



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



LUCAS FERNANDES MENDES RICARDO

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESCAPE DE
UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE 600CC USANDO O
*SOFTWARE RICARDO WAVE***

OURO PRETO - MG
2019

LUCAS FERNANDES MENDES RICARDO

lucasfm.ricardo@gmail.com

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESCAPE DE
UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE 600CC USANDO O
*SOFTWARE RICARDO WAVE***

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: Dra. Elisângela Martins Leal

**OURO PRETO – MG
2019**

R488d Ricardo, Lucas Fernandes Mendes .
Dimensionamento e otimização do sistema de escape de um motor de
combustão interna de 600CC usando o software Ricardo WAVE [manuscrito] /
Lucas Fernandes Mendes Ricardo. - 2019.

51f.: il.: color; grafis; tabs.

Orientadora: Profª. Drª. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Motor de combustão interna. 2. Sistema de escape. 3. Dimensionamento,.
4. Otimização. 5. Software Ricardo Wave. I. Leal, Elisângela Martins . II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br

DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESCAPE DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE 600CC USANDO O SOFTWARE RICARDO WAVE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Ao 5º dia do mês de julho do ano de dois mil e dezanove às 10 horas e 30 minutos, no Auditório da Fundação Gorceix, localizado na Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro, UFOP, foi realizada a defesa de monografia do aluno **Lucas Fernandes Mendes Ricardo**, sendo a comissão examinadora constituída por: Prof. DSc. Edson Alves Figueira Junior, Prof. DSc. Cláudio Márcio Santana e Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado “**Dimensionamento e Otimização do Sistema de Escape de um Motor de Combustão Interna de 600cc usando o Software Ricardo Wave**”, sob orientação da Profª. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado.

Ouro Preto, 05 de julho de 2019.

Elisângela Martins Leal

Profª. DSc. Elisângela Martins Leal
Professora Orientadora

Edson Alves Figueira Jr

Prof. DSc. Edson Alves Figueira Junior
Professor Avaliador

Cláudio Márcio Santana

Prof. DSc. Cláudio Márcio Santana
Professor Avaliador

Lucas Fernandes M. Ricardo

Lucas Fernandes Mendes Ricardo
Aluno

Aos meus pais, Adilson e Eni, e aos meus irmãos, Tiago e Letícia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda a perseverança. Aos meus pais Adilson e Eni por depositarem em mim a confiança e o apoio necessário para a conclusão do meu curso. Aos meus irmãos Tiago e Letícia. A toda minha família.

Aos professores da Mecânica, em especial minha orientadora Elisângela por toda a dedicação na orientação do presente trabalho de pesquisa. A toda equipe do Fórmula, sobretudo ao Eduardo. Ao 14.2 de mecânica e todos os outros períodos que contribuíram para a conclusão desse trabalho.

Aos amigos do Vale do Aço. Aos amigos do CEFET-MG. Aos amigos e moradores da república Lunáticos pelo companheirismo.

Por fim, agradeço a UFOP e a Escola de Minas por todo o suporte a minha formação acadêmica. Espero que todos que fizeram parte disso se sintam representados. Obrigado!

“Não espere o futuro mudar tua vida, porque o futuro é a consequência do presente.”

Racionais MC's

RESUMO

RICARDO, Lucas Fernandes Mendes. Dimensionamento e otimização do sistema de escape de um motor de combustão interna de 600cc usando o *software Ricardo WAVE*. Graduação em Engenharia Mecânica. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. 51 páginas. 2019.

Motor de combustão interna é uma máquina térmica que permite fazer a conversão da energia química de um combustível em energia mecânica. Ao participar de competições como a Fórmula SAE Brasil, o estudante se vê envolto por uma série de diferentes sistemas que compõe o motor de combustão interna e seus periféricos, onde cada um contém uma série de componentes com diferentes funções, sendo que cada um pode ser melhorado de forma a prover um melhor rendimento ao motor. Neste trabalho estuda-se os motores de combustão interna e seu sistema de exaustão, além do escoamento dos gases de combustão, de forma a encontrar um método relativamente simples para dimensionar e otimizar o tubo de escape. Este estudo também apresenta o *software* de simulação e modelagem de motores, *Ricardo WAVE*. Por fim, esta monografia mostra a relação existente entre o sistema de exaustão e o desempenho em termos de potência e torque de um motor de combustão interna, o qual é crucial para o correto funcionamento do motor. É visto que alterações no sistema de escape acarretam em mudanças no desempenho de um motor de combustão interna, os ganhos devido ao correto dimensionamento do sistema de escape em termos de potência chega a 6%, e em torque, a 2,5%.

Palavras-chave: motor de combustão interna, sistema de escape, dimensionamento, otimização, Formula SAE, *software Ricardo WAVE*.

ABSTRACT

RICARDO, Lucas Fernandes Mendes. Sizing and optimization of the exhaust system of a 600cc internal combustion engine using Ricardo Wave software. Bachelor degree in Mechanical Engineering. School of Mining, Federal University of Ouro Preto. 51 pages, 2019.

Internal combustion engine is a thermal machine that allows to convert a fuel chemical energy into mechanical energy. By participating in competitions such as Formula SAE Brazil, the student is surrounded by a set of different systems that make up the internal combustion engine and its peripherals, where each one contains a series of components with different functions, being that each of these systems can be improved performance in order to provide better engine performance. The importance given to the exhaust system by many people is superfluous, being judged as a component only with the function of expelling the gases generated during combustion. In this work the internal combustion engines and their exhaust system were studied, in addition to the flue gas flow, in order to find a relatively simple method to size and optimize the exhaust pipe. This study also presented simulation software and engine modeling, Ricardo Wave. Finally, this monograph showed the relationship between the exhaust system and the performance in terms of power and torque of an internal combustion engine, which is crucial for the correct operation of the engine. It has been discussed that changes in the exhaust system leads to considerable changes in the performance of an internal combustion engine, gains due to the correct design of the exhaust system in terms of power has reached 6% and in torque, 2.5%.

Keywords: *internal combustion engine, exhaust system, sizing, optimization, Formula SAE, Ricardo Wave software.*

LISTA DE SIMBOLOS

SAE - *Society of Automotive Engineers*

r_v - Relação de compressão;

V_1 - Volume total no ponto morto inferior;

V_2 - Volume total no ponto morto superior;

L - Comprimento do sistema de escape;

AVE - Abertura da válvula de escape em graus APMI;

N - Rotação do motor em RPM;

D - Diâmetro do Sistema de Escape;

cc - Cilindrada do motor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motor de Nicolaus Otto e Eugen Langen de 1867.....	6
Figura 2 - Movimento rotativo da manivela.....	7
Figura 3 - Os quatro tempos para o Ciclo Otto.....	8
Figura 4 - Ciclo Otto ideal completo.....	9
Figura 5 - Motor dois tempos de ignição por centelha.....	10
Figura 6 - Sistema de escape.....	14
Figura 7 - Header e tubo de escape.....	15
Figura 8 – Modelo de um motor sobrealimentado no <i>software Ricardo WAVE</i>	24
Figura 9 – Fluxograma do trabalho proposto.....	27
Figura 10 – Motor Honda Hornet CB600F.....	31
Figura 11 - Inserção de dados de um duto que forma um <i>header</i> . Marcado em vermelho atrás, o duto selecionado.	34
Figura 12 - Dados de uma junta no <i>software Ricardo WAVE</i>	35
Figura 13 - Dados relacionados a curvatura da junta no <i>software Ricardo WAVE</i>	35
Figura 14 - Modelo completo de um motor de combustão interna.....	36
Figura 15 - Curva de potência do modelo.	37
Figura 16 - Curva de torque do modelo.....	38
Figura 17 - Gráfico comparativo de potência com variação no comprimento do tubo 4:1.....	40
Figura 18 - Gráfico comparativo de torque com variação no diâmetro do tubo 4:1.....	40
Figura 19 - Gráfico comparativo de potência com variação no diâmetro do tubo 4:1.....	41
Figura 20 - Gráfico comparativo de torque com variação no diâmetro do tubo 4:1.....	42
Figura 21 - Curva de potência - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - 50 mm	43
Figura 22 - Curva de torque - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - 50 mm	44

Figura 23 - Curva de potência - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - inicial 75/ final 90 mm	45
Figura 24 - Curva de torque - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - inicial 75/ final 90 mm	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comprimentos do sistema de escape (em mm) pela rotação do motor e o ângulo de abertura da válvula de escape.....	18
Tabela 2 - Diâmetro do sistema de escape (em mm) de acordo com o comprimento do sistema de escape e a cilindrada do motor de combustão interna.	19
Tabela 3 - Variáveis e Indicadores	29
Tabela 4 - Dados técnicos Motor Honda CB600F 2006 e cálculos simplificados de Bell	32
Tabela 5 - Comprimento dos <i>Headers</i> e Tubo de escape 4:1 e diâmetros	33
Tabela 6 - Dados de curva e potência do modelo.....	38
Tabela 7 - Valores de torque e potência variando o comprimento do duto 4:1.....	39
Tabela 8 - Valores de torque e potência variando o diâmetro do duto 4:1	41
Tabela 9- Valores de torque e potência variando o diâmetro e o comprimento do duto 4:1	43
Tabela 10 – Resultados de ganhos de torque e potência em relação ao sistema de escapamento original da moto Honda CB600f 2006.	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Geral	3
1.3.2	Específicos.....	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Motor de combustão interna.....	5
2.2	Sistema de escape	11
2.3	Dimensionamento e otimização.....	16
2.4	Formula SAE (Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade)	21
2.5	<i>Software Ricardo WAVE</i>	22
3	METODOLOGIA.....	25
3.1	Tipo de Pesquisa.....	25
3.2	Materiais e Métodos	26
3.3	Variáveis e Indicadores	28
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	28
3.5	Tabulação de Dados.....	29
3.6	Considerações Finais do Capítulo	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Validação do motor com sistema de exaustão e análise de dados.....	33
4.2	Estudo de casos.....	39
4.2.1	Variação do comprimento do tubo 4:1	39

4.2.2	Varição do diâmetro do tubo 4:1	41
4.3	Otimização.....	42
4.4	Considerações Finais	46
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	48
5.1	Conclusões.....	48
5.2	Recomendações de trabalhos futuros	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será apresentada uma abordagem teórica do princípio de funcionamento do motor de combustão interna, bem como a relação existente entre sua performance e o sistema de escape, que deve possuir o seu dimensionamento correto. Será ainda, apresentada a ferramenta *Ricardo WAVE* e sua relevância para a área de motores. Sendo assim, a finalidade do primeiro capítulo está vinculada na apresentação do problema, os motivos de sua origem, justificativas para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

O motor é uma máquina térmica que consegue fazer a conversão da energia química em trabalho mecânico. Visto isso, o motor de combustão faz com que a energia térmica seja transformada em energia mecânica. No motor de combustão interna, a queima dos combustíveis ocorre confinada dentro do cilindro do motor. Esses motores utilizam os seus próprios gases de combustão para a realização dos processos de conversão da energia térmica para a mecânica (TILLMANN, 2013).

Os motores de combustão interna possuem sistemas complementares que visam proporcionar as condições necessárias para que o processo de transformação da energia interna dos combustíveis em trabalho mecânico se realize de forma eficiente e contínua. Podem se destacar os sistemas:

- Sistema de admissão de ar e exaustão de gases provenientes da combustão.
- Sistema de alimentação de combustível.
- Sistema de arrefecimento.
- Sistema de lubrificação.
- Sistema elétrico.

Sendo dependentes, o sistema de alimentação de ar e exaustão de gases, é projetado para suprir o motor de ar limpo em quantidade que garanta o melhor rendimento do motor durante o processo de explosão, além de proporcionar a saída eficiente dos gases provenientes

e contribuir para a admissão do ar. O circuito envolve a admissão do ar, filtragem, processo de combustão e exaustão dos gases para o meio exterior (PASSOS, 2015).

Os gases resultantes da combustão do motor estão contidos dentro do cilindro em alta temperatura e pressão. Quando a válvula se abre, devido a grande diferença de pressão, a massa de gases produzida pela combustão percorre todo o sistema de escape em alta velocidade (PASSOS, 2015). Então, o correto dimensionamento do comprimento e do diâmetro do sistema de escape é responsável por valores de pressão negativos que contribuem para ganhos significativos de eficiência volumétrica, logo, uma quarta função destacada para o sistema de escape é aumentar a massa de ar aspirada para dentro do cilindro. Rocha (2011) diz que a movimentação dos gases de combustão através do sistema de escape provoca um efeito de sucção na admissão do ar devido ao vácuo criado durante as expulsões dos gases da combustão. Quanto maior for a massa de ar admitida no cilindro maior é a quantidade de combustível injetado, logo, a potência produzida pelo motor é aumentada.

Caracterizada a importância do sistema de escape para o bom rendimento de um motor de combustão interna, competições estudantis que exigem o máximo de desempenho de um veículo podem ser almejadas.

Criada em 2004, a Fórmula SAE BRASIL é uma competição estudantil organizada pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), que assim como as outras provas promovidas pela entidade, tem como objetivo propiciar aos estudantes de engenharia a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, desenvolvendo um projeto completo e construindo um carro tipo Fórmula. Os trabalhos são realizados em grupo (SAEBrasil, 2018).

O evento ocorre durante três dias, os carros passam por provas estáticas e dinâmicas, avaliando a performance do veículo de cada equipe na pista, assim como as apresentações técnicas das equipes, que inclui projeto, custo, e uma apresentação de *marketing* (SAEBrasil, 2018).

Devido a grande competitividade envolvida na Fórmula SAE BRASIL, *softwares* que auxiliam os estudantes aperfeiçoarem ao máximo seus projetos são usados. Utilizado por grandes partes das equipes envolvidas na competição, o *Ricardo WAVE* se mostra um exemplo que propicia ao usuário informações de cunho valioso, além de permitir simulações para que se tire o máximo dos componentes utilizados nos motores.

O *software Ricardo WAVE* é usado em todo o processo de projeto do motor - desde os primeiros estudos conceituais até as investigações detalhadas dos motores de produção. Seja melhorando a eficiência volumétrica, projetando sistemas de reforço complexos, melhorando a resposta transitória ou extraindo o máximo desempenho de um motor de corrida (WAVE, 2018).

Qual a influência do correto dimensionamento e otimização do sistema de escape no desempenho de um motor de combustão interna em um carro tipo fórmula?

1.2 Justificativa

É função de o engenheiro aplicar o conhecimento científico e técnico adquirido durante a graduação para criar, construir, melhorar e manter processos, sistemas, equipamentos, dentre outras.

A importância dada ao sistema de escape por algumas pessoas é supérflua, sendo julgado como um componente apenas com a função de expulsar os gases gerados durante a combustão. Porém, ao participar de competições como a Fórmula SAE Brasil, o estudante se vê envolto por uma série de diferentes sistemas que compõe o motor de combustão interna e seus periféricos, onde cada um contém uma série de componentes com diferentes funções, sendo que cada um pode ser melhorado de forma a prover um melhor rendimento ao motor.

Dada a importância de pequenos ganhos em termos de potência e torque para um veículo de alto desempenho, o sistema de escape se mostrou crucial para esse fim. O trabalho serve ainda, para direcionar futuros pesquisadores e estudantes na área, a ter um direcionamento ao modificar e recriar o sistema de escape para diferentes motores e geometrias necessárias.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Dimensionar e otimizar um sistema de escape para um motor de combustão interna de 600cc utilizado em carro tipo Fórmula, utilizando o *software Ricardo WAVE*.

1.3.2 Específicos

- Realizar estudo teórico do motor de combustão interna, do sistema de escape, bem como efetuar a análise de desempenho do motor operado com diferentes geometrias do sistema de escape;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Dimensionar o sistema de escape, simular estudos de caso no *software Ricardo WAVE*;
- Selecionar a melhor dimensão através das respostas de desempenho apresentadas em gráficos;
- Concluir o trabalho e apresentar sugestões de trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será dividido em cinco capítulos e estão organizados da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito do funcionamento de um motor de combustão interna e sobre o sistema de escape, além da análise entre as relações existentes entre ambos, possibilitando diferentes configurações visando diferentes objetivos.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados. Além disso, é proposto o projeto de um sistema de escape que visa o desempenho de um veículo tipo Fórmula.

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo será apresentada uma abordagem histórica e teórica de motores de combustão interna. Será ainda apresentado o sistema de exaustão e o seu dimensionamento. Por fim, o capítulo irá abordar a competição estudantil fórmula SAE e o *software* de simulação e modelagem de motores *Ricardo Wave*.

2.1 Motor de combustão interna

Uma máquina térmica permite a transformação de calor em trabalho. A energia térmica necessária para o processo pode ser obtida de diversas fontes, entre elas se destaca a combustão (BRUNETTI, 2012). O motor de combustão interna é uma máquina térmica, formada por um conjunto de peças mecânicas e elétricas, cuja finalidade é produzir trabalho pela força de expansão resultante da queima da mistura de ar com combustível, no interior de cilindros fechados (SENAI, 2002).

Segundo Tillman (2013), os primeiros relatos sobre o surgimento dos motores afirmam que os motores de combustão tiveram início com a invenção das armas de fogo, isso devido à energia térmica da explosão transformar-se em trabalho. Sendo assim, as primeiras tentativas de desenvolvimento de um motor ocorreram na segunda metade do século XVII, com o uso da pólvora para movimentar um pistão dentro de um cilindro.

Relatos e documentos históricos demonstram, em esquema datado de 1508, em que Leonardo da Vinci propunha a elevação de peso por meio de fogo, porém, devido a limitações da época, o projeto se tornou inviável (TILLMAN, 2013). Em 1673, foi proposto por Christiaan Huygens, um físico neerlandês a utilização de um mecanismo diferente. O combustível utilizado foi a pólvora, jogando-a na interface do pistão e aproveitando os gases de combustão que arrefeciam, baixando a pressão. A descida do pistão fazia subir a água ou carvão pela ação da própria pressão atmosférica, ocasionando na rotação do sistema (MARTINS, 2006).

Dando prosseguimento na história dos motores, foi apresentado na Exposição Industrial de Paris, em 1867, o motor concebido por Nicolaus Otto e Eugen Langen (Figura 1). O conceito desse motor era o de “pistão livre”, impulsionado pela explosão dos gases no cilindro, o pistão estava ligado a um volante através de uma cremalheira e uma engrenagem. No retorno do pistão, produzia-se trabalho mecânico. O motor concebido não havia compressão dos gases antes da combustão, e sua eficiência correspondia a 11% (TILLMAN, 2013).

