

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Vinícius Alves da Silva

INSTRUMENTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO
MATEMÁTICO DINÂMICO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA
DE DOIS TEMPOS

Divinópolis
2018

Vinícius Alves da Silva

INSTRUMENTAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MODELO
MATEMÁTICO DINÂMICO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA
DE DOIS TEMPOS

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica e Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva

Co-orientador: Prof. Me. Jean Carlos Pereira

Divinópolis
2018

(Catalogação - Biblioteca Universitária – Campus Divinópolis – CEFET-MG)

S586i	<p>Silva, Vinícius Alves da. Instrumentação e desenvolvimento do modelo matemático dinâmico de um motor de combustão interna de dois tempos. / Vinicius Alves da Silva. - Divinópolis, 2018. 65f.; il.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Luis Filipe Pereira Silva. Coorientador: Prof. Me. Jean Carlos Pereira.</p> <p>Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas.</p> <p>1. Eletrônica. 2. Mecânica. 3. Motor – Combustão Interna. 4. Modelagem. 5. Instrumentação. 6. Termodinâmica. 7. Sensores. 8. Transporte – Fenômenos. 9. Matemática. I. Silva, Luis Filipe Pereira. II. Pereira, Jean Carlos. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 62(043)</p>
-------	--



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CEFET-MG / Campus Divinópolis
Curso de Engenharia Mecatrônica

Monografia intitulada "*Instrumentação e Desenvolvimento do Modelo Matemático Dinâmico de um Motor de Combustão Interna de Dois Tempos*", de autoria do graduando Vinícius Alves da Silva, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva - CEFET-MG / Campus Divinópolis - Orientador

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício - CEFET-MG / Campus Divinópolis

Prof. Dr. Christian Gonçalves Herrera - CEFET-MG / Campus Divinópolis

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica
CEFET-MG / Campus Divinópolis

Divinópolis - Dezembro de 2018

DEDICO ESTE TRABALHO A MINHA
FAMÍLIA E AMIGOS.

Agradecimentos

Agradeço,

em primeiro a Deus por toda a oportunidade de poder cursar este curso de engenharia que era um sonho e agora está realizado.

Aos meus pais Cláudia e Marcos por todo apoio e assistência em minha vida e educação.

Aos meus orientadores e professores do CEFET-MG campus V Divinópolis por toda paciência nos momentos de ensinamentos e dúvidas.

Aos meus amigos por todas as horas de descontração e contribuição nesses anos de intenso estudo.

Ao colegas do CEFET por toda ajuda durante o curso e desenvolvimento deste trabalho.

Não é questão de mudar o mundo, e sim de fazer o nosso melhor enquanto passamos por ele.

Resumo

Em busca de colaborar para a pesquisa sobre o possível aumento da eficiência de motores de combustão interna através do controle de suas variáveis sem a alteração de seus componentes, o presente trabalho desenvolve um modelo em caixa preta de um motor de combustão interna de dois tempos através da configuração de seus atuadores e observação de sua rotação de saída. Já presente no Laboratório de Termodinâmica e Fenômenos de Transporte do CEFET-MG campus V, uma planta de motor de combustão interna de dois tempos foi utilizada para o levantamento do modelo. Neste trabalho são analisados alguns dos modelos que representam a dinâmica dos sistemas que compõem o motor dois tempos. O sistema físico é composto um motor Yamaha RD135 e por sensores os quais possibilitam a observação das variáveis necessárias para o levantamento do modelo e uma interface de comunicação em Java. Desta forma o presente trabalho integra duas das grandes áreas da engenharia mecatrônica: mecânica e eletrônica. Ao final do trabalho o modelo é validado e a planta didática instrumentada para outros possíveis trabalhos futuros.

Palavras-chave: motor de combustão interna, modelagem, instrumentação.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Acrônimos e Notação	xi
1 Introdução e Contextualização	1
1.1 Definição do Problema	2
1.2 Motivação	3
1.3 Objetivos do Trabalho	3
1.3.1 Objetivo Geral	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Estado da Arte	4
1.5 Organização do Documento	5
2 Fundamentos	6
2.1 Revisão Bibliográfica	6
2.2 Metodologia	7
2.3 Fundamentação Teórica	9
2.3.1 Motor de Combustão Interna	9
2.3.2 Eletrônica	11
2.3.3 Calibração	15
3 Desenvolvimento	17
3.1 Descrição da Planta	17
3.2 Melhoria na estrutura mecânica da planta	19
3.3 Instrumentação	23
3.3.1 Sensor de Rotação / Sensor PMI	23
3.3.2 Acionamento da válvula borboleta	26
3.3.3 Injeção Eletrônica	27
3.3.4 Sensor Triplex	30
3.4 Interface Gráfica	31
3.5 Testes da instrumentação	33
3.5.1 Conclusões do capítulo	36
4 Modelagem	37
4.1 Modelagem do sistema de um MCI dois tempos	37
4.1.1 Acionamento da válvula borboleta	38

4.1.2	Dinâmica do cárter	39
4.1.3	Dinâmica da limpeza	40
4.1.4	Dinâmica da combustão / movimento do pistão	41
4.2	Modelagem do sistema MCI dois tempos em caixa preta	43
4.2.1	Acionamento da válvula borboleta	44
4.2.2	Bico Injetor	45
4.2.3	Motor dois tempos	46
4.3	Validação dos modelos encontrados	48
4.3.1	Acionamento da válvula borboleta	48
4.3.2	Validação do modelo do motor	49
4.3.3	Conclusões do capítulo	50
5	Considerações Finais	51
5.1	Conclusões	51
5.2	Propostas de trabalhos futuros	52
	Referências	53

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de blocos da metodologia adotada.	8
2.2	Ciclo dois tempos de fluxo cruzado. (adaptada de FERGUSON; KIRKPA- TRICK (2015))	10
2.3	Elementos internos de um sensor indutivo.	12
2.5	Histerese.	12
2.4	Funcionamento de um sensor indutivo.	13
2.6	Placa Arduino Uno.	13
2.7	Estrutura do Bico injetor (adaptado de GUPTA (2012)).	15
3.1	Planta inicial do motor de combustão interna de dois tempos.	18
3.2	Posicionamento do sensor indutivo e engrenagem com rasgo para medida da rotação.	18
3.3	Estrutura de aço original.	19
3.4	Estrutura de aço galvanizado modelada no software <i>SolidWorks</i> .	20
3.5	Posicionamento das forças.	20
3.6	Simulação estática da estrutura no <i>Ansys</i> .	21
3.7	Estrutura de aço reformulada.	22
3.8	Apoio do vibra-stop usinado em Náilon.	22
3.9	Modificação dos apoios do motor.	23
3.10	Modificação dos apoios do motor.	23
3.11	Sensor indutivo NPN LJ12A3-4-Z/BX (Normal Aberto).	23
3.12	Modelagem da peça para o sensoriamento da rotação.	24
3.13	Posicionamento da parte metálica durante a etapa de impressão da peça auxiliar.	24
3.14	Peça auxiliar do sensor posicionada no eixo de saída do motor.	25
3.15	Protótipo de apoio do sensor indutivo para medição de velocidade.	25
3.16	Peça auxiliar para medição da velocidade na saída do motor com 10 pontos metálicos.	25
3.17	Sensor PMI e suporte para sensores indutivos posicionados no bloco do motor.	26
3.18	Suporte do servomotor para acionamento da válvula borboleta.	27
3.19	Corpo de injeção eletrônica completo (Honda CG 150).	27
3.20	Circuito com TIP 122 para o chaveamento para abertura do bico injetor.	28
3.21	Balança de precisão e béquer utilizados para medição da massa de combus- tível entregue.	29
3.22	Curva linearizada da massa de combustível entregue a partir do tempo de abertura do bico injetor, obtida através do método dos mínimos quadrados.	30

