2.2. Temperatura no Coletor de Admissão.....	22
3.2.3. Consumo Específico de Combustível.....	23
3.2.4. Combustível.....	23
3.2.5. Vazão Mássica de Ar.....	25
3.2.6. Pressão Requerida no Coletor de Admissão para a Potência Desejada.....	26
3.2.7. Razão de Pressão.....	26
3.2.8. Vazão mássica de combustível.....	27
3.2.9. Vazão Volumétrica de Combustível.....	27
3.3. Bicos Injetores.....	28
3.4. Bomba de Combustível.....	29
3.5. Turbocompressor.....	30
3.5.1. Compressor.....	30
3.5.2. Turbina.....	34
3.5.3. Lubrificação.....	35
3.6. Pressurização.....	36
3.7. Coletor de Escape.....	37
4. APLICAÇÃO DO PROJETO.....	40
4.1. Instalação Elétrica.....	40
4.2. Adaptação da Ignição.....	40
4.3. Fabricação Roda Fônica.....	41
4.4. Regulagem da Ignição.....	45
4.5. Fabricação do Coletor de Escape.....	45
4.6. Lubrificação da Turbina.....	46
5. POTÊNCIA ESTIMADA PELO RICARDO WAVES.....	47
5.1. Honda 500 Aspirado.....	48
5.2. Honda 500 Turbo.....	49



5.3. Honda 600 Aspirado.....	52
6. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	52
6.1. Honda 500 aspirado.....	52
6.2. Honda 500 Turbo.....	53
6.3. Honda 600.....	54
6.4. Rendimentos.....	55
7. CONCLUSÕES.....	57
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.1.1- Tempos de um motor ciclo Otto.....	3
Figura 2.2.1.1- Estrutura do Supercharger.....	6
Figura 2.2.2.1 – Funcionamento do turbocompressor.....	7
Figura 2.2.2.2 - Palhetas fechadas.....	8
Figura 2.2.2.3 - Palhetas abertas.....	9
Figura 2.3.3.1 – carcaça quente do turbocompressor.....	11
Figura 2.3.3.2 – Válvula Wastegate externa.....	12
Figura 2.3.6.1 – Sonda Lambda .....	14
Figura 3.2.1 – Gráfico do torque e do rendimento .....	20
Figura 3.2.2 – Gráfico rendimento.....	21
Figura 3.5.1.1 – Mapa do compressor da GT06.....	30
Figura 3.5.1.2 – Ponto de fluxo máximo na GT12.....	31
Figura 3.5.1.3 – Ponto de máximo fluxo na GT15.....	32
Figura 3.5.1.4 – Compressor GT15.....	33
Figura 3.5.1.5 – Compressor GT12.....	33
Figura 3.5.2.1 – Mapa turbine GT12.....	34
Figura 3.5.3.1 – Localização do retorno de óleo.....	36
Figura 3.6.1-Válvula Pop-off.....	37
Figura 3.7.1 – Coletor de escape .....	38
Figura 3.7.2 – Layout posicionamento da turbina.....	39
Figura 3.7.3 – Posicionamento da turbina.....	39
Figura 4.1.1 – Estado do carro antes do inicio do projeto.....	40
Figura 4.2.1-Roda Fônica original CB500.....	41
Figura 4.3.1 – Desenho roda fônica.....	41
Figura 4.3.2 – Roda fônica em produção.....	42
Figura 4.3.3 – Fabricando o rasgo na RF.....	42
Figura 4.3.4 – Sinal da RF não lido pelo sensor.....	43
Figura 4.2.5 – RF com rasgo e posicionada.....	44
Figura 4.3.6 – Sinal da RF uniforme.....	44
Figura 4.5.1- Posicionando os dutos.....	45
Figura 4.6.1-Tomada de óleo.....	46
Figura 4.6.2-Retorno de óleo.....	47

Figura 4.6.3-Retorno de óleo para o motor.....	47
Figura 5.1.1 – Layout do motor no RICARDO WAVES.....	48
Figura 5.1.2 – Desempenho do motor Honda 500 simulado.....	49
Figura 5.2.1-Mapa do compressor(RICARDO) .....	50
Figura 5.2.2-Mapa da turbina(RICARDO) .....	50
Figura 5.2.3 – Layout motor turbo.....	51
Figura 5.2.4 – Curvas de desempenho do motor Honda 500 Turbo Simuladas.....	51
Figura 5.3.1 – Curvas de desempenho simuladas no RICARDO WAVES do motor Honda 600.....	52
Figura 6.1.1 – Curvas de desempenho do Honda 500 aspirado medidas no dinamômetro.....	53
Figura 6.2.1 – Curva de desempenho do Honda 500 turbo medida no dinamômetro.....	54
Figura 6.3.1- Curva de Potência e Torque do motor Honda 600 medidas no dinamômetro.....	55
Figura 6.3.2- Curva de Potência e Torque suavizadas.....	55
Figura 7.1 – Comparação entre as linhas de potência do motor Honda 500 do RICARDO WAVES e Dinamômetro.....	58
Figura 7.2 - Comparação entre as linhas de potência do motor Honda 500 Turbo do RICARDO WAVES e Dinamômetro.....	58
Figura 7.3 – Comparação das potências dos motores.....	59

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.3.6.1 - Fueltech Manual da Sonda Lambda WB-o2.....	15
Tabela 3.5.3.1 – Pressões de óleo.....	35

## 1. INTRODUÇÃO

A sociedade atual exige carros cada vez menores, menos poluentes e que consomem menos combustível. Essas três exigências podem ter uma mesma solução: a adoção de um turbocompressor. Este componente diminui a necessidade de motores grandes a medida que aumenta a potência de motores pequenos possibilitando a construção de carros menores. Ao mesmo tempo em que aumentando a eficiência do sistema há também a diminuição de consumo de combustível e de poluentes jogados na atmosfera. Se a eficiência de um motor é maior isso significa que ele aproveita melhor a energia usada, portanto, este motor utilizará menos energia para produzir a mesma quantidade de trabalho de um motor com eficiência menor. Motores a ciclo Otto, em geral, têm baixa eficiência. Portanto, seria de grande aproveitamento a utilização do turbocompressor. Ao redirecionar os gases de escape, que seriam jogados diretamente na atmosfera, para as pás da turbina geramos energia para girar as pás do compressor. Com isso, comprimimos o ar, antes aspirado, para dentro dos cilindros aumentando a pressão e com isso melhoramos o rendimento do motor.

Especificamente neste projeto, o que se buscou foi a performance, pois o objetivo final é o aumento de potência para melhorar o rendimento do carro de corrida da fórmula SAE. Para tal, foram utilizados cálculos e softwares como o RICARDO WAVES e SolidWorks. No entanto, os resultados obtidos com ele servem perfeitamente para base para todas as finalidades mencionadas anteriormente.

## **2. REVISÃO TEÓRICA**

### **2.1. Funcionamento do Motor**

#### **2.1.1. Motor a Combustão Interna Ciclo Otto**

Motores a ciclo Otto são motores de ignição por centelha composto de 4 tempos. Eles transformam a energia química que há no combustível, com a oxidação deste, em energia térmica que aumenta a pressão gradativamente na câmara de combustão. Este aumento de pressão move as partes móveis do motor (Pistão e Biela) em forma de movimento linear. O virabrequim ligado a biela transforma esse movimento linear em movimento circular. Ao girar, a árvore de manivelas pode ser ligada mecanicamente ao eixo e as rodas do carro afim de movimenta-lo. Estes motores podem ser a gasolina, álcool ou gás natural. Os quatro tempos do motor a ciclo Otto são: admissão, compressão, ignição e exaustão. Na admissão, a mistura ar-combustível entra no cilindro pela válvula de admissão de forma turbulenta para haver uma mistura mais homogênea e com a ajuda inicial (cruzamento de válvulas) da válvula de escape aberta juntamente com a de admissão. A válvula de escape aberta cria uma pressão negativa no cilindro pela saída dos gases para o escapamento auxiliando a entrada da mistura no tempo da admissão. Quando a válvula de admissão se fecha a mistura é comprimida pelo pistão na câmara de combustão. Pouco tempo antes do pistão alcançar o ponto morto superior(PMS) ocorre a ignição que se inicia por uma faísca produzida pela vela de ignição. Este tempo, como o próprio nome diz, é o tempo de ignição. Após a mistura ser queimada, a válvula de escapamento se abre permitindo que os gases oriundos da queima sejam levados para o sistema de escapamento. A mistura ar-combustível deve ser estequiométrica, porém de acordo com as condições de operação (temperatura do motor, rotação, regime) isso pode variar. Em condições de carga, a mistura deve ser rica, ou seja, mais combustível do que ar, para que o risco de falta de combustível em altas rotações seja minimizado, o que seria fatal. E para refrigerar a câmara de combustão. Porém, caso seja rica demais o combustível em excesso pode lavar o óleo nas paredes do cilindro levando a um desgaste prematuro e pode danificar os componentes de exaustão como por exemplo o catalizador.

A ignição também tem um papel fundamental neste tipo de ciclo. Cada motor tem seu tempo de ignição ideal, e este parâmetro depende de muitas variantes: tamanho do

motor, combustível utilizado e sua qualidade, regime de funcionamento, desenho da câmara de combustão, rotação, etc. A ignição tem relação direta com a potência e rendimento do motor. Ela é medida em graus em relação a uma referência. Neste caso, é usada a quantidade de graus Antes do Ponto Morto Superior do primeiro cilindro ( $^{\circ}$  APMS). Ou seja, em um motor com uma ignição estática de  $20^{\circ}$  APMS a centelha da vela é acionada pela bobina  $20^{\circ}$  antes do primeiro cilindro estar posicionado no PMS. Se a ignição estiver muito atrasada o motor pode perder potência, se tiver muito adiantada a pressão no cilindro pode aumentar mais do que o suportável pelo combustível.

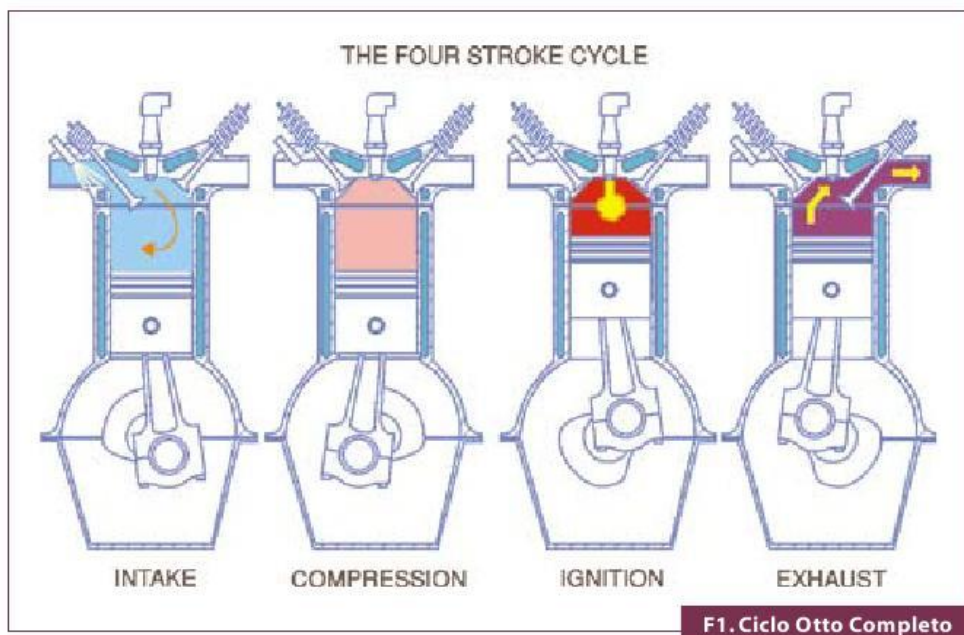


Figura 2.1.1.1- Tempos de um motor ciclo Otto  
(<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/428>)

### 2.1.2. Motor Honda 500

O motor a ser sobrealimentado é um motor Honda de 500 cilindradas(0,5L). Este motor, originalmente carburado a gasolina, é de 4 tempos DOHC (Doble Over Head Camshaft) o que significa que ele usa dois comandos de válvulas no cabeçote. Ele é refrigerado à água com uma capacidade dos cilindros de 0,5 L. Tem uma potência máxima de aproximadamente 54 CV a 9500 rpm e um torque de 4,5 kgf.m a 8000 rpm. Com 2 cilindros inclinados a  $20^{\circ}$  com a vertical possui uma relação de compressão de 10,5:1. A ignição original é transistorizada. Seu peso é de 56kg.

O sistema de combustível será mudado para injeção eletrônica e o de ignição, enquanto não houver mudança de combustível e a instalação do turbocompressor, será mantida original. Após essas mudanças será mudada para uma ignição programável da FuelTech com duas bobinas de gol MI 3 fios e a utilização do módulo de leitura de roda fônica FirePro. O combustível também será modificado, onde usaremos a Etanol por motivos explicados no tópico relacionado ao assunto.

### 2.1.3. Eficiência de um Motor

A energia introduzida em um motor a combustão interna, em grande parte, se “perde” ao longo do funcionamento do mesmo. O restante se transforma em trabalho. As perdas se dão através do circuito de refrigeração, por atrito, por radiação de calor e perdas pelo escapamento. A eficiência total de um motor ciclo Otto é por volta de 30% e é decomposta em três tipos: eficiência térmica, de atrito e volumétrica. Uma forma de aumentar a eficiência de um motor é a utilização de um turbocompressor. Com isso, no cálculo da eficiência consideraremos a energia adicionada pelo compressor aumentando o rendimento. Como o compressor pressuriza o cilindro do motor a relação de compressão do motor aumenta muito, fazendo com que a eficiência suba tanto quanto desejarmos, ou tanto quanto o motor e o combustível aguentarem. Ou seja, o turbocompressor agirá sobre a eficiência térmica do motor.

Para o Ciclo Otto ideal a eficiência térmica do motor é dada pela fórmula:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (1)$$

Onde  $r$  = razão de compressão

$$K = C_p/C_v$$

Ao usarmos a sobrealimentação aumentaríamos o  $r$  aumentando assim o rendimento térmico do sistema.



#### 2.1.4. Restrição na Admissão

A restrição na admissão é um critério limitante imposto pelas regras da Fórmula SAE. Esta restrição tem como função limitar a capacidade de potência do motor. Ela se resume a um restritor circular de no máximo 20 mm de diâmetro para propulsores a gasolina e deve se localizar no sistema de captação de ar entre a borboleta e o motor. No caso do motor turbinado, o restritor deve ser instalado a montante do turbo, mas após a válvula de borboleta. Ou seja, a única sequência permitida é borboleta, restritor, compressor, motor.

## 2.2. Sobrealimentação

### 2.2.1. A sobrealimentação

A sobrealimentação é uma das muitas maneiras para aumentar a potência do motor sem se aumentar muito o peso do veículo. Ela consiste na compressão de ar para dentro do motor. Motores não sobrealimentados, chamaremos de “aspirados” (mesmo que este termo não seja o mais adequado) funcionam diminuindo a pressão dentro dos cilindros fazendo com que o ar fora do motor que está a uma pressão maior (pressão atmosférica) se desloque para dentro dele. Motores sobrealimentados funcionam desta forma até um determinado regime. Após a vazão de ar que sai do motor ser suficiente para girar o eixo do turbocompressor para que o compressor aumente a pressão acima da atmosférica, o mecanismo começa a comprimir ar para dentro do motor, o que o torna capaz de “empurrar” muito mais ar pros cilindros do que o motor seria capaz sem a sobrealimentação.

Os dois principais tipos são o compressor acionado mecanicamente e o compressor acionado por uma turbina.

O compressor acionado mecanicamente pode ser do tipo parafuso ou centrífugo e são ligados a uma polia que é acionada através de uma correia ligada a outra polia instalada no motor. O comportamento do compressor é definido pelo seu tamanho e pela relação das polias. Quando acionado mecanicamente, o compressor garante uma pressão adequada desde regimes de baixas rotações.

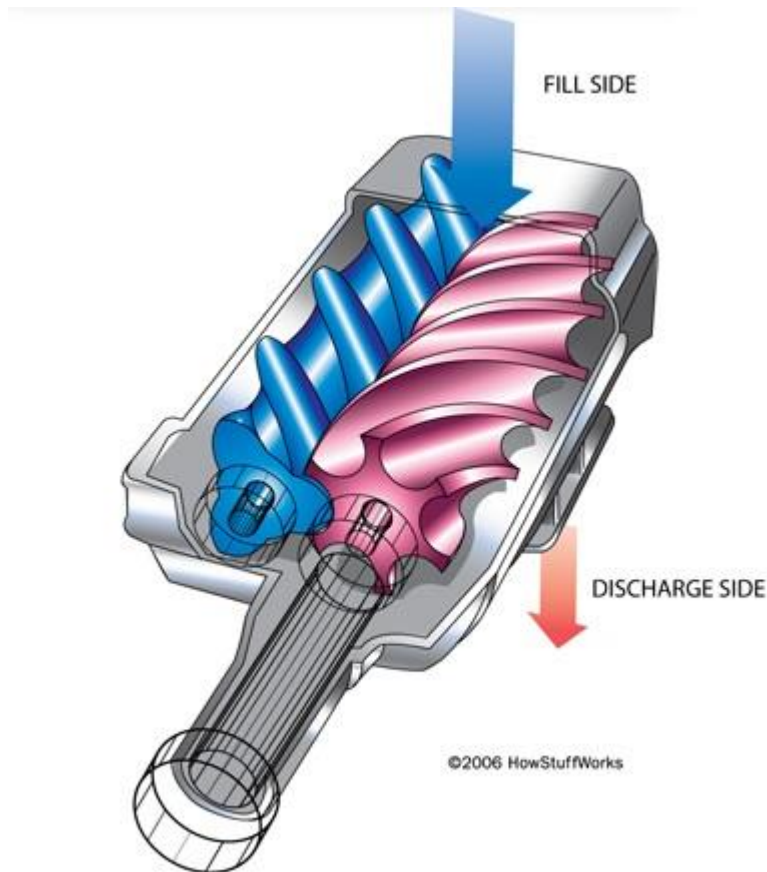


Figura 2.2.1.1- Estrutura do Supercharger  
(<http://auto.howstuffworks.com/supercharger3.htm>)

Nos turbocompressores, o compressor e a turbina que o aciona são do tipo dinâmico centrífugo e ambos estão ligados por um eixo. O comportamento do turbocompressor é definido pelo tamanho de seus componentes: compressor, turbina e eixo.