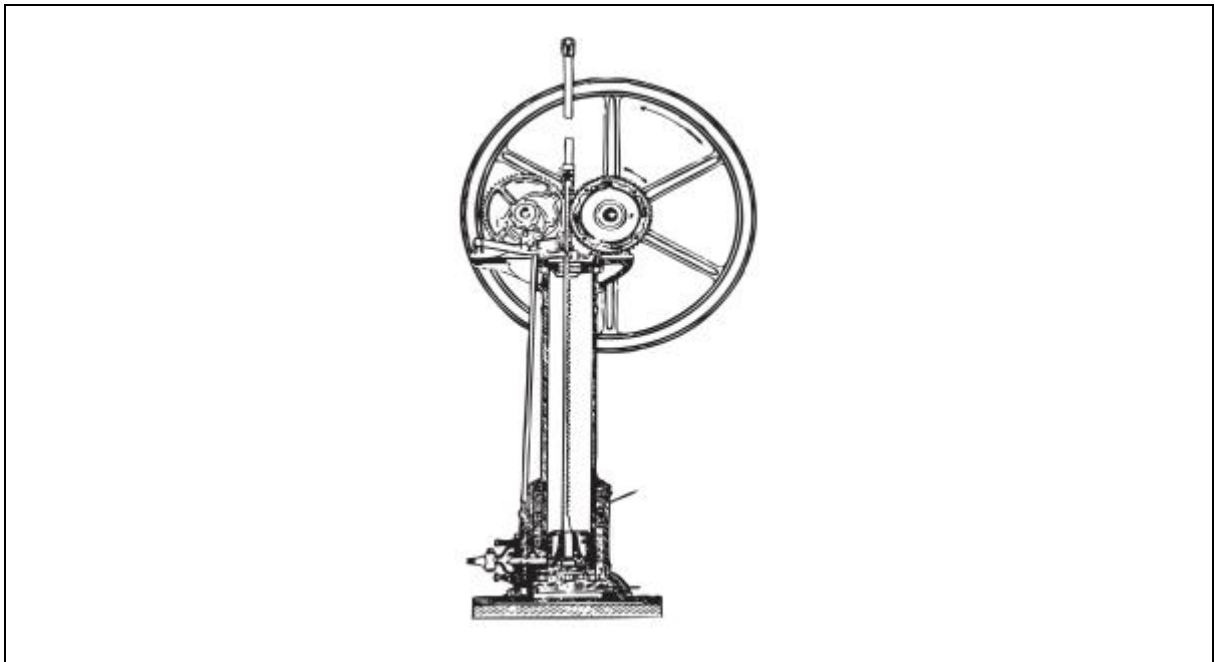


Figura 1 - Motor de Nicolaus Otto e Eugen Langen de 1867
Fonte: Tillman, 2013

Em 1876, o alemão Nicolaus Otto volta ao cenário e apresenta um motor de quatro cilindros que funcionava em quatro tempos, utilizando os princípios estabelecidos por um inventor chamado Beau de Rochas poucos anos atrás. Porém o motor de Otto era bem mais compacto e leve, possuía 1/3 do peso do anterior e, uma eficiência maior, próxima a 14%. Até 1890 tinham sido construídos 50.000 motores desse tipo na Europa e nos Estados Unidos. As características básicas dele são as mesmas encontradas nos motores de hoje (TILLMAN, 2013).

Desde sua concepção, o motor de combustão interna vem sofrendo modificações. Segundo SENAI (2002), compreende-se que o motor de combustão interna funciona através da força de expansão dos gases em combustão que impulsiona o êmbolo para baixo, e a biela

transforma seu movimento alternado de sobe e desce em movimento rotativo da manivela conforme a Figura 2.

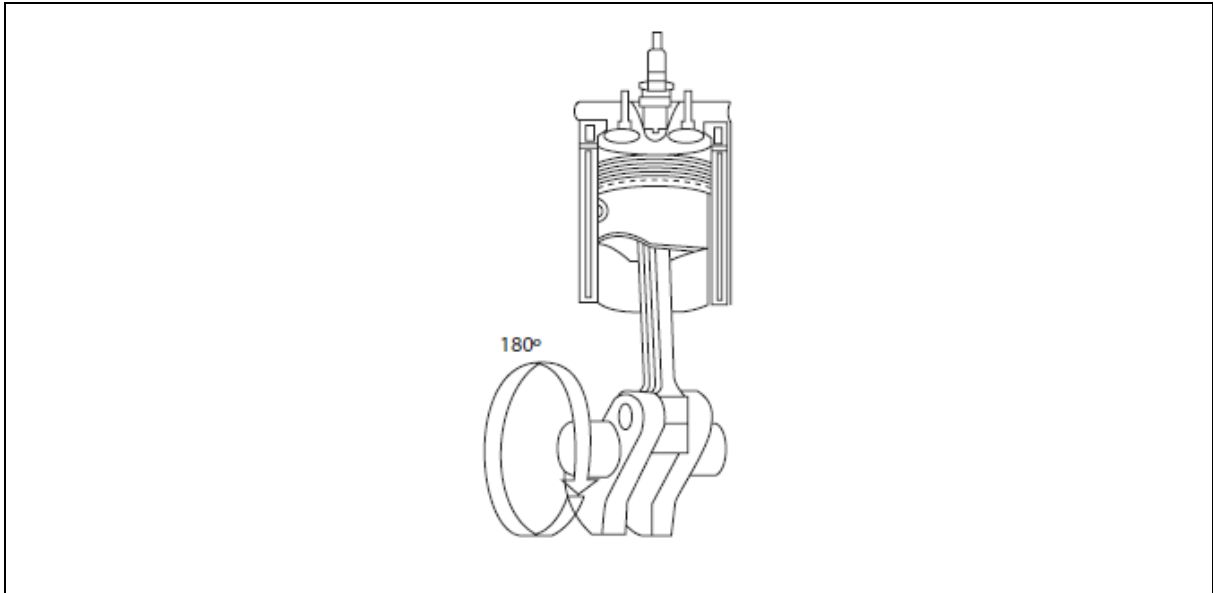


Figura 2 - Movimento rotativo da manivela
Fonte: Brunetti, 2012

Brunetti (2012) sugere que os processos que ocorrem com o fluido de trabalho podem gerar diversas classificações para as máquinas térmicas, são elas:

- Motores de combustão externa: quando a combustão acontece externamente ao fluido ativo, que será apenas o veículo de energia térmica a ser transformada em trabalho.
- Motores de combustão interna: quando o fluido ativo participa diretamente da combustão.

Dando ênfase aos motores de combustão interna, pode-se classificá-los quanto à forma de obtenção de trabalho mecânico em:

- Motores rotativos: quando o trabalho é obtido diretamente por um movimento de rotação.
- Motores de impulso: quando o trabalho é obtido pela força de reação dos gases expelidos em alta velocidade pelo motor.
- Motores alternativos: quando o trabalho é obtido pelo movimento alternado de subida e descida de um pistão, transformado em rotação contínua por um sistema biela-manivela.

Os motores alternativos podem ser classificados quanto a sua ignição (TAYLOR, 1988):

- Motores de ignição por centelha ou Otto: motor no qual a mistura ar-combustível é admitida no interior dos cilindros e inflamada por uma centelha gerada pelos eletrodos de uma vela.
- Motores de ignição por compressão ou Diesel: onde o pistão comprime somente ar, até que atinja uma temperatura suficientemente elevada. Quando o pistão se aproxima do ponto morto superior, injeta-se o combustível que reage espontaneamente com o oxigênio presente no ar quente.

As diferentes formas de funcionamento dos dois tipos de motores criam características distintas que obedecem ao ciclo proposto por Otto e Diesel e, de certa forma, direcionam as suas aplicações (BRUNETTI, 2012).

O ciclo Otto é o ciclo ideal dos motores alternativos de ignição por centelha e o seu nome se deve a Nikolaus A. Otto, criador do primeiro motor quatro tempos, em 1876. A denominação de motor de quatro tempos se deve à execução pelo pistão de quatro cursos completos dentro do cilindro, e a realização, pelo eixo de manivelas, de duas revoluções para cada ciclo mecânico, como mostrado na Figura 3 (ÇENGEL, 2006).

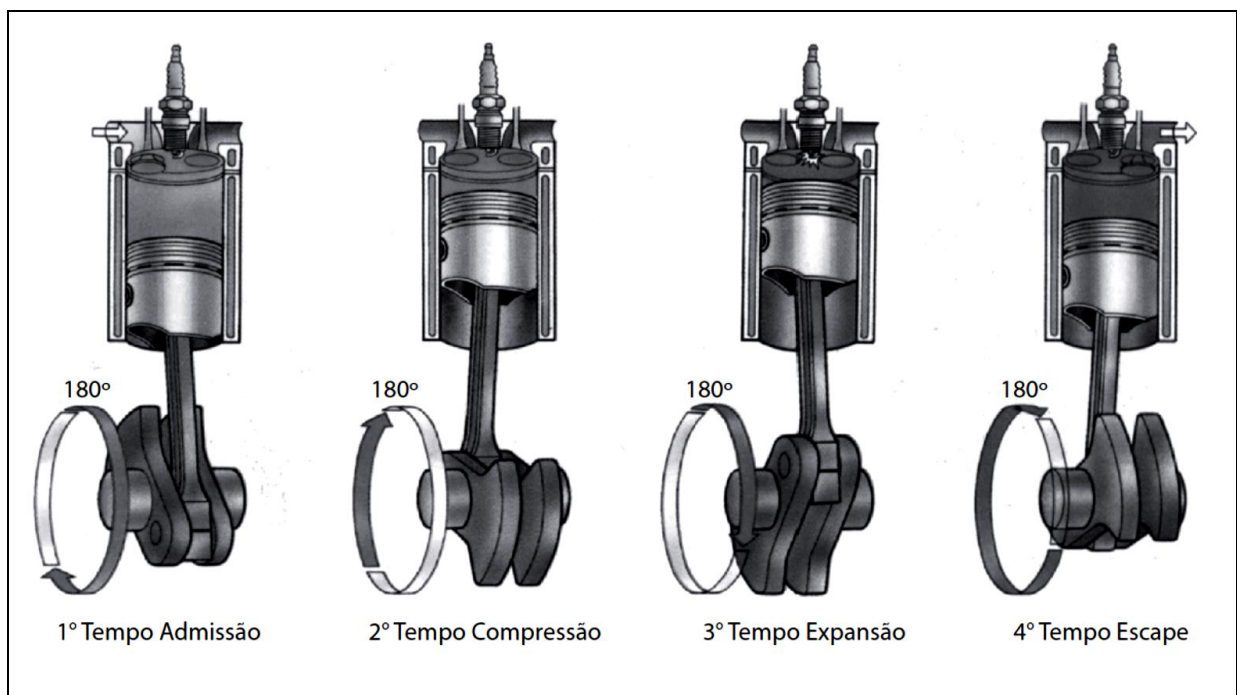


Figura 3 - Os quatro tempos para o Ciclo Otto
Fonte: Brunetti, 2012

Inicialmente, com a válvula de admissão aberta admite-se o ar e o combustível, enquanto a de descarga fica fechada e o pistão se encontra no ponto morto inferior. Em

seguida, a válvula de admissão é fechada e o pistão move-se para cima, comprimindo a mistura de ar e combustível. Logo depois que o pistão atinge o ponto morto superior, a vela solta centelha e a mistura sofre ignição, aumentando a pressão e a temperatura do sistema. Os gases à alta pressão forçam o pistão para baixo, o que, por sua vez, força o eixo de manivelas a girar, produzindo trabalho útil durante o curso de expansão. Ao final do ciclo, o pistão se encontra na posição mais baixa (Ponto morto inferior) e o cilindro está cheio de produtos de combustão. O pistão move-se para cima mais uma vez (Ponto morto superior), expulsando os gases de exaustão através da válvula de escape, e uma segunda vez para baixo sugando a mistura de ar fresco e combustível através da válvula de admissão iniciando um novo ciclo, conforme a Figura 4.

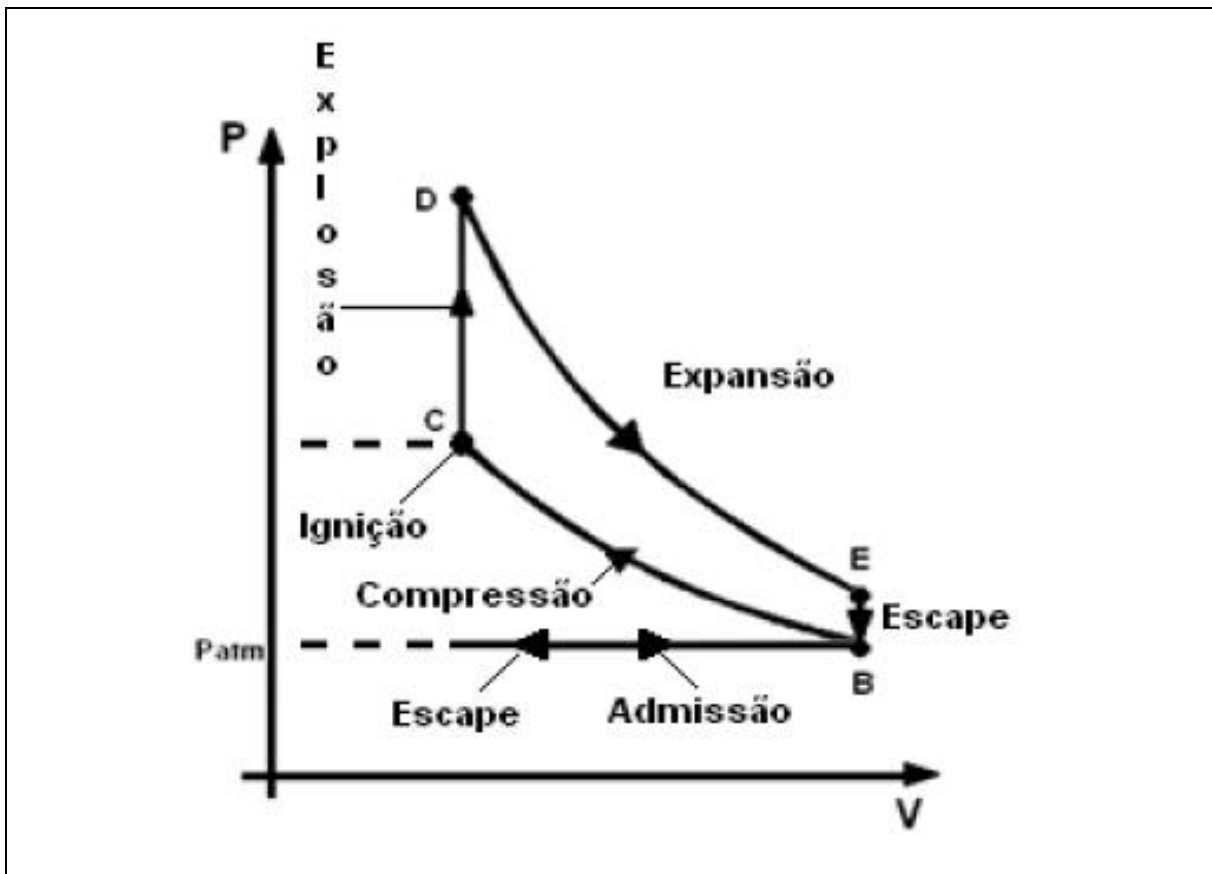


Figura 4 - Ciclo Otto ideal completo

Fonte: UOL Educação, Física do automóvel e GREF, 2016

Pode-se assim resumir que o ciclo termodinâmico ideal do motor de combustão interna tipo Otto em quatro processos internamente reversíveis: compressão isentrópica de B para C, fornecimento de calor a volume constante de C para D, expansão isentrópica de D para E e rejeição de calor a volume constante de E para B.

Já nos motores de dois tempos, de acordo com Çengel (2006), todas as quatro funções descritas anteriormente são executadas apenas em dois tempos: o tempo motor e o tempo de compressão. Nesses motores, o cárter é vedado, e o movimento para baixo do pistão é utilizado para pressurizar ligeiramente a mistura de ar e combustível no cárter. As válvulas de admissão e de descarga são substituídas por aberturas na parte inferior da parede do cilindro, como mostrado na Figura 5.

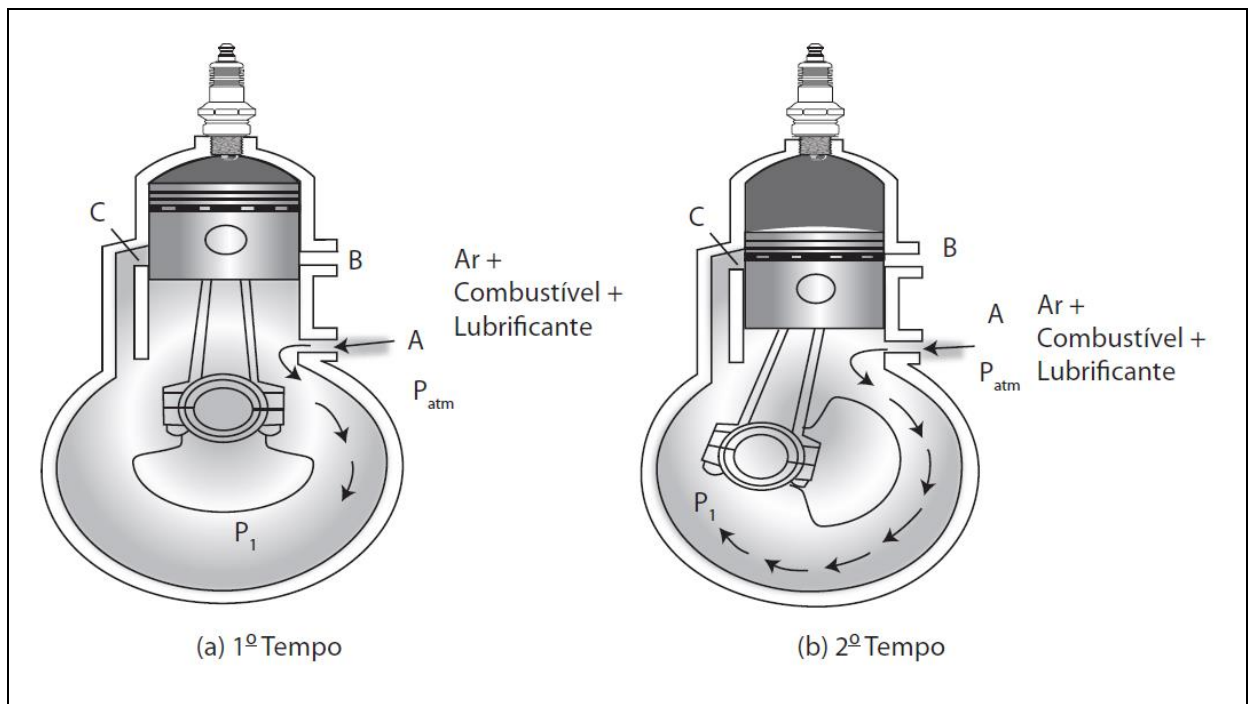


Figura 5 - Motor dois tempos de ignição por centelha
Fonte: Brunetti, 2012

Durante o funcionamento do motor de dois tempos o pistão abre primeiro a janela de exaustão, permitindo que os gases de exaustão do ciclo anterior sejam parcialmente expelidos. Em seguida, a janela de admissão é aberta, isso permite que a mistura de ar e combustível entre e expulse a maior parte dos gases de exaustão restantes do cilindro. Uma nova mistura é então comprimida à medida que o pistão se move para cima durante o tempo de compressão, sofrendo ignição por faísca ocorrendo assim à combustão da mistura, por fim, inicia-se novamente o ciclo de exaustão dos gases e admissão de ar combustível. Vale ressaltar que para motores dois tempos é muito importante a utilização de lubrificante juntamente como combustível, para evitar qualquer problema no funcionamento (BRUNETTI, 2012).