3.23 Exemplo de JQuery Slider.	32
3.24 Exemplo de gráfico XY para visualização da rotação do motor.	32
3.25 Interface atual.	32
3.26 Estrutura completa improvisada para simulação.	33
3.27 Tabela de relações das marchas dos motores Yamaha RX 125 e RD 135.	33
3.28 Gráfico da rotação do motor.	34
3.29 Rotação do motor com a válvula borboleta fechada ($\alpha_0 = 20^\circ$, tempo em alta do bico injetor = 2.6732ms).	35
3.30 Rotação do motor com a válvula borboleta fechada ($\alpha_0 = 20^\circ$, tempo em alta do bico injetor = 2.6732ms) (filtro de média aplicado).	35
4.1 Diagrama simplificado para a modelagem de um motor dois tempos.	37
4.2 Representação de vista de corte do interior do corpo da válvula onde a válvula está fechada com um ângulo α_0 e apresenta um ângulo α . A figura a direita apresenta a vista da área de fluxo (Adaptada de ERIKSSON; NIELSEN (2014)).	38
4.3 Conceito de zona/fase de acordo com o modelo BENSON/BRADHAM. Adaptado de MERKER G. P.; GERSTLE (1997).	41
4.4 Mecanismo do pistão e coordenadas	43
4.5 Identificação do modelo de acionamento da válvula borboleta. (Resposta ao degrau de amplitude 5).	45
4.6 Dinâmica da vazão do bico injetor.	46
4.7 Rotação do motor (DADOS: inicial: $\alpha_0 = 20^\circ$, tempo de injeção = 2.6732ms; após step: $\alpha = 25^\circ$, tempo de injeção = 3.5665ms) (Tempo de amostragem de 1s).	47
4.8 Rotação do motor (DADOS: inicial: $\alpha_0 = 20^\circ$, tempo de injeção = 2.6732ms ;após step: $\alpha = 23^\circ$, tempo de injeção = 3.2092ms) (Tempo de amostragem de 1s).	48
4.9 Validação do modelo do acionamento da valvula borboleta.	49
4.10 Validação do modelo do motor (com filtro de média).	50

Lista de Acrônimos e Notação

MCI	Motor de Combustão Interna
UCE	Unidade de Controle Eletrônico
PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
CFD	Computational Fluid Dynamics
TPS	Throttle Position Sensor
MAP	Manifold Absolute Pressure
IAT	Intake Air Temperature

Introdução e Contextualização

A proposta de motores de combustão interna (MCI) é produzir energia mecânica através da energia química contida no combustível. Nestes motores, esta energia é liberada pela queima ou oxidação do combustível dentro do motor. Os MCIs mais conhecidos são os chamados de ignição por centelha (também chamados de ciclo Otto ou motores de gasolina ou petróleo) e os de ignição por compressão (ou motores à diesel) [HEYWOOD \(1988\)](#). Devido a sua relativa simplicidade e baixo custo, robustez e a entrega de potência relacionada ao peso que apresentam, estes motores ganharam um enorme destaque na área de transporte e geração de energia. Por exemplo, em 1900 a maioria dos automóveis eram alimentados à vapor ou eletricamente, mas em 1920 a maior parte dos automóveis já eram alimentados por motores de gasolina. Recentemente, no ano de 2010, apenas nos Estados Unidos haviam 220 milhões de veículos alimentados por MCIs [FERGUSON; KIRKPATRICK \(2015\)](#).

Em sua geometria os motores apresentam pistões que percorrem um cilindro em movimento linear, e a partir de sua movimentação entregam potência a um eixo de transmissão através de um mecanismo de biela e virabrequim [FERGUSON; KIRKPATRICK \(2015\)](#). Existem diferentes tipos de MCI, os quais são classificados de acordo com seu ciclo termodinâmico, ciclo de trabalho, combustível, método de ignição, aplicação, velocidade, arranjo de pistões, entre outros aspectos [GUPTA \(2012\)](#). Mesmo com a classificação, as etapas que ocorrem dentro de um MCI são sempre as mesmas, sendo elas a admissão, compressão, expansão (ou combustão) e exaustão. O MCI mais popular no meio urbano é o que apresenta o ciclo de trabalho de quatro tempos, onde a cada movimento do pistão, ascendente e descendente, cada etapa ocorre de maneira isolada.

Outro tipo de MCI é o que apresenta ciclo de trabalho de dois tempos, onde algumas etapas ocorrem de maneira simultânea. Este motor é mais leve, apresenta volume menor, geralmente não apresentam válvulas e sim portas, e entregam potência a cada rotação de seu eixo, diferentemente do motor de quatro tempos, que necessita de duas revoluções

e apresentam válvulas em sua estrutura. Ele ainda é bem eficiente em processos que necessitam de alta rotação e sua entrega de torque pode ser considerada aproximadamente constante, devido a potência gerada a cada ciclo do pistão [GUPTA \(2012\)](#). Como é capaz de apresentar um tamanho pequeno, este tipo de motor é empregado em unidades que necessitam de potência leve, como aeromodelos de porte leve, motoserras, roçadeiras, que são construídas de maneira a entregar alto desempenho [BLAIR \(1996\)](#).

Atualmente utilizados em motocicletas de corrida em trilhas o motor de dois tempos já foi utilizado em automóveis de uso urbano durante os anos de 1960, porém, este foi sendo abandonado após as primeiras leis de controles de emissões de poluentes. Um limitante do motor de dois tempos é o seu processo de limpeza, uma vez que a exaustão da mistura queimada e a admissão de ar-combustível fresco ocorrem de maneira simultânea dentro do cilindro, o que causava um certo desperdício de combustível e aumentava a taxa de emissão de hidrocarbonetos [FERGUSON; KIRKPATRICK \(2015\)](#). A partir disso, diversos designs de pistões foram desenvolvidos e diferentes tipos de injeção de combustível estudados para se reduzir o efeito negativo da etapa de limpeza neste tipo de motor [BLAIR \(1996\)](#).

Uma forma de otimizar o desempenho de um motor seria com sua modelagem, uma vez que esta oferece a oportunidade de realizar testes e simulações eficientes. E com um bom procedimento para testes, seria possível se projetar um sistema de controle para lidar com as restrições de emissões e consumo de combustível [TURESSON \(2009\)](#). Após uma pesquisa constatou-se que pouco é discutido sobre motores de dois tempos no meio acadêmico, e grande parte de seus estudos de modelagem é feita computacionalmente a partir de softwares de simulação de motores. Modelos matemáticos incompletos, onde se estuda as diferentes partes do motor também foram encontrados.

Sendo assim, este trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecatrônica tem o objetivo de iniciar uma pesquisa sobre a possibilidade de se aumentar a eficiência de motores de combustão interna através da modelagem de seu sistema e do controle de suas variáveis sem alteração em seus componentes. A finalidade do trabalho é levantar um modelo de motor de combustão interna de dois tempos que representa a dinâmica do sistema e a instrumentação de sua planta didática, presente no laboratório de Termodinâmica e Fenômenos de Transporte do CEFET-MG campus V.

1.1 Definição do Problema

O problema abordado neste trabalho é a limitação existente sobre a modelagem dinâmica do sistema motor de combustão interna de dois tempos, assunto o qual não tem sido muito contemplado no ambiente acadêmico.