Neste projeto utilizaremos o compressor acionado por turbina. Por isso, nos ateremos a este mecanismo.

## 2.2.2. Funcionamento do turbocompressor

O turbocompressor é um componente que regenera parte da energia cinética e térmica que seria desperdiçada nos gases de escape aumentando assim a quantidade de ar que entra no motor e por consequência a sua potência e eficiência. Este mecanismo é composto de uma turbina ligada por um eixo a um compressor, mancal (de lubrificação ou rolamento) e válvula wastegate, que pode ser incorporada ou não.

Os gases queimados que saem do cilindro são dirigidos pelo coletor de escape (ponto 5 na figura abaixo) até a entrada da turbina (ponto 6). Neste ponto, os gases giram as pás da turbina transformando a energia de pressão em energia cinética das pás. Elas estão ligadas ao eixo, que também está ligado as pás do compressor fazendo-as girar. Com isso, o compressor suga o ar filtrado da atmosfera (ponto 1) e aumenta sua pressão, assim como sua densidade, através do aumento da área de sua seção circular. Como este componente comprime ar que passa pelo resfriador de ar (ponto 3) e depois para os cilindros a quantidade de ar admitida nos mesmos aumenta proporcionalmente com a pressão. No entanto, para que haja um aumento de potência com segurança no motor devemos aumentar a quantidade de combustível admitida, sendo assim o torque e consequentemente a potência aumentarão.

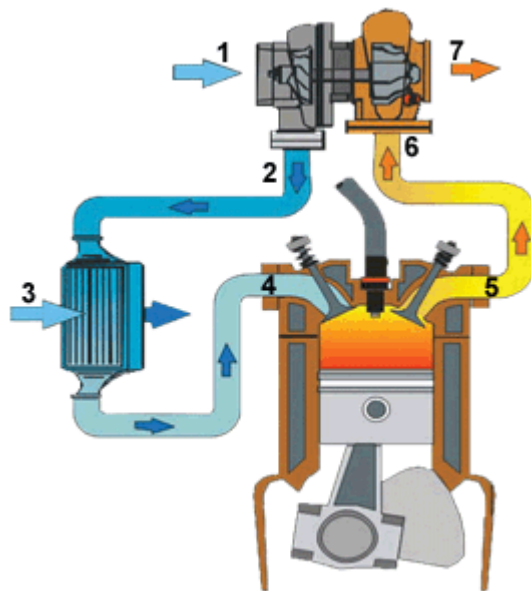


Figura 2.2.2.1 – Funcionamento do turbocompressor

(<http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/basic>)

O dimensionamento do turbocompressor é muito importante. Caso ele seja muito pequeno para determinado motor, não necessitará de grande energia dos gases de exaustão para produzir pressão positiva e trará respostas rápidas em baixas rotações. Porém, em altas rotações o turbo não conseguirá ter vazão suficiente para alimentá-lo de forma satisfatória. E neste caso, haverá uma restrição dos gases de exaustão. Um turbocompressor necessitará de grande energia dos gases de exaustão para produzir

pressão positiva e dessa forma quase não pressurizará em baixas rotações. No entanto, em altas rotações um turbo maior produzirá mais potência do que um turbo pequeno.

Em resumo, um turbo menor fornecerá respostas mais rápidas para o motor e em baixas rotações. Sua desvantagem é que restringirá o motor em altas rotações podendo haver o fenômeno de Choke. Um turbo maior apenas pressurizará em altas rotações, terá respostas mais lentas, mas não restringirá o fluxo do motor a altas rotações.

Existem também os turbocompressores de geometria variável que agrega em si as vantagens de um turbo pequeno e de um turbo grande. Em baixas rotações ele age como se tivesse uma turbina pequena. Em altas rotações ele funciona como se fosse uma turbina grande. Ele possui palhetas moveis que permanecem fechadas em baixas rotações. A medida em que a velocidade do motor aumenta essas palhetas vão se abrindo aumentando assim, a área da seção transversal efetiva da turbina assim como na figura 2.2.2.2.

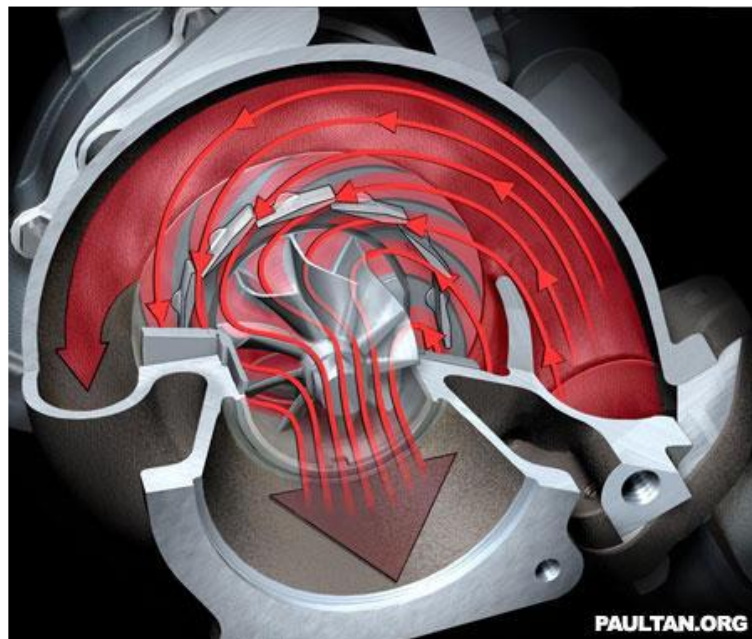


Figura 2.2.2.2 - Palhetas fechadas

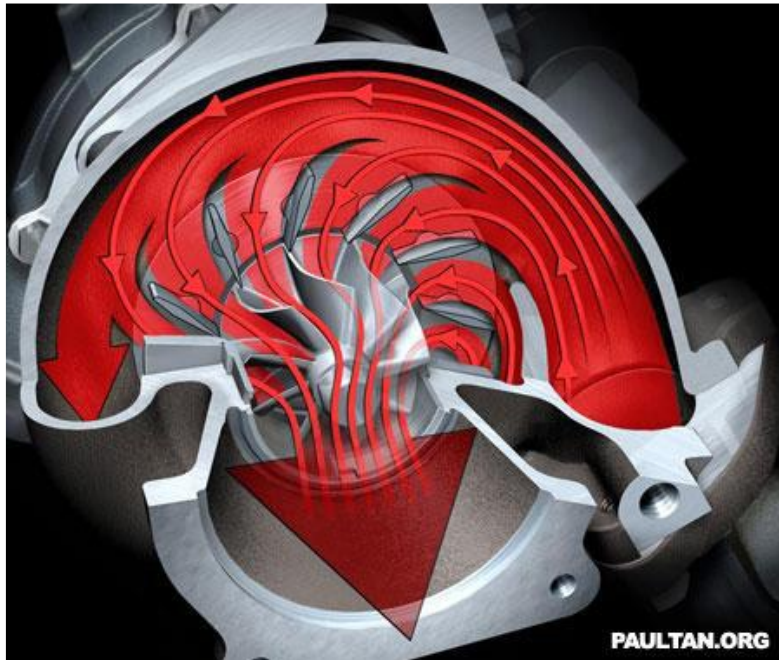


Figura 2.2.2.3 - Palhetas abertas

A lubrificação do eixo da turbina pode ser feita com mancais de óleo ou com rolamentos. A turbina que será utilizada será lubrificada a óleo.

### **2.3. Sistema de Sobrealimentação de Ar**

#### **2.3.1. Turbocompressor**

O tamanho do compressor e da turbina devem ser adequadamente dimensionados para cada tipo de motor. Potência pretendida, volume do motor, rotação máxima, combustível utilizado, condições ambientes e eficiência volumétrica influenciam na escolha do turbocompressor. Portanto, antes de se escolher este equipamento, deve-se ter em mãos todos esses parâmetros.

Também é importante observar a lubrificação da turbina que deve ser suficiente para que os mancais estejam sempre alimentados e a extração do óleo não deve ser restringida.

### 2.3.2. Coletor de Escapamento

O coletor de escapamento deve ser dimensionado segundo seu material, design e modo de fabricação. Deseja-se que o escape suporte o turbo, guie os gases de exaustão para a turbina, retenha o máximo de calor possível e mantenha os pulsos de pressão intactos ao longo do caminho em ritmo constante. Este componente pode ser fabricado de vários materiais dentre os mais comuns são: o ferro fundido, aço inoxidável, aço carbono e alumínio. Pode ser feito com moldes ou na forma tubular. Estas 3 variantes são definidas segundo a aplicação do coletor. No caso de motores fabricados em grande escala, por exemplo, a melhor escolha é o ferro fundido. Na aplicação em questão, onde queremos alta performance a melhor escolha é o aço inoxidável tubular.

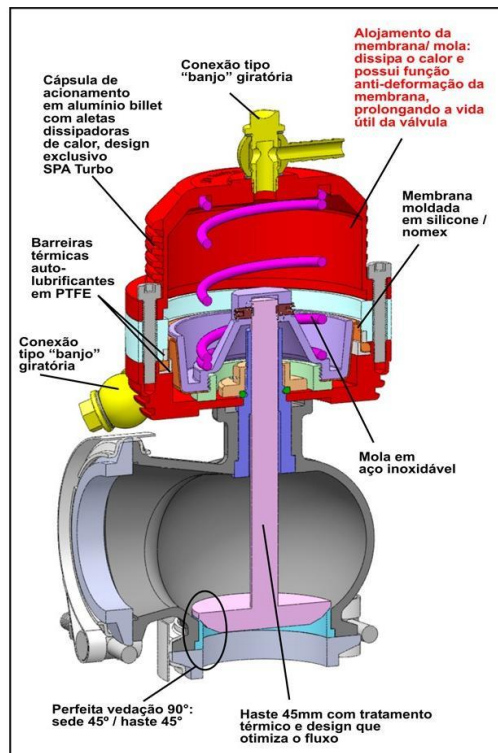
### 2.3.3. Válvula Reguladora de Pressão

A válvula reguladora de pressão limita a pressão máxima no coletor de admissão. Em um carro onde se deseja uma longa vida útil utilizamos válvulas que desviam o ar antes de entrar no turbo. Em consequência disso, a pressão do turbo é limitada indiretamente pela sua rotação, ou seja, quando a pressão no coletor de admissão chega na desejada, a válvula começa a desviar o ar excedente que sai do coletor de escape para a atmosfera ao invés de ir para o turbo, caso contrário este componente ia girar mais e aumentaria a pressão na admissão. Apesar deste tipo de válvula aumentar a vida do motor, ela aumenta o atraso de resposta ao se requerer potência, o que chamamos de Lag. Este tipo de válvula se chama Wastegate. Ela pode ser incorporada na turbina ou externa a ela. A incorporada é construída dentro da carcaça da turbina e basicamente é uma porta com um braço de manivela que é acionada pelo atuador pneumático que se localiza externamente à turbina. Este tipo de Wastegate está ilustrada na Figura 2.3.3.1.



Figura 2.3.3.1 – carcaça quente do turbocompressor (Garret)

A wastegate externa age de maneira diferente. Seu funcionamento é baseado em uma válvula, uma membrana, uma mola e um parafuso. A válvula está em contato com os gases de escape e ligada a uma membrana que divide a câmara da wastegate em dois. A parte superior da membrana está a pressão ambiente. E a parte inferior está ligada ao coletor de admissão. Portanto, o coletor de admissão e o parte inferior da membrana estão na mesma pressão. Quando a pressão na admissão chega a um valor estipulado (regulado pelo aperto do parafuso) e capaz de vencer a força da mola, a membrana tende a se expandir levantando a válvula e desviando parte do ar, que iria para a turbina, para a atmosfera, limitando assim a velocidade da turbina. Este tipo de válvula se encontra na Figura 2.3.3.2.



• Figura 2.3.3.2 – Válvula Wastegate externa

([http://uemaster.mercadoshops.com.br/valvula-alivio-wastegate-1000hp-melhor-que-tial-hks\\_620xJM](http://uemaster.mercadoshops.com.br/valvula-alivio-wastegate-1000hp-melhor-que-tial-hks_620xJM))

Outro tipo de válvula reguladora funciona após o turbocompressor. Esta válvula se chama Pop-off. A sua capacidade de regular a pressão se deve ao fato de que ela desvia o ar excedente que o turbo pressurizou. Com isso, todo o ar que sai do motor passa pela turbina e ela está girando o tempo todo a sua máxima capacidade. Sendo assim, quando for requerido potência a resposta do motor será bem mais rápida do que com o outro tipo de válvula. Porém, como o turbo está girando o tempo todo a máxima capacidade em relação à rotação do motor a sua vida útil irá diminuir bastante.

Como o estudo em questão é o aprimoramento de um motor de corrida se torna mais importante a performance do que a durabilidade. Portanto, a escolha mais adequada é a válvula Pop-off.

#### 2.3.4. Válvulas de alívio

Quando o motor está funcionando a plena carga e se tira o pé do acelerador repentinamente, o compressor continua rodando a altas rotações. Portanto ele continua pressurizando até que sua rotação diminua. Neste caso, a pressão após o compressor



aumentaria muito até a razão de pressão ser tão grande a ponto do fluxo de ar se reverter e voltar para o compressor. Com isso, a pressão diminuiria permitindo que o compressor aumentasse a pressão novamente. Isso aumentaria novamente a razão de pressão fazendo com que o ciclo se repita. Esse fenômeno se chama SURGE e é muito prejudicial para os componentes do turbo podendo ocasionar na falha do componente.

As válvulas de alívio servem para aliviar a pressão oriunda do compressor após a válvula borboleta ser fechada. Evitando o fenômeno de SURGE.

A configuração mais usada em uma instalação do compressor é a filtro localizado a montante do compressor, que seria seguido da tubulação até o corpo de borboleta.

No caso da configuração usada nesse projeto, por motivos de regras da Fórmula SAE, o corpo de borboleta deve vir entre o filtro de ar e o compressor. Não sendo necessária a utilização da válvula de alívio.

#### 2.3.5. Manômetros

Os manômetros necessários para uma boa monitoração do motor são: pressão de óleo, pressão de combustível e pressão de ar no coletor de admissão.

##### Pressão de óleo

O óleo tem fundamental importância no motor. Sem o óleo suas peças de desgastariam rapidamente. Foi modificado o sistema de lubrificação para levar óleo ao turbo. Este sistema deixou de ser inteiramente interno para ter partes externas como mangueiras, cotovelos e ramificadores. Somando o fato de que com o turbo o motor sofrerá maiores cargas, é de extrema necessidade a utilização de tal manômetro para identificar qualquer vazamento ou problema na bomba de óleo.

##### Pressão de combustível

Com a utilização do turbo a quantidade de mistura ar/combustível será maior e a temperatura na câmara de combustão também será aumentada. Em um momento de carga total no motor, a mistura e a temperatura serão máximas e a falta de combustível pode significar danos as partes do motor (até a quebra) uma vez que o ar entrando sem ou pouco combustível a alta pressão e alta temperatura no motor podem fundir os metais das partes móveis. Com isso, a instalação de um manômetro de combustível se faz necessária para identificar quaisquer vazamentos ou avarias na bomba injetora. Além do mais, com o aumento da pressão no coletor de admissão será de fundamental

importância o aumento proporcional da pressão de combustível para manter constante a diferença de pressão a montante e a jusante dos bicos injetores.

#### Pressão de ar no coletor de admissão

Este tipo de monitoração é necessário para o acerto do motor turbinado, já que lidamos com pressão positiva no coletor de admissão. E para o controle da pressão máxima do turbo.

#### 2.3.6. Sonda Lambda

A sonda Lambda é um elemento fabricado de material cerâmico (dióxido de zircônio), coberto interna e externamente de uma fina camada de platina micro porosa. Quando o dióxido de zircônio é aquecido acima de 300°C, ele se torna um condutor elétrico conduzindo íons de oxigênio da camada interna de platina(atmosfera) para a camada externa (gases do escape). Essa migração de íons gera uma milivoltagem que é lida pela injeção e assim, esta corrige o tempo de injeção para que a mistura seja a mais próxima do ideal de acordo com o regime do motor.

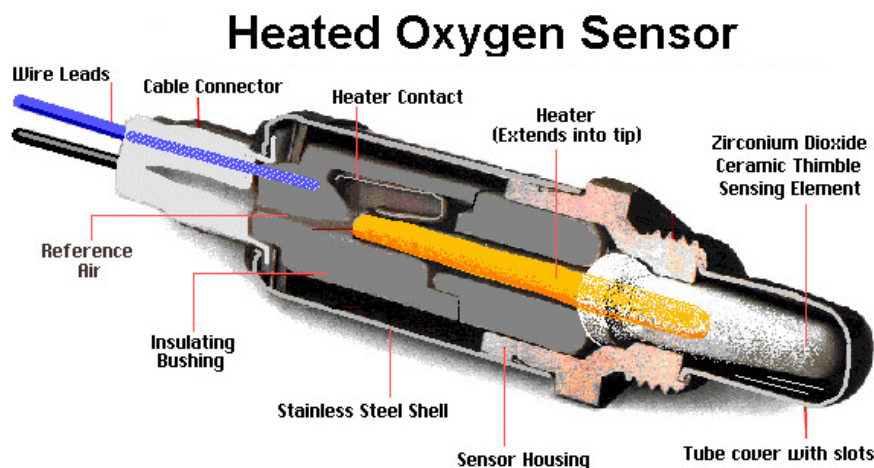


Figura 2.3.6.1 – Sonda Lambda (<http://davidt9000.blogspot.com.br/2011/06/fuel-injection-part2.html>)

A sonda Lambda é de extrema importância para o acerto da mistura ar-combustível. Ela é fixada no escapamento e monitora a quantidade de oxigênio no escapamento. Nos motores originalmente a injeção ela ajuda o motor a injetar a quantidade de combustível ideal já que a injeção faz a correção do tempo de injeção em função da leitura deste

sensor. No caso da injeção programável FuelTech a sonda lambda não se comunica com o módulo. A sonda será usada apenas para monitorar a mistura de ar-combustível durante o acerto no dinamômetro.