Çengel (2006) destaca que motores de dois tempos em geral são menos eficientes do que seus equivalentes de quatro tempos, por causa da expulsão incompleta dos gases de exaustão e da expulsão parcial da mistura de ar fresco e combustível com os gases de exaustão. Entretanto, eles são relativamente simples e baratos, e têm melhores relações potência-peso e potência-volume, o que os torna adequados para aplicações que exigem tamanho pequeno e pouco peso como motocicletas.

O ciclo Diesel é o ciclo ideal dos motores alternativos de ignição por compressão. O motor de ignição por compressão, proposto pela primeira vez por Rudolph Diesel, nos anos de 1890 (ÇENGEL, 2006). Nesse ciclo, de acordo com Van Wylen (2003), o calor é transferido ao fluido de trabalho a pressão constante e corresponde à injeção e queima do combustível. Em seguida, os gases da combustão sofrem uma expansão isentrópica, até que o pistão atinja o ponto morto inferior e os eliminem pela válvula de escape.

Tendo isso em vista, a grande diferença entre os ciclos Otto e Diesel é que nos motores à gasolina, uma mistura de ar e combustível é comprimida, e as relações de compressão são limitadas pelo início da autoignição do combustível presente no interior do cilindro. Nos motores a diesel, apenas o ar é comprimido durante o tempo de compressão, eliminando a autoignição. Portanto, os motores diesel podem ser desenvolvidos para operarem a relações de compressão entre 12 e 24:1, muito mais altas, (ÇENGEL, 2006).

Brunetti (2012), utiliza, para calcular a relação de compressão (r_v) de um motor de combustão interna a razão entre o volume total (V_1), encontrado no ponto morto inferior, e o volume morto (V_2) encontrado no ponto morto superior.

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

2.2 Sistema de escape

O sistema de escape automotivo consiste em todos os tubos e outros componentes que são projetados para transportar gases provenientes da combustão do motor de combustão interna até sua liberação no meio ambiente. O típico sistema de exaustão começa com os *Runners*, que são pequenos dutos localizados após as válvulas de escape, ainda no cabeçote do motor e termina com o silenciador (LAUKKONEN, 2013).

Podem se destacar quatro principais funções destinadas ao sistema de escape. A primeira função destacada é direcionamento dos gases da combustão. O sistema de exaustão é construído para direcionar os gases da combustão para um local afastado do motor e do condutor do veículo. O sistema de escape deve ser projetado de uma forma que todos os gases possuam a menor restrição possível durante sua passagem (ROCHA, 2011).

O calor transportado nos gases de exaustão pelos dutos representa quase metade do calor residual total gerado por um motor de combustão interna. Logo, significa que um sistema de escape é responsável por transportar quase tanto calor quanto o próprio sistema de arrefecimento. Se esse calor permanecesse no compartimento do motor, o motor ficaria mais quente, e conseqüentemente, ocorreria à redução da eficiência (LAUKKONEN, 2013).

Alguns dos gases de escape produzidos durante a combustão dos motores de combustão interna são perigosos. A combustão da gasolina produz como subproduto o monóxido de carbono, que é potencialmente perigoso aos seres vivos. Como os condutores dos veículos ficam confinados em seu interior, os sistemas de exaustão desempenham uma importante função de segurança ao direcionar com segurança os gases de escape para um local onde seja seguro (LAUKKONEN, 2013).

A segunda função destinada ao sistema de escape é conseguida através do uso do silenciador e de um correto desenho do sistema, a função é atenuar o ruído produzido pelo motor. A presença do silenciador no sistema de escape pode reduzir o ruído do motor em até 50dB. Alguns motores podem produzir ruídos de até 125 dB, levando isso em consideração, é compreensível o quanto o uso é benéfico a saúde do ser humano e ao meio ambiente, reduzindo a poluição sonora (ROCHA, 2011).

Outra função a ser destacada do sistema de escape é a redução de poluentes emitidos na atmosfera após a combustão. O componente do sistema de escape que reduz a toxicidade das substâncias emitidas após a combustão é o catalisador. O catalisador proporciona a oxidação do monóxido de carbono que é um gás inflamável, inodoro e de grande toxicidade. O catalisador proporciona também a oxidação dos hidrocarbonetos e também a redução do óxido de nitrogênio (ROCHA, 2011).

Os gases resultantes da combustão do motor estão contidos dentro do cilindro em alta temperatura e pressão. Quando a válvula se abre, devido a grande diferença de pressão, a massa de gases produzida pela combustão percorre todo o sistema de escape em alta velocidade (PASSOS, 2015). Então, o correto dimensionamento do comprimento e do

diâmetro do sistema de escape é responsável por valores de pressão negativos que contribuem para ganhos significativos de eficiência volumétrica, logo, uma quarta função destacada para o sistema de escape é aumentar a massa de ar aspirada para dentro do cilindro. Rocha (2011) diz que a movimentação dos gases de combustão através do sistema de escape provoca um efeito de sucção na admissão do ar devido ao vácuo criado durante as expulsões dos gases da combustão. Quanto maior for a massa de ar admitida no cilindro maior é a quantidade de combustível injetado, logo, a potência produzida pelo motor é aumentada.

Devido a sua função de transportar gases potencialmente perigosos a saúde humana, e as altas temperaturas com as quais os mesmos deixam o cilindro do motor, o sistema de escape deve possuir alguns atributos. Dentre as principais características, Laukkonen (2013) destaca quatro:

1. O sistema deve ser selado para evitar vazamentos de gases do sistema de exaustão.
2. Os tubos devem ser resistentes ao calor.
3. Os tubos de escape devem manter uma distância segura de partes potencialmente inflamáveis.
4. O sistema deve ser ajustado para cada motor e fim (desempenho, custo de fabricação, consumo).

Grande parte das características está relacionada principalmente a fatores de segurança. Um sistema de escape que possui vazamentos, ou seja, com partes enferrujadas ou furadas representa um perigo potencial para a saúde de qualquer pessoa no compartimento de passageiros do veículo. Outra característica salientada é a de que os tubos de escape indevidamente isolados podem danificar componentes, superaquecendo-os ou até mesmo causando incêndios (LAUKKONEN, 2013).

Já a última característica destacada por Laukkonen (2013), é importante e está relacionada a questões de desempenho, e não à segurança. Essa característica é encontrada principalmente em veículos de desempenho que usam tubos de escape especialmente projetados, ao invés de coletores de admissão prontos.

O sistema de escape pode ser compreendido pela junção de todos os componentes que estão presentes entre a válvula de escape até a saída dos gases de combustão para o meio ambiente. O sistema de escapamento é composto pelas peças detalhadas logo após a representação da Figura 6.

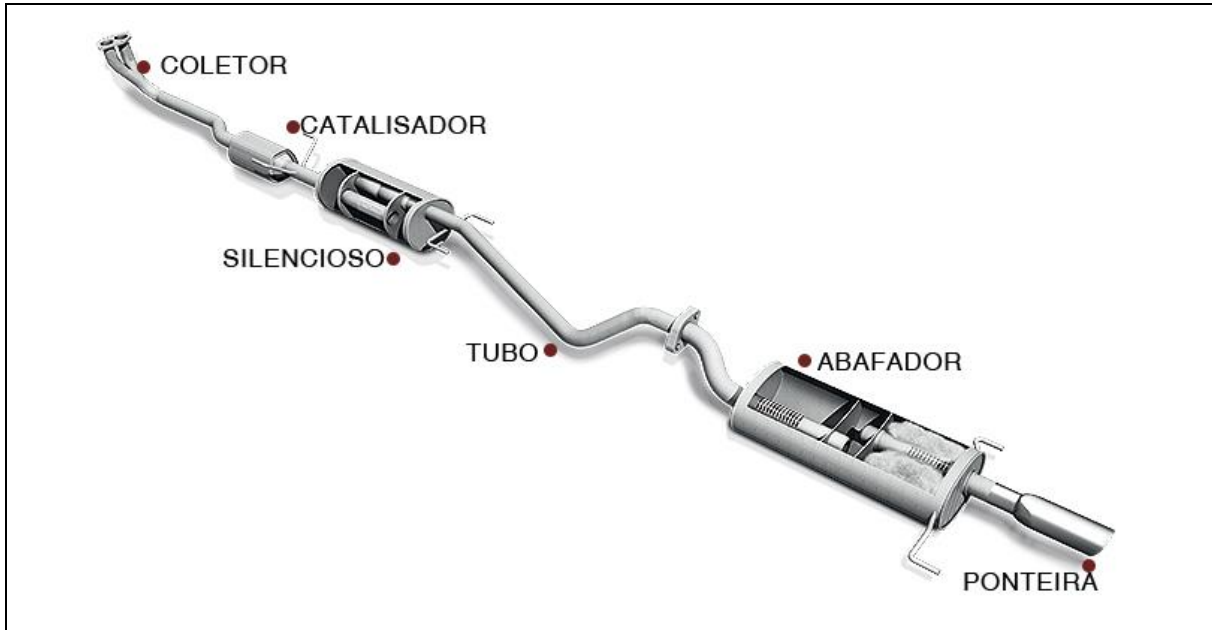


Figura 6 - Sistema de escape

Fonte: Escapamento Esportivo: Como Funciona? 2015

- **Runners internos:** Os *runners* são pequenos dutos localizados no interior do cabeçote do motor, ele fica localizado logo após a válvula de escape e termina ao sair do cabeçote, onde é ligado ao coletor de escape. São dutos de pequeno comprimento e diâmetro próximo ao da válvula de escape
- **Coletor de escape ou headers:** embora os coletores de escape e os *headers* desempenhem o mesmo papel nos motores, ou seja, canalizar os gases de combustão até o tubo de escape, existem grandes diferenças entre eles. Essencialmente, os *headers* são peças de atualização projetadas para aplicações de desempenho, enquanto os coletores de escape são mais utilitários. O coletor de escape fica acoplado ao motor e é formada por um conjunto de tubos, geralmente é constituído de ferro fundido, devido a sua grande resistência mecânica e custo baixo. Sua finalidade é coletar os gases resultantes da queima de combustível e encaminhá-los para o tubo de descarga primário, conhecido também por silencioso. O coletor de escape é uma única peça. O coletor de escape é uma peça de longa longevidade, visando o mínimo de manutenção possível, porém em raros casos o coletor é otimizado para desempenho. Os *headers* desempenham funções semelhantes ao coletor de escape, ou seja, encaminhar os gases de combustão produzidos pelo motor até o próximo componente do sistema de combustão. São tubos normalmente constituídos de aço projetados de forma individual para cada cilindro. Todos esses tubos se conectam a um tubo coletor, também

conhecido como junta. Os tubos são lisos e iguais em comprimento. Isso garante que os gases de cada cilindro cheguem ao coletor separadamente, uma vez que cada válvula do cilindro abre em tempos diferentes, evitando a contrapressão. Os headers podem ser vistos na Figura 7.

- **Tubos de escape:** Fazem a ligação entre os demais componentes do sistema. Um tubo de escape 4:1 (utilizado para unir 4 tubos) pode ser visualizado na Figura 6.

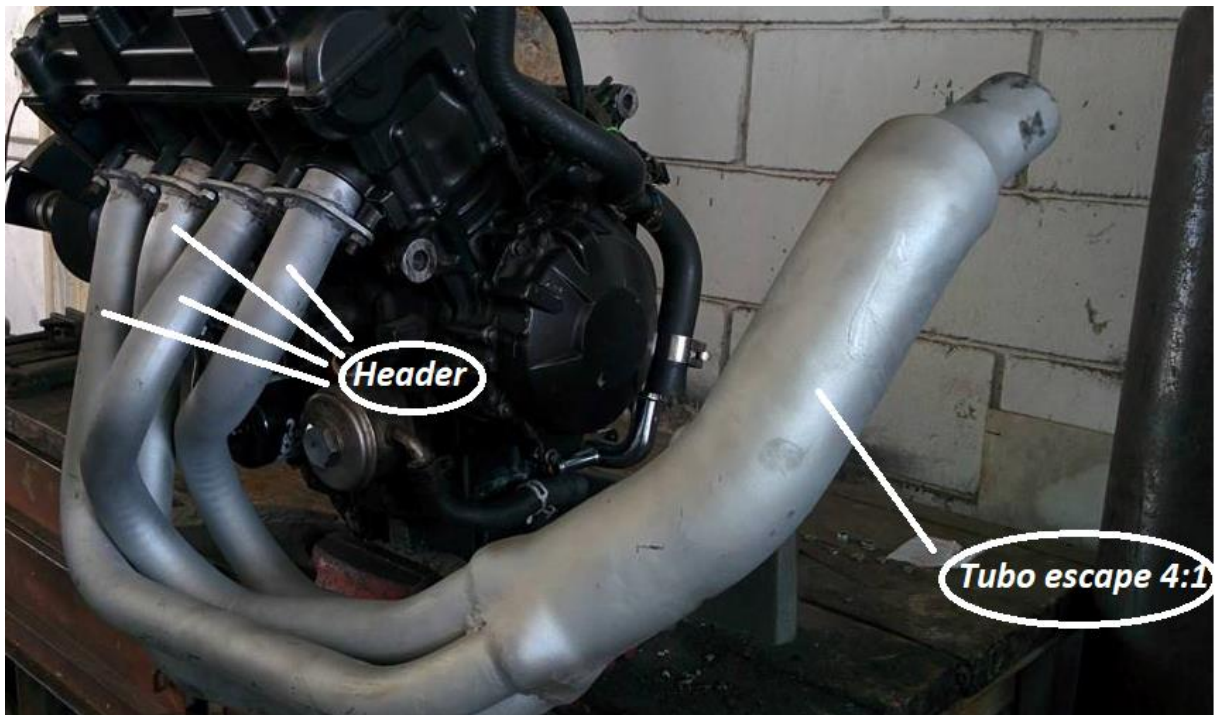


Figura 7 - Header e tubo de escape
Fonte: UNESP Racing, 2019

- **Silencioso ou silenciador:** Câmara dotada de várias divisões internas por onde passam os gases. Ao passar por esse percurso, as ondas sonoras do ruído perdem pressão e esse processo resulta na redução do barulho gerado pelo funcionamento do motor. Em sua composição também podem estar a lã de vidro ou o basalto.
- **Catalisador:** É um dispositivo instalado na saída do coletor de escape ou entre o coletor e o silencioso. Sua função é transformar substâncias poluentes, por meio de seus elementos internos de cerâmica, em gases menos nocivos à atmosfera. Ou seja, purificar os gases poluentes com reações químicas.

- **Abafador:** É o silenciador auxiliar, encarregado de absorver os ruídos mais agudos. Em sua composição também podem estar a lã de vidro e o basalto. Essa peça conta com tubos repletos de pequenos furos e envolve o corpo do escape. No sistema conhecido como refletivo, não existe a presença de lã de vidro. Esse sistema conta com três divisões no seu interior, que configuram uma espécie de labirinto formado por defletores. Ao jogar os gases de uma divisão para outra, o nível de ruído e também as vibrações diminuem por causa do choque das ondas sonoras nas paredes internas do abafador. Trabalha em outra frequência, diferente do silenciador. Geralmente é o último elemento sistema de escapamento no automóvel.

2.3 Dimensionamento e otimização

Uma das principais publicações acerca do dimensionamento do sistema de escape para um motor de quatro cilindros é o livro “*Four-Stroke Performance Tuning in Theory and Practice*”, escrito por Bell e publicado no ano de 1980. Muito utilizado até hoje pelo seu método simplista para se calcular os comprimentos e diâmetros dos dutos de escape. Diversos parâmetros são considerados valores constantes, tais como a velocidade das ondas de pressão e a velocidade das partículas expelidas do cilindro, tendo somente em consideração o valor variável da velocidade do motor e o ângulo do virabrequim para o qual a válvula de escape abria (ROCHA, 2011).

Quando a válvula de escape presente do cabeçote do motor se abre, os gases comprimidos no interior no cilindro são expelidos. Uma onda de pressão positiva criada é responsável por empurrar os gases pelo sistema de escape até o ambiente exterior. Quando essa onda de pressão encontra a atmosfera, ela se dissipa, formando um vácuo que produz o efeito de sucção. Esse efeito caminha pelo sistema de exaustão em direção aos cilindros, e é gerado devido à diferença de pressão existente entre o meio ambiente e o interior do sistema de escape juntamente com o cilindro do motor de combustão interna (BELL, 1980).

Bell (1980) diz que o efeito de sucção, caso chegue ao cilindro no período em que a válvula de escape e a de admissão estão semiabertas (período de sobreposição), irá ajudar a aspirar uma maior massa de ar para dentro do cilindro e expulsar os gases da combustão remanescentes para fora do cilindro.

Ao conseguir calcular a velocidade do efeito de sucção e entender seu comportamento em determinado sistema de escape, é possível fazer com que ela alcance o cilindro no período de sobreposição das válvulas, auxiliando na maior admissão de massa de ar. Bell (1980)

considera que os gases de escape abandonam o cilindro a uma velocidade entre 61 a 91 metros por segundo, já a velocidade da onda de pressão varia entre 457 a 518 m/s.

Bell (1980) não explica a origem destes valores, além de não apresentar as deduções das fórmulas utilizadas. Desta forma não é possível saber como obteve as fórmulas que se irão utilizar para o dimensionamento do sistema de escape de um motor de combustão interna de quatro tempos.

O projeto do sistema de escape envolve a avaliação do diâmetro, comprimento e geometria dos tubos. Primeiro a considerar é o diâmetro do *header*, geralmente semelhante ao diâmetro dos *runners*, porém em alguns casos, pode ter os seus valores alterados. Em baixas velocidades do motor, altas velocidades de gases de escape são necessárias para obter uma resposta rápida do acelerador. Por meio da conservação de massa, um tubo de escape de pequeno diâmetro resultará em maior velocidade do gás, propício para a resposta do acelerador para aceleração. No entanto, sem área suficiente, tubos de pequeno diâmetro podem limitar a taxa de fluxo de massa necessária para expelir todos os gases queimados em rotações mais altas. Portanto, uma razão entre o compromisso com respostas do acelerador e fluxo mássico de gases deve ser estipulada, o diâmetro deve ser escolhido para fornecer fluxo de alta velocidade e suficiente vazão nas velocidades máximas do motor (VIKINGSMOTORSPORT, 2006).

Para a onda de pressão gerar a adequada "limpeza" do cilindro, um comprimento ideal é necessário para permitir que as ondas refletidas cheguem a tempo para o período de sobreposição das válvulas. Mudanças na temperatura dos gases de escape ao longo das rotações do motor resultam em uma velocidade dinâmica variável, portanto, o comprimento ideal só pode ser contabilizado em uma rotação do motor que deve ser fixada. Além disso, qualquer alteração na geometria dentro do sistema de exaustão resultará em alterações nas ondas de pressão refletidas, e conseqüentemente também afetará significativamente o comprimento do sistema de escape (VIKINGSMOTORSPORT, 2006).