1.2 Motivação

Diante do exposto, a principal motivação para este projeto parte da oportunidade de conciliação de duas grandes áreas estudadas ao longo do curso e da expansão dos conhecimentos sobre motores de combustão interna, que a muito tempo acompanha diversos projetos em áreas automotivas e processos industriais.

Existe ainda a demanda pela melhoria da planta didática presente no laboratório do CEFET-MG campus V, contribuindo assim com o âmbito acadêmico.

1.3 Objetivos do Trabalho

Nestes termos, são objetivos deste projeto:

1.3.1 Objetivo Geral

Modelar e validar a dinâmica do motor de combustão interna de dois tempos, de acordo com a(s) entrada(s) e saída(s) determinadas, e instrumentá-lo de forma adequada.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar a atual instrumentação da planta disponível no laboratório do CEFET-MG campus V e coletar seus dados;
- Elaborar uma nova estrutura física afim de melhorar a estabilidade e fixação do sistema;
- Desenvolver a melhoria necessária na instrumentação para se adquirir a rotação do motor;
- Aperfeiçoar o circuito de acionamento do bico injetor, melhorando assim a injeção eletrônica;
- Desenvolver uma interface de comunicação da instrumentação com o computador;
- Realizar testes experimentais com a nova instrumentação;
- Separar as malhas que envolvem o processo de combustão e identificar as variáveis mecânicas que podem ser atuadas e monitoradas;
- Definir as entradas e saídas do sistema a ser modelado;
- Modelar do sistema através de equações matemáticas que descrevem sua dinâmica;
- Validar e ajustar, se necessário, o modelo encontrado.

1.4 Estado da Arte

Recentemente, algumas pesquisas estão sendo realizadas a respeito da modelagem de motores de combustão interna de dois tempos, principalmente com o objetivo de prever e otimizar o seu funcionamento.

Em [NEFF \(2013\)](#) é possível encontrar um modelo simplificado de um MCI de dois tempos que foi recriado a partir do uso de informações concedidas por Kranc (1977) e também o método de Euler para se resolver equações diferenciais. Esse modelo foi desenvolvido fim de demonstrar as possíveis flutuações que se apresentam devido a uma distribuição variável de potência e carga simplificada pelo uso de uma articulação de garfo escocês ao invés da biela-manivela normalmente utilizada. Em sua modelagem simplificou-se as equações matemáticas termodinâmicas envolvendo a parte de combustíveis ao se utilizar apenas o ar como fluido de trabalho, e também não ocorreu a validação com um motor real, sendo esta baseada apenas em dados passados do modelo simplificado anterior.

Em [LEWIS \(2014\)](#) foi desenvolvido um modelo quasi-dimensional de um MCI dois tempos com ignição por centelha, levando em consideração o movimento do fluxo em massa da frente da chama devido ao movimento rotativo dentro do cilindro. A progressão da frente da chama através da cabeça do cilindro foi monitorada usando sondas de ionização e a espessura da chama determinada, essas medidas foram comparadas com as previsões do modelo de simulação. A pressão do cilindro também foi medida e comparada com a pressão prevista, fração de massa queimada e taxa de liberação de calor.

Em [YUM *et al.* \(2017\)](#) abordou-se o desenvolvimento de um modelo e a simulação de um MCI de dois tempos à diesel para analisar o funcionamento do mesmo quando movimenta uma hélice para propulsão em ondas. O modelo foi dividido em vários submodelos e de forma que toda a termodinâmica no que se diz respeito ao deslocamento dos flúidos no interior do motor foi abordada. A validação do modelo ocorreu através de dados experimentais já existentes de um motor real do software OpenProp, utilizado justamente para concepção e análise de hélices marítimas e turbinas de eixo horizontal, porém foi apenas validado em seu regime permanente, sendo o estado transiente descartado.

Em [JIANG \(2015\)](#) foi feito um estudo onde se analisou e comparou a performance de MCI de dois tempos através do uso de injeção direta e ignição a jato ao invés dos sistemas de injeção e ignição convencionais. O estudo se trata de simulações unidimensionais de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) através do software CAE Star-CCM+ de um modelo CAD do motor desenhado no SolidWorks. No entanto, a validação do estudo foi baseada em resultados anteriores e nenhum motor físico foi utilizado.

Uma abordagem dinâmica do ciclo Otto de um motor monocilíndrico pode ser encontrada em [ION; PETRESCU \(2015\)](#). Nela se define que quando a relação entre o comprimento da manivela e o comprimento da biela aumentar, a dinâmica do mecanismo

se deteriora, e que para um bom funcionamento é necessária uma redução nesta relação, principalmente quando se quer aumentar a velocidade do motor. Mesmo apresentando simulação não houve uma validação do modelo encontrado com uma planta real.

Em um artigo publicado por [DUYGU; KARABULUT \(2016\)](#) é apresentada uma análise com o objetivo de estimar as características de desempenho termodinâmico e a otimização de grandezas mecânicas de um motor de dois tempos a gasolina com compressão do cárter através de um modelo dinâmico. Este modelo tem um grau de liberdade e envolve 5 equações de movimento, bem como relações cinemáticas. A análise mostrou três novidades, onde apresentou uma nova forma de se obter a pressão do gás através de uma relação derivada da primeira lei da termodinâmica, o uso de um perfil de taxa de liberação de calor para fornecer calor para o ciclo termodinâmico e a modelagem do movimento da haste de conexão através de equações de movimento. Como resultado, o estudo mostrou a simulação do modelo com diferentes parâmetros e apresentou alguns detalhes sobre a relação de transferência de calor para as paredes internas e flutuação da velocidade do motor, porém não houve validação com um motor real, apenas uma comparação com outros estudos.

1.5 Organização do Documento

Este documento é dividido em cinco capítulos. O presente capítulo apresenta a definição do problema estudado, a motivação para a realização da instrumentação e modelagem do MCI de dois tempos, os objetivos do trabalho e a organização deste documento.

No segundo capítulo, nomeado de Fundamentos, estão dispostas a revisão de literatura, a metodologia e fundamentação teórica do trabalho.

No terceiro capítulo são apresentados os tópicos referentes ao desenvolvimento do trabalho, sendo eles a descrição da planta utilizada, as melhorias executadas na estrutura física, sua instrumentação, a calibração de seus sensores e atuadores, o desenvolvimento da interface de comunicação e o teste da instrumentação.

O quarto capítulo se trata da modelagem do sistema de um MCI de dois tempos, onde são apresentados os diferentes processos que o compõem, os procedimentos realizados para o levantamento dos modelos escolhidos e suas validações.

A conclusão é exposta no capítulo cinco, assim como as propostas para trabalhos futuros.

Fundamentos

Neste capítulo são mostradas a revisão bibliográfica, a metodologia e a fundamentação teórica necessária ao trabalho

2.1 Revisão Bibliográfica

A modelagem e automação de motores de combustão interna vem sendo abordada em vários estudos desde que este se encontra na necessidade de ter sua performance e emissão de poluentes melhorada. A modelagem de motores é uma ferramenta importante para os fabricantes de motores em busca de otimizar o desempenho do motor, uma vez que oferece testes eficientes e possibilidades de simulações, sendo o processo de validação muito importante, pois com ele pode-se economizar tempo e dinheiro [TURESSON \(2009\)](#).