Será usada uma sonda Banda Larga da FuelTech que é mais precisa do que a sonda lambda de 4 fios usada nos carros originais, pois pode ler uma gama maior de proporções da mistura.

A máxima potência é obtida com misturas levemente ricas. A Fueltech fornece uma tabela com valores sugeridos por ela de números Lambda, como está evidenciado na tabela 2.3.6.1.

Tipo de Motor	Combustível	Lambda Máxima Potência
Aspirado	Gasolina	0,90
	Álcool	0,86
	Metanol	0,82
Turbo (Baixa Pressão)	Gasolina	0,86
	Álcool	0,85
	Metanol	0,82
Turbo (Alta Pressão)	Gasolina	0,82
	Álcool	0,80
	Metanol	0,78

Tabela 2.3.6.1 - Fueltech Manual da Sonda Lambda WB-o2

### 2.3.7. Coletor de Escape

O coletor de escape desempenha um papel fundamental em todos os aspectos de performance de um sistema turbo. Alguns dos vários papéis deste componente são: orientar os gases de exaustão para a turbina, manter os pulsos de pressão dos gases de exaustão se movendo em um passo estável e tentar manter o máximo de calor dentro das paredes do coletor. Tudo isso a altíssimas temperaturas e ainda tendo que suportar o turbo.

A aplicação do automóvel deve ser definida, pois todo o processo de fabricação do coletor é diretamente ligado a isso. Tanto material, quanto design e estilo. O diâmetro e espessura da parede também deverão ser dimensionados.

A capacidade do coletor de segurar o calor dentro dele está intimamente ligado com seu material, área de superfície e com sua espessura. Os materiais mais usados para a

fabricação deste elemento são: aço fundido, aço inoxidável, e aço carbono. Sendo que o mais recomendado quando se visa performance é o aço inoxidável, pois ele tem uma propriedade muito boa de reter calor. E ao contrário do que somos levados a pensar quanto mais grossa for a parede do coletor mais rápido o calor será transferido para o ambiente. Isso se dá porque o metal é um condutor de calor melhor do que o ar. Por último, a transferência de calor é diretamente proporcional a área de superfície, ou seja, quanto maior a área maior a transferência de calor.

O estilo do coletor pode ser: tubular, feito em molde, ou até soldado.

## **2.4. Sistema de Alimentação de Combustível**

### **2.4.1. Módulo de Injeção FuelTech**

O motor da CB500 é originalmente carburado. Para haver um melhor acerto do mistura ar-combustível deste motor foi instalado uma injeção eletrônica programável. Com ela pode-se programar o tempo de abertura dos bicos injetores levando-se em consideração vários parâmetros, dentre eles: Pressão no coletor de admissão, abertura da borboleta, temperatura do ar externo, pressão do ar externo e temperatura do motor.

### **2.4.2. Bomba de Combustível**

A bomba de combustível é responsável por suprir o motor com combustível. Ela pode ser interna ao tanque de combustível ou externa. Este componente deve estar de acordo com o tamanho e a potência que se deseja atingir no motor. Seu dimensionamento é de extrema importância, pois caso ela tenha uma capacidade menor do que a desejada poderá ocorrer a falta de combustível acarretando em inúmeros problemas, inclusive a quebra do motor. E caso ela esteja muito maior do que o necessário será difícil regular a mistura ar-combustível de forma linear.

Uma bomba tem duas variantes importantes: sua vazão e sua pressão. O ideal é se obter a curva de desempenho da bomba e comparar com a curva do sistema. No entanto, é muito difícil de se conseguir essas informações para bombas automotivas por motivos práticos. Na prática, há um consenso de caracterização das bombas a partir de sua vazão, tendo fixado uma pressão de 3 bar. Isso se dá porque uma grande parte dos automóveis têm sua pressão de combustível fixada para essa pressão.

### 2.4.3. Bicos Injetores

Os bicos injetores devem ser dimensionados de acordo com a potência do motor desejada e deve estar dimensionada de forma coerente com a bomba de combustível e quantidade de bicos por cilindro. A partir do cálculo da vazão de combustível necessária e do número de bicos injetores obtemos a vazão de cada um.

### 2.4.4. Linha de Combustível

A linha de combustível deve ser dimensionada de acordo com a vazão e pressão que serão alcançados com o funcionamento do motor. A vazão dela deve ser suficiente para alimentar o motor a determinada pressão.

### 2.4.5. Combustível

A principal limitação da utilização de altas pressões com a utilização do turbo é a capacidade do combustível de resistir a detonação. Este fenômeno é extremamente prejudicial ao motor e ocorre quando o combustível não tem o nível de octanagem necessário. O resultado é um som característico e vibração do motor devido a propagação de ondas de pressão de grandes amplitudes e aumento da pressão.

A gasolina nacional “normal” não tem a octanagem muito alta, porém o álcool e a gasolina Premium têm. Podemos utilizar duas soluções para o problema de detonação: trocar o combustível para um de octanagem maior ou ajustar o ponto de ignição para diminuirmos o pico de pressão alcançado dentro do cilindro. Neste projeto adotaremos a solução de troca de combustível.

### 2.4.6. Dosador de Combustível

Em um motor aspirado a pressão no coletor de admissão vai de negativa (em relação a atmosférica) até no máximo a pressão atmosférica. Como a pressão de combustível geralmente é em torno de 3 bar ( $\pm 3$  atm) a diferença de pressão entre a admissão e a linha de combustível chega ao um mínimo de 3 atm de diferença. No entanto, quando adicionamos a turbina a pressão na admissão pode chegar muito perto da de combustível. Caso isso acontecesse, a válvula injetora de combustível abriria, mas o

combustível não sairia da linha porque não haveria diferença de pressão. O regulador de pressão de combustível serve para evitar esse problema.

Para injeção eletrônica existem basicamente dois tipos: os de 1:1(geralmente originais de fábrica) e os HPI. Os dosadores de 1:1 agem aumentando a pressão de combustível proporcionalmente ao aumento de pressão no coletor. Isso torna o diferencial de pressão entre admissão e combustível sempre constante. Por exemplo, num carro turbinado onde a pressão de combustível é de 3 bar, ao compressor aumentar a pressão da admissão para 1 bar manométrico a pressão de combustível deverá subir até 4 bar para manter o diferencial de pressão entre admissão e combustível em 3 bar.

Existem também os dosadores de combustível HPI que servem para aumentar a pressão de gasolina na proporção de 1:1 ou mais, podendo chegar até 5:1. Por exemplo, podemos regular este dosador para aumentar a pressão de gasolina 3 vezes mais do que o aumento da pressão na admissão.

A escolha do dosador depende do tipo de projeto e do tipo de equipamentos que se deseja usar. O dosador HPI é usado mais quando não se tem uma injeção programável. Neste caso, pode-se tentar fazer um acerto da quantidade de combustível que alimenta o motor bastante grosseiro apenas pelo aumento pressão de combustível e pela vazão do bico injetor. O HPI é usado também com injeção programável para preparação bem fortes que resultarão em muita potência do motor.

No caso do projeto em questão, como utilizaremos uma injeção totalmente programável usaremos um dosador de 1:1.

## **2.5. Sistema de Ignição**

### **2.5.1. Módulo de Ignição**

Com o motor da CB500 aspirado foi usado o módulo de ignição original da moto, pois como não foi modificado o combustível ou parâmetros geométricos do motor não havia necessidade de se mudar o mapa de ignição.

Ao instalar o turbo foi necessário a modificação deste sistema para que o novo mapa de ignição fosse coerente com as modificações realizadas, como maior relação de pressão no motor e combustível com maior octanagem.

### 2.5.2. FirePro

Para o controle da ignição é necessário o monitoramento do rotação e posição exata do primeiro pistão do motor. Para isso, é necessário a utilização de uma roda Fônica com uma certa quantidade de dentes. O modulo de injeção e ignição da Fueltech não consegue ler o sinal que a roda fônica produz. Para isso, é necessário a utilização da FirePro que apenas interpreta a leitura feita da roda fônica pelo sensor de rotação a manda para o módulo de injeção e ignição.

### 2.5.3. Roda Fônica

A roda fônica é simplesmente uma engrenagem com uma certa quantidade de dentes e que contém uma falha em determinado dente ou dentes. Esta falha, tendo uma localização referente ao Ponto Morto Superior do primeiro cilindro, possibilita ao módulo de injeção saber exatamente a posição do virabrequim.

Para a leitura da roda fônica é usado um sensor que são basicamente dois: sensor por efeito Hall ou sensor indutivo.

### 2.5.4. Ponto de Ignição

Ao sistema de ignição cabe a importante tarefa de inflamar a mistura ar-combustível no momento correto. O sistema transforma os 12V da bateria em algumas dezenas de milhares de volts suficientes para transpor a distância existente entre os eletrodos das velas de ignição.

## **3. DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES**

### **3.1. Potência Desejada**

O primeiro passo para se calcular os parâmetros e dimensões dos componentes é a potência que se deseja alcançar. A potência original do motor é de 54cv. No entanto, a potência real do motor medido nas rodas no dinamômetro é de 52,88 cv, Estimaremos como alvo 100 cavalos, o que será suficiente para ter um aumento por volta de 100% da potência medida.

### 3.2. Cálculos Iniciais

Muitos cálculos serão feitos em unidades inglesas, pois os mapas de compressores e turbinas da Garret são nessas unidades.

#### 3.2.1. Rendimento Volumétrico

O rendimento volumétrico é muito importante para o cálculo de vazão de ar. No entanto, este dado é muito difícil de se arranjar, já que as empresas de motores não liberam esta informação. Um método que para obter este rendimento seria a bancada de fluxo. No entanto, não temos esta opção disponível.

Segundo relatórios da equipe de fórmula SAE do ano de 2009 e 2010, onde usavam o motor da CB500 o rendimento volumétrico deste motor é de 80% no pico de torque. Portanto,

$$\eta_v = 0,8$$

Através do gráfico de torque obtido com o ensaio no dinamômetro obtemos a curva de rendimento. Na figura abaixo encontra-se tanto a linha de torque quanto a linha de rendimento deste motor.

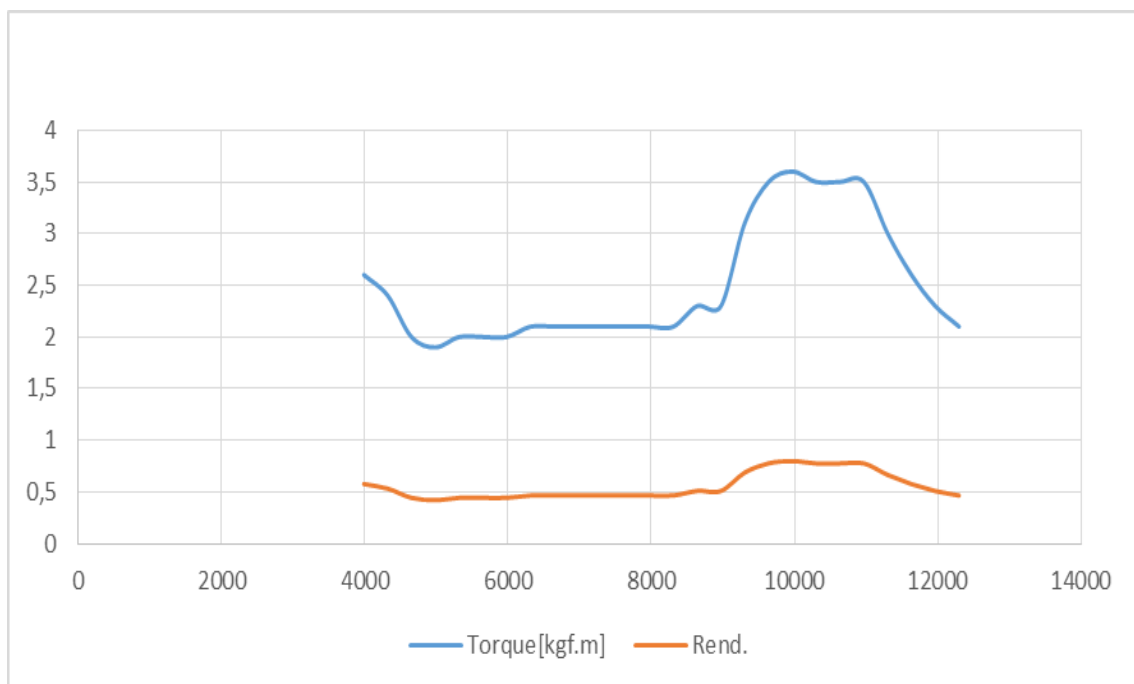


Figura 3.2.1 – Gráfico do torque e do rendimento



Para uma melhor análise evidenciaremos a linha de rendimento numa escala de gráfico mais apropriada.

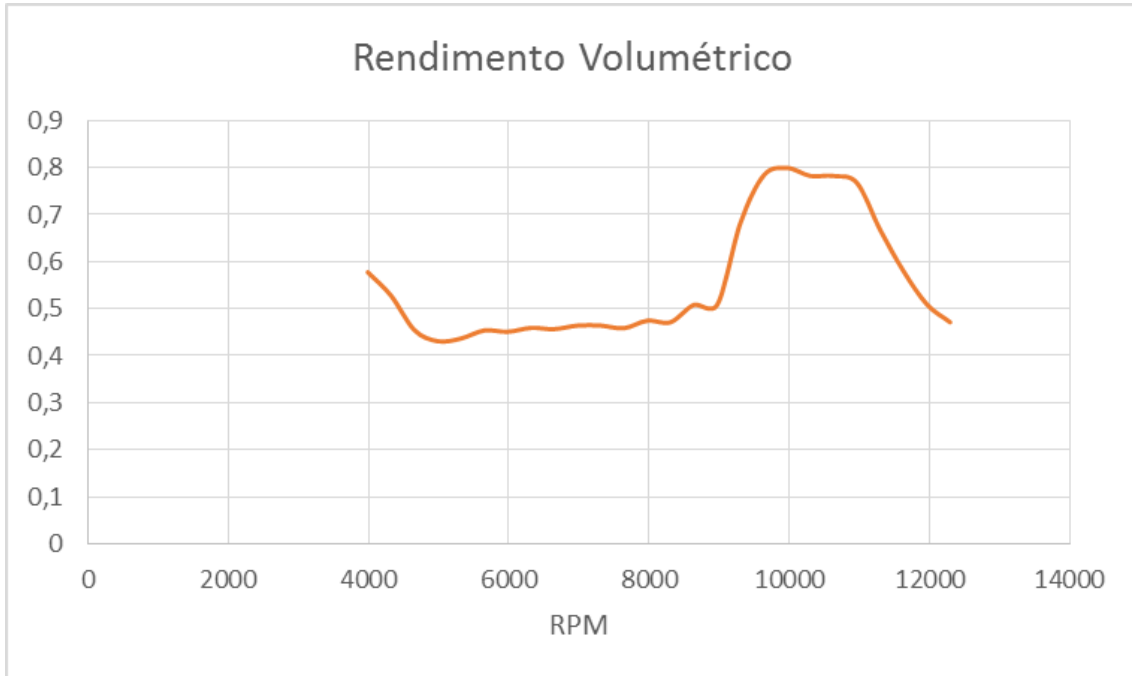


Figura 3.2.2 – Gráfico rendimento

Esta análise gráfica nos dá uma curva que obedece a função  $T[\text{kgf.m}] = 4,5 \cdot \eta_v$ . Vamos fazer uma verificação por meio de cálculos. A partir de fórmulas de potência e rendimento, chegamos a:

$$Pot[kW] = \frac{\eta \times PCI \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \times \rho_{Ar} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \times V_T [m^3] \times RPM \times \eta_v}{\frac{A}{F} \times 120} \quad (2)$$

Substituindo a potência pelo torque:

$$T[kgf.m] = \frac{0,1 \cdot \eta \cdot PCI \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \cdot \rho_{Ar} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot V_T [m^3] \cdot 60000}{\frac{A}{F} \cdot 120 \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \eta_v$$

Usando um rendimento global de 0,3 sugerido pela SAE (Mechanical Engineering, vehicle design, Richard B. Hathaway),  $\rho_{Ar} = 1,169 \text{ kg/m}^3$ , considerando mistura estequiométrica do ar com o etanol, temos:

$$T[kgf.m] = \frac{0,1 \cdot 0,3 \cdot 3.26281,4 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \cdot 1,169 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \cdot 5 \cdot 10^{-4} [m^3] \cdot 60000}{8,77 \cdot 120 \cdot 2 \cdot \pi} \cdot \eta_v = 4,2 \cdot \eta_v$$

O que confirma a análise gráfica a cima, pois as funções estão bem próximas uma da outra.

Pelo gráfico, para a potência máxima deste motor que é por volta de 10968 rpm utilizaremos um rendimento de 0,78.

### 3.2.2. Temperatura no Coletor de Admissão

Segundo artigo da Garret, a temperatura no coletor de admissão para carros turbinados e sem intercooler é de 79,44°C até 148,89°C(175°F-300°F). Portanto, como é apenas uma estimativa utilizaremos um valor baixo, pois utilizaremos baixa pressão no coletor de admissão.

$$T_{admissão} = 79,5^\circ C = 175^\circ F$$

### 3.2.3. Consumo Específico de Combustível

Segundo artigo da Garret, carros turbinados geralmente têm o consumo específico de combustível de 0,5 até 0,6 [lb/(HP\*hr)]. Usaremos 0,6 [lb/(HP\*hr)]. Pois a FuelTech também recomenda este valor.

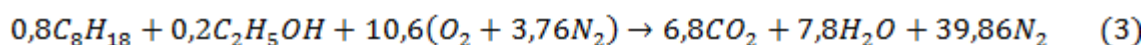
### 3.2.4. Combustível

O combustível original do motor em questão é a gasolina. No entanto, ao aumentarmos a taxa de compressão dinâmica do motor instalando o turbo poderá haver detonação, pois a octanagem da gasolina brasileira é relativamente baixa. Uma forma de diminuirmos o risco de detonação no durante o funcionamento do motor é utilizarmos um combustível com maior octanagem. Sendo assim, trocaremos o combustível original pelo álcool etanol que responde bem as altas taxas de compressão dinâmica.