Devido à natureza complicada dos efeitos que ocorrem na eliminação dos gases, a bibliografia fornece equações de orientação que são adequadas para um motor específico, assumindo um tubo de escape reto ideal. Uma equação, que segundo Bell (1980) pode ser utilizada para o cálculo do comprimento do sistema de escape de um motor de combustão interna é:

$$L = \frac{21590 \times (AVE + 180)}{N} - 76,2 \quad (2)$$

L representa o comprimento do tubo mm, N significa a velocidade do motor em rotações por minuto e AVE significa a abertura da válvula de escape em graus antes do ponto morto inferior °APMI. Com esta equação é possível fazer-se um estudo das variáveis que nela entram e poder observar-se qual o seu efeito no dimensionamento do sistema de escape.

É observado na equação de Bell (1980) que curvas e ângulos no tubo são desconsiderados, idealmente, os *headers* e o restante do sistema de escape seriam retos, no entanto, restrições físicas de espaço quase sempre inviabilizam que eles sejam desenvolvidos dessa maneira.

A presença de curvas nos sistema de escape pode ocasionar em redirecionamentos bruscos do fluxo de gases, que podem produzir zonas de separação de fluxo e recirculação. Normalmente, atribuir maiores raios, amenizar curvas e ter comprimentos iguais para todos os *headers* são soluções que visam amenizar esses efeitos (VIKINGSMOTORSPORT, 2006).

Ainda sobre o dimensionamento do comprimento do sistema de escape, utilizando a fórmula de Bell (1980), a tabela a seguir apresenta resultados do comprimento do sistema de escape para diferentes valores de rotação do motor N e para o ângulo de abertura da válvula de escape antes do ponto morto inferior °APMI. A faixa de rotação utilizada varia entre 2000 rpm e 8000 rpm.

Tabela 1 - Comprimentos do sistema de escape (em mm) pela rotação do motor e o ângulo de abertura da válvula de escape

Abertura da válvula de escape em ° APMI												
Rotação do Motor (RPM)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1000	3838,2	3944,0	4049,8	4155,6	4261,4	4367,2	4473,0	4578,8	4684,6	4790,4	4896,2	5002,0
2000	1881,0	1933,9	1986,8	2039,7	2092,6	2145,5	2198,4	2251,3	2304,2	2357,1	2410,0	2462,9

3000	1228,6	1263,9	1299,1	1334,4	1369,7	1404,9	1440,2	1475,5	1510,7	1546,0	1581,3	1616,5
4000	902,4	928,9	955,3	981,8	1008,2	1034,6	1061,1	1087,5	1114,0	1140,4	1166,9	1193,3
5000	706,7	727,8	749,0	770,2	791,3	812,5	833,6	854,8	876,0	897,1	918,3	939,4
6000	576,2	593,8	611,5	629,1	646,7	664,4	682,0	699,6	717,3	734,9	752,5	770,2
7000	483,0	498,1	513,2	528,3	543,5	558,6	573,7	588,8	603,9	619,0	634,1	649,3
8000	413,1	426,3	439,6	452,8	466,0	479,2	492,4	505,7	518,9	532,1	545,3	558,6
9000	358,7	370,5	382,2	394,0	405,8	417,5	429,3	441,0	452,8	464,5	476,3	488,0
10000	315,2	325,8	336,4	347,0	357,6	368,1	378,7	389,3	399,9	410,5	421,0	431,6
11000	279,7	289,3	298,9	308,5	318,1	327,7	337,4	347,0	356,6	366,2	375,8	385,5
12000	250,0	258,8	267,6	276,5	285,3	294,1	302,9	311,7	320,5	329,3	338,2	347,0
13000	224,9	233,0	241,2	249,3	257,5	265,6	273,7	281,9	290,0	298,2	306,3	314,4
14000	203,4	211,0	218,5	226,1	233,6	241,2	248,7	256,3	263,9	271,4	279,0	286,5

Fonte: Pesquisa direta (2019)

A partir da determinação do tubo principal, o diâmetro do sistema de escape é o próximo parâmetro a ser dimensionado. A equação 3, proposta por Bell (1980) para o cálculo de D , assim como a do cálculo do comprimento do sistema de exaustão (equação 2), não tem sua dedução demonstrada. Bell (1980) faz depender o diâmetro interior do tubo principal da cilindrada do motor e do comprimento do mesmo, por depender do comprimento do sistema de escape, o diâmetro depende também da velocidade do motor e do ângulo de abertura da válvula de escape.

$$D = \sqrt{\frac{cc}{(0,03937 \times L) \times 25}} \times 53,34 \quad (3)$$

Em que D é o diâmetro em mm, L é o comprimento do tubo principal de escape em mm e cc é o volume do motor em cm^3 (centímetros cúbicos). Ainda, utilizando a equação 3, proposta por Bell (1980), é possível construir a tabela 2 e estipular valores para o diâmetro do sistema de exaustão para determinadas rotações do motor e suas cilindradas.

Tabela 2 - Diâmetro do sistema de escape (em mm) de acordo com o comprimento do sistema de escape e a cilindrada do motor de combustão interna.

Cilindrada												
Comprimento do sistema de escape (mm)	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800
2000	14,7	20,8	25,5	29,4	32,9	36,1	39,0	41,6	44,2	46,6	48,8	51,0
1900	15,1	21,4	26,2	30,2	33,8	37,0	40,0	42,7	45,3	47,8	50,1	52,3
1800	15,5	21,9	26,9	31,0	34,7	38,0	41,1	43,9	46,6	49,1	51,5	53,8
1700	16,0	22,6	27,7	31,9	35,7	39,1	42,3	45,2	47,9	50,5	53,0	55,3

1600	16,5	23,3	28,5	32,9	36,8	40,3	43,6	46,6	49,4	52,1	54,6	57,0
1500	17,0	24,0	29,4	34,0	38,0	41,6	45,0	48,1	51,0	53,8	56,4	58,9
1400	17,6	24,9	30,5	35,2	39,4	43,1	46,6	49,8	52,8	55,7	58,4	61,0
1300	18,3	25,8	31,6	36,5	40,8	44,7	48,3	51,7	54,8	57,8	60,6	63,3
1200	19,0	26,9	32,9	38,0	42,5	46,6	50,3	53,8	57,0	60,1	63,0	65,8
1100	19,9	28,1	34,4	39,7	44,4	48,6	52,5	56,2	59,6	62,8	65,8	68,8
1000	20,8	29,4	36,1	41,6	46,6	51,0	55,1	58,9	62,5	65,8	69,1	72,1
900	21,9	31,0	38,0	43,9	49,1	53,8	58,1	62,1	65,8	69,4	72,8	76,0
800	23,3	32,9	40,3	46,6	52,1	57,0	61,6	65,8	69,8	73,6	77,2	80,6
700	24,9	35,2	43,1	49,8	55,7	61,0	65,8	70,4	74,7	78,7	82,5	86,2
600	26,9	38,0	46,6	53,8	60,1	65,8	71,1	76,0	80,6	85,0	89,2	93,1
500	29,4	41,6	51,0	58,9	65,8	72,1	77,9	83,3	88,3	93,1	97,7	102,0
400	32,9	46,6	57,0	65,8	73,6	80,6	87,1	93,1	98,8	104,1	109,2	114,1
300	38,0	53,8	65,8	76,0	85,0	93,1	100,6	107,5	114,1	120,2	126,1	131,7
200	46,6	65,8	80,6	93,1	104,1	114,1	123,2	131,7	139,7	147,2	154,4	161,3
100	65,8	93,1	114,1	131,7	147,2	161,3	174,2	186,2	197,5	208,2	218,4	228,1

Fonte: Pesquisa direta (2019)

Quanto maior for a cilindrada do motor, maior terá que ser o valor do diâmetro interno do tubo principal de escape e isso pode ser observado na tabela, pode ser observado também que o aumento da velocidade do motor também contribui para o aumento do diâmetro do sistema de escape (BELL, 1980).

Outro método utilizado para o dimensionamento do sistema de escape é baseado em Blair (1999). Este método avalia a propagação de uma onda de pressão que se forma nos dutos de escape no instante de abertura da válvula de escape e calcula o tempo decorrido durante dois percursos de ida e volta. A onda de pressão positiva evolui no sentido válvula de escape até o ambiente externo e a onda de depressão evolui no sentido do ambiente interno até à válvula de escape. O método pretende avaliar, para um dado regime de funcionamento do motor qual é o comprimento de tubo de escape que leva a que a chegada da segunda onda de depressão atinja a válvula de escape no período de sobreposição da abertura das válvulas de escape e admissão.

O método de Blair (1999) não foi demonstrado por ser demasiadamente complexo para a realização deste estudo, porém, segundo Rocha (2011), o método empírico de Bell (1980), obtém resultados próximos dos obtidos pelo método baseado em teorias mais recentes Blair (1999), “o que comprova que nesta matéria a prática se adiantou bastante à teoria e que só recentemente é que o tema passou a ser estudado, de um modo mais científico, com profundidade”.

O método de Blair (1999) pode ser visto como uma maneira otimizada de calcular o sistema de escape em comparação ao método de Bell (1980), entretanto, devido ao seu complexo entendimento, o uso de *softwares* que permitem a modelagem de todo o processo são vistos como uma alternativa de otimização do sistema. Utilizando inicialmente o método de Bell (1980) para dimensionar o sistema de escape, todo o fluxo de gases pode ser observado, geometrias das mais variadas podem ser simuladas e alteradas, os valores iniciais de comprimento diâmetro calculados podem posteriormente ser alterados e testados a fim de se obter o melhor desempenho de um motor de combustão interna.

2.4 Formula SAE (Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade)

A competição estudantil Formula SAE teve início em janeiro de 1980, com o então professor substituto da Universidade do Texas, Ron Matthews, que fundou na universidade a filial estudantil da SAE (*Society of Automotive Engineers*). Um mês após sua fundação, juntamente com mais três membros da filial (Mike Best, Robert Edwards e John Tellkamp), decidiram a participação na competição de Mini Indy organizada pela SAE. A competição consistia numa corrida de asfalto em veículos que utilizavam um motor de 5 HP da Briggs & Stratton, porém naquele ano, a competição foi cancelada pela SAE (SAE, 2018).

Os quatro, ao analisar as opções de competições de corrida de asfalto, decidiram que queriam iniciar uma nova competição, que foi denominada Formula SAE. Dentre as regras, se destacava a opção de utilizar quaisquer motores quatro tempos, incluindo Diesel e Wankel, porém foi imposta a admissão uma restrição, onde deveria ser aplicado um restritor de 25,4 mm de diâmetro. Modificações no motor eram incentivadas a fim de melhorar seu desempenho. O modelo de competição foi sugerido a SAE, que deu sua aprovação (SAE, 2018).

Uma vez que competições de veículos de alto desempenho estavam escassas devido ao fim da Mini-Indy, a competição Formula SAE foi aprovada e teve início no ano de 1980. Três grandes montadoras, General Motors, Ford e Chrysler, viram grandes oportunidades na competição, e ajudaram a impulsionar o Formula SAE, uma vez que os engenheiros recém-formados das universidades saíam com conhecimentos técnicos e acadêmicos extras de grande valia para as mesmas (SAEBrasil, 2018).

O apoio das grandes montadoras fortaleceu devido à troca de conhecimentos e desenvolvimento de pesquisas. Além de contratar os alunos, produtos específicos para o Formula SAE foram desenvolvidos (SAEBrasil, 2018).

A competição Fórmula SAE foi criada no Brasil no ano de 2004 e é realizada anualmente. Segundo a SAE Brasil, a competição Fórmula tem como objetivos “propiciar aos estudantes de Engenharia a oportunidade de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, desenvolvendo um projeto completo e construindo um carro tipo Fórmula”. Em 2016, ocorreram mais de 1030 inscrições, envolvendo veículos elétricos e a combustão. As equipes que ficarem mais bem classificadas ganham a oportunidade de ir para os EUA, onde irão participar de duas competições internacionais (SAEBrasil, 2018).

São realizadas provas estáticas, dinâmicas e apresentações técnicas das equipes. Durante as provas estáticas, as equipes demonstram se o veículo possui as especificações demonstradas no projeto. Durante as apresentações técnicas, o projeto é demonstrado, bem como os custos e apresentação de *marketing*, onde o estudante tenta vender o seu veículo para os jurados.

Meses antes da competição, relatórios de custos, estrutura, atenuador de impacto e projeto são enviados pelos estudantes ao comitê organizador. Os relatórios são avaliados por engenheiros especialistas, e já valem como a primeira parte da avaliação dos protótipos. As provas dinâmicas são realizadas no segundo dia do evento. Todas as provas são pontuadas de maneiras diferentes, de maneira a garantir que o melhor conjunto de projeto e carro vença a competição.

2.5 Software Ricardo WAVE

Ricardo é uma empresa de consultoria que atua nos mais diversos setores onde a engenharia está presente, dentre eles transportes, incluindo carros de passeio, veículos comerciais, ferrovias. A empresa Ricardo atua também no setor defesa, energia, análise de recursos e meio ambiente. A lista de clientes da empresa inclui clientes dos mais diversos ramos, tais como: instituições financeiras, agências governamentais, empresas de energia e fabricantes de automóveis (Ricardo, 2018).

A empresa Ricardo visa lidar com os desafios estratégicos dos seus clientes, executando tarefas que incluem desenvolvimento de estratégias para redução de custos,

gerenciamento de segurança, análise de conformidade regulatória e avaliações de impactos ambientais. Além dos serviços de consultoria técnica, recursos internos de engenharia permitem projetar e fornecer protótipos de conjuntos complexos, incluindo motores, transmissões, motores elétricos e geradores, baterias e sistemas de células de combustível (Ricardo, 2018).

O *software Ricardo WAVE* foi desenvolvido pela empresa Ricardo e é utilizado para a análise de desempenho de motores. O *software* oferece pacotes de extensão que poderão ser utilizados para diferentes fins, auxiliando no dimensionamento de componentes, otimização de motores, simulações acústicas, testes com modelos variados de transmissão, admissão, combustão e escape, permitindo a simulação completa do veículo (Wave, 2018).

O *software* é usado em todo o processo de projeto do motor, desde os primeiros estudos conceituais até as investigações detalhadas dos motores que já se encontram em produção. O *Wave* pode ser utilizado para melhorar a eficiência volumétrica, projetando sistemas de reforço complexos, melhorando a resposta transitória ou extraindo o máximo desempenho de um motor de corrida (*WavePerformance*, 2018).

Parâmetros que abrangem todo o motor e seus componentes são inseridos no *software*, dados do ambiente como temperatura e pressão, geometrias da admissão e escape, como diâmetros, comprimentos e curvas, parâmetros de abertura das válvulas, comprimentos de *runners* internos do motor, dentre outros. Diversos dados podem ser extraídos do *software* após a inserção dos parâmetros, como curvas de torque e potência, dados do fluxo interno de gases presentes na combustão, comportamento da turbina para o caso de motores sobrealimentados, dentre outros. O modelo de um motor sobrealimentado utilizando o *software Ricardo WAVE* é mostrado na Figura 8.

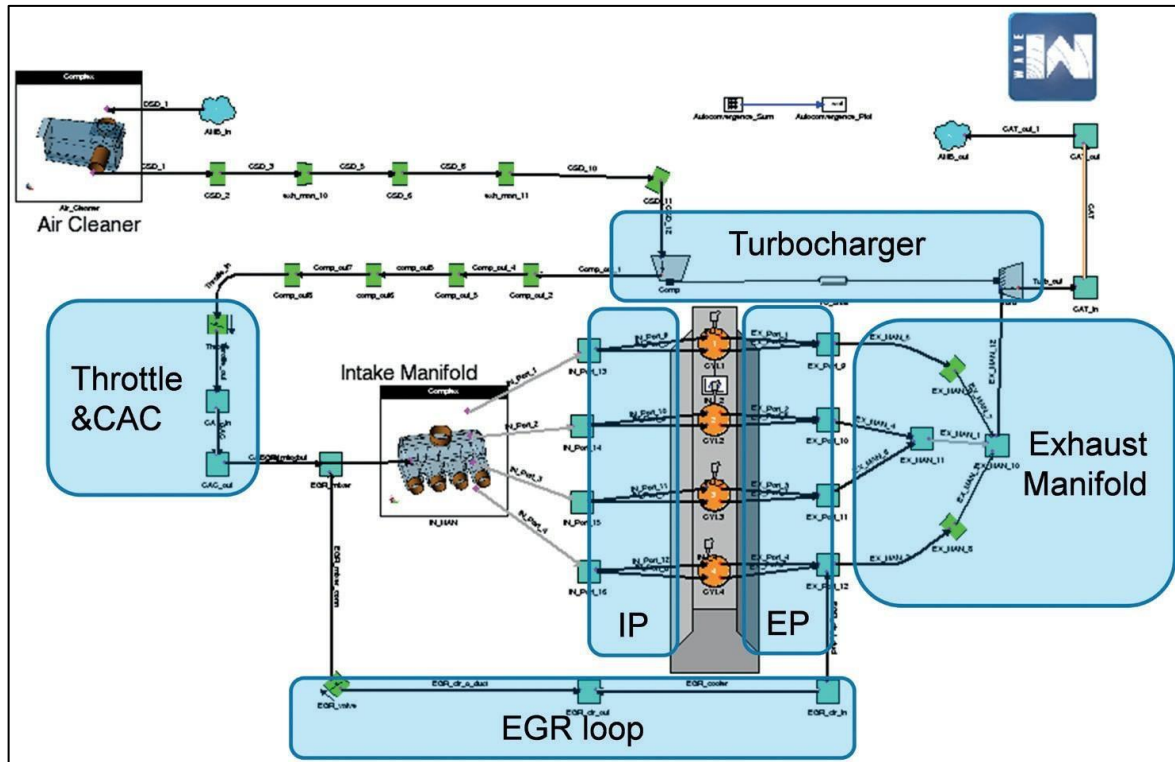


Figura 8 – Modelo de um motor sobrealimentado no *software Ricardo WAVE*
 Fonte: Wave, 2018

Na Figura 8 está presente o modelo completo de um motor, com todos os componentes da admissão e exaustão. São inseridos os dutos de admissão e escape, as juntas, o *plenum*, corpo de borboleta, filtro de ar, é visto também a presença do turbo, que está ligado ao sistema de escape e de admissão.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como finalidade demonstrar as formas que deram o desenvolvimento da pesquisa a respeito do desempenho de um motor de combustão interna com a adoção de diferentes geometrias do sistema de exaustão. Será apresentada a natureza da pesquisa, o tipo, as variáveis e indicadores coletados, o instrumento de captação e a tabulação dos dados.