Os primeiros motores desenvolvidos para uso comercial queimavam misturas de ar de carvão e gás na pressão atmosférica, sem nenhuma compressão antes da combustão. J. J. E. Lenoir (1822-1900) desenvolveu o primeiro motor comercializável deste tipo, um motor de dois tempos de 6 cavalos de potência. A melhor eficiência destes motores chegou a 5%. Um desenvolvimento mais bem sucedido - um motor atmosférico introduzido em 1867 por Nicolaus A. Otto (1832-1891) e Eugen Langen (1833-1895) - usaram o aumento de pressão resultante da combustão da carga de ar-combustível no início do curso externo para acelerar um conjunto de pistão livre e cremalheira para que seu momento gerasse um vácuo no cilindro. Obtiveram assim uma eficiência térmica de aproximadamente 11%. Após estes resultados Otto propôs um ciclo com quatro cursos do pistão e seu protótipo de motor de quatro tempos foi executado pela primeira vez em 1876 [HEYWOOD \(1988\)](#).

O primeiro motor prático de dois tempos foi inventado e construído por Sir Dugald Clerk (1854-1932), um engenheiro mecânico escocês, em 1878. O graduado se formou no Yorkshire College em 1876, e patenteou seu motor de dois tempos em 1881. Ele é bem conhecido por suas contribuições ao longo da carreira para melhorar os processos de combustão em motores de dois tempos de grande porte. O motor era feito de dois cilindros

- um deles era um cilindro de trabalho para produzir energia e o outro, um cilindro de bombeamento para comprimir e transferir o ar de admissão e a mistura de combustível para o cilindro de trabalho. Válvulas foram usadas para o fluxo de entrada, e uma porta de cilindro descoberta pelo pistão durante o curso de expansão foi usada para a exaustão dos gases de combustão [FERGUSON; KIRKPATRICK \(2015\)](#).

Karl Benz (1844-1929), um engenheiro alemão, desenvolveu com sucesso um motor de dois tempos de 3,5 cv alimentado a combustível líquido com um carburador e ignição centelha em 1885. O sistema de ignição consistia de uma bobina de indução elétrica com um disjuntor rotativo acionado pelo motor e uma vela de ignição removível montada na cabeça do cilindro, semelhante ao que é encontrado nos motores de hoje. O motor foi instalado em um veículo de três rodas em 1886, a primeira "carruagem sem cavalos". A transmissão era um arranjo de duas correntes que conectava o motor ao eixo traseiro [FERGUSON; KIRKPATRICK \(2015\)](#).

Em 1995, um trio de professores se uniram para desenvolver um modelo teórico para a análise de motores de combustão interna de dois tempos com ignição por centelha. [BOZZA; TUCCILLO; DE FALCO \(1995\)](#).

Em 1999, um grupo de pesquisadores desenvolveram um trabalho onde desenvolveram um modelo numérico da operação de um motor de combustão interna de dois tempos linear com ignição por centelha, o qual foi validado utilizando resultados já existentes de trabalhos anteriores [ATKINSON *et al.* \(1999\)](#).

Desta forma, a modelagem do motor de dois tempos, objetivo deste trabalho, pode ser vista como um propósito importante para o seu avanço tecnológico.

2.2 Metodologia

Este trabalho pode ser dividido em duas partes, uma que se refere à instrumentação da planta didática e outra relativa à modelagem da dinâmica do motor de combustão interna de dois tempos. O diagrama de blocos que apresenta a metodologia adotada durante o presente trabalho pode ser vista na figura [2.1](#).

Primeiramente, foi feito uma revisão bibliográfica e uma pesquisa sobre o assunto de motores de combustão interna a dois tempos, onde foi possível entender seu funcionamento e identificar os modelos já existentes.

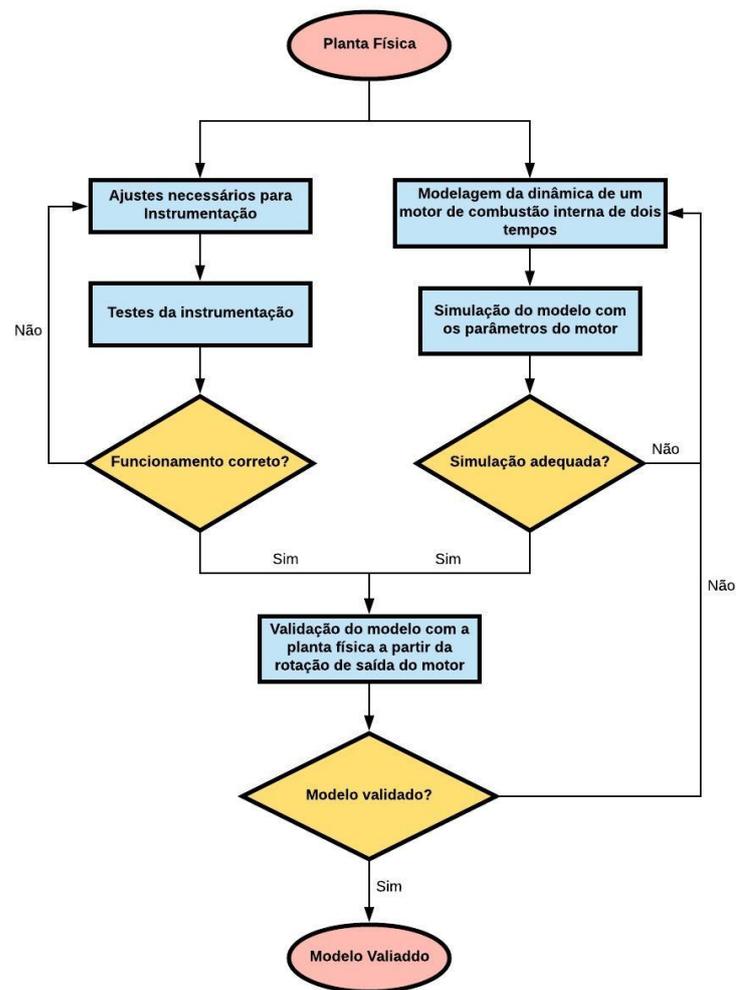


Figura 2.1: Diagrama de blocos da metodologia adotada.

Em relação a planta física, primeiramente foi analisada sua estrutura para a identificação das melhorias necessárias. Para sua instrumentação foram identificados os sinais que devem ser obtidos para o levantamento dos modelos, e a partir de suas dinâmicas e faixas de valores desejadas definiu-se os sensores. Para o acionamento do sistema foi necessária a calibração de seus atuadores.

Para a comunicação da planta com o computador foi desenvolvido uma interface gráfica em linguagem java utilizando-se o software *NetBeans* [NETBEANS \(2008\)](#). A aquisição de dados, envio de sinais e comunicação com a interface java foi feita utilizando-se a plataforma *Arduino UNO*.

A partir da finalização da etapa de instrumentação e desenvolvimento da interface de comunicação deu-se início a fase de levantamento dos modelos.

2.3 Fundamentação Teórica

2.3.1 Motor de Combustão Interna

O Motor de Combustão Interna (MCI) é um motor térmico que converte a energia química em um combustível em energia mecânica, geralmente disponibilizada em um eixo de saída rotativo. A energia química do combustível é primeiramente convertida em energia térmica por meio de combustão ou oxidação com ar dentro do motor. Essa energia térmica aumenta a temperatura e a pressão dos gases dentro do motor, e o gás de alta pressão se expande contra os mecanismos do motor. Essa expansão é convertida pelas articulações mecânicas do motor em um virabrequim rotativo, que é a saída do motor. O virabrequim, por sua vez, é conectado a uma transmissão e / ou trem de força para transmitir a energia mecânica rotativa ao uso final desejado. Para motores, isso geralmente será a propulsão de um veículo (ou seja, automóvel, caminhão, locomotiva, embarcação marítima ou avião) [PULKRABEK \(1997\)](#).