Para cálculos futuros, deduziremos as relações ar-combustíveis da gasolina brasileira e do etanol hidratado, ambos usados nos testes.

Para calcular a relação ar-combustível para a gasolina devemos fazer o balanceamento químico. O percentual obrigatório de etanol anidro combustível na gasolina é, a partir da zero hora do dia 1º de outubro de 2011, de 20%, conforme disposto na Resolução do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (Cima), nº 1, de 31 de agosto de 2011, publicada no Diário Oficial da União em 1º de setembro de 2011. O etanol anidrido, de acordo com a RESOLUÇÃO ANP Nº 7, DE 9.2.2011 - DOU 10.2.2011 – RETIFICADA DOU 14.4.201, contém 0,4% em volume de água. O que corresponde a 0,08% em volume de água na gasolina. Por ser uma proporção tão pequena não consideraremos esta água, sem maiores consequências para os resultados.

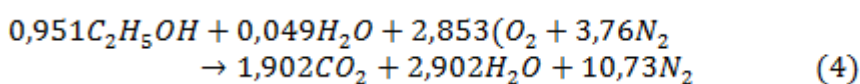
Considerando uma combustão completa:



A relação ar-combustível será:

$$\frac{A}{C} = \frac{10,6 \times 31,999 + 39,86 \times 28,013}{0,8 \times 114,232 + 0,2 \times 46,069} = 14,47 \frac{kg \text{ ar}}{kg \text{ comb}}$$

No Etanol Hidratado(EH), conforme a RESOLUÇÃO ANP Nº 7, DE 9.2.2011 - DOU 10.2.2011 – RETIFICADA DOU 14.4.201, a porcentagem de água é de 4,9%. Portanto, equacionando a reação química:

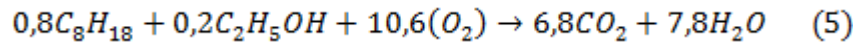


Calculando a relação ar-combustível:

$$\frac{A}{C} = \frac{2,853 \times 31,999 + 10,73 \times 28,013}{0,951 \times 46,069 + 0,049 \times 18,015} = 8,77 \frac{kg \text{ ar}}{kg \text{ comb}}$$

Para cálculos futuros, também será necessário o PCI dos combustíveis.

Para o cálculo do PCI da gasolina brasileira:



$$h_c(\text{combustível})$$

$$= 6,8(h_c)_{CO_2} + 7,8(h_c)_{H_2O_{vapor}} - 0,8(h_c)_{C_8H_{18}} - 0,2(h_c)_{C_2H_5OH}$$

$$h_c(\text{combustível})$$

$$= 6,8(-393522) + 7,8(-241826 - 0,8(-208600))$$

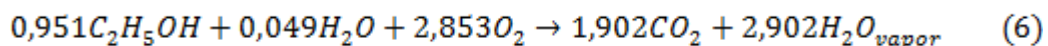
$$- 0,2(-235000)$$

$$h_c(\text{combustível}) = -4348312,4 \frac{kJ}{kmol \text{ comb}}$$

$$PCI = \frac{h_c(\text{combustível})}{M_{comb}}$$

$$PCI = 43224 \frac{kJ}{kg \text{ comb}}$$

Calculando o PCI do Etanol Hidratado(EH):



$$h_c(\text{etanol}) = 1,902(h_c)_{CO_2} + 2,902(h_c)_{H_2O} - 0,951(h_c)_{C_2H_5OH} - 0,049(h_c)_{H_2O}$$

$$h_c(\text{etanol}) = 1,902(-393522) + 2,902(-241826) - 0,951(-277380) - 0,049(-241829)$$

$$h_c(\text{etanol}) = -1174619,89 \frac{\text{kJ}}{\text{kg etanol}}$$

$$PCI = \frac{h_c(\text{etanol})}{M_{RH}} = \frac{1174619,89}{44,69} \quad (7)$$

$$PCI = 26281,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg etanol}}$$

### 3.2.5. Vazão Mássica de Ar

A fórmula da vazão mássica é:

$$\dot{m}_{ar} \left[ \frac{\text{lb}}{\text{min}} \right] = Pot_{ef}[\text{HP}] \cdot \frac{A}{C} \cdot \frac{BSFC \left[ \frac{\text{lb}}{\text{HP} * \text{hr}} \right]}{60} \quad (8)$$

,onde  $Pot_{ef}$  = Potência Efetiva

Portanto,

$$\dot{m}_{ar} \left[ \frac{\text{lb}}{\text{min}} \right] = 100[\text{HP}] \cdot 8,77 \cdot \frac{0,6 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{HP} * \text{hr}} \right]}{60} = 8,77$$

$$\dot{m}_{ar} = 8,77 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{min}} \right]$$

### 3.2.6. Pressão Requerida no Coletor de Admissão para a Potência Desejada

A fórmula da pressão requerida é

$$MAP_{req}[psia] = \frac{\dot{m}_{ar} \left[ \frac{lb}{min} \right] \cdot R \cdot (460 + T_{admissão}[^{\circ}F])}{\eta_v \cdot \frac{N[rpm]}{2} \cdot V_d[in^3]} \quad (9)$$

, onde

R= constante dos gases = 639,6

V<sub>d</sub>=Volume dos cilindros

Portanto,

$$MAP_{req}[psia] = \frac{8,77 \left[ \frac{lb}{min} \right] \cdot 639,6 \cdot (460 + 175[^{\circ}F])}{0,78 \cdot \frac{10968[rpm]}{2} \cdot 30,5[in^3]}$$

$$MAP_{req} = 27,3[psia]$$

### 3.2.7. Razão de Pressão

Vamos calcular a razão de pressão do sistema,

$$PR = \frac{P_{após\ compressor}[psia]}{P_{antes\ do\ compressor}[psia]} \quad (10)$$

Com uma perda sugerida pela Garrett de 1 psia para o filtro de ar podemos usar

$$P_{antes\ do\ compressor}[psia] = 14,7 - 1 = 13,7[psia]$$

Portanto,

$$PR = \frac{27,3[psia]}{13,7[psia]} = 1,99$$

### 3.2.8. Vazão mássica de combustível

Para um motor em plena carga, segundo a tabela da FUELTECH apresentada a cima, para um carro turbo e a álcool em plena carga o fator lambda deve ser igual a 0,85. Como

$$\lambda = \frac{\frac{A}{\bar{F}_{Real}}}{\frac{A}{\bar{F}_{Esteq}}} \quad (11)$$

Então,

$$\frac{A}{\bar{F}_{Real}} = \lambda \cdot \frac{A}{\bar{F}_{Est}} = 0,85 \cdot 8,77 = 7,45 \left[ \frac{Kg \text{ ar}}{Kg \text{ comb}} \right]$$

$$\frac{A}{\bar{F}} = \frac{\dot{m}_{AR}}{\dot{m}_{Comb.}}$$

$$\dot{m}_{Comb.} = \frac{\dot{m}_{AR}}{\frac{A}{\bar{F}}} = \frac{8,77}{7,45} = 1,17 \left[ \frac{lb}{min} \right] = 70,63 \left[ \frac{lb}{h} \right]$$

### 3.2.9. Vazão Volumétrica de Combustível

Segundo a RESOLUÇÃO ANP N° 7, DE 9.2.2011 - DOU 10.2.2011 - RETIFICADA DOU 14.4.2011(14/03/13) a massa específica do álcool hidratado é de 807,6 a 811,0 [kg/m<sup>3</sup>]. Usando a média de 809,3 kg/m<sup>3</sup>. Temos,

$$\dot{V}_{comb} \left[ \frac{m^3}{min} \right] = \frac{\dot{m}_{comb} \left[ \frac{kg}{min} \right]}{\rho_{alcohol} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \quad (12)$$

$$\dot{V}_{comb} \left[ \frac{dm^3}{min} \right] = \frac{\dot{m}_{comb} \left[ \frac{kg}{min} \right]}{\rho_{alcohol} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} \cdot 10^3 \left[ \frac{dm^3}{m^3} \right] = \frac{0,534}{809,3} \cdot 10^3 = 0,660 \frac{dm^3}{min}$$

Ou

$$\dot{V}_{comb} = 660 \frac{ml}{min}$$

### 3.3. Bicos Injetores

Com o cálculo da vazão mássica e volumétrica de combustível em mãos, podemos calcular a vazão de cada bico injetor.

$$\dot{m}_{injetor} = \frac{\dot{m}_{comb}}{número_{injetores}} = \frac{70,63}{2} = 35,31 \left[ \frac{lb}{h} \right] \quad (13)$$

Corky Bell, indica em seu livro uma conta muito simples

$$\dot{m} \left[ \frac{lb}{hr} \right] = \frac{Pot[cv].0,55}{núm. injetores} \quad (14)$$

Substituindo valores temos

$$\dot{m} \left[ \frac{lb}{hr} \right] = \frac{100.0,55}{2} = 27,5$$

$$\dot{m} = 27,5 \left[ \frac{lb}{hr} \right]$$

Se considerarmos a diferença de consumo específico de combustível do álcool para a gasolina novamente nesta conta:

$$\dot{m} \left[ \frac{lb}{hr} \right] = \frac{100.0,55}{2} . 1,4 = 38,5 \left[ \frac{lb}{hr} \right]$$

Este valor é condizente com o valor encontrado anteriormente, se considerarmos que é uma estimativa que não considera as particularidades do motor.

A FuelTech disponibiliza uma fórmula para o cálculo da vazão dos bicos injetores como mostrado abaixo:



$$\dot{m} \left[ \frac{lb}{hr} \right] = \frac{Pot[cv].BSFC \left[ \frac{lb}{cv.h} \right].Comb}{Num.Injetores.Aprov} \quad (15)$$

Onde,

Comb = uma correção para cada combustível usado. No caso do álcool o valor é 1,4.

Aprov.= é o aproveitamento do bico injetor. Ele recomenda um aproveitamento de 80%.

Neste caso,

$$\dot{m} \left[ \frac{lb}{hr} \right] = \frac{100[cv].0,6 \left[ \frac{lb}{cv.h} \right].1,4}{2.0,8}$$

$$\dot{m} = 52,5 \left[ \frac{lb}{hr} \right]$$

### 3.4. Bomba de Combustível

A vazão da bomba de combustível é a vazão total de combustível. Ou seja,

$$\dot{m}_{bomba} = 70,63 \left[ \frac{lb}{h} \right]$$

$$\dot{V}_{bomba} = 660 \frac{ml}{min}$$

Com essa informação em mãos, adicionamos que a bomba deve ser capaz de pressurizar a linha, com essa vazão, em pelo menos 4,2 bar com segurança, pois o regulador de pressão de combustível é do tipo 1:1 e quando a pressão no coletor de admissão subir de 1bar para 2,2 bar (como calculado anteriormente) a pressão de combustível deverá subir para 4,2 bar.

O valor da vazão volumétrica da bomba medida a 3 bar foi de 1350 ml/min. Portanto, essa bomba atenderá bem as necessidades deste sistema.

### 3.5. Turbocompressor

#### 3.5.1. Compressor

Para a escolha do compressor devemos ter em mãos a vazão mássica de ar necessária para alimentar a potência desejada e a razão de pressão. Como já calculado

$$\dot{m}_{ar} = 8,77 \left[ \frac{lb}{min} \right]$$

$$PR = 1,99$$

Traçamos linhas referentes a esses valores no gráfico e obtemos um ponto. Analisaremos 3 compressores para ver qual será a melhor escolha.

Primeiro vamos traçar o ponto no mapa da menor turbina da Garret: a GT06 com TRIM=50 e A/R=0,32, conforme Figura 3.5.1.1.

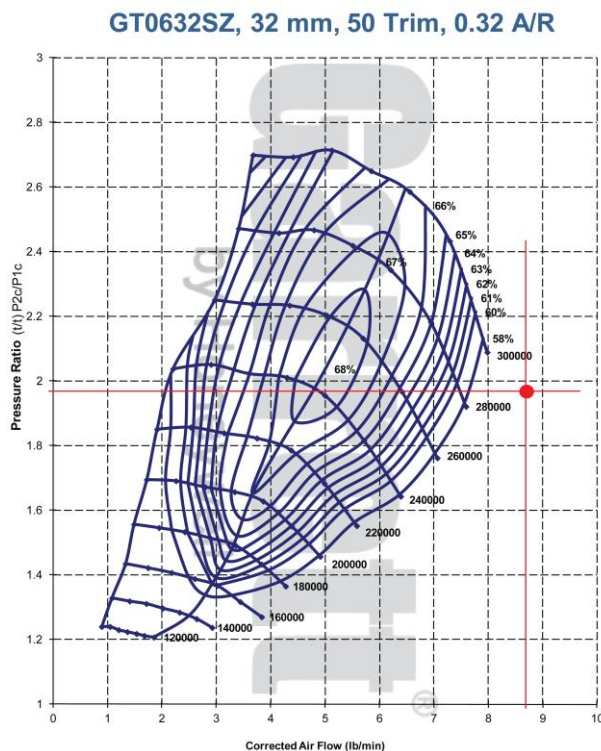


Figura 3.5.1.1 – Mapa do compressor da GT06 (Garrett)

O ponto encontrado está bem longe da linha de onde se encontra o gráfico. Portanto, esse compressor se mostra muito pequeno para o motor.

Vamos dar uma olhada em um compressor um pouco maior. O compressor em questão agora é a GT12 da Garret com TRIM=50 e A/R=0,33

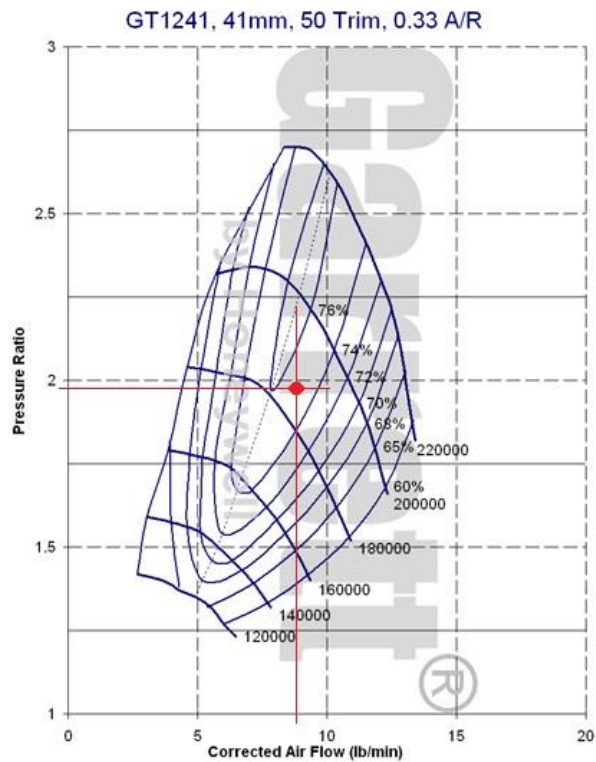


Figura 3.5.1.2 – Ponto de fluxo máximo na GT12 (Garrett)

O Ponto de máxima potência ficou em uma área de alta eficiência chamada Ilha de Eficiência, o que é muito bom para um carro de corrida. No entanto, devemos verificar se em rotações mais baixas o carro estará muito próximo da linha de Surge, que é o limite esquerdo do gráfico. Mas primeiramente, analisaremos uma turbina um pouco maior para sanar todas as dúvidas, a GT15 com TRIM=56 e A/R=.33.

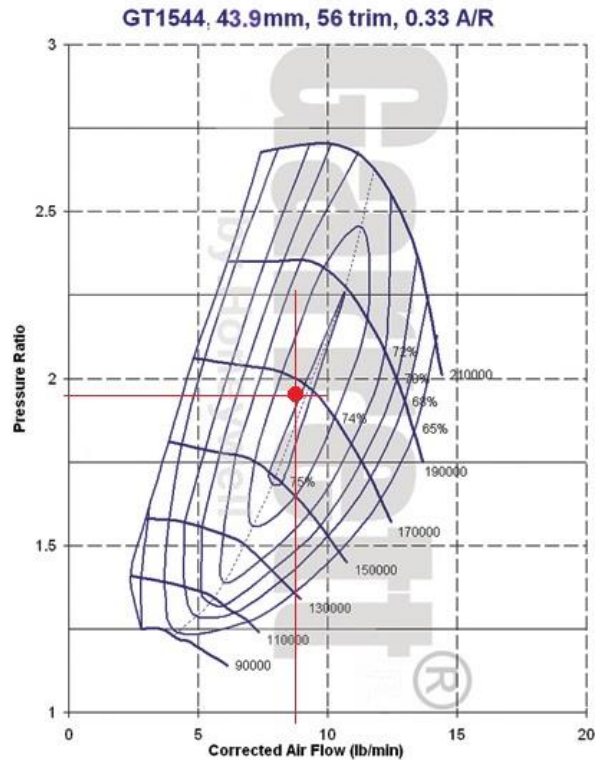


Figura 3.5.1.3 – Ponto de máximo fluxo na GT15 (Garrett)

Aparentemente, este compressor ficou um pouco grande. Mas vamos conferir.