3.1 Tipo de Pesquisa

De maneira filosófica Minayo (2003) define pesquisa como uma atividade básica das ciências que buscam a realidade, uma atitude e uma prática teórica de constante procura que define um processo inacabado e permanente. Já de uma maneira mais racional, Gil (2002) define em seu livro “Como elaborar projetos de pesquisa” o termo pesquisa como “procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas a problemas que são propostos”. Quando não se dispõe de informações para responder um determinado problema, ou quando a informação se encontra desordenada, a pesquisa é requerida (GIL, 2002). Ainda, uma terceira definição para pesquisa, encontrada no dicionário online Michaelis, pesquisar significa buscar, indagar, inquirir e investigar.

A pesquisa pode ser classificada de duas maneiras, como qualitativa ou quantitativa (MINAYO, 2003). O método qualitativo é baseado na interpretação, um conjunto de técnicas deve ser adotado para construir uma realidade buscando estudar as conjunturas difíceis de serem descritas numericamente, as informações são reunidas pela análise, descrição e gravação. Já o conjunto de informação que podem ser quantificadas utilizando métodos estatísticos, opiniões e dados obtidos de acordo com pesquisas, análises numéricas e teste é denominada pesquisa quantitativa (SILVA, 2004).

As razões pela qual se realizam pesquisas podem ser de ordem intelectual ou ordem prática, enquanto a primeira decorre do desejo de conhecer pela própria satisfação intelectual, a segunda vem do desejo de contribuir com formas de fazer algo de maneira mais eficiente e eficaz (GIL, 2002)

O objetivo geral de uma pesquisa, segundo Gil (2002) pode ser classificado em três grandes grupos, são eles: exploratórios, descritivos e explicativos. As pesquisas exploratórias

têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições, elas visam proporcionar familiaridade com um determinado problema, e torna-lo mais explícito.

As pesquisas descritivas visam à descrição de características de determinado fenômeno ou estabelecer relações entre variáveis. Já as pesquisas explicativas, identificam os fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos, de modo a aprofundar o conhecimento da realidade, explicando a razão e o porquê das coisas (GIL, 2002).

Fonseca (2002) especifica a pesquisa documental como sendo aquela elaborada através de diversas fontes sem tratamentos analíticos. Já a pesquisa ação é realizada e concebida a partir de bases empíricas em estreita associação, com a ação ou resolução de um problema. Por fim, segundo Yin (2001), o estudo de caso envolve um estudo minucioso e exaustivo de um ou mais objetos de maneira a permitir um amplo e detalhado conhecimento, com a lógica do planejamento, da coleta e da análise de dados.

A pesquisa experimental, por meio da manipulação de variáveis controladas adequadamente, possui o intuito de observar, examinar e interpretar as alterações e reações ocorridas em seu objeto de pesquisa, utilizando técnicas e equipamentos adequados, ou seja, selecionar variáveis capazes de influenciar ou definir determinado fenômeno (GIL, 2002).

Baseado nas informações apresentadas, este trabalho consiste, quanto à abordagem de uma pesquisa, em uma pesquisa quantitativa, pois utilizam de dados numéricos, cálculos e processo de análise estatística. Quanto ao objetivo, em uma pesquisa descritiva, devido ao fato de que irá se observar e analisar a entrega de potência e torque de um motor de combustão interna em funções de diferentes geometrias do sistema de escape, e relacionar alterações nas variáveis do sistema de escape com a desempenho do motor. O presente trabalho se enquadra ainda como uma pesquisa experimental, haja vista que são realizados testes com diferentes sistemas de exaustão concebidos de maneira empírica, e são concebidas relações a partir disso.

3.2 Materiais e Métodos

Um estudo bibliográfico foi realizado a fim de auxiliar na compreensão do processo de exaustão dos gases através das válvulas em um motor de combustão interna, bem como um estudo acerca do sistema de escape completo e de sua contribuição para o funcionamento e rendimento do motor.

Depois de feito o estudo bibliográfico e compreensão dos sistemas envolvidos, a segunda etapa do trabalho consistiu na escolha de um motor que teria todos seus parâmetros já presentes na biblioteca do *software Ricardo WAVE*, após discussão, o motor da CB600F foi o selecionado.

A terceira etapa do trabalho foi realizada no *software SolidWorks 2014*, onde foram desenhados sistemas de exaustão em 3D baseados no motor selecionado. A quarta etapa consistiu no uso do *software Ricardo WAVE*, onde os dados referentes as geometrias dos sistemas de escape foram inseridas, em seguida foram gerados documentos de texto e gráficos contendo dados referentes aos dados de desempenho do motor com cada sistema de escape.

Por fim, na quarta etapa, é feita a comparação dos dados de desempenho, torque, através de uma planilha utilizando o *software Excel*, possibilitando a conclusão e fechamento de todo o estudo. A coleta e comparação dos dados permite a comprovação de variações no desempenho do motor com a adoção de diferentes sistemas de escape.

O fluxograma que descreve as etapas e os materiais deste trabalho é mostrado na Figura 9

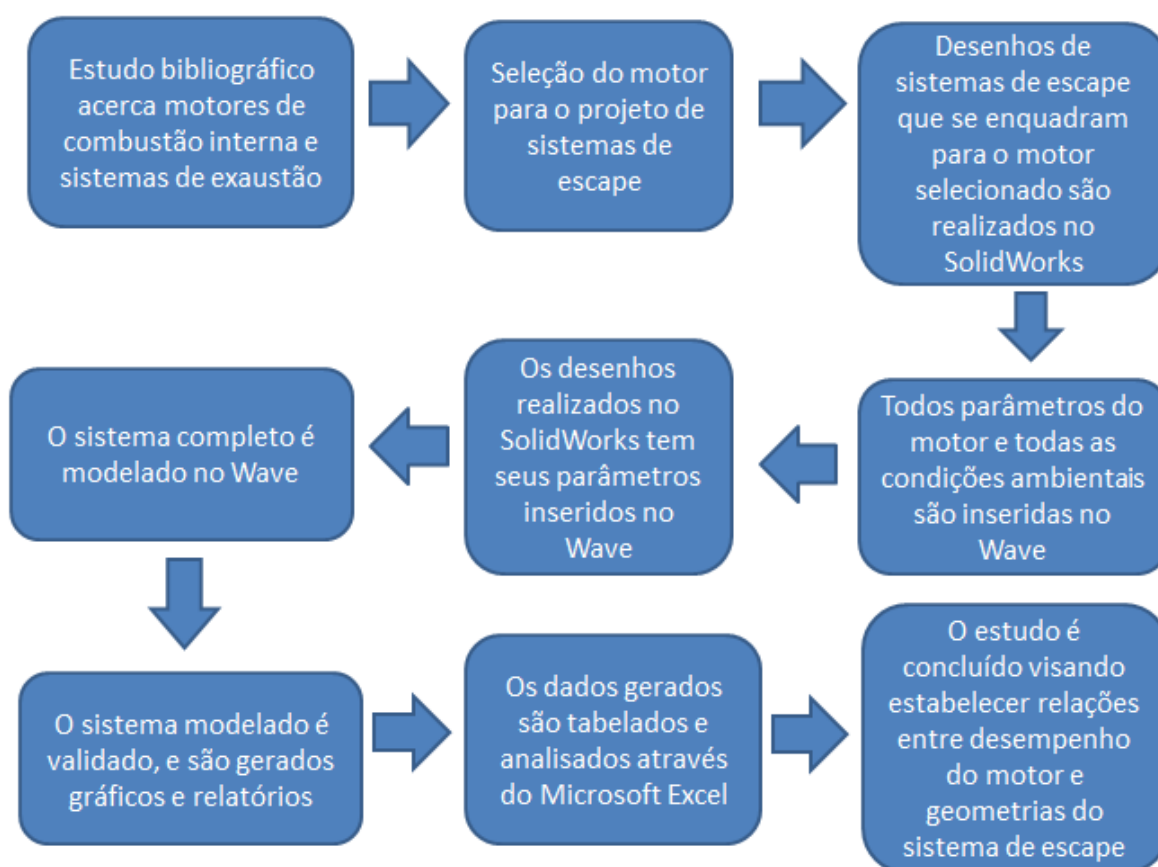


Figura 9 – Fluxograma do trabalho proposto
Fonte: Pesquisa direta, 2019.

3.3 Variáveis e Indicadores

Gil (2008) define o termo variável como uma medida ou classificação, uma quantidade que varia em função de indicadores. Variável é um conceito operacional que contém ou apresenta propriedade, aspecto, fator ou valores. As variáveis podem ser classificadas do ponto de vista qualitativo ou quantitativo.

Variáveis classificadas como quantitativas são divididas em discretas ou contínuas, sendo que a primeira apresenta os possíveis valores que formam um conjunto finito de números, e a segunda mostra que essas estão dentro de um intervalo, aberto ou fechado, dos números reais. As variáveis qualitativas podem ser nominais, onde não existe ordenação nas possíveis respostas, ou então ordinais, que existe determinada ordem nas possíveis respostas.

O conceito variável provém da Matemática que naturalmente é de essência quantitativa, fazendo com que as variáveis usualmente sejam classificadas como contínuas e discretas (GIL, 2008).

O trabalho em questão possuiu a grande maioria das variáveis classificadas como quantitativas, e os indicadores utilizados para defini-las podem ser vistos na Tabela 3.

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

Reunir documentos, provas, pesquisas sobre determinado tema é conhecida como coleta de dados, e deve ser feita de maneira organizada para facilidade em análises futuras. A coleta de dados visa fornecer o embasamento necessário para o andamento da pesquisa.

Para o trabalho, a coleta de dados é feita através de livros, manuais, normas, tabelas, catálogos, e de outros trabalhos já realizados, que auxiliam no entendimento e análise de desempenho de motores de combustão interna, bem como dos sistemas de escape.

Haverá também uma parte experimental realizada no *software Ricardo WAVE*, onde ocorrerão observações, a fim de coletar dados experimentais que serão utilizados na determinação do efeito de diferentes sistemas de exaustão no desempenho de um motor de combustão interna.

Tabela 3 - Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Potência do Motor	Eficiência térmica Trabalho do Ciclo Otto Cilindrada Relação de compressão Tempos Poder calorífico do combustível Massa específica do combustível
Torque do Motor	Potência Rotação por minuto
Sistema de Exaustão (escape) do Motor	Abertura da válvula de escapamento Diâmetro da válvula de escapamento Comprimento e diâmetro do <i>runner</i> Temperatura de saída dos gases pelas válvulas de escape Diâmetro, comprimento e grau de curvatura dos <i>headers</i> Tipo de junção dos <i>headers</i> (4:1 ou 4:2:1) Diâmetro e comprimento das juntas Comprimento, diâmetro e grau de curvatura do tubo de escape

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

3.5 Tabulação de Dados

A partir dos dados obtidos pelo *software Ricardo WAVE*, serão realizados cálculos no *software Excel* que permite rápida interação e maior facilidade para determinar ganhos e perdas de rendimento do motor em função das geometrias do sistema de escape, os resultados de torque e potência serão comparados. Além disso, é utilizado o *software Microsoft Word* para relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Foram mostradas nesse terceiro capítulo as classificações de uma pesquisa, assim como em quais esse trabalho se enquadra. Ferramentas e técnicas utilizadas para analisar o desempenho de um motor de combustão interna em função de diferentes sistemas de escape foram apresentadas. Apontou-se também todos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento efetivo da pesquisa.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos no *software Ricardo WAVE* do desempenho do motor de combustão interna em função dos sistemas de escape desenvolvidos. O modelo de sistema de exaustão proposto foi inicialmente desenvolvido no *software SolidWorks*, para posteriormente ter seus parâmetros inseridos no *software Ricardo WAVE*. Serão demonstrados os valores conseguidos no *software Ricardo WAVE* em planilhas do *software Excel* e em gráficos gerados pelo próprio *WAVE*. Será feita uma comparação dos valores, a fim de se saber quais parâmetros alteram para mais ou para menos o desempenho do motor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de cumprir o intuito do trabalho, a metodologia descrita no capítulo 3 foi seguida. Foi realizado um estudo acerca dos motores de combustão interna, bem como do sistema de escape e sua relação com a eficiência final do sistema. O segundo passo a ser adotado seria a escolha de um motor compatível com a proposta do projeto FórmulaSAE. O motor selecionado foi o da motocicleta CB600F Hornet, ano 2006, mostrado na Figura 10.



Figura 10 – Motor Honda Hornet CB600F
Fonte: Pesquisa direta, 2019.

O motor da Figura 10 foi adquirido pelo projeto Fórmula Escola de Minas UFOP (FEMU) seguindo o pretexto do melhor custo/benefício. Além disso, o *software* utilizado para análise pretendida no trabalho (*Ricardo WAVE*) possui em sua biblioteca um motor com características semelhantes.

Os dados referentes ao motor encontrados em seu manual estão detalhados na Tabela 4. Inicialmente, as equações de Bell (1980) foram utilizadas como base para o comprimento e diâmetro iniciais. Cabe salientar que as equações desenvolvidas por Bell (1980) são empíricas resultantes dos testes de bancada realizados com diferentes sistemas de exaustão. As equações 2 e 3 foram utilizadas, tendo seus parâmetros inseridos no Excel para auxiliar possíveis

mudanças nos valores de entradas. Os valores de entrada foram encontrados nos manuais de serviços e instruções do motor Honda CB600F 2006.

Tabela 4 - Dados técnicos Motor Honda CB600F 2006 e cálculos simplificados de Bell

Dados técnicos Motor Honda CB600F 2006			
Tipo	4 tempos, refrigerado a líquido, duplo comando no cabeçote (DOHC), 4 válvulas por cilindro		
Disposição dos cilindros	4 cilindros em linha, inclinados 30° em relação à vertical		
Diâmetro e curso	65,0 mm por 45,2 mm		
Relação de compressão	12:1		
Cilindrada	599,9 cm ³		
Potência máxima	96,5 cv a 12000 rpm		
Torque máximo	6,43 kgf a 9500 rpm		
Vela de ignição	CR9EH-9 (NGK)		
Folga dos eletrodos	0,8 – 0,9 mm		
Rotação de marcha Lenta	1300 +- 100 rpm		
Folga da válvula de Admissão	0,16 mm		
Folga da válvula de Escapamento	0,22 mm		
Sistema de válvulas	Acionado por corrente, DOHC (duplo comando no cabeçote)		
Válvula de admissão	15° APMS		
Válvula de admissão	35° DPMI		
Válvula de escapamento	38° APMI		
Válvula de escapamento	7° DPMS		
Sistema de lubrificação	Forçado por bomba de óleo e cárter úmido		
Bomba de óleo	Trocoidal		
Sistema de arrefecimento	Arrefecido por líquido		
Filtro de ar	Elemento de papel		
Peso seco do motor	63,2 kg		
Sequência de ignição	1-2-4-3		
Comprimento e diâmetro dos dutos simplificado segundo Equação de Bell			
Entradas		Saídas	
Rotação média de trabalho	8000 rpm	Comprimento total sistema de escape	500,4 mm
Abertura da válvula de escape	38 (°APMI)	Diâmetro	58,9 mm
Cilindrada	600 cc		

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

Considerando os cálculos iniciais, foram feitos desenhos do sistema de escape no *software SolidWorks* que atendiam aos requisitos da estrutura do veículo. O comprimento

total almejado para o sistema de escape foi aproximadamente ao do cálculo realizado no *software* Excel, ou seja, 500,4 mm, e o diâmetro de 58,9 mm.

4.1 Validação do motor com sistema de exaustão e análise de dados

Os dados relativos à admissão e ao bloco do motor foram encontrados na biblioteca do *software* Ricardo WAVE, tendo sido modificado apenas um parâmetro na admissão, onde foi inserido um restritor a fim de cumprir os requisitos da competição do Fórmula SAE. O objetivo deste trabalho é o dimensionamento do sistema de exaustão, sendo que o sistema de admissão e o bloco do motor são parâmetros secundários.

Devido a limitações na estrutura do veículo tipo Fórmula, não foi possível deixar o comprimento de todos os *Headers* semelhantes. O comprimento de cada duto do sistema de escape e os diâmetros pode ser vistos na tabela 5.

Tabela 5 - Comprimento dos *Headers* e Tubo de escape 4:1 e diâmetros

	Comprimento 1 (mm)	Curva (°)	Comprimento 2 (mm)	Total (mm)
<i>Header</i> 1	68,84	90	281,65	650,49
<i>Header</i> 2	38,14	90	201,25	539,39
<i>Header</i> 3	112,88	90	137,79	550,67
<i>Header</i> 4	71,07	90	127,27	498,34
Comprimento do Tubo de escape 4:1	300 mm			
Diâmetro do <i>Runner</i>	33 mm			
Diâmetro dos <i>Headers</i>	33 mm			
Diâmetro do tubo de escape 4:1	60 mm			

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

Os *runners* são pequenos dutos localizados no interior do cabeçote do motor. Eles estão logo após a válvula de escape e terminam ao sair do cabeçote, onde é ligado ao coletor de escape ou ao *header* respectivo de cada cilindro. Normalmente, o diâmetro do coletor ou dos *headers* são semelhantes ao dos *runners*, devido a isso, o valor de 33 mm para o diâmetro do *header* foi selecionado.

Os dados relativos a cada *header* foi inserido no *software* Ricardo WAVE. Cada duto que forma um *header* deve ter suas informações fornecidas, dentre elas o comprimento, diâmetro, temperatura interna, rugosidade da superfície. Cada curva do tubo de escape é representada por uma junta, que é utilizada para unir dois ou mais dutos retos. Para as juntas

são inseridos os dados relacionados aos ângulos de curvatura, bem como diâmetro de entrada na junta e saída.

Na figura 8 é possível ver a página onde são inseridos os dados de um duto. Como exemplo, houve a seleção de um dos dutos (marcado em vermelho), após abre-se uma janela para inserção dos dados deste duto. As figuras 11 e 12 representam as páginas onde são adicionados os dados da junta.