Normalmente, um MCI é alimentado com combustíveis fósseis, como gás natural ou derivados de petróleo, como gasolina, óleo diesel ou óleo combustível. Há um uso crescente de combustíveis renováveis, como biodiesel para motores de ignição por compressão e bioetanol ou metanol para motores de ignição por centelha. O presente trabalho tratará de um motor de combustão interna movido a gasolina.

O termo MCI geralmente se refere a um motor em que a combustão é intermitente, como os mais conhecidos motores de pistão a quatro e dois tempos. O presente trabalho foca em um MCI de dois tempos a gasolina.

Ciclo a Dois Tempos

O motor a dois tempos necessita de apenas uma revolução para se completar o ciclo. Há uma entrega de potência a cada revolução ao invés de a cada duas revoluções como nos motores a quatro tempos [FERGUSON; KIRKPATRICK \(2015\)](#). O seu funcionamento implica em não haver segregação entre as diferentes partes do ciclo, o que o torna mais difícil de ser controlado [MARTINS \(2006\)](#).

Os motores de dois tempos são mecanicamente mais simples que os motores de quatro tempos, e possuem uma potência específica mais alta, a relação potência / peso. Eles podem usar ciclos de ignição por faísca ou por compressão. Uma das limitações de desempenho dos motores de dois tempos é o processo de limpeza, onde simultaneamente ocorre a exaustão da mistura queimada e se introduz a nova mistura ar-combustível no cilindro. Em consequência deste problema, uma grande variedade de motores de dois tempos foi inventada para garantir um nível aceitável de eliminação [FERGUSON; KIRKPATRICK \(2015\)](#).

O princípio de funcionamento de um motor de dois tempos, desenvolvido por Joseph Day (1855-1946), é ilustrado na Figura 2.2. Durante a compressão, uma pressão subatmosférica é criada no cárter. No exemplo mostrado, isso abre uma válvula de palheta, permitindo que o ar-combustível (ou apenas ar) entre no cárter. Uma vez que o pistão inverte a direção durante a combustão e a expansão começa, a entrada de ar no cárter se fecha para que o ar seja comprimido. À medida que o pistão se desloca, ele descobre os orifícios ou orifícios de exaustão, e os gases de exaustão começam a sair, reduzindo rapidamente a pressão do cilindro para a da atmosfera. Em seguida, as portas de entrada são abertas e o ar comprimido do cárter flui para o cilindro, empurrando os gases de escape restantes. Este movimento de empurrar para fora a mistura queimada pelo ar que entra é chamado de limpeza FERGUSON; KIRKPATRICK (2015).

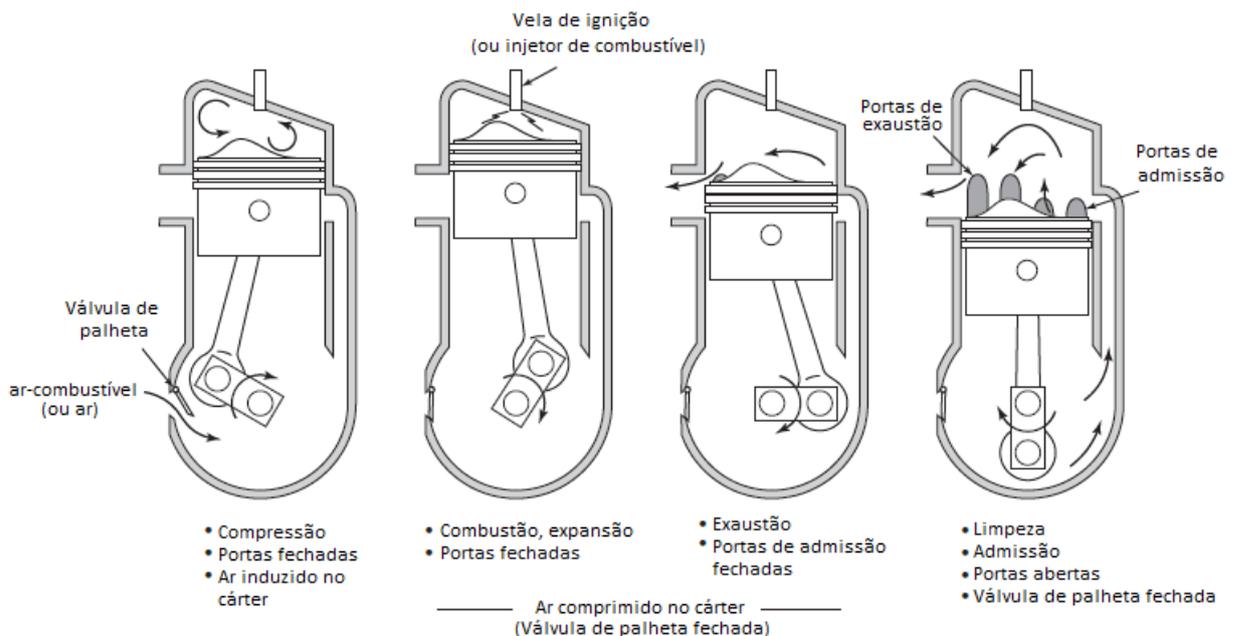


Figura 2.2: Ciclo dois tempos de fluxo cruzado. (adaptada de FERGUSON; KIRKPATRICK (2015))

O processo de limpeza de motores a dois tempos não é perfeito; parte do ar vai direto através do cilindro e sai pela porta de escape, um processo chamado de curto-circuito. Pode ser também que o ar-combustível se misture com os gases de exaustão e o ar que entra restante empurrará uma porção dessa mistura. A magnitude do problema é fortemente dependente dos projetos da porta e da forma do topo do pistão FERGUSON; KIRKPATRICK (2015).

Relação Ar - Combustível

A relação Ar-Combustível (*air/fuel ratio* - A/F) é a relação entre a massa de ar e a massa de combustível

$$(A/F) = \frac{m_a}{m_f} \quad (2.1)$$

Uma combustão de relação estequiométrica, entre um combustível de hidrocarbonetos e ar produz apenas água e dióxido de carbono [ERIKSSON; NIELSEN \(2014\)](#). Ou seja, a partir da mistura estequiométrica o combustível utiliza todo ar admitido para sua combustão, quando se fornece um valor maior de combustível do que ar em relação a estequiometria diz-se que se trata de uma mistura rica, e o contrário é considerada uma mistura pobre

A relação estequiométrica também chamada de relação ar-combustível equivalente (*air/fuel equivalence ratio* - λ) é definida como

$$\lambda = \frac{A/F}{(A/F)_{est}} \quad (2.2)$$

onde $(A/F)_{est}$ é a relação estequiométrica definida de acordo com o conteúdo de hidrogênio e carbono do combustível.

Para maiores informações sobre relações estequiométricas de outros combustíveis ver [ERIKSSON; NIELSEN \(2014\)](#) seção 4.1.3 e

2.3.2 Eletrônica

Sensor Indutivo

O sensor indutivo é um componente eletrônico capaz de detectar a aproximação de um objeto metálico através da emissão de um campo eletromagnético, sem a necessidade de contato físico. Ele não necessita de energia mecânica para operar e é imune a vibrações e choques mecânicos. É composto por uma bobina em um núcleo de ferrite, um oscilador, um detector de nível de sinais de disparo e um circuito de saída, como está representado na figura [2.3](#).