Vamos traçar uma linha para menores RPM's para ver se todos os regimes se encontram dentro do gráfico e longe da linha de Surge. Através da fórmula dada pela Garret vamos calcular uma nova vazão de ar para uma rotação perto da de torque máximo.

$$\dot{m}_{ar} = \frac{MAP[psia] \cdot \eta_v \cdot \frac{N}{2} [rpm] \cdot V_d [in^3]}{R \cdot (460 + T_m)} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{ar} = \frac{25[psia] \cdot 0,8 \cdot \frac{9306}{2} [rpm] \cdot 30,5}{639,6 \cdot (460 + 175)} = 6,99 \left[ \frac{lb}{min} \right]$$

Traçando uma linha ligando os dois pontos referente ao fluxo de ar com o turbo pressurizando até o torque máximo, temos para o GT12e o GT15:

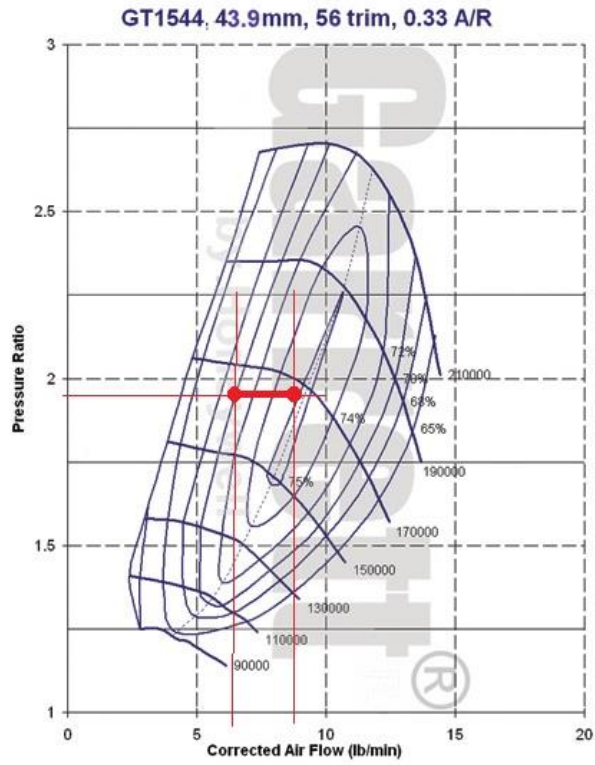


Figura 3.5.1.4 – Compressor GT15 (Garrett)

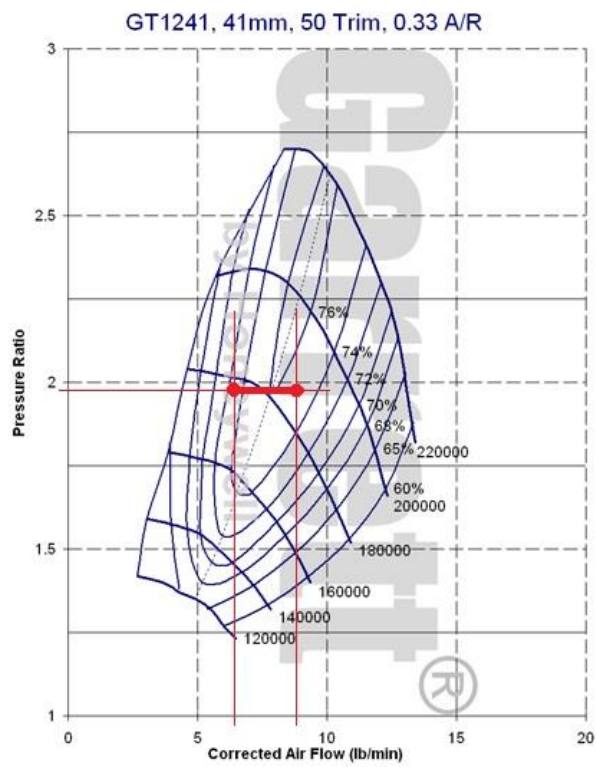


Figura 3.5.1.5 – Compressor GT12 (Garrett)

Após analisar os dois gráficos traçados com o ponto de máxima potência e o de máximo torque verificamos que a GT15 está um pouco grande para esse motor. Em um carro de corrida, é muito importante que o local onde se localiza a maior potência esteja no ponto de melhor eficiência do compressor para que possamos extrair o máximo deste equipamento. É fácil notar que com o compressor da GT12 uma grande parte do regime de funcionamento está localizado na área de maior eficiência. E o melhor, sem risco de Surge.

### 3.5.2. Turbina

Para selecionar a turbina dois parâmetros devem ser observado: o tamanho básico da turbina e seu A/R. O melhor de escolher ambos é através de experiências por tentativa e erro. Após isso, comparar resultados e julgar qual seria o melhor para determinado uso. No entanto, seria necessário muito tempo e dinheiro para fazê-lo.

A fabricante do turbocompressor Garrett dá sugestões e vende seu compressor já com uma turbina que eles julgam ideal. Sendo assim, utilizaremos a turbina aconselhada pela Garrett. Está é uma turbina com TRIM=72 e A/R=0,43. Seu mapa se encontra na figura abaixo.

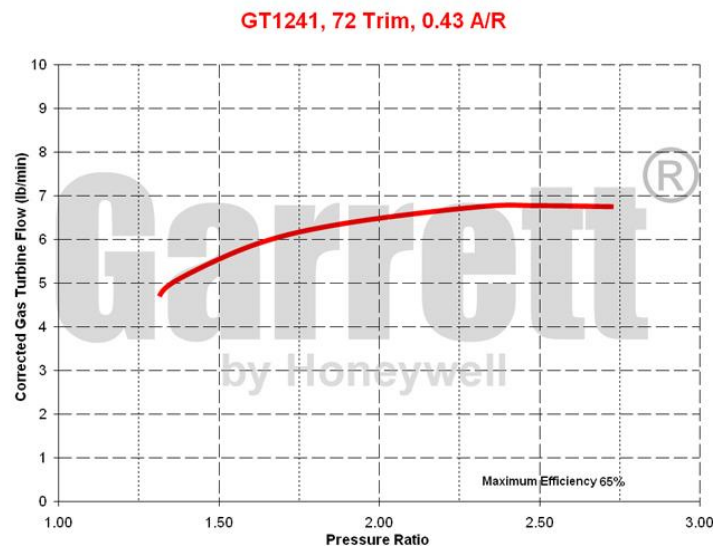


Figura 3.5.2.1 – Mapa turbine GT12 (Garrett)

### 3.5.3. Lubrificação

A lubrificação do turbocompressor é algo vital. Seu eixo gira a altíssimas rotações (mais de 200.000rpm para turbinas de mancal a óleo) e sem uma boa lubrificação seu mancal falharia rapidamente. É importante observar a pressão de óleo que chega na turbina e o posicionamento do retorno de óleo para o motor a fim de não ser restringido. Corky Bell sugere uma tabela de pressões mínimas e máximas no eixo da turbina, apresentada na tabela 3.5.3.1.

	Min. pressure (psi)	Min. flow (gal/min)
Idle, hot	5	0.1
Maximum load	25	0.5

Tabela 3.5.3.1 – Pressões de óleo

Conforme especificações técnicas da Honda para o motor da CB500 a pressão alcançada no interruptor de óleo que é onde está localizada a tomada de óleo para a turbina é de 34 psi. Considerando as perdas através da mangueira de óleo, dos nipples e da diferença de altura é razoável dizer q a pressão de óleo na entrada da turbina está dentro dos limites.

Em relação ao retorno do óleo, a entrada de óleo no motor deve ser localizada acima do nível do reservatório de óleo no cárter e a turbina deve ficar acima dessa entrada a fim de garantir o retorno de óleo ao motor sem que haja restrição do óleo.

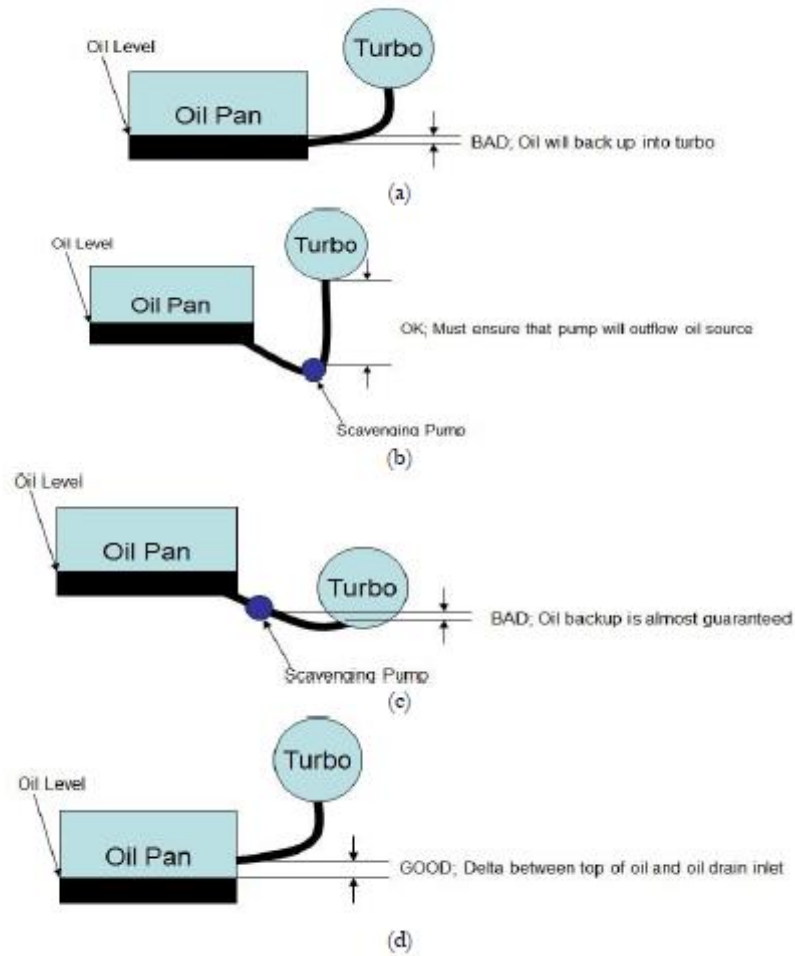


Figura 3.5.3.1 – Localização do retorno de óleo (Formula SAE Turbocharger System Development)

### 3.6. Pressurização

A pressurização tem o diâmetro de saída do compressor para não haver grandes mudanças de seção de área. Nela se encontra também a válvula Pop-off. Ambas estão ilustradas na figura 3.6.1.





Figura 3.6.1-Válvula Pop-off

### **3.7. Coletor de Escape**

O estilo do coletor de escape escolhido foi o tubular. O ideal seria o de aço inoxidável. No entanto, por motivos de força maior utilizaremos o coletor tubular de aço carbono.

Algumas recomendações são feitas em relação ao coletor de escape:

- Deve ser o mais curto possível, para evitar a perda de energia para o ambiente antes dos gases passarem pela turbina.
- Deve ter dutos de comprimento igual, para que efeitos como ressonância ocorra com a mesma frequência.
- O diâmetro do duto deve seguir o do cabeçote e o da entrada da turbina.
- Evitar curvas acentuadas para se evitar mudanças repentinas no fluxo, ocasionando perda de carga e estresse localizado no material.

O diâmetro interno do tubo do coletor foi de 30 mm e uma espessura de 2,75mm.

Com essas características em mente, foi usado o software SolidWorks para fazer o desenho em 3D do escapamento, como apresentado na figura 3.7.1. O que influenciou muito também foi o espaço disponível para o coletor. Isso limitou muito a variação do design.

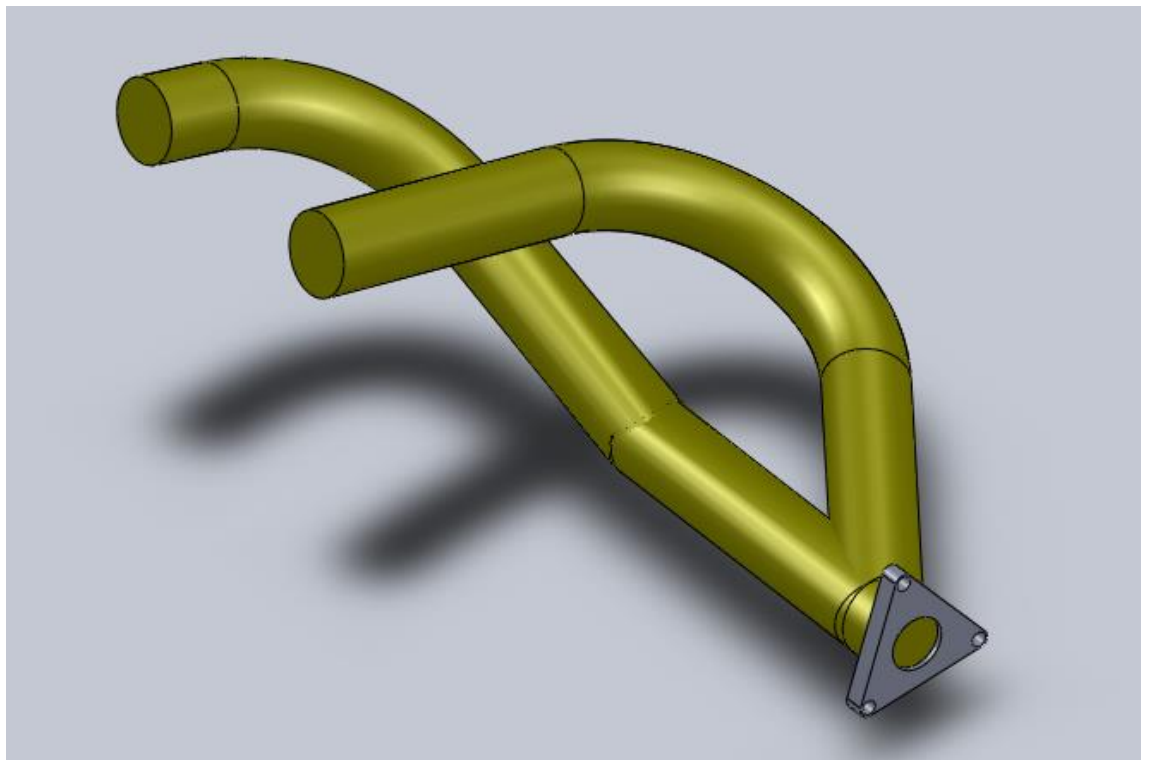


Figura 3.7.1 – Coletor de escape

Este desenho foi baseado no espaço que havia disponível no cofre do motor. Montando ele no carro com a turbina obtemos o desenho da Figura 3.7.2. e figura3.7.3.



## 4. APLICAÇÃO DO PROJETO

### 4.1. Instalação Elétrica

A instalação elétrica do carro teve que ser feita quase que totalmente. Na Figura 4.1.1 vemos como estava o estado da instalação elétrica antes de começar o projeto.



Figura 4.1.1 – Estado do carro antes do início do projeto

O primeiro passo foi refazer a instalação elétrica dos componentes de energia, do sistema de ignição original e da injeção programável. Após isso o motor foi ligado e a mistura as-combustível regulada.

### 4.2. Adaptação da Ignição

Para se controlar a ignição é preciso saber exatamente a posição de cada pistão com o intuito de saber exatamente a hora de produzir a centelha. Para isso, foi necessário a utilização do módulo de leitura de roda fônica da FuelTech que se chama FirePro. No entanto, este módulo não era compatível com a roda Fônica original da moto (Figura 4.2.1) que é de 12-3 dentes. Sendo assim, foi preciso fabricar uma nova RF com a quantidade de dentes certa. Posteriormente, foi necessário a regulagem do módulo de ignição.



Figura 4.2.1-Roda Fônica original CB500

### 4.3. Fabricação Roda Fônica

Foi feito o desenho em 3D no software SolidWorks, como na Figura 4.2.1 para que por encomenda fosse fabricada a peça.

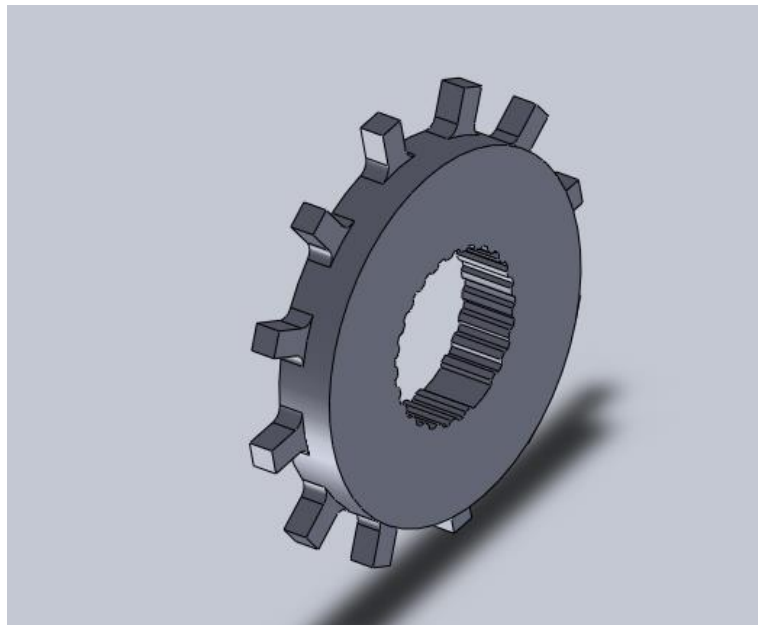


Figura 4.3.1 – Desenho roda fônica

Primeiro, foi usado o processo de torneamento para dar forma à um bloco cilíndrico, visto na figura 4.3.2.

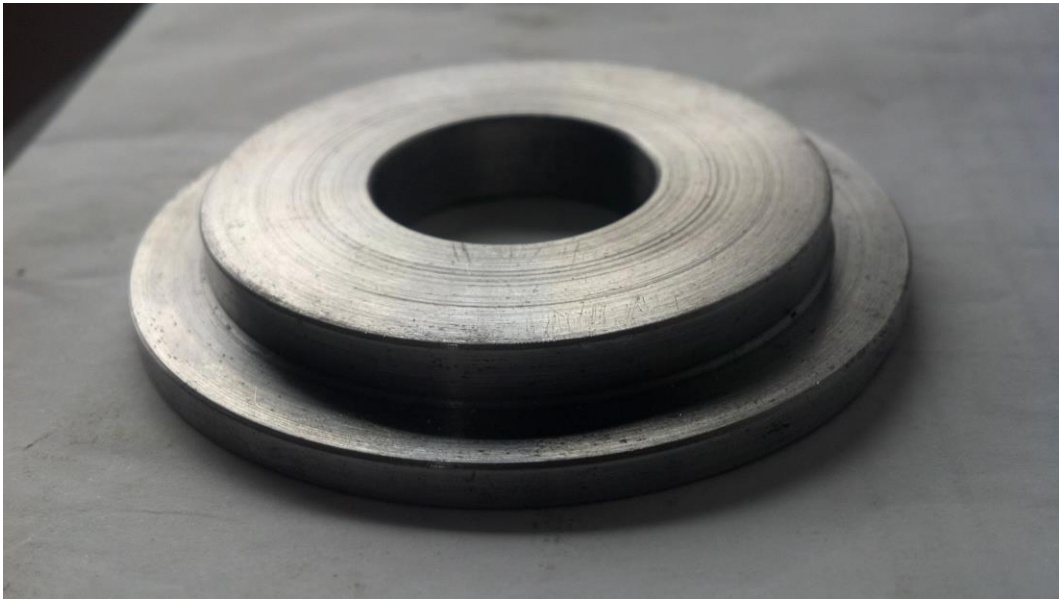


Figura 4.3.2 – Roda fônica em produção

O próximo passo foi mandar esta peça pré-fabricada para uma empresa de usinagem especializada para a fabricação dos dentes, já que não detínhamos as ferramentas necessárias. Essa peça chegou em nossas mãos com todos os dentes. Em seguida, retiramos um dente para servir de falha, como está na Figura 4.2.3.