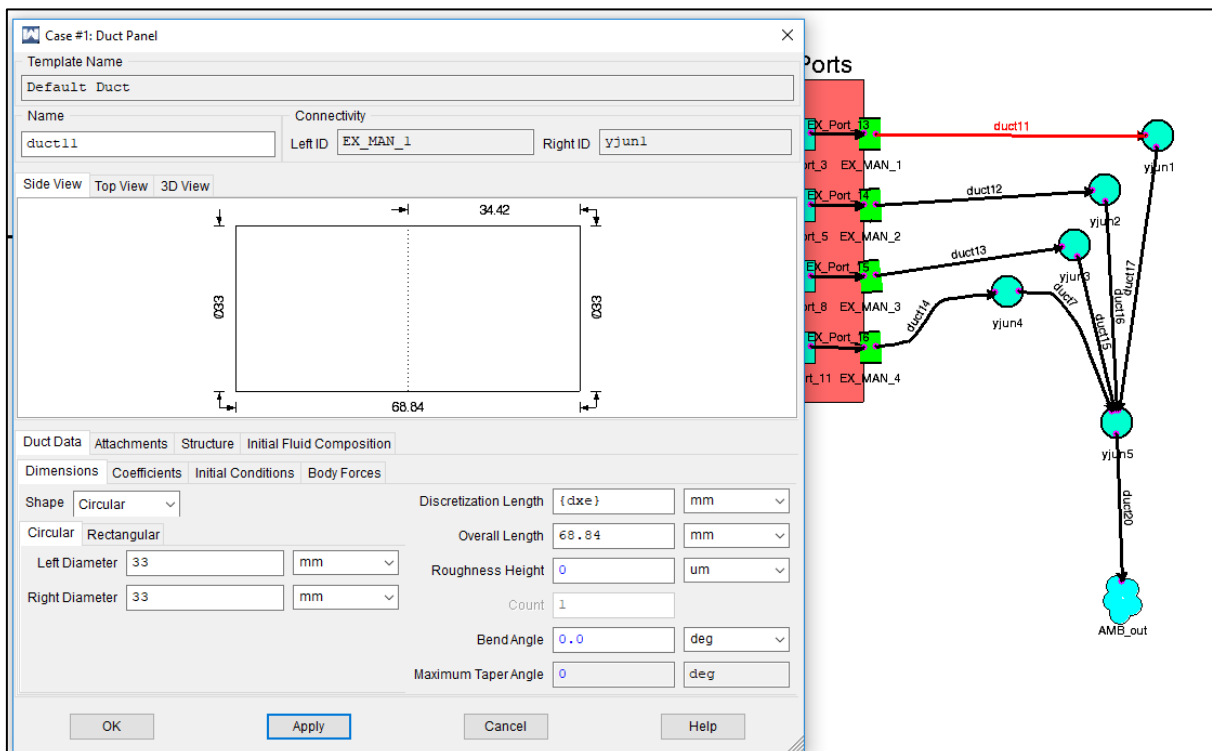


Figura 11 - Inserção de dados de um duto que forma um *header*. Marcado em vermelho atrás, o duto selecionado.

Fonte: Pesquisa direta.

Posteriormente, um tubo de escape para ligar todos os *headers* em um só foi selecionado, o comprimento foi 300 mm e o diâmetro 60 mm, a fim de fornecer dimensões parecidas com as calculadas segundo a equação de Bell (1980). O modelo completo do sistema do motor de combustão interna pode ser visto na Figura 14.

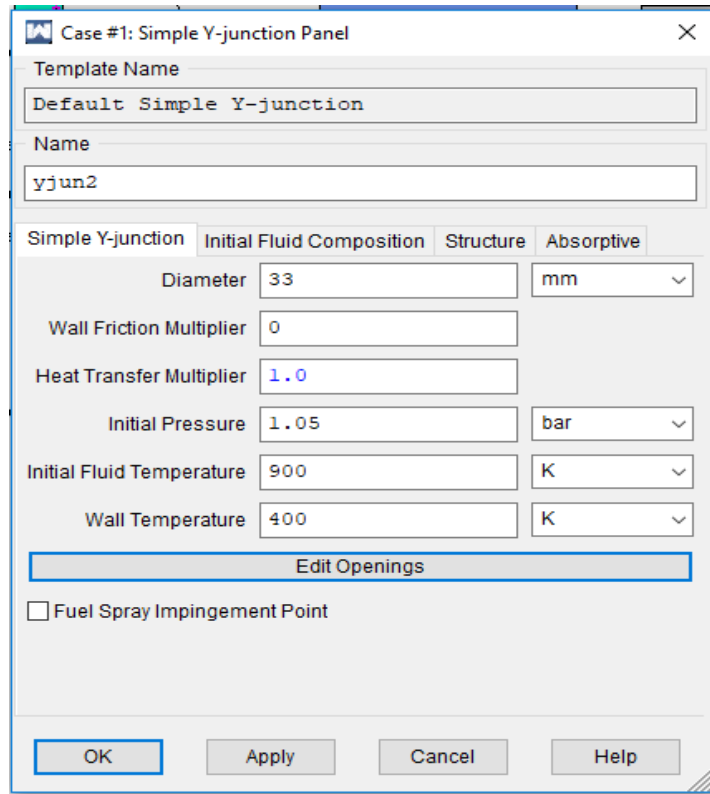


Figura 12 - Dados de uma junta no *software Ricardo WAVE*.
Fonte: Pesquisa direta, 2019.

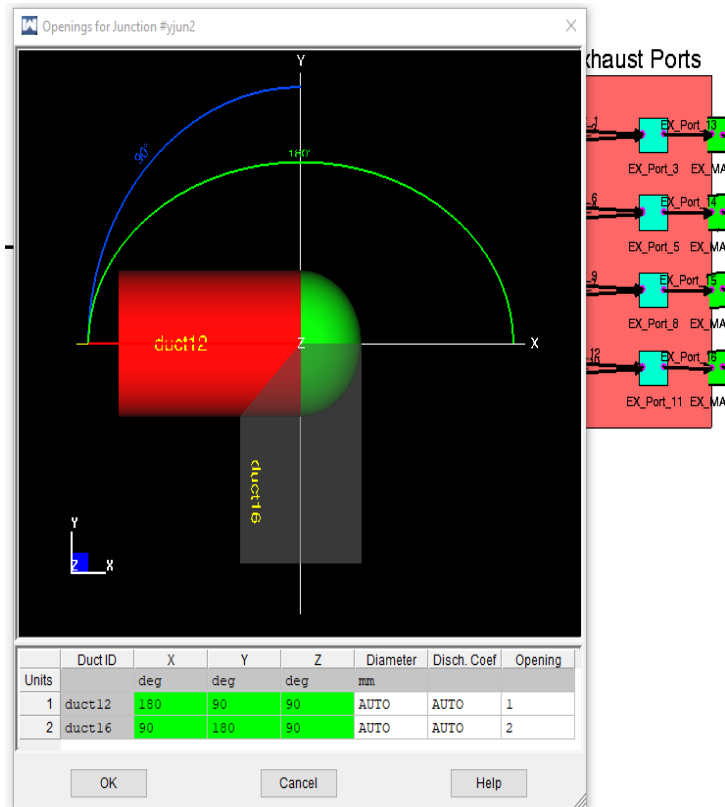


Figura 13 - Dados relacionados a curvatura da junta no *software Ricardo WAVE*
Fonte: Pesquisa direta, 2019.

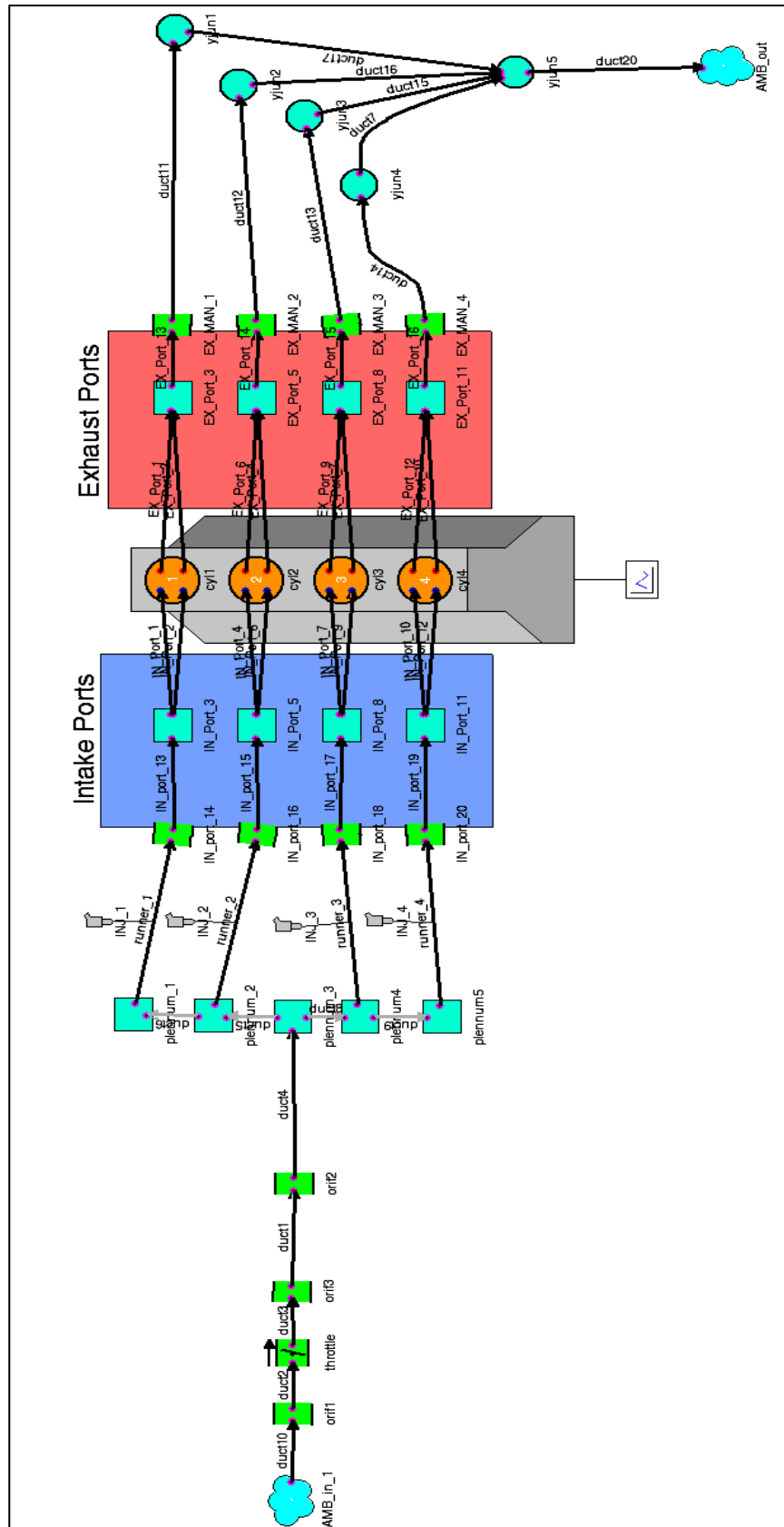


Figura 14 - Modelo completo de um motor de combustão interna
 Fonte: Pesquisa direta, 2019.

Após toda modelagem do motor, em especial do sistema de escape, o modelo precisa ser validado pelo *software Ricardo WAVE* para acusar possíveis erros e divergências de informações. A partir daí podem ser gerados relatórios, informando dados individuais de cada componente do sistema, seja da admissão, do bloco do motor, ou do sistema de escape. Também podem ser gerados relatórios e gráficos de varredura, que é feito a partir do modelo completo. Os dados variam desde temperaturas e pressões, tempo que a mistura usa para percorrer cada componente, até dados de eficiência volumétrica, potência e torque.

São de interesse do trabalho os dados relativos a potência e torque do modelo. O gráfico da Figura 15 mostra a curva de potência do modelo especificado, enquanto o gráfico da Figura 16 contém a curva de torque.

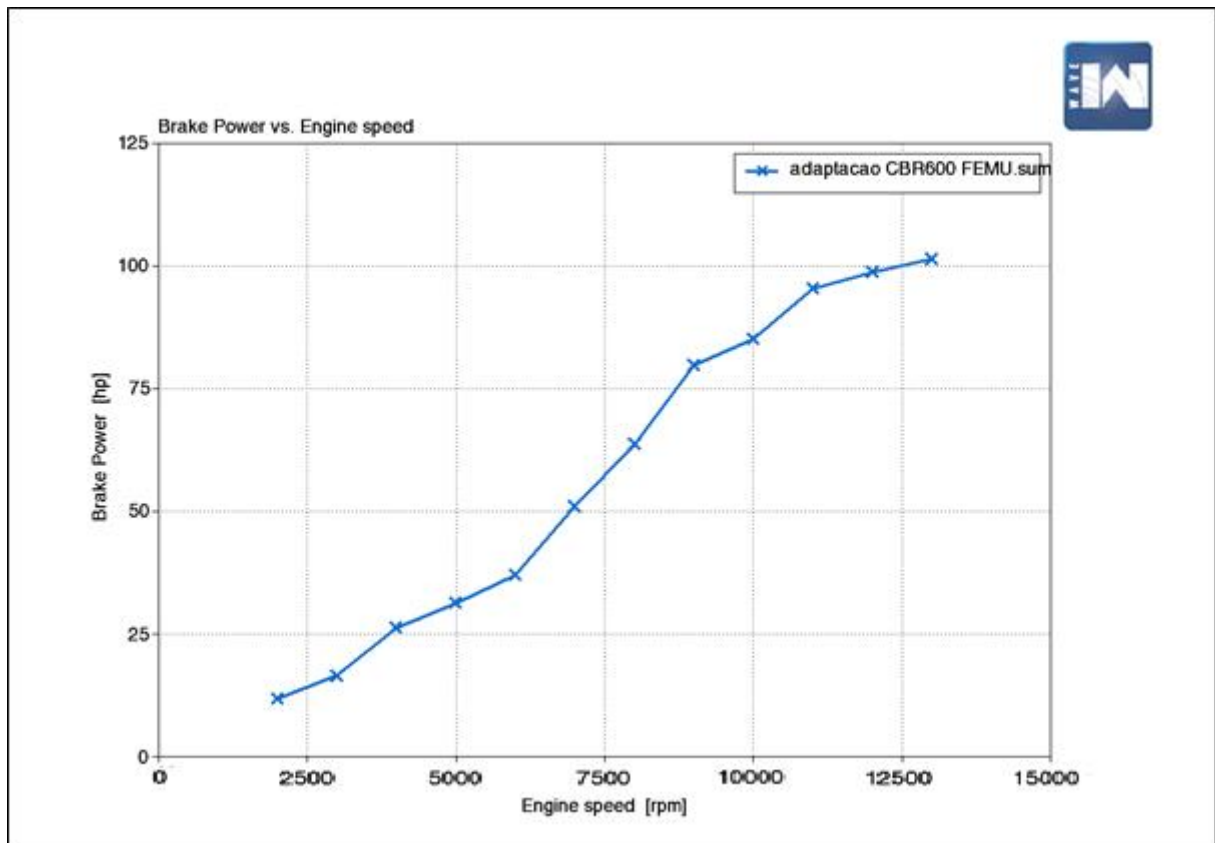


Figura 15 - Curva de potência do modelo.
Fonte: Pesquisa direta, 2019.

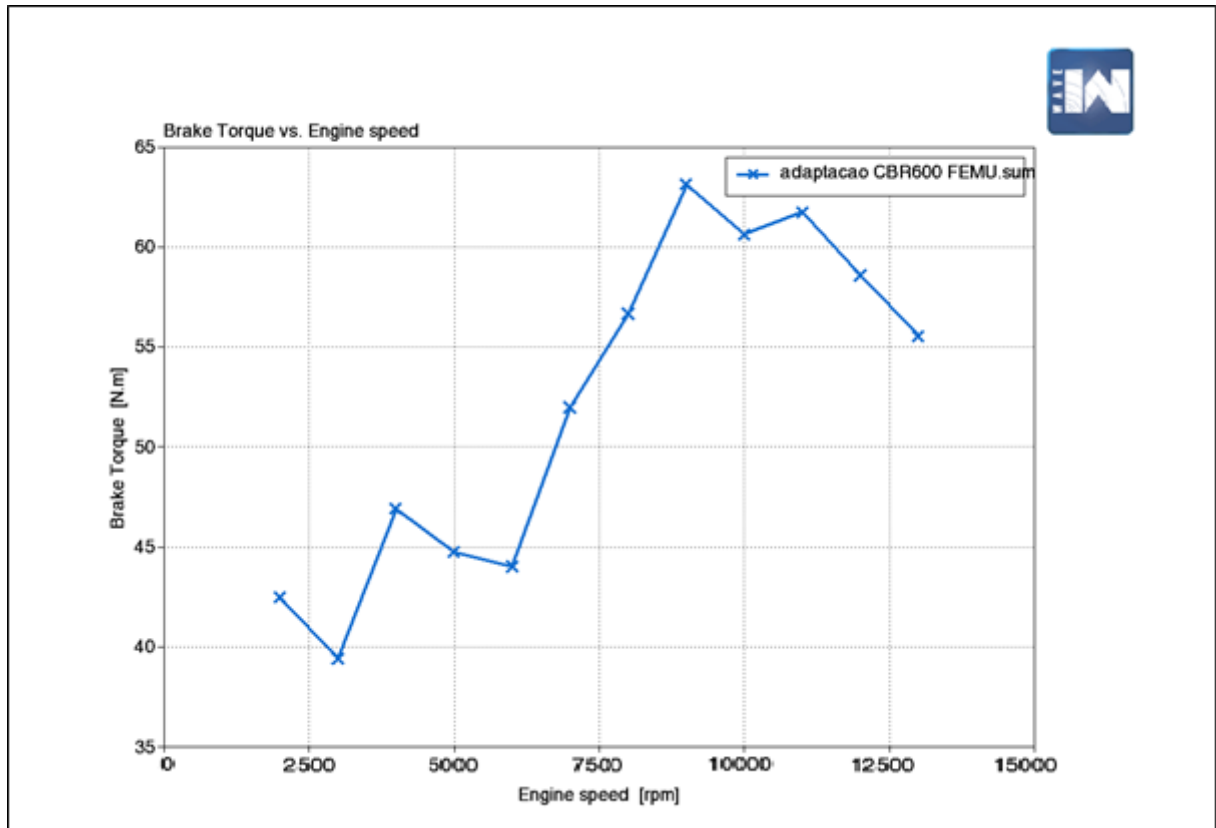


Figura 16 - Curva de torque do modelo
Fonte: Pesquisa direta, 2019.

O modelo de motor simulado, após o dimensionamento do sistema de escape seguindo as fórmulas de Bell (1980), tiveram como valores de potência e torque máximo iguais a 101 hp e 63,3 Nm respectivamente. Mesmo após a restrição de ar imposta na admissão pelo restritor, os valores encontrados são ligeiramente superiores ao do motor Honda original, pertencente à motocicleta CB600F, que possui potência de 96,5 hp e torque de 63,07 Nm (convertido de kgf para Nm).

O valor superior encontrado no modelo de potência e torque pode ser atribuído ao novo sistema de escape, menos restritivo a exaustão de gases que o da motocicleta original, uma vez que o modelo não possui o silenciador. Os dados de torque e potência estão encontrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados de curva e potência do modelo

Propriedades	Modelo	Motor Honda CB600	Diferença percentual (%)
Torque (Nm)	63,30	63,07	0,36
Potência (hp)	101	96,50	4,66

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

4.2 Estudo de casos

A fim de dimensionar e otimizar o sistema de escape para o melhor rendimento do motor, alguns modelos foram simulados no *software Ricardo WAVE*.

Foi utilizado como base para os modelos, os parâmetros iniciais feitos com base nas equações de Bell (1980), apresentados na seção anterior. Foram simulados modelos variando alguns parâmetros: o comprimento do tubo 4:1 utilizado para unir os quatro *headers* e o diâmetro do duto 4:1. Posteriormente, uma análise de otimização foi realizada com o intuito de analisar possíveis ganhos de potência e torque.

4.2.1 Variação do comprimento do tubo 4:1

O comprimento do tubo 4:1 foi analisado desde 240 mm até 360 mm. A Tabela 7 mostra os valores de torque e potência de acordo com essa variação. A tabela mostra também as diferenças percentuais entre o torque e a potência do modelo validado na seção 4.1 com os novos protótipos de sistema de exaustão.