O sensor trabalha pelo princípio da indução eletromagnética. Funciona de maneira similar aos enrolamentos primários e secundários de um transformador. O oscilador e a bobina, juntos, produzem um campo magnético fraco. Quando um objeto metálico entra na zona desse campo, uma corrente é induzida em sua superfície e por causa da interferência com o campo magnético, energia é extraída do circuito oscilador do sensor, diminuindo a amplitude da oscilação e causando uma queda de tensão. O circuito de detecção do sensor identifica a queda de tensão do circuito do oscilador e responde mudando o estado do sensor. O seu funcionamento é representado pela figura [2.4](#).

A distância linear entre os pontos de ativação e de desativação de um sensor é chamada de histerese ou curso (deslocamento) diferencial. A histerese é necessária para ajudar a evitar a trepidação de contatos (ligando e desligando rapidamente) quando o sensor fica

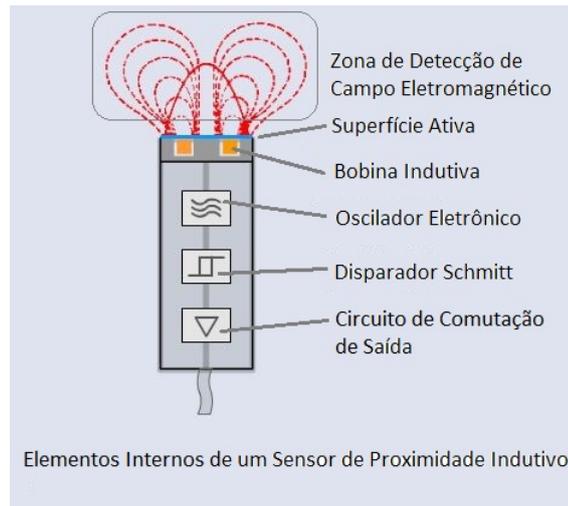


Figura 2.3: Elementos internos de um sensor indutivo.

sujeito a choque e vibração ou quando o alvo fica imóvel no alcance do valor nominal valor. As amplitudes de vibração devem ser menores do que a banda de histerese para evitar oscilações. A figura 2.5 ilustra esta característica.

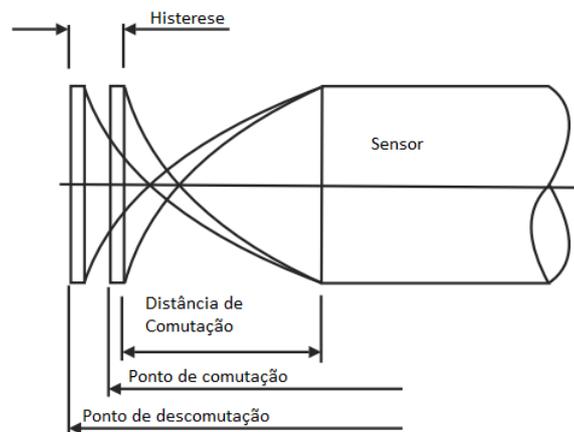


Figura 2.5: Histerese.

Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de se utilizar. São placas baseadas na série de microcontroladores Atmega, possuem pinos para entrada ou saída digital e pinos de entradas analógicas. Para comunicação, o Arduino dispõe de portas para a interface assíncrona (UART). A sua IDE (Integrated development environment) presente permite que o usuário possa escrever e editar o código que será convertido em instruções para o microcontrolador executar. A interface foi escrita na linguagem Java, que foi utilizada como base para os projetos Processing e Wiring, e sua programação se assemelha muito à linguagem C/C++. Uma placa

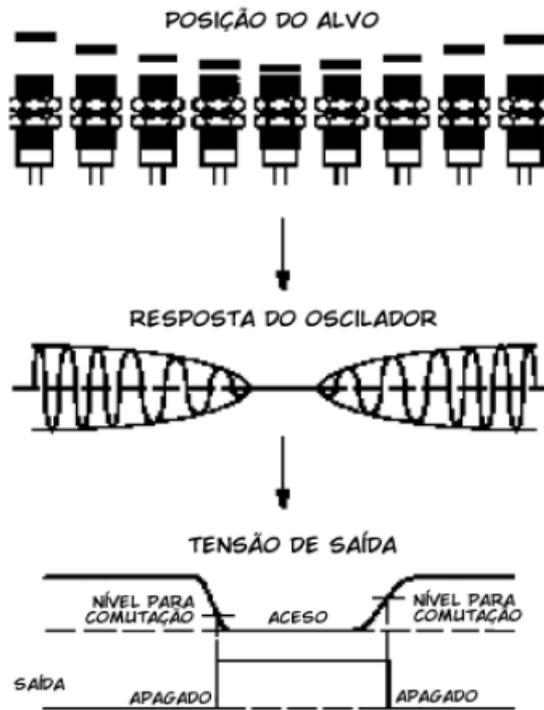


Figura 2.4: Funcionamento de um sensor indutivo.

arduino UNO pode ser vista na figura [2.6](#)



Figura 2.6: Placa Arduino Uno.

Com o Arduino é possível gerar pulsos em diferentes frequências. O microcontrolador Atmega328 (que está presente no Arduino Uno) tem três timers/contadores dentro do chip. Ao se modificar estes contadores é possível se gerar frequências de até 8MHz, uma boa explicação sobre o uso de timers e contadores do Arduino pode ser vista em [GAMMON \(2012\)](#).

Outra função importante disponibilizada pelo Arduino são as interrupções externas. As interrupções permitem que os microcontroladores respondam a eventos sem que seja preciso a todo o momento comunicar com o Arduino para verificar se sofreu alteração de estado. Ou seja, ao se ativar uma interrupção, uma rotina será executada, e assim que ela se encerrar, o código retorna para o local de onde a interrupção foi ativada.

Netbeans

O NetBeans é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*) gratuito e de código aberto para desenvolvedores de software nas linguagens Java, JavaScript, HTML5, PHP, C/C++, Groovy, Ruby, entre outras. É desenvolvido pela empresa Sun Microsystems.

A IDE NetBeans auxilia programadores a escrever, compilar, debugar e instalar aplicativos, e foi arquitetada em forma de uma estrutura reutilizável que visa simplificar o desenvolvimento e aumentar a produtividade, pois reúne em uma única aplicação todas estas funcionalidades. Totalmente escrita em Java, mas que pode suportar qualquer outra linguagem de que desenvolva com Swing, como C, C++, Ruby e PHP. Também suporta linguagens de marcação como XML e HTML.

O software conta com o GUI Builder (GUI, do inglês *Graphical User Interface*), que torna possível construir GUIs de aparência profissional sem um conhecimento profundo dos gerenciadores de layout. Por possuir uma comunidade grande em todo o mundo, o Netbeans IDE permite o desenvolvimento rápido e fácil de suas aplicações Java.

Injeção Eletrônica

A injeção eletrônica é um sistema de alimentação de combustível de um MCI. Sua utilização em larga escala se deve à necessidade de as indústrias de automóveis reduzirem o índice de emissão de gases poluentes. Esse sistema permite um controle mais eficaz da mistura admitida pelo motor, mantendo-a mais próxima da mistura estequiométrica (mistura ar / combustível). Isso se traduz em maior economia de combustível, já que o motor trabalha sempre com a mistura adequada, e também melhora o desempenho do motor.

O corpo da injeção eletrônica é composto por sensores e atuadores, sendo os mais conhecidos os sensores de temperatura, sensor de rotação, sensor de abertura da válvula borboleta, sensor de pressão, a bomba de combustível, o regulador de pressão de combustível, o bico injetor e a unidade controladora.