Figura 4.3.3 – Fabricando o rasgo na RF

Houve alguns problemas de leitura da RF e foi necessário usar um osciloscópio para identificar o problema. O sinal resultante foi um sinal irregular. Como havia regiões onde se pareciam com uma falha, o módulo não estava conseguindo distinguir os dois. Este sinal irregular se encontra na figura 4.3.4.

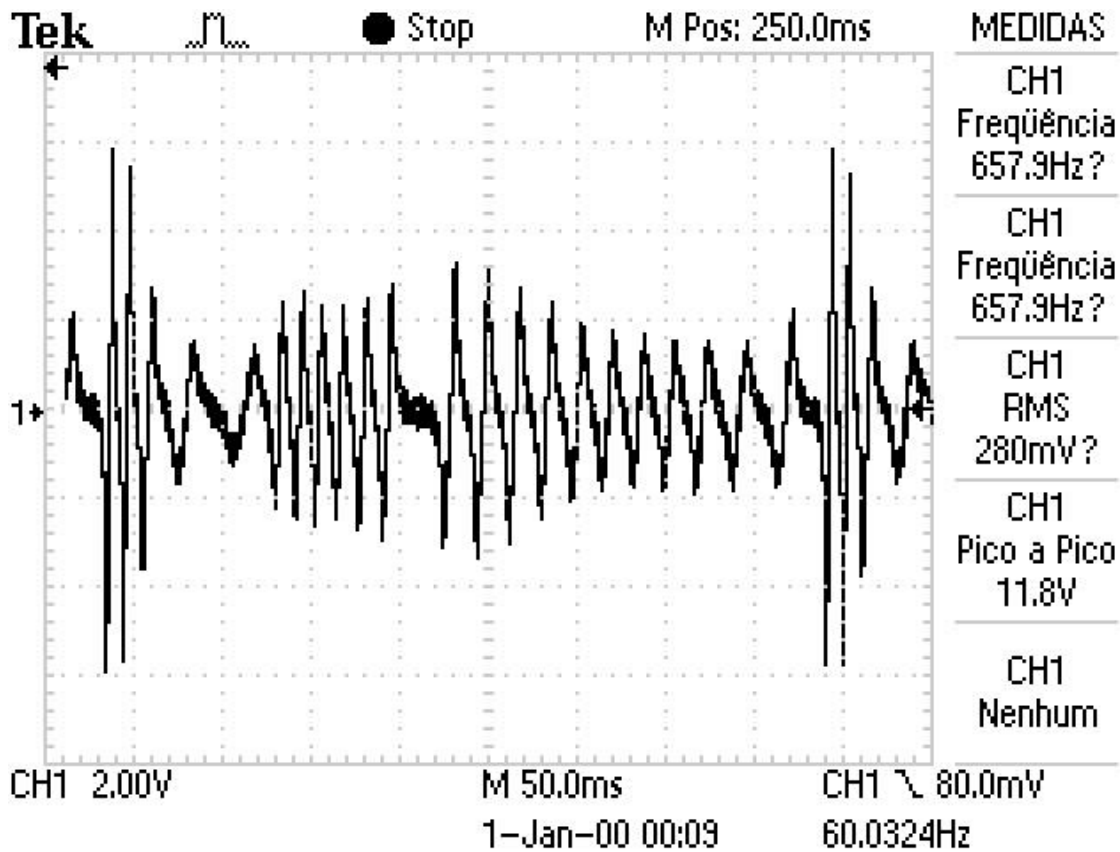


Figura 4.3.4 – Sinal da RF não lido pelo sensor

O que foi feito para resolver este problema é o aumento da falha da RF retirando mais material da parte onde se localizava a falha. O resultado está apresentado na Figura 4.3.5.



Figura 4.2.5 – RF com rasgo e posicionada

Após fazer essa falha maior a leitura da RF pelo osciloscópio foi bem mais uniforme. Conforme mostrado na figura 4.3.6.

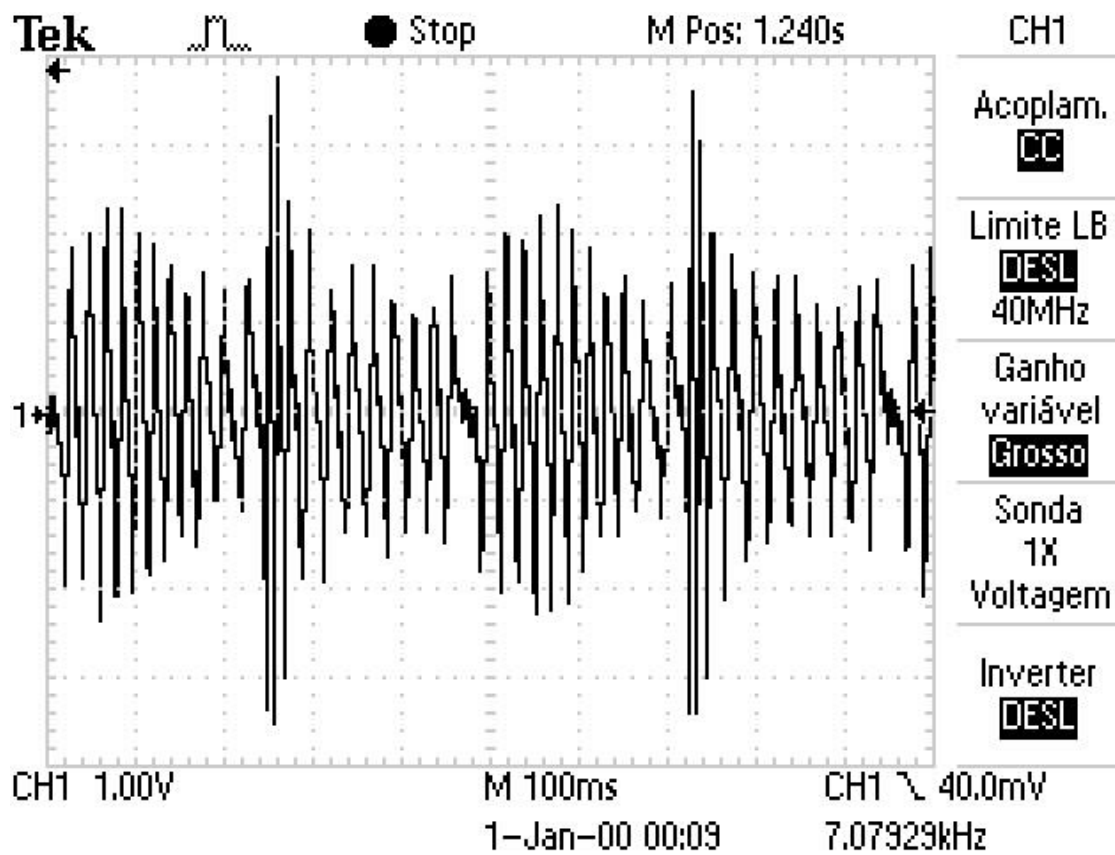


Figura 4.3.6 – Sinal da RF uniforme



#### **4.4. Regulagem da Ignição**

O passo seguinte foi posicionar a RF de forma que a FuelTech lê-se corretamente o posicionamento do motor. O que ocorreu nas primeiras instalações da RF é que ela estava em uma posição incorreta e o módulo adiantava muita o ponto de ignição. Com isso, não dava para sincronizar o módulo com a posição dos pistões. Foi necessário instalar e desinstalar a RF várias vezes em diversas posições para que a sincronização fosse possível.

Para a leitura correta é preciso a sincronização da leitura feita pelo módulo com o tempo real de ignição. Para isso, a FuelTech trava o ponto de ignição em 20° APMS. Após essa trava devemos ler com uma pistola de ponto de ignição um avanço de igual valor com o que a FuelTech está produzindo.

Foi preciso fazer uma marca de 20° no volante do motor para que pudéssemos regular a ignição como a original e a partir dessa fazer o ajuste da ignição enquanto rodamos o carro no dinamômetro.

#### **4.5. Fabricação do Coletor de Escape**

O coletor de escape foi fabricado através da reutilização de parte do coletor antigo do motor aspirado e foram sendo soldados tubos em certas posições a fim de que se encontrassem imediatamente na lateral do carro, assim como desenhado no SolidWorks.



Figura 4.5.1- Posicionando os dutos

#### 4.6. Lubrificação da Turbina

A lubrificação da turbina deve ser tomada da parte de maior pressão no motor. Com isso, foi instalado um niple para adaptar a saída de óleo do sensor de óleo (que nesse projeto não está sendo usado) para um aeroquip(mangueira de malha de aço) para conduzir o óleo até a entrada da turbina.



Figura 4.6.1-Tomada de óleo

Para o retorno do óleo lubrificante ao motor havia um problema. Normalmente, o retorno se localiza no cárter do motor. No entanto, em motos o cárter permanece totalmente cheio, diferentemente dos carros onde o cárter fica parcialmente cheio e dá para botar o retorno acima do nível do óleo como explicado na seção de lubrificação.

Para contornar este problema foi usada a entrada da vareta de óleo da moto que fica localizada na lateral do motor. Foi usado um niple para adaptar a entrada com a mangueira de retorno de óleo.

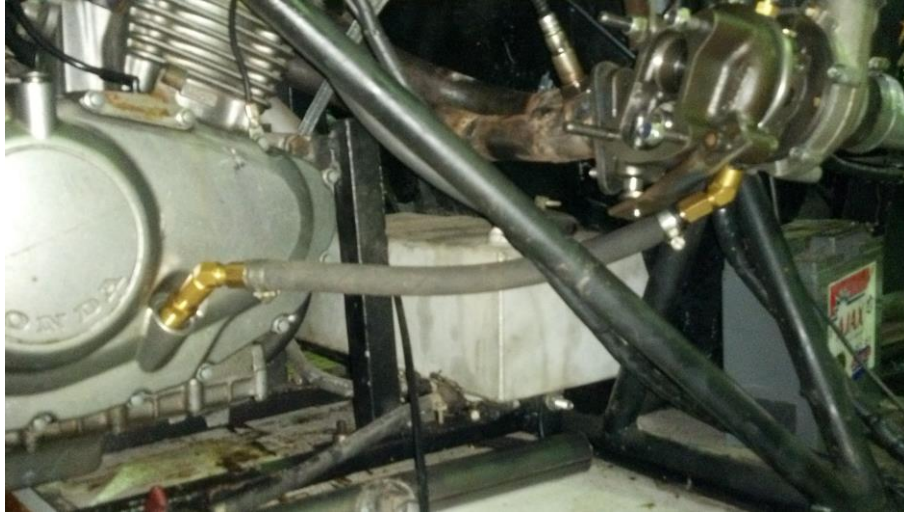


Figura 4.6.2-Retorno de óleo



Figura 4.6.3-Retorno de óleo para o motor

Uma vantagem de localizar o retorno de óleo no orifício da vareta de óleo é que não foi necessária fazer nenhum tipo de buraco no motor. Com isso, o turbo e seus componentes podem ser removidos a qualquer momento e com muita facilidade para que o motor volte a ser original aspirado.

## **5. POTÊNCIA ESTIMADA PELO RICARDO WAVES**

O software RICARDO WAVES é usado para simulação de performance realizada virtualmente de configurações de sistemas de admissão, combustão e exaustão. É uma poderosa ferramenta capaz de produzir resultados tão acurados que fabricantes de todo mundo o usam para projetar seus motores. Foram medidos ângulos e dimensões das

partes do motor assim como a utilização de especificações técnicas fornecidas pelo fabricante do motor. Foram usados também gráficos e tabelas fornecidos pela Garret para simular o turbocompressor. Essas medidas são necessárias para caracterizar o motor o mais fielmente possível.

## 5.1. Honda 500 Aspirado

Foram rodados simulações no programa RICARDO WAVES e o arranjo dos componentes da simulação ficaram como na figura 5.1.1.

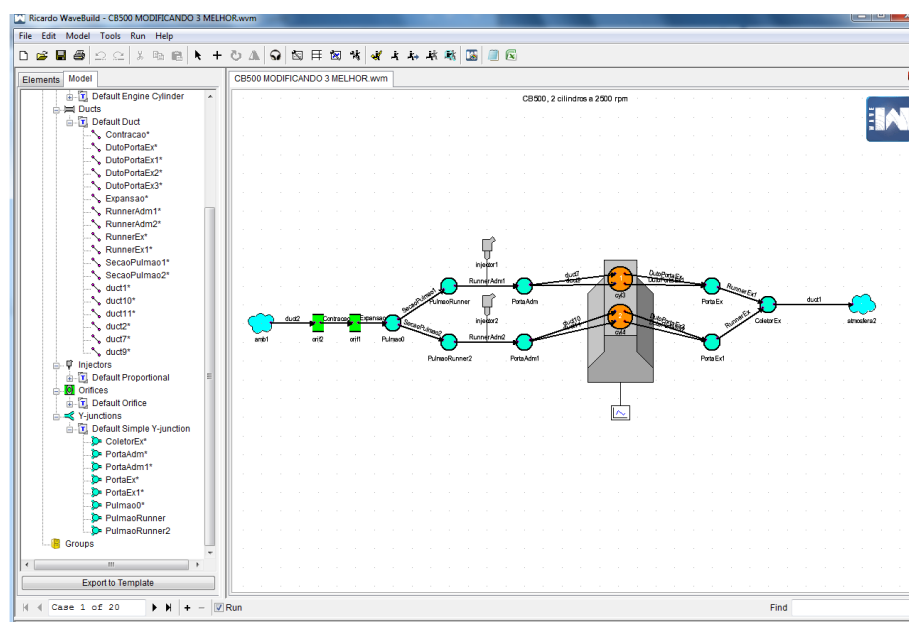


Figura 5.1.1 – Layout do motor no RICARDO WAVES

Após rodar esta configuração no software os resultados de torque e potência são mostrados na figura 5.1.2.

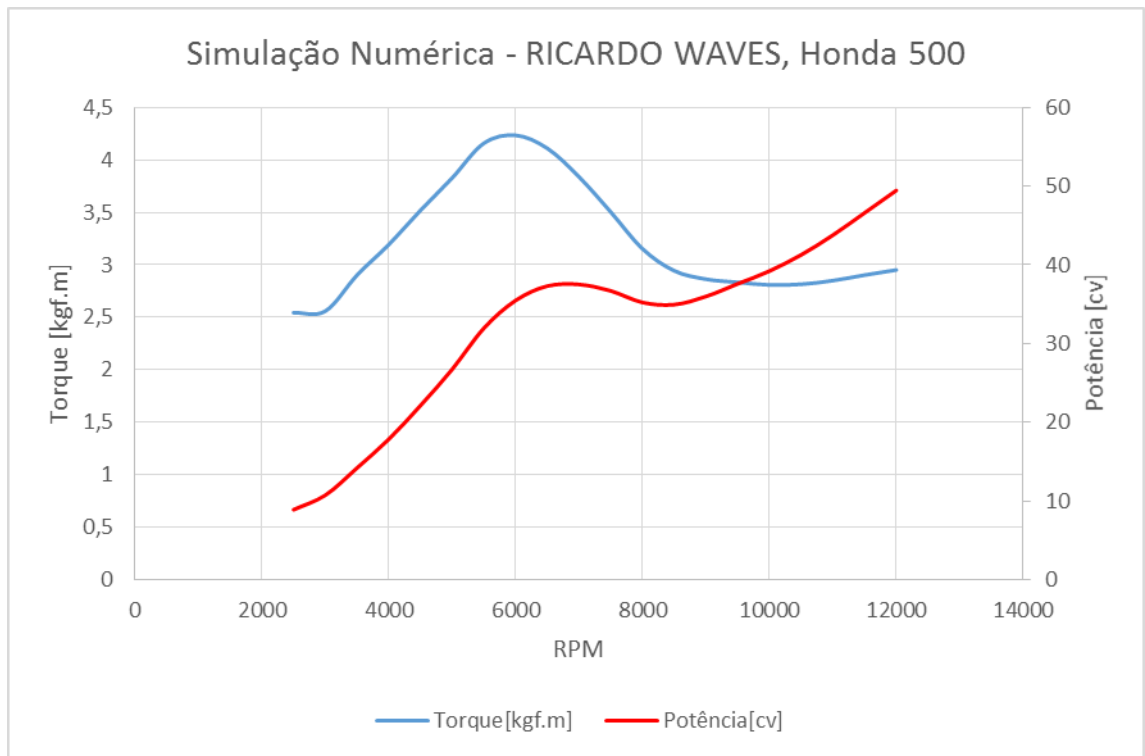


Figura 5.1.2 – Desempenho do motor Honda 500 simulado

## 5.2. Honda 500 Turbo

Na configuração do motor turbinado foi necessário mudarmos os componentes de aspiração e injeção do layout do RICARDO, assim como plotar os gráficos do compressor e turbina no software para que ele pudesse saber os parâmetros do componente. Na figura 5.2.1 e Figura 5.2.2 estão os gráficos que foram usados pelo programa.