Tabela 7 - Valores de torque e potência variando o comprimento do duto 4:1

Caso	Comprimento Tubo 4:1(mm)	Torque (Nm)	Diferença torque (%)	Potência (hp)	Diferença na potência (%)
1	240	63,1	-0,32	101,7	0,69
2	260	64,5	1,90	102,2	1,19
3	280	63,3	0,00	101,8	0,79
4	320	64,1	1,26	101,1	0,10
5	340	63,5	0,32	100,7	-0,30
6	360	63,3	0,00	101,8	0,79
7	450	64,7	2,21	101,5	0,50
8	150	64,3	1,58	99,0	-1,98

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

As figuras 17 e 18 apresentam gráficos contendo a curva de torque e potência do motor de combustão interna com diferentes comprimentos no tubo 4:1.

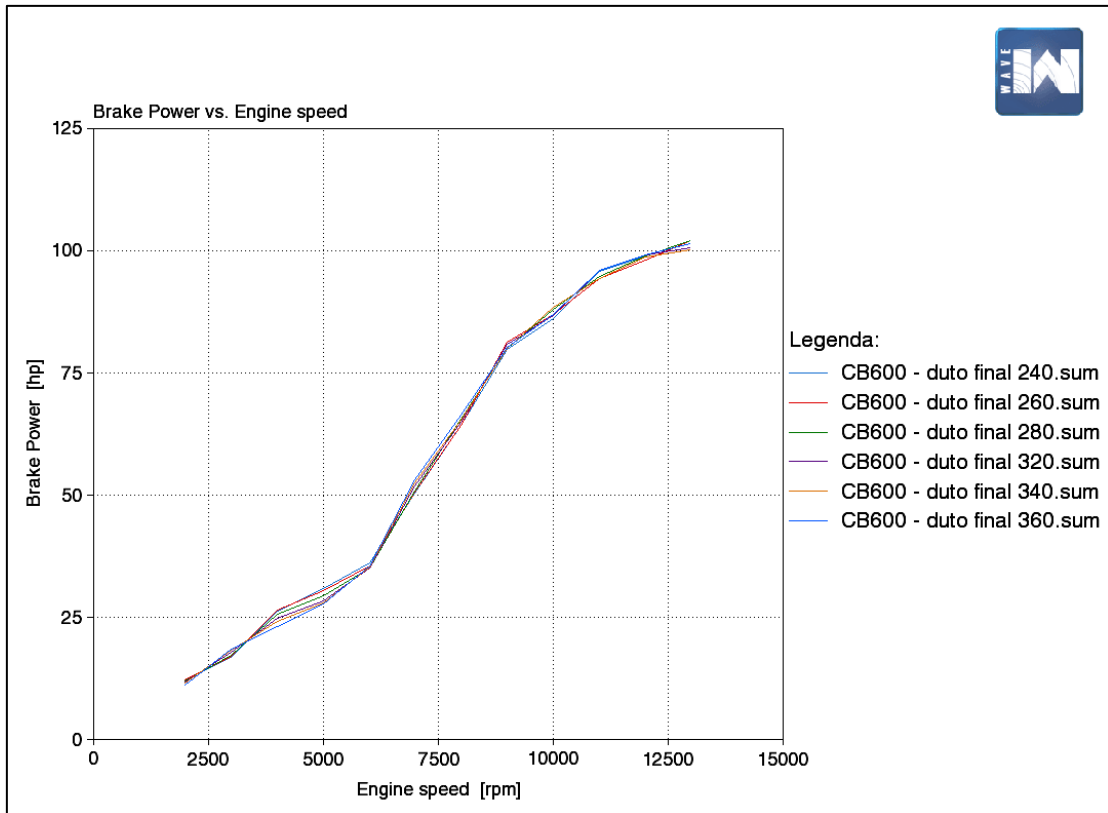


Figura 17 - Gráfico comparativo de potência com variação no comprimento do tubo 4:1
 Fonte: Pesquisa direta, 2019

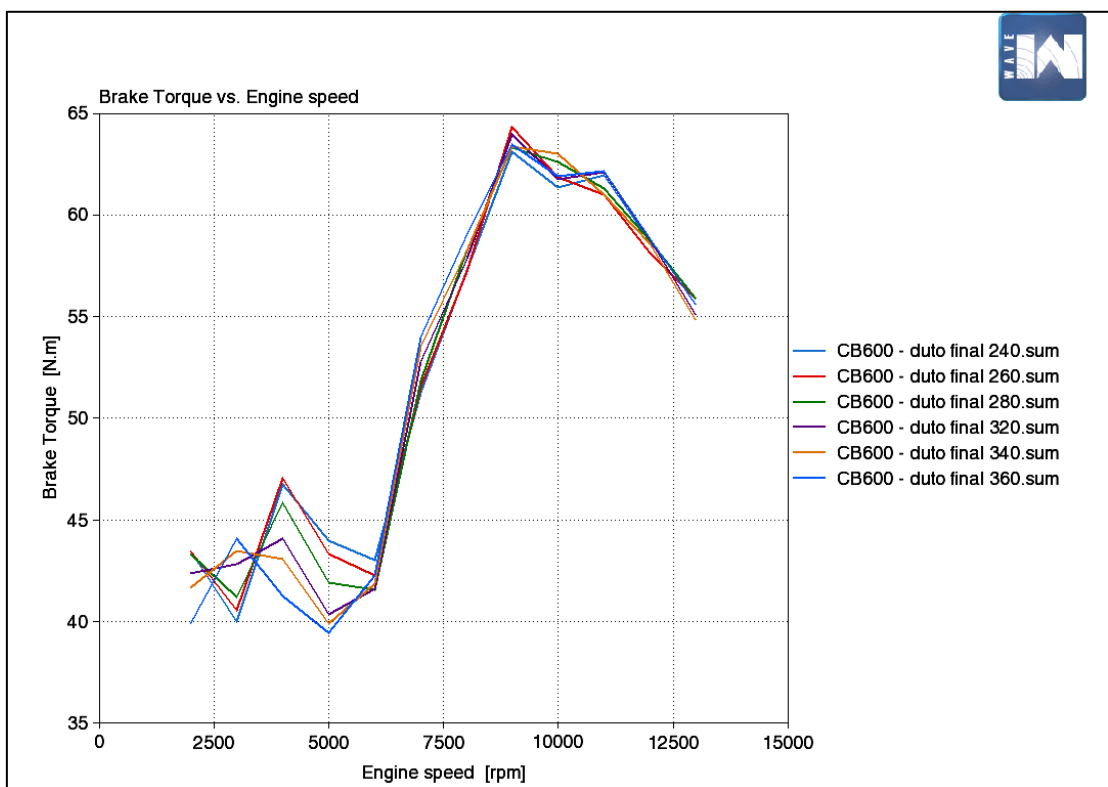


Figura 18 - Gráfico comparativo de torque com variação no comprimento do tubo 4:1
 Fonte: Pesquisa direta, 2019

4.2.2 Variação do diâmetro do tubo 4:1

O diâmetro do tubo 4:1 foi analisado desde 45 mm até 75 mm. A Tabela 8 mostra os valores de torque e potência de acordo com essa variação. A tabela mostra também as diferenças percentuais entre o torque e a potência do modelo validado na seção 4.1 com os novos protótipos de sistema de exaustão. As figuras 19 e 20 apresentam gráficos contendo a curva de torque e potência do motor de combustão interna com diferentes diâmetros no tubo 4:1.

Tabela 8 - Valores de torque e potência variando o diâmetro do duto 4:1

Caso	Diâmetro Tubo 4:1(mm)	Torque (Nm)	Diferença torque (%)	Potência (hp)	Diferença na potência (%)
1	45	63,7	0,63	102,6	1,58
2	50	64,5	1,90	102,2	1,19
3	55	63,45	0,24	102,2	1,19
4	65	63,2	-0,16	101,8	0,79
5	70	63	-0,47	101,5	0,50
6	75	62,8	-0,79	101,5	0,50

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

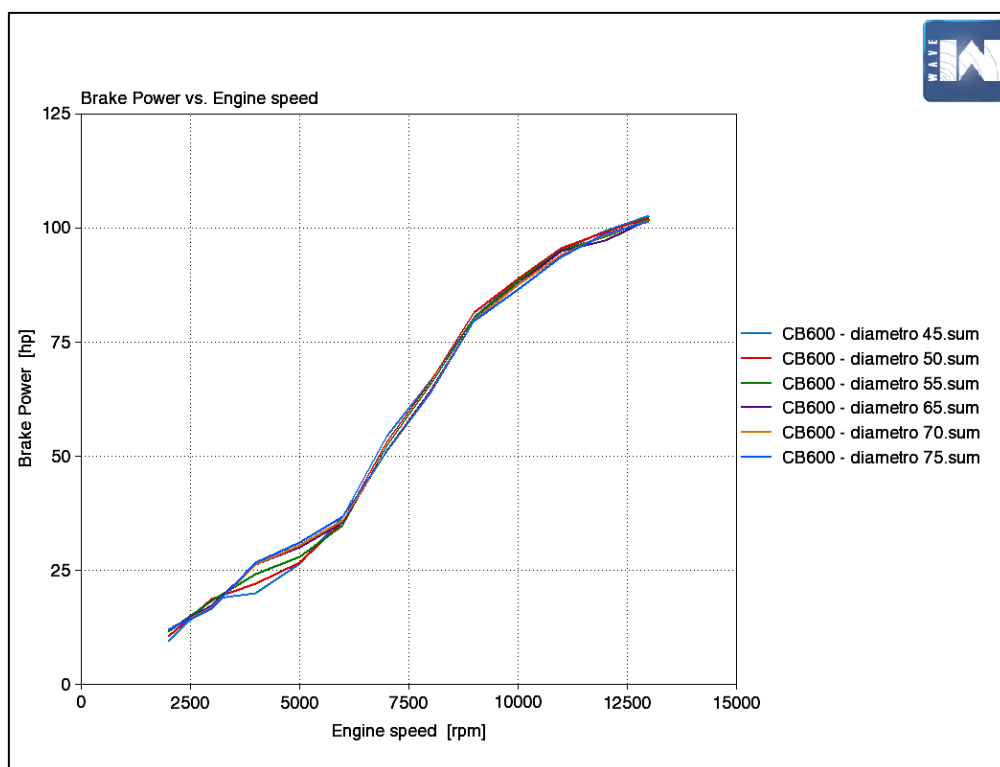


Figura 19 - Gráfico comparativo de potência com variação no diâmetro do tubo 4:1

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

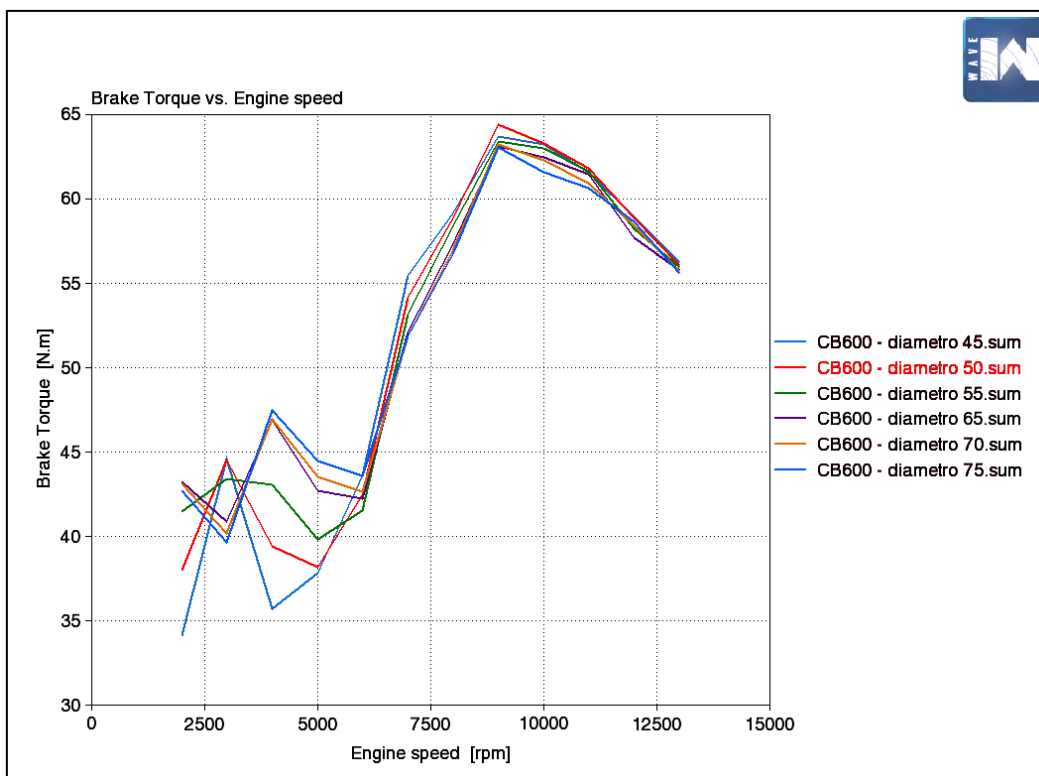


Figura 20 - Gráfico comparativo de torque com variação no diâmetro do tubo 4:1
 Fonte: Pesquisa direta, 2019.

4.3 Otimização

Considerando os testes realizados na seção 4.2 deste trabalho, foi feito, pensando no desempenho final do motor de combustão interna, a junção dos modelos que obtiveram melhores respostas em termos de potência e torque. De acordo com os dados exibidos nas Tabelas 7 e 8, vários modelos mostraram desempenho superior ao que foi feito utilizando as equações de Bell.

Considerando o comprimento do tubo 4:1, o modelo que obteve melhor resposta foi o que possuía 260 mm, ele obteve ganhos de 1,2% em termos de potência e 1,9% de torque, conforme a seção 4.2.1. Levando em consideração o diâmetro do tubo 4:1, o modelo com desempenho superior foi o que possuía 50 mm, os ganhos em termos de potência e torque foram 1,2 e 1,9% respectivamente, conforme a seção 4.2.2. A tabela 9 mostra os valores de torque e potência ao unir alguns dos melhores casos. A tabela 9 apresenta também alguns testes utilizando variações no diâmetro durante o comprimento do tubo 4:1, dando um formato cônico ao tubo 4:1. As figuras 21 e 22 apresentam as curvas de torque e potência do modelo com comprimento do tubo 4:1 de 260 mm e diâmetro de 50mm, que era inicialmente

pensado como o modelo ideal, que unia o comprimento e o diâmetro que fornecia o maior valor de torque e potência.

Tabela 9- Valores de torque e potência variando o diâmetro e o comprimento do duto 4:1

Caso	Comprimento e diâmetros (inicial e final) Tubo 4:1(mm)	Torque (Nm)	Diferença no torque (%)	Potência (hp)	Diferença na potência (%)
1	260/45/50	63,3	0	103	1,98
2	260/50/60	63,2	-0,16	103	1,98
3	260/60/75	63,5	1,90	101	0
4	260/75/90	64,8	2,37	101	0
5	260/50/50	64,7	2,21	102	0,99
6	260/75/75	64,5	1,90	100	-0,99

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

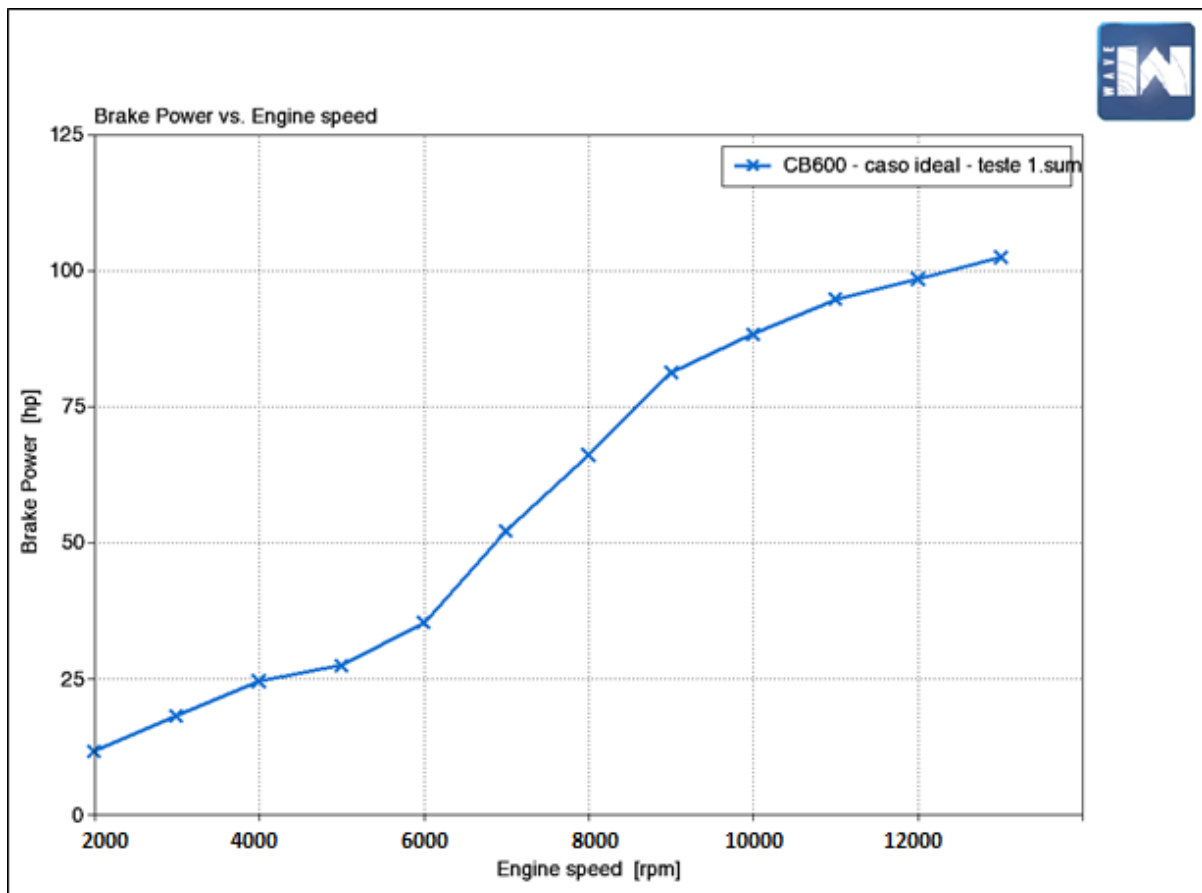


Figura 21 - Curva de potência - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - 50 mm