O bico injetor é uma eletroválvula comandada pela UCE (Unidade de comando eletrônico) que promove sua abertura a partir da energização de sua bobina solenoide. Quando o solenoide não é energizado, o êmbolo do circuito magnético é forçado com sua vedação contra a válvula pela mola presente, e fecha a passagem de combustível. Quando a bobina solenoide é energizada, o êmbolo é atraído e eleva o fuso em cerca de 0,15 mm, de modo que o combustível possa fluir através da passagem anular calibrada em torno da haste da válvula. A extremidade dianteira do fuso do injetor tem a forma de um ponto de atomização com o topo do piso para atomizar o combustível injetado. A massa do combustível injetado por injeção é controlada pela variação da duração do pulso de corrente que excita

a bobina do solenoide (GUPTA (2012)). A estrutura de um bico injetor pode ser vista na figura 2.7.

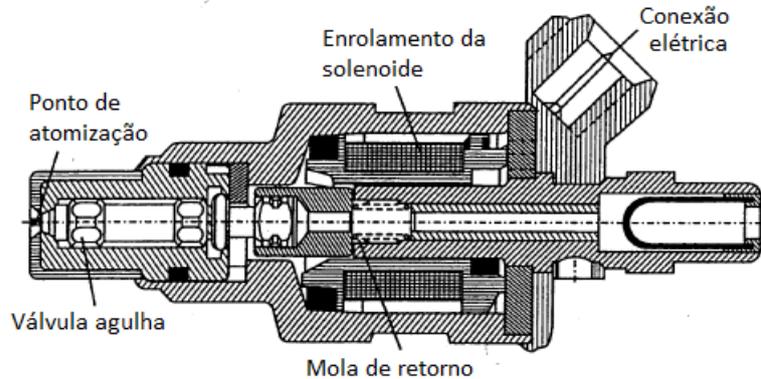


Figura 2.7: Estrutura do Bico injetor (adaptado de GUPTA (2012)).

2.3.3 Calibração

A calibração é o processo realizado para estabelecer a relação entre os valores adquiridos por um instrumento de medição e os valores correspondentes aos padrões utilizados. Esse procedimento é importante pelo fato de que certifica que os instrumentos usados estão dentro de um critério aceitável, de forma a não interferir no resultado final do projeto.

A curva de calibração média para um instrumento geralmente é tomada como uma linha reta passando pelos dados normalmente espalhados, conforme definido por algum critério escolhido. O mais comum é o critério de mínimos quadrados, que minimiza a soma dos quadrados dos desvios verticais dos pontos de dados da linha ajustada (o procedimento de mínimos quadrados também pode ser usado para ajustar curvas diferentes de linhas retas a dados dispersos). A equação da reta é tomada como

$$q_o = mq_i + b \quad (2.3)$$

Onde:

$$q_o \triangleq \text{valores de saída (variável dependente)} \quad (2.4)$$

$$q_i \triangleq \text{valores de entrada (variável independente)} \quad (2.5)$$

$$m \triangleq \text{inclinação da reta} \quad (2.6)$$

$$b \triangleq \text{interseção da reta com o eixo vertical} \quad (2.7)$$

As seguintes equações podem ser usadas para calcular m e b :

$$m = \frac{N \sum q_i q_o - (\sum q_i)(\sum q_o)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (2.8)$$

$$b = \frac{(\sum q_o)(\sum q_i^2) - (\sum q_i q_o)(\sum q_i)}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (2.9)$$

onde

$$N \triangleq \text{Número de dados} \quad (2.10)$$

Os desvios padrão de m e b podem ser encontrados em:

$$s_m^2 = \frac{N s_{q_o}^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (2.11)$$

$$s_b^2 = \frac{s_{q_o}^2 \sum q_i^2}{N \sum q_i^2 - (\sum q_i)^2} \quad (2.12)$$

onde

$$s_{q_o}^2 = \frac{1}{N} \sum (m q_i + b - q_o)^2 \quad (2.13)$$

O símbolo s_{q_o} representa o desvio padrão de q_o . Ou seja, se q_i for fixado e repetido repetidamente, q_o resultará em valores distintos, com a quantidade de variação sendo indicada por s_{q_o} (DOEBELIN; MANIK (2007)).

Desenvolvimento

Este capítulo será dividido em cinco partes, onde serão apresentados: a descrição inicial da planta utilizada no projeto, as melhorias executadas, sua instrumentação, o desenvolvimento da interface de comunicação e os testes realizados para verificação do funcionamento da instrumentação e comunicação.

3.1 Descrição da Planta

Neste trabalho será utilizada a planta de um motor de combustão interna de dois tempos já presente no laboratório de Termodinâmica e Fenômenos de transporte do CEFET-MG campus V Divinópolis.

A planta pode ser vista na figura [3.1](#) e apresenta os seguintes componentes:

- Motor de dois tempos Yamaha RD135;
- Corpo de Injeção eletrônica de Honda CG 150 completo com sensor triplex (sensor de pressão na admissão, sensor posição da válvula borboleta e sensor de temperatura de admissão);
- Bomba de combustível modelo Honda NXR 150 de 3 bar;
- Bomba de gasolina para partida à frio 12V;
- Reservatório de combustível de Fiat uno Flex;
- Fonte de computador modelo LC-B450E;
- Circuito de chaveamento do bico injetor;
- Sensor Indutivo LJ18A3-8-Z/CX (Normal aberto e Normal fechado).



Figura 3.1: Planta inicial do motor de combustão interna de dois tempos.

Em seu projeto inicial o objetivo da planta era o mesmo do presente trabalho, ser instrumentada para que fosse possível observar a rotação do motor em tempo real. Para isso foi utilizado o sensor indutivo LJ18A3-8-Z/CX posicionado na tampa do motor, e a medição era realizada através de um rasgo na engrenagem de saída do motor. O posicionamento do sensor Indutivo e a engrenagem de leitura podem ser vistos na figura

[3.2](#)



Figura 3.2: Posicionamento do sensor indutivo e engrenagem com rasgo para medida da rotação.

Contudo, alguns problemas foram identificados, como a leitura do sensor, que não estava compatível com o esperado e a falta de estabilidade da estrutura de aço. A leitura do sensor apresentava dois problemas, primeiramente, a engrenagem com o rasgo na saída

do motor não se apresentava fixa, se deslocando horizontalmente, o que não permitia a identificação do rasgo pelo sensor de maneira precisa. Outro problema é que o sensor estava apresentando uma frequência de comutação inferior a apresentada no datasheet. A estrutura de aço não era fixada, apresentava dimensões desiguais em seus apoios, e não possuía um travamento estrutural para garantir sua rigidez, o que fazia com que vibrasse e se deslocasse durante o funcionamento do motor. Os choques causados pela vibração afetaram suas soldas.

A partir da identificação destes problemas se deu início ao desenvolvimento das melhorias a serem executadas na planta.

3.2 Melhoria na estrutura mecânica da planta

Ao se realizar os primeiros testes na planta foi possível observar que a mesma não apresentava rigidez suficiente, uma vez que com o acionamento do motor, a estrutura de aço vibrava o que fazia com que se deslocasse, pois a mesma não se apresentava fixa. Algumas avarias foram também encontradas em algumas de suas soldas, devido a estrutura não apresentar travamento entre seus apoios e estar sofrendo a ação de esforços verticais. A estrutura de aço inicial pode ser vista na figura [3.3](#).



Figura 3.3: Estrutura de aço original.