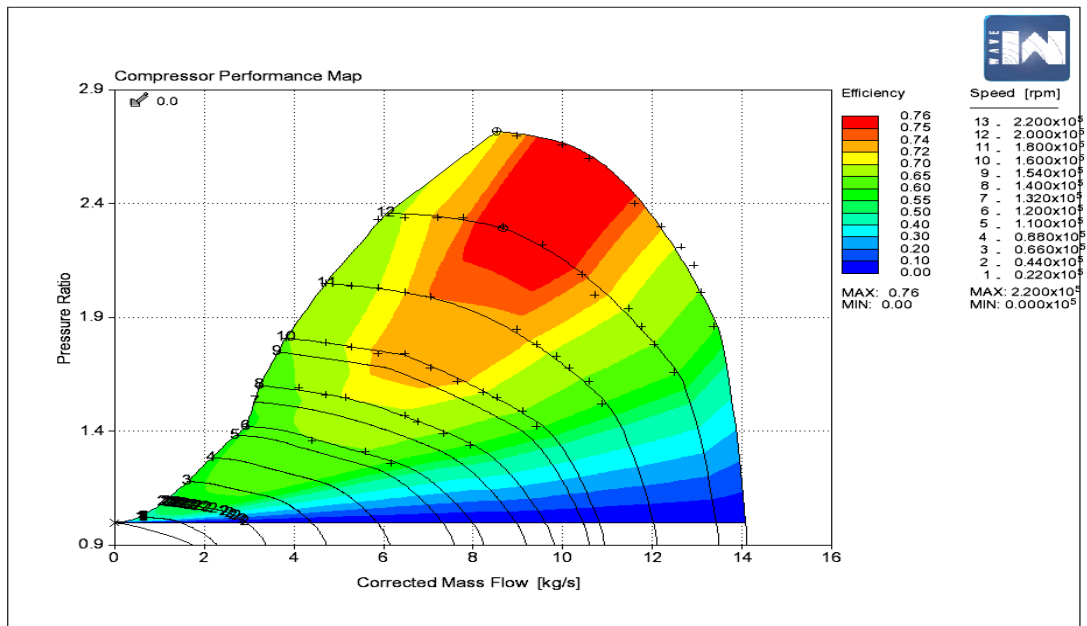


Figura 5.2.1-Mapa do compressor(RICARDO)

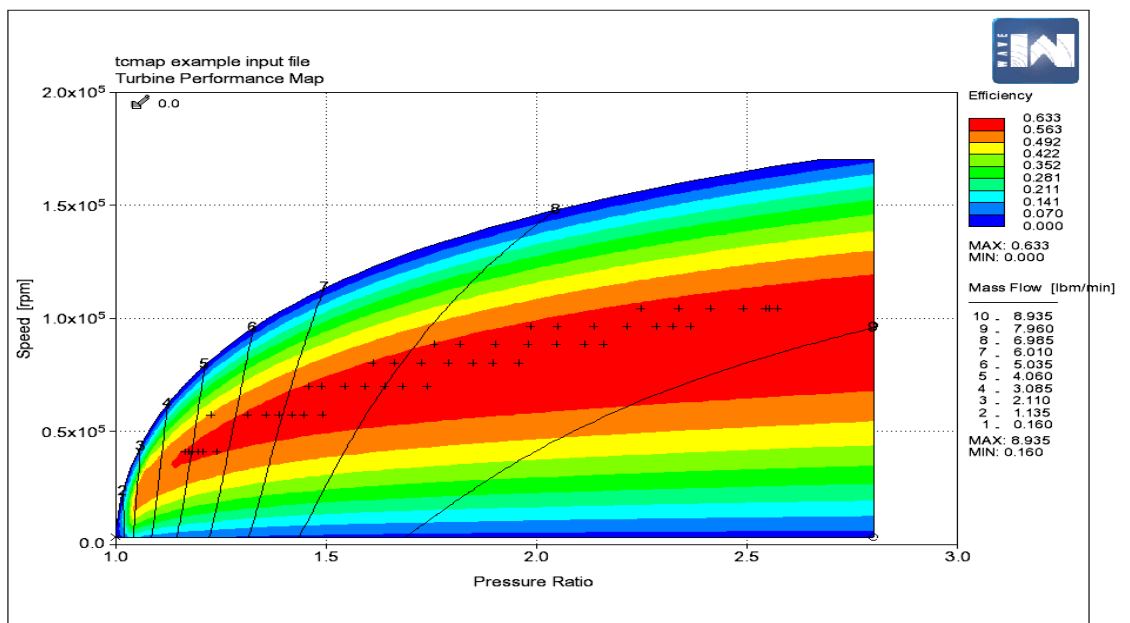


Figura 5.2.2-Mapa da turbina(RICARDO)

Os componentes inseridos no Layout do programa também mudaram. Foi necessário adicionar componentes novos e modificar outros. O resultado está evidenciado na figura 5.2.3.

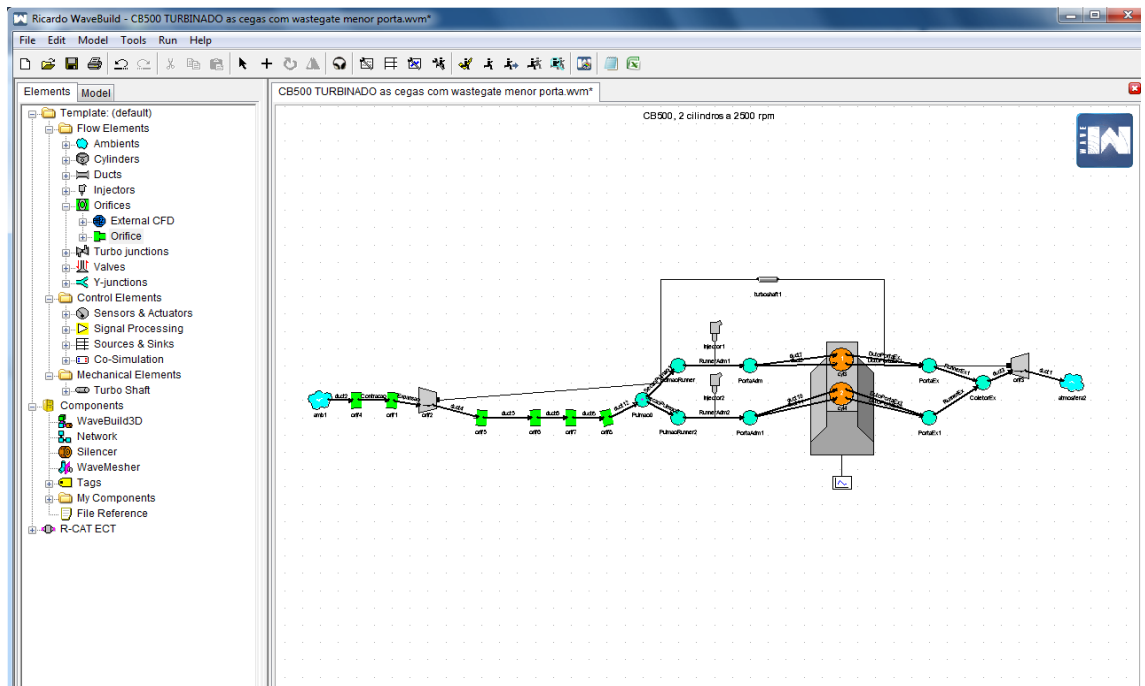


Figura 5.2.3 – Layout motor turbo

O resultado final está exibido no gráfico 5.2.4.

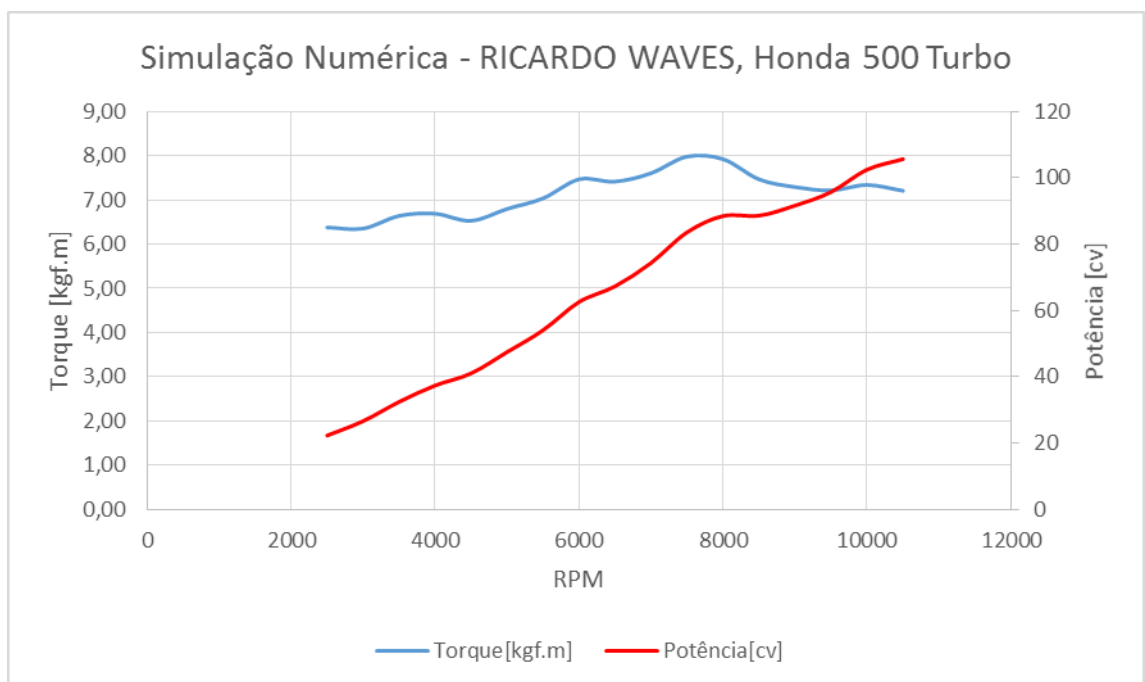


Figura 5.2.4 – Curvas de desempenho do motor Honda 500 Turbo simuladas

### 5.3. Honda 600 Aspirado

As simulações no RICARDO para este motor foram feitas pela grupo responsável pelo motor da equipe Ícarus de Fórmula SAE. E seus resultados estão apresentados na figura abaixo.

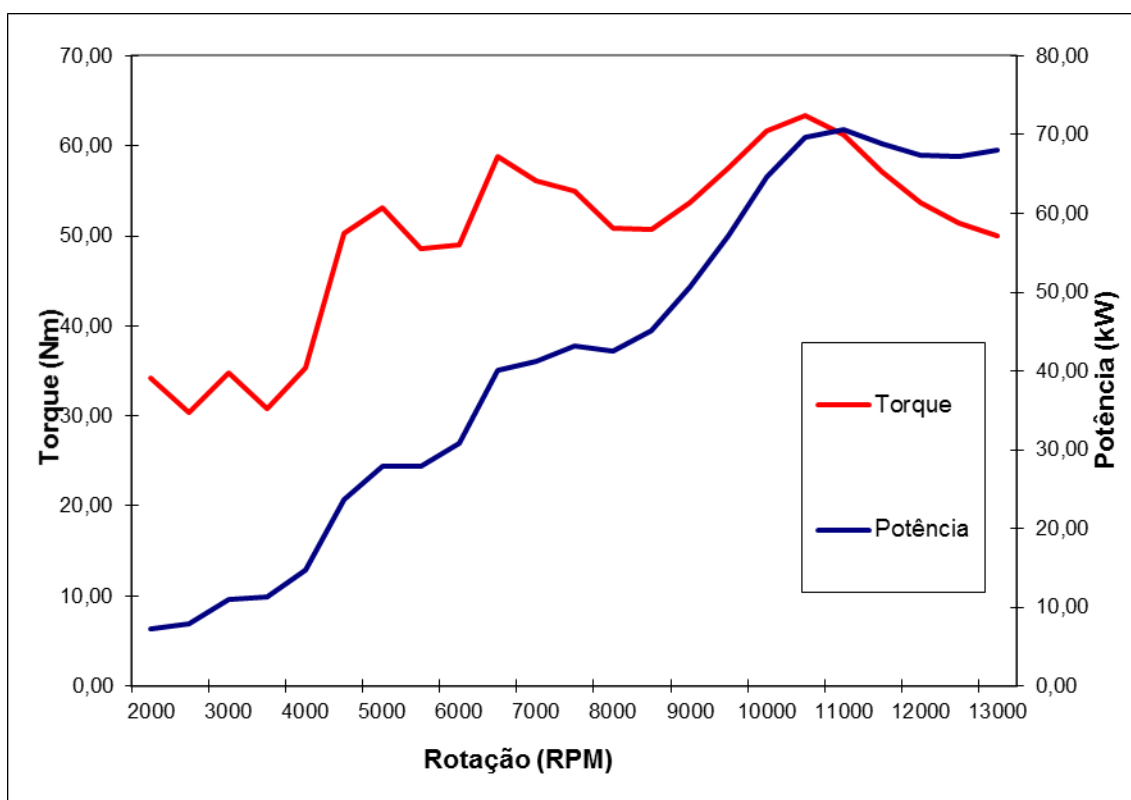


Figura 5.3.1 – Curvas de desempenho simulados no RICARDO WAVES do motor Honda 600

## 6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados indicados abaixo foram obtidos através de medição do torque e potência no dinamômetro.

### 6.1. Honda 500 aspirado

O mapa de injeção e a medição no dinamômetro desta configuração foi feita pela equipe de Fórmula SAE em 2009. Os pontos resultantes da medição estão apresentados na Tabela 9.1.1 e representam o torque[kgf.m] e a potência[cv] em função da rotação.



Os pontos referentes as rotações inferiores a 3000 não foram mostrados nas medições. Portanto, foi feita uma interpolação dos pontos abaixo desta rotação.

Ao plotarmos um gráfico RPM x Torque[kgf.m] junto com o de RPM x Potência[cv] para analisarmos graficamente o comportamento do motor chegamos a Figura 6.1.1.

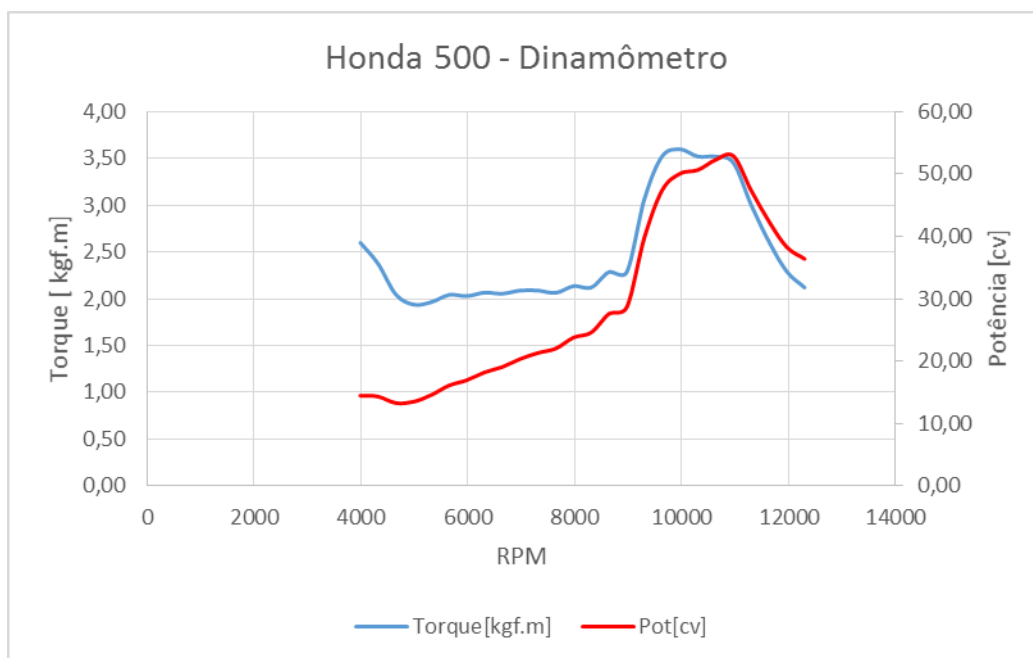


Figura 6.1.1 – Curvas de desempenho do Honda 500 aspirado medidas no dinamômetro

## 6.2. HONDA 500 Turbo

O acerto do motor no dinamômetro foi feito. Porém, alguns acontecimentos enumerados a seguir impediram o acerto fino. Ou seja, a mistura ar-combustível foi ajustada de forma grosseira, mas razoável. E a ignição não foi mexida, o qual continuou na mesma configuração da original. Os problemas foram surgindo, e só foi possível fazer uma medição de torque e potência.

O principal problema foi a falha da turbina. O eixo travou e ela não estava pressurizando ar para dentro do motor. Após a falha ser descoberta, conseguimos um outro miolo (eixo e pás) do turbocompressor para usar. No entanto, este miolo estava no fim da vida e vazando óleo, mas foi o suficiente para acertar a mistura e passar uma vez no dinamômetro. Portanto, com um acerto da injeção e ignição mais trabalhado

poderíamos conseguir mais potência. Além de que, por estar em péssimas condições, a turbina não entregou toda a potência que poderia.

Um outro motivo que diminuiu a potência medida foi a falta de estrutura no carro. E para finalizar, a embreagem estava patinando.