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

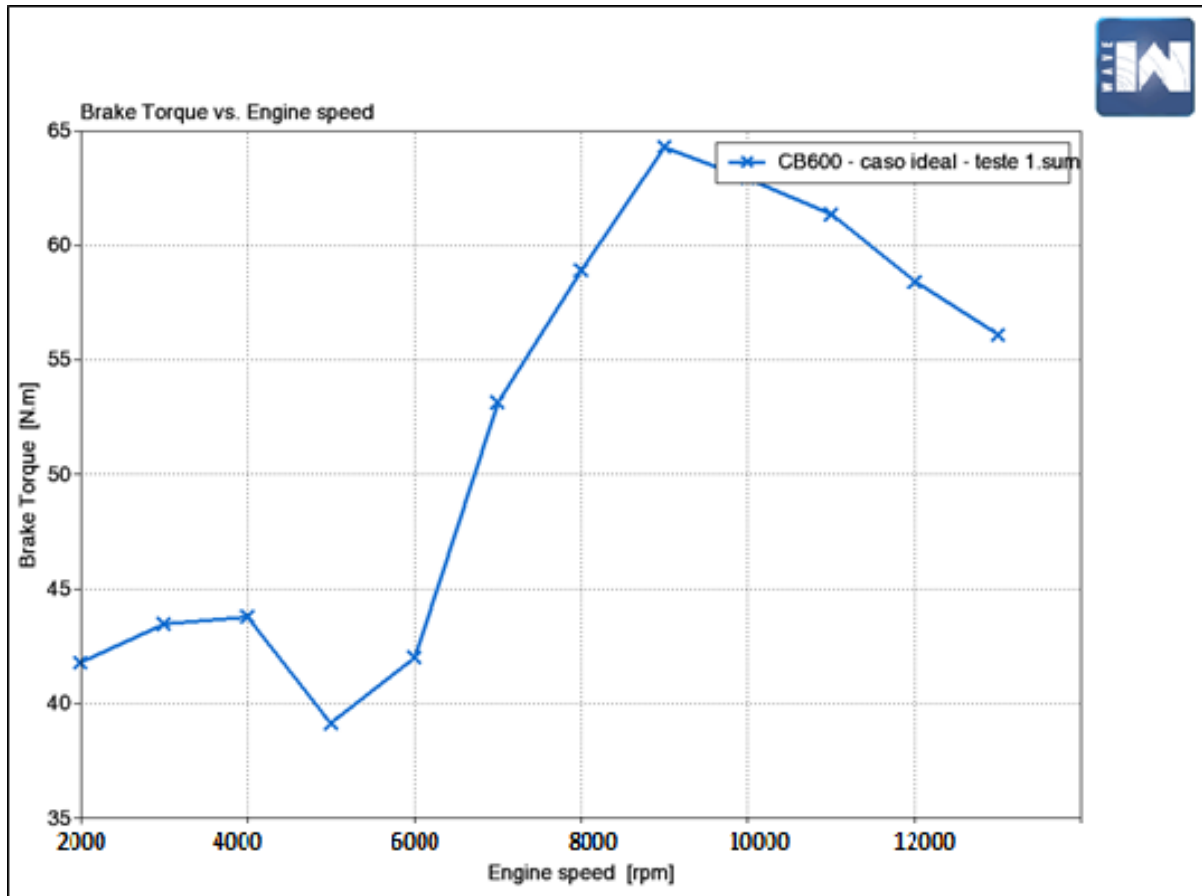


Figura 22 - Curva de torque - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - 50 mm
 Fonte: Pesquisa direta, 2019.

As figuras 23 e 24 apresentam as curvas de torque e potência do modelo com comprimento do tubo 4:1 de 260 mm, diâmetro inicial de 75mm e final de 90mm. Apesar de não mostrar valores elevados de torque e potência quando comparados aos resultados obtidos com outros modelos, os gráficos foram apresentados para evidenciar a grande mudança sofrida na curva de torque apenas com pequenas alterações no sistema de exaustão.

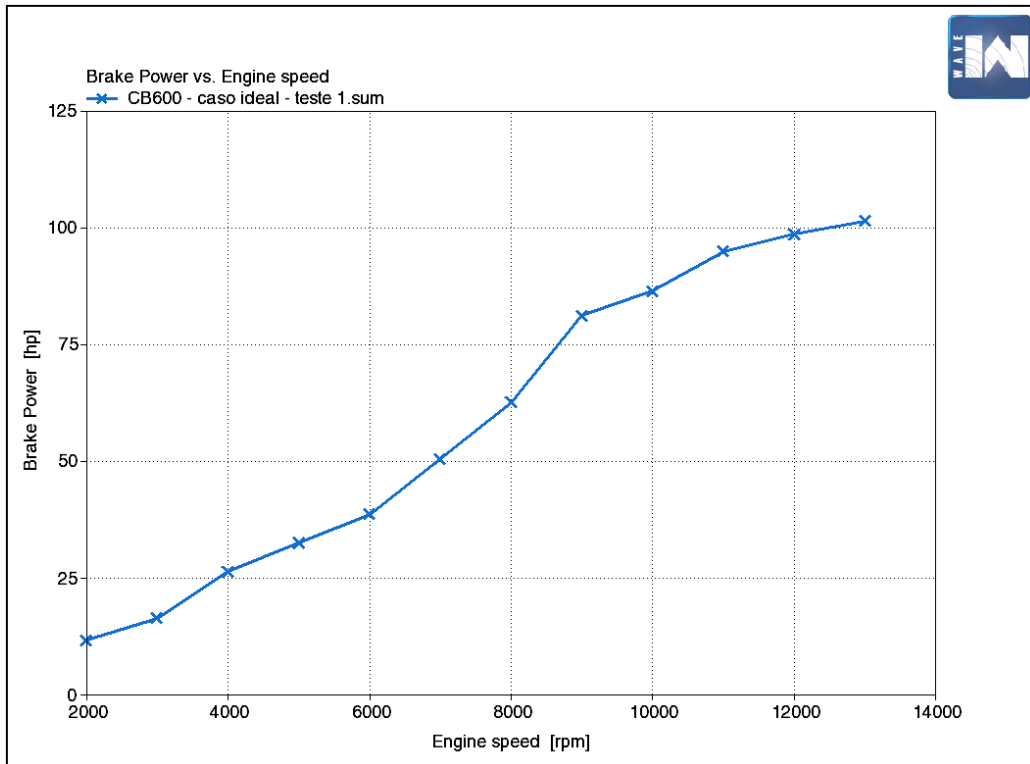


Figura 23 - Curva de potência - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - inicial 75/ final 90 mm
 Fonte: Pesquisa direta, 2019.

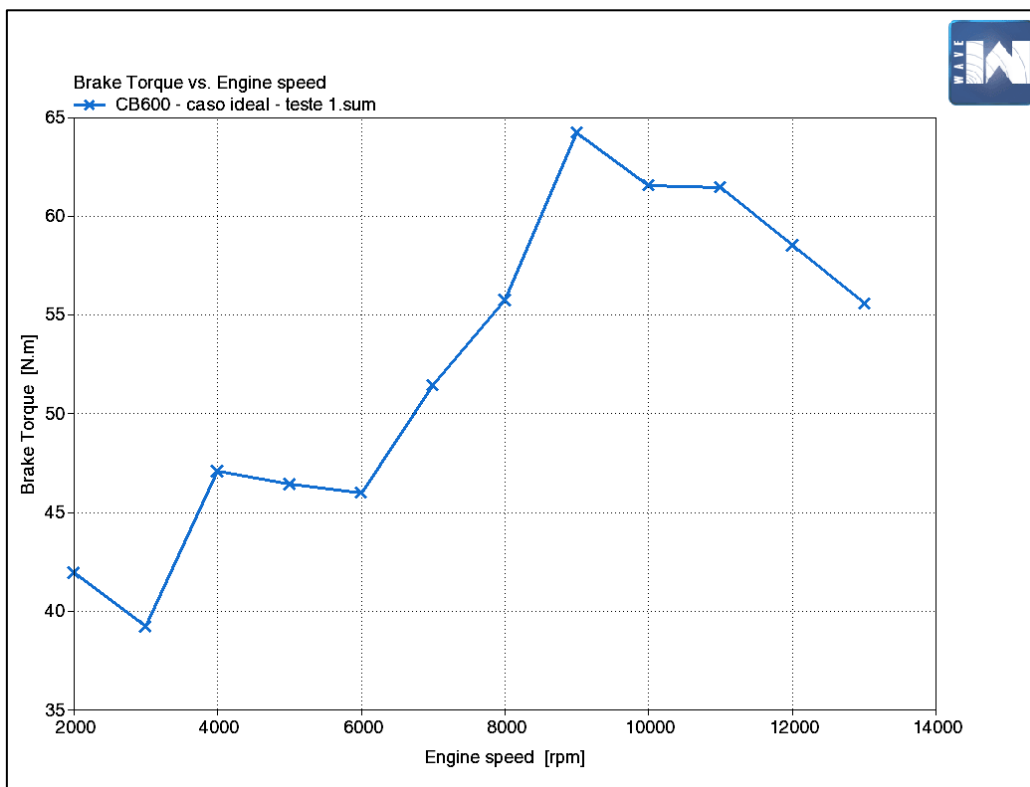


Figura 24 - Curva de torque - Comprimento tubo 4:1 - 260 mm/ Diâmetro tubo 4:1 - inicial 75/ final 90 mm
 Fonte: Pesquisa direta, 2019.

4.4 Considerações Finais

Uma vez que a proposta para a otimização do sistema de escape do veículo Fórmula SAE foi através de um método empírico, foram estipulados intervalos para a variação dos parâmetros desejados. Isso se deu para melhor organização e padronização dos testes de simulação.

A ferramenta *Ricardo WAVE* se mostrou muito competente, seu uso permite ao usuário uma economia financeira significativa, tendo em vista que podem ser feitos modelos de vários sistemas do motor de combustão interna. O modelo permite validar as entradas e simular as respostas do motor com determinadas mudanças, sendo que o intuito é evitar a construção física desnecessária de vários componentes. Tudo pode ser simulado previamente no *software Ricardo WAVE*.

Uma das propostas iniciais para este trabalho foi a parametrização do sistema de exaustão. Porém, como visto na seção 2.2 deste trabalho, quando a válvula de escape presente no cabeçote do motor se abre, os gases comprimidos presentes no interior do cilindro são expelidos devido a uma onda de pressão positiva criada, que é responsável por empurrar os gases pelo sistema de escape até o ambiente exterior. Quando a onda de pressão positiva encontra a atmosfera, ela se dissipa e forma uma onda de pressão negativa que produz efeito de sucção, essa onda caminha pelo sistema de exaustão em direção aos cilindros ajudando a retirar os gases ainda presentes pelo caminho, caso chegue ao cilindro no período em que a válvula de escape e a de admissão se encontram semiabertas (período de sobreposição), irá ajudar a aspirar uma maior massa de ar para dentro do cilindro e ainda de gases da combustão remanescentes para fora deste (BELL, 1980).

Ao compreender o capítulo anterior, é possível entender que a parametrização do sistema de escape seria algo delicado, uma vez que o rendimento de um motor de combustão interna não obedece a um padrão linear de melhoras no rendimento. Aumentar ou diminuir gradualmente determinado diâmetro ou comprimento não acarreta necessariamente em melhores (ou piores) índices de melhora gradual no torque e potência do motor de combustão interna.

Já a otimização do sistema de escape é possível, a geometria do sistema de escape é a responsável por criar resistência à passagem dos gases de escape, reduzindo ou aumentando a velocidade dos gases, além disso, o comprimento total ideal do sistema de escape seria o

necessário para que a onda de pressão negativa chegue ao cilindro do motor no momento exato de sobreposição das válvulas, ajudando na sucção dos gases de admissão.

Tendo essas informações em vista, vários fatores devem ser levados em consideração a respeito do fluxo de gases no sistema de exaustão, dentre eles, as curvas que os tubos fazem para se adequar a estrutura de determinado veículo, pequenas imperfeições internas no material usado para a fabricação do sistema de escape (quanto mais lisa a superfície, melhor o fluxo de gases), dentre outros. Cada sistema de escape possui suas características, mostrando a importância de um estudo particular a respeito de cada um.

Uma constatação deste trabalho foi que a junção dos modelos com melhores resultados (diâmetro e comprimento que obtiveram melhores valores de torque e potência) não acarreta em um resultado ainda melhor, o que já era suspeitado após o estudo e entendimento do sistema de escape. Isso se deve ao fato de que o fluxo de gases sofre alterações a cada mudança de parâmetro na geometria do sistema de escape. A tabela 9 presente na seção 4.3 mostra isso.

Ao final, comparando os valores obtidos nos modelos feitos, é visto que alterações no sistema de escape acarretam em mudanças consideráveis no desempenho de um motor de combustão interna. A tabela 10 mostra os ganhos em termos de potência e torque quando comparados com o motor original que possui potência de 96,5 hp e torque de 63,07 Nm. Deve-se salientar que os modelos feitos possuem uma restrição na admissão por exigência da SAE para a competição Fórmula, o que acarreta em pequenas perdas de desempenho. Isso evidencia ainda mais os ganhos devido ao correto dimensionamento do sistema de escape, que em termos de potência chegou a 6%, e em torque, 2,5%.

Tabela 10 – Resultados de ganhos de torque e potência em relação ao sistema de escapamento original da moto Honda CB600f 2006.

Caso	Comprimento e diâmetros (inicial e final) Tubo 4:1(mm)	Torque (Nm)	Diferença no torque (%)	Potência (hp)	Diferença na potência (%)
1	260/60	64,5	2,27	102,2	5,91
2	300/50	64,5	2,27	102,2	5,91
3	450/60	64,7	2,58	101,5	5,18
4	260/50	64,7	2,58	102,0	5,70

Fonte: Pesquisa direta, 2019.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões acerca do trabalho, assim como as recomendações de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

A finalidade de um sistema de escape em motores de combustão interna é recolher e eliminar os gases originários da combustão de uma forma apropriada. As condições básicas de um sistema de escape correto são diminuição dos ruídos estimulado pelo motor no ambiente, a geometria externa compacta, perda pequena de potência, dispondo de uma boa durabilidade e mínimos níveis de vibração, segundo Brunetti (2012).

Este trabalho tem como objetivo principal dimensionar um sistema de escape para um motor de combustão interna de 600cc utilizado em carro tipo Fórmula SAE, usando o *software Ricardo WAVE*.

Verifica-se que a junção dos modelos com melhores resultados de diâmetro e comprimento, conforme apresentado neste trabalho, visando melhores valores de torque e potência, não traz resultados ainda melhores. Ou seja, a otimização deste componente utiliza informações/otimizações de outros componentes, como por exemplo, o sistema de admissão. Comparando os valores obtidos nos modelos, é visto que alterações no sistema de escape ocasiona mudanças no desempenho de um motor de combustão interna. Os ganhos devido ao correto dimensionamento do sistema de escape, comparando com o motor Honda CB600F, em termos de potência chegou a 6%, e em termos de torque, chegou a 2,5%. Mediante os resultados obtidos, pode-se concluir que o objetivo principal deste trabalho foi concluído com êxito. Além disso, os objetivos específicos também foram alcançados.

O método utilizado para otimizar o sistema de exaustão se mostrou trabalhoso, uma vez que foram necessárias dezenas de testes e validações de modelos para se escolher o melhor protótipo. Após todo o processo, é impossível afirmar que o melhor modelo foi o selecionado, uma vez que existem infinitas possibilidades de geometrias para sistemas de escape, porém ao se utilizar as equações de Bell, é possível afirmar que foi utilizada uma base

bem estruturada para o primeiro modelo. Assim, pode-se concluir que a pergunta problema foi respondida.

O *software Ricardo WAVE* se mostrou uma excelente ferramenta de modelagem e simulação de motores de combustão interna, fornecendo dados e respostas condizentes. Pode ser usado para simular alterações nos mais diferentes componentes do motor.

Por fim, o trabalho elucidou a importância do sistema de escape, que é crucial para o correto funcionamento e desempenho de um motor de combustão interna.

5.2 Recomendações de trabalhos futuros

A possibilidade de estudar o comportamento de um motor de combustão interna nas mais variadas situações através do *software Ricardo WAVE* abre um leque enorme de possibilidades de trabalhos futuros.

Recomenda-se a utilização do *software* para um estudo semelhante na parte da admissão do motor de combustão interna, fazendo alterações em filtros de ar, corpo de borboleta, coletor de admissão. O *software* permite também analisar respostas do motor na utilização dos mais variados materiais de construção mecânica para compor os componentes do motor. Além disso, o *software* permite alterações e criação de um motor novo, seja no cabeçote, bloco, ou qualquer outra parte que o compõe (ao invés de pegar um bloco pronto como no trabalho), abrindo margem para os mais diferentes estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2013. 1 v.

ÇENGEL, Y. A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

BELL, A. G. **Performance Tuning in Theory and Practice – Four-Stroke**, Haynes Publishing Group, Somerset, 1980.

BLAIR, G. P. **Design and Simulation of Four-Stroke Engines**, Society of Automotive Engineers Inc, Warrendale, 1999.

SENAI. **Mecânica de Automóveis Motores de Combustão Interna - Álcool e Gasolina**. Rio Grande do Sul, 2003.

TILLMAN, C, A, C. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas**. Rio Grande do Sul – Pelotas. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 2013

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

ROCHA, R, G. **Estudo de um método para projetar sistemas de escape de um motor de combustão interna a 4 tempos**, 2011. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Portugal, 2011.

VIKINGMOTORSPORT. **Exhaust optimization for Viking Motorsports Formula SAE Team: Final Report Spring – 2016**. Portland State University: Maseeh College of Engineering and Computer Science, Portland, 2016.

FSAE. **History of Formula SAE**. Disponível em:

<<https://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72>>.

Acesso em outubro de 2018

SAEBrasil. **Fórmula SAE BRASIL, O que é**. Disponível em:

<<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/formula-sae-brasil>>. Acesso em outubro de 2018

WAVE. Disponível em: <<https://software.ricardo.com/products/wave>>. Acesso em outubro de 2018

WAVEPERFORMANCE. **WAVE - engine performance** . Disponível em <https://software.ricardo.com/products/wave/wave-engine-performance>. Acesso em outubro de 2018.

RICARDO. **What we do**. Disponível em: <<https://ricardo.com/about-us/what-we-do>>. Acesso em outubro de 2018.

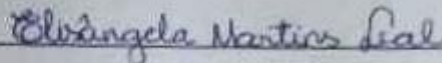
LAUKKONEN. **What is an Exhaust System?**. Disponível em: <<http://www.crankshift.com/exhaust-system/>>. Acesso em outubro de 2018

PASSOS, R. **Sistemas de escape: coletores, dutos e emissões**. Disponível em: <<https://www.flatout.com.br/sistemas-de-escape-coletores-dutos-e-emissoes-parte-1/>>. Acesso em outubro de 2018.

FONSECA, R. **Tire dúvidas sobre o sistema de escapamento do carro**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/Noticias/Carros/0,,MUL1097748-9658,00-TIRE+DUVIDAS+SOBRE+O+SISTEMA+DE+ESCAPAMENTO+DO+CARRO.html>>. Acesso em outubro de 2018

Certifico que o aluno LUCAS FERNANDES MENDES RICARDO, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE ESCAPE DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DE 600CC USANDO O SOFTWARE RICARDO WAVE", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 12 de julho de 2019.



Profa. Dra. Elisângela Martins Leal

Orientadora