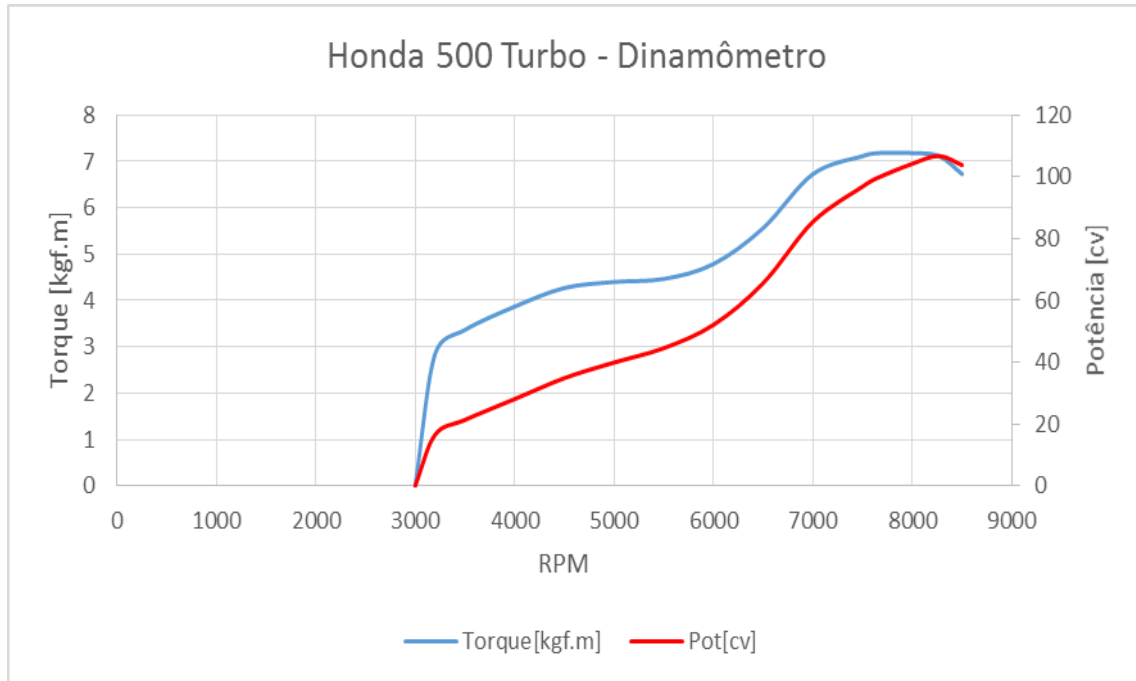


Figura 6.2.1 – Curva de desempenho do Honda 500 turbo medida no dinamômetro

Mesmo com todos esses empecilhos foi conseguido uma potência máxima de cerca de 106 cavalos nas rodas com 0,9 bar de pressão na admissão.

### 6.3. HONDA 600

A partir de relatórios de 2010 feitos pela equipe Ícarus de Fórmula SAE obteve-se os gráficos e tabelas oriundos da medição do motor em dinamômetro de rolo do motor Honda 600. Este motor é usado hoje em dia pela equipe. Muitos pontos da tabela foram ocultados, pois ocupariam muito espaço no trabalho. A figura 6.3.1 contém os resultados obtidos diretamente do dinamômetro. No entanto, para uma melhor visualização, a figura 6.3.2 exhibe o gráfico da figura 6.3.1 com linhas suavizadas.

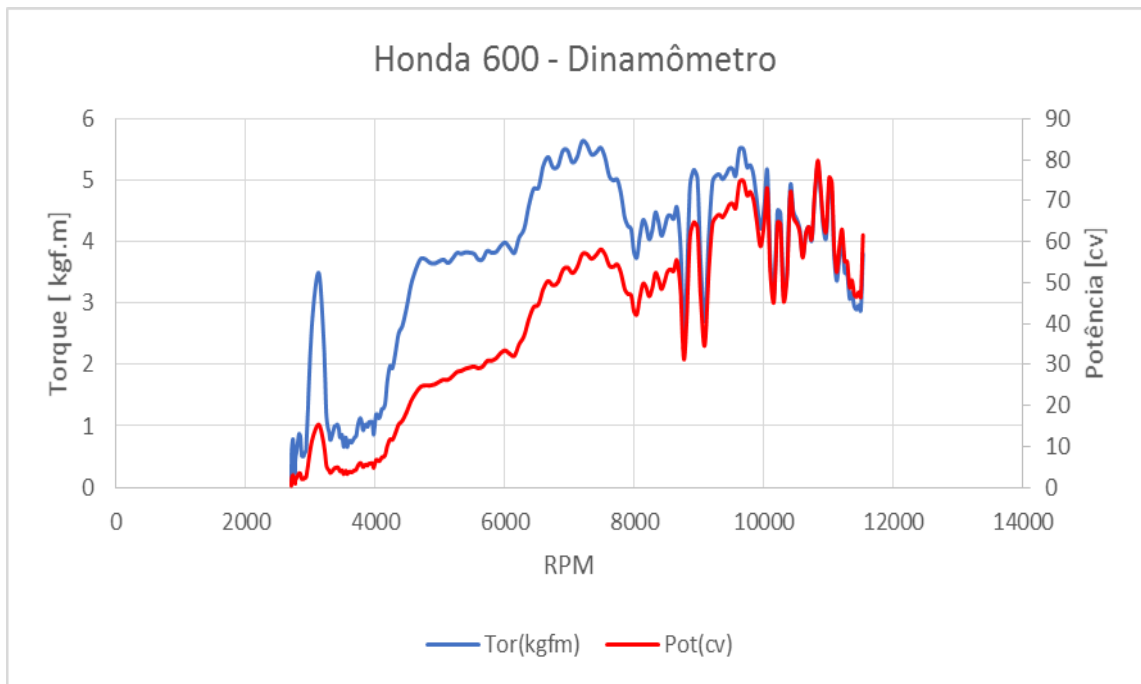


Figura 6.3.1- Curva de Potência e Torque medidas no Dinamômetro



Figura 6.3.2- Curva de Potência e Torque suavizadas

#### 6.4. Rendimentos

Vamos calcular a eficiência do motor Honda aspirado. Como dito antes, o rendimento volumétrico desse motor é de 80%. Para calcular o rendimento global do motor usaremos a fórmula abaixo.

$$\eta = \frac{POT_{EF}}{\dot{Q}} \quad (17)$$

Primeiramente calcularemos a vazão mássica ideal do motor quando era aspirado a gasolina.

$$\dot{m}_{AR \text{ Ideal}} = \rho_{AR} \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \cdot V_T [m^3] \cdot \frac{RPM}{60} \cdot 0,5 \left[ \frac{\text{Cilindrada total enchida}}{\text{Rotação}} \right] \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{AR \text{ Ideal}} &= 1,169 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right] \cdot 0,0005 [m^3] \cdot \frac{9800}{60} \cdot 0,5 \left[ \frac{\text{Cilindrada total enchida}}{\text{Rotação}} \right] \\ &= 0,04773 \left[ \frac{kg}{s} \right] \end{aligned}$$

De acordo com a figura 2.3.6.2 o valor de  $\lambda$  ideal é 0,9 para motores aspirados a gasolina. Com isso,

$$\lambda = \frac{\frac{A}{\bar{F}_{Real}}}{\frac{A}{\bar{F}_{Esteq}}} \quad (19)$$

$$\frac{A}{\bar{F}_{Real}} = 14,47 \cdot 0,9 = 13$$

A vazão de massa de combustível será

$$\dot{m}_c = \frac{0,04773}{13} = 0,00367 \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

Portanto,

$$\dot{Q} = \dot{m}_{comb} \cdot PCI \quad (20)$$

$$\dot{Q} = 0,00367 \left[ \frac{kg}{s} \right] \cdot 43224 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = 158,7 [kW]$$

O rendimento então será,

$$\eta = \frac{POT_{EF}}{\dot{Q}} \quad (21)$$

$$\eta = \frac{38,25 [kW]}{158,7 [kW]} = 0,24$$

Para calcular o rendimento do motor turbo usamos a fórmula (20) com a vazão mássica calculada no tópico 3.2.8 e o PCI do álcool obtido na equação (7):

$$\dot{Q} = 0,008899 \left[ \frac{kg}{s} \right] \cdot 26281,4 \left[ \frac{kJ}{kg} \right] = 233,88 \left[ \frac{kJ}{s} \right]$$

Portanto, o rendimento será

$$\eta = \frac{108 [kW]}{233,88 [kW]} = 0,46$$

## 7. CONCLUSÕES

Os resultados práticos são muito importantes, assim como os resultados das simulações. Nas figuras 7.1 e 7.2, foram plotados, no mesmo gráfico, as linhas de potência obtidas através do software RICARDO WAVES BUILD e as linhas de potência medidas pelo dinamômetro do motor Honda 500 e Honda 500 Turbo, respectivamente.

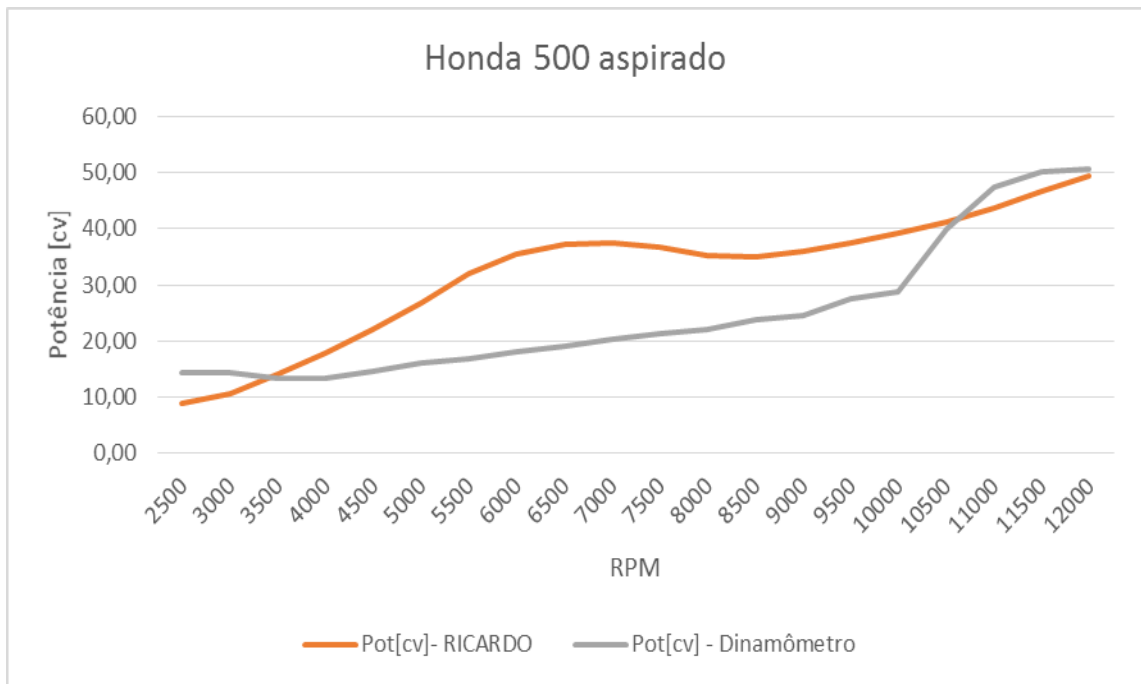


Figura 7.1 – Comparação entre as linhas de potência do motor Honda 500 do RICARDO WAVES e Dinamômetro

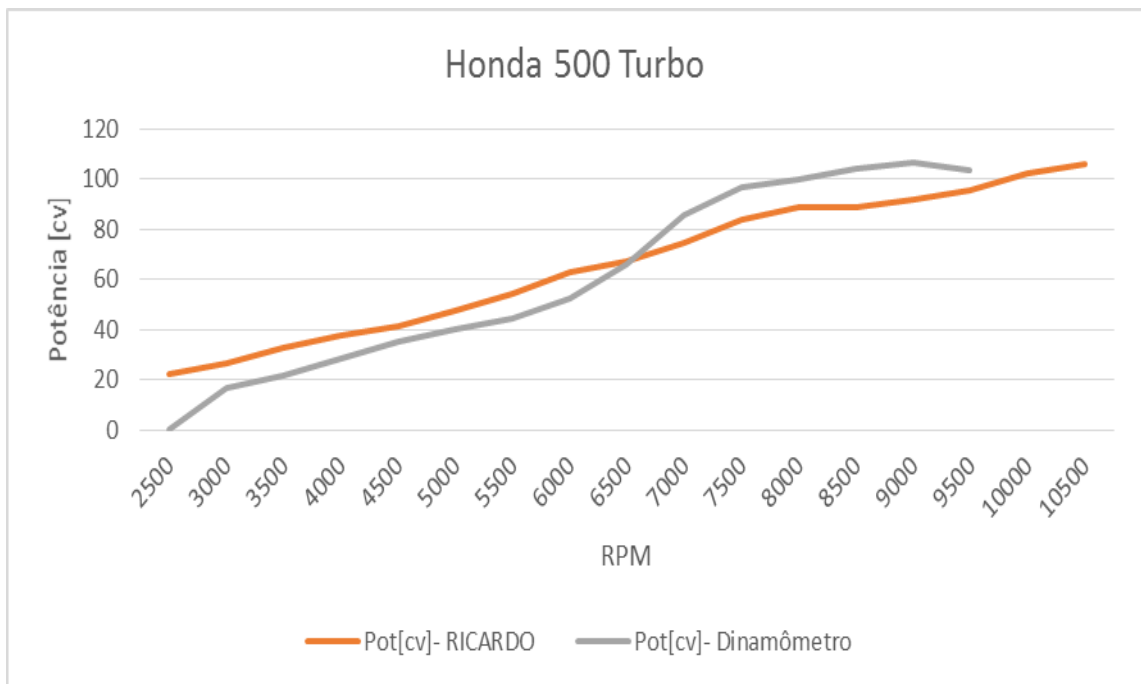


Figura 7.2 - Comparação entre as linhas de potência do motor Honda 500 Turbo do RICARDO WAVES e Dinamômetro

Os gráficos de potência e torque medidos no dinamômetro nos permitem analisar de fato os resultados. Ao compararmos os gráficos das potências medidas dos motores Honda 500 aspirado, Honda 500 turbo e Honda 600, obtemos as linhas da figura 7.3.

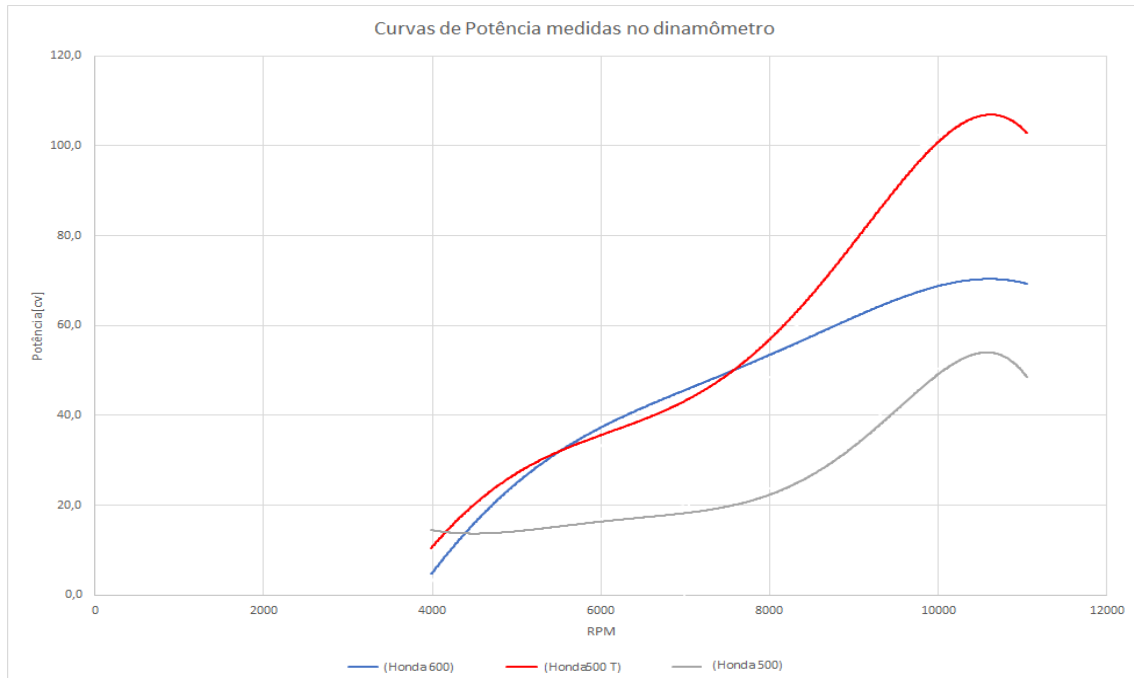


Figura 7.3 – Comparação das potências dos motores

O motor Honda 500 turbinado dobrou sua potência e superou o motor Honda 600. A subida de potência é suave até as 8000 rotações por minuto que é quando o compressor atinge a área de máxima eficiência e a curva de potência aumenta a sua inclinação.

Um aspecto muito importante também é o aumento de eficiência do motor turbo.

Com a instalação do turbo o rendimento global praticamente dobrou.

A utilização do turbocompressor em motores a combustão interna ciclo Otto nos permite ter um motor pequeno de grande potência e rendimento. Essa capacidade pode nos ajudar muito a diminuir o tamanho dos carros e economizar combustível.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GARRET, 2012. Disponível em: [www.turbobygarret.com](http://www.turbobygarret.com), acesso 10/09/2012

BELL, CORKY, 1997, Maximum Boost: designing, testing and installing turbocharger systems/ by Corky Bells, Ed. Robert Bentley, Inc, 1ªEd.

HONDA, Manual de Serviços CB500, Moto Honda da Amazônia LTDA.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG. R. E.; BORGNAKKE, C. Fundamentos da Termodinâmica Clássica, Edgard Blücher, 4ª Ed., São Paulo, 1995

SAE INTERNACIONAL, 2013 Formula SAE Rules

SENAI, CIMATEC, Motores de Combustão Interna , 2003.

SAE, FORMULA, Equipe Ícarus- UFRJ, Relatórios de projeto SAE

LODETI, Júlio César, Rendimentos e perdas em um motor real

GRIESS, ERIC; MCCUTCHEON, KEVIN; ROBERTS, MATTHEW; CHAN, WILLIAM, Formula SAE Turbocharger System Development, Senior Project Final Report, Mechanical Engineering Department, California Polytechnic State University, 2012.

LEUFVEN,OSKAR; ERIKSSON, LARS, Surge and Choke Capable Compressor Model, 2011

TEXEIRA CHAVES, RAFAEL, Estudo do uso de misturas de etanol hidratado e gasolinas automotivas em um motor ASTM-CFR, 2013

MCGRAW- HILL, V. GANESAN ED., Internal Combustion Engine, 1994

FOX, ROBERT W.; MCDONALD, ALAN T.; PRITCHARD, PHILIP J., Introdução à Mecânica dos Fluidos, 6ª Ed., Ed. LTC,2006.

BELL, A. GRAHAM, Modern Engine Tuning, Ed. Haynes.

BELL, A. GRAHAM, Performance Tuning in Theory and Practice Four Strokes, Ed. Haynes, 1981.