Uma nova estrutura de aço foi modelada utilizando-se o software *SolidWorks*. Com o objetivo de se manter a estrutura rígida independente de forças horizontais ou verticais sendo aplicadas a ela foi planejado incluir barras horizontais em seus apoios, assim como desabar partes da cantoneira para uma solda completa em seu contato. A estrutura original foi desmontada e adicionou-se barras de perfil C. Para se reduzir o efeito da vibração vibra-stops foram incluídos na planta, juntamente com seu apoio também modelado no

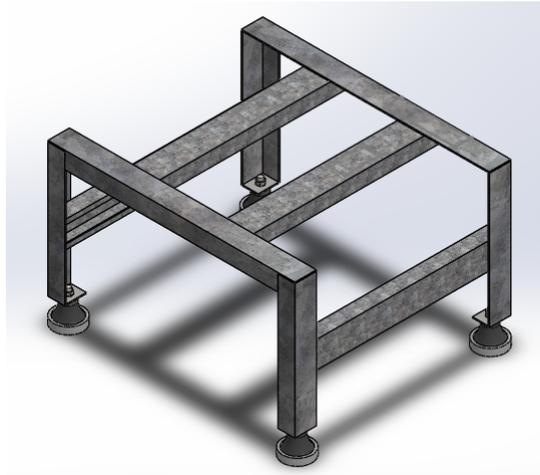


Figura 3.4: Estrutura de aço galvanizado modelada no software *SolidWorks*.

SolidWorks, que será fixado no chão. O desenho da estrutura pode ser visto na figura 3.4

Para assegurar que a nova estrutura irá suportar os esforços e vibração do motor, simulações com carga estática e para se verificar a frequência natural do sistema foram executadas no software *Ansys*.

Para provar que a estrutura suportaria o peso do motor e de seus componentes uma simulação com carga estática foi executada. Na simulação, mostrada nas figuras 3.5 e 3.6, duas cargas foram posicionadas na superfície da estrutura, uma simulando a carga do motor (20Kg), posicionada nos locais dos apoios, e outra representando os componentes (5Kg), distribuída ao longo do perfil em paralelo ao apoio do motor. Após a simulação obteve-se um resultado de deformação máxima de 0,051mm nos apoios do motor, comprovando assim que a estrutura suporta a carga estática dos componentes.

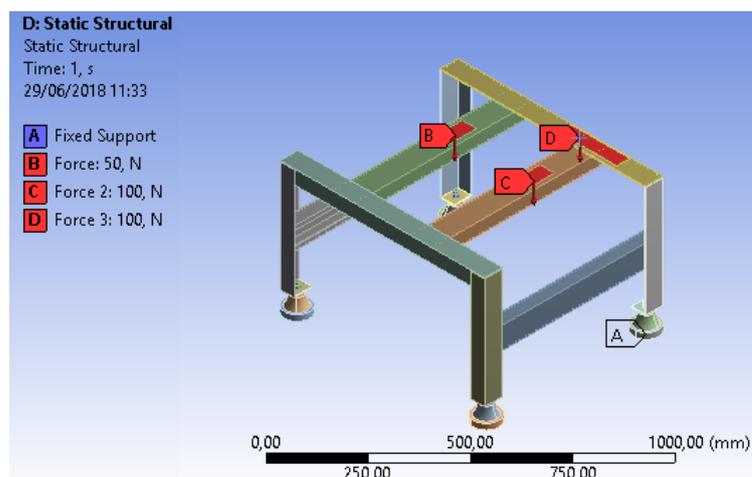


Figura 3.5: Posicionamento das forças.

Na simulação modal, optou-se por verificar 10 frequências naturais do sistema. A tabela 3.1 mostra os valores de frequências encontrados relativos a cada modo. O modo

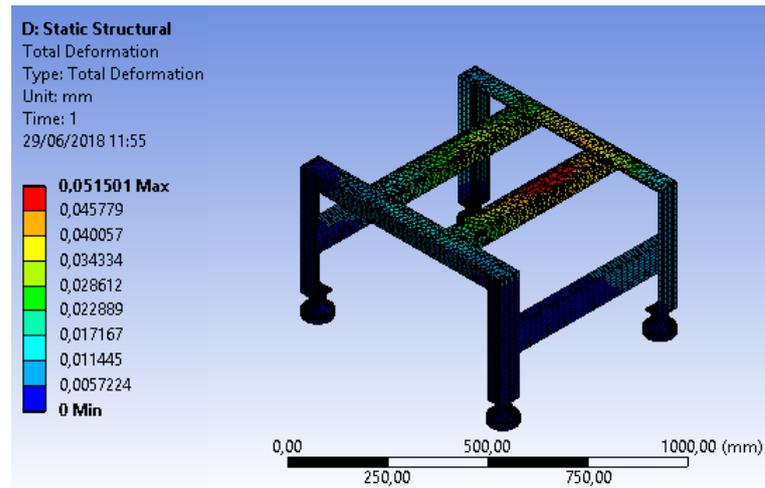


Figura 3.6: Simulação estática da estrutura no *Ansys*.

representa como o sistema se comportará caso o mesmo seja excitado frequência.

Tabela 3.1: Frequências Naturais da estrutura sem o peso do motor

Modo	Frequência (Hz)	Deslocamento máximo (mm)
1	27,168	8,5004
2	31,774	8,6695
3	43,696	10,58
4	67,308	8,7098
5	90,642	11,806
6	91,248	10,47
7	107,29	14,113
8	121,49	14,65
9	140,37	18,061
10	176,45	15,132

Se considerarmos que a frequência de excitação ocorre de acordo com a etapa de combustão do motor, ou seja, o número de vezes que ela ocorre em um segundo, podemos relacioná-la diretamente com a rotação, uma vez que em um MCI de dois tempos a combustão ocorre a cada revolução. Dessa maneira observa-se que é possível se atingir as frequências apresentadas na tabela [3.1](#).

Ao se limitar o funcionamento do motor entre 1000 e 5000 RPM, limita-se as frequência entre 16,6667 e 83,333 Hz. Com esta limitação podemos determinar quais os modos que a estrutura irá atingir, sendo estes os modos de 1 a 4.

Considerando o plano onde o suporte está apoiado, o modo 1 e 2 apresentam deslocamentos na horizontal e vertical, respectivamente. O modo 3 apresenta uma rotação em um eixo normal a este plano e o modo 4 uma elevação da estrutura. Com a fixação da estrutura no solo, espera-se que estes deslocamentos sejam insignificantes para o funcionamento e observação das variáveis do sistema.

Para as simulações, foram utilizados os dados de aço galvanizado presentes no *SolidWorks* e para a borracha do vibra-stop foi necessária uma pesquisa para encontrar suas propriedades. Através de sua dureza e um gráfico apresentado em [KUNZ; STUDER \(2006\)](#) foi possível aproximar seu Módulo de Young do valor de 7,5 MPa. Seu coeficiente de Poisson foi definido como 0,49.

A nova estrutura de aço e os apoios dos vibra-stop podem ser vistos nas figuras [3.7](#) e [3.8](#) respectivamente.



Figura 3.7: Estrutura de aço reformulada.



Figura 3.8: Apoio do vibra-stop usinado em Náilon.

Os apoios do motor também foram modificados de forma a se adequar a nova estrutura e melhorar sua rigidez. As figuras [3.9](#) e [3.10](#) mostram à esquerda os antigos apoios e à direita os novos. Uma placa de borracha foi posicionada embaixo de ambos a fim de reduzir o impacto da vibração.



Figura 3.9: Modificação dos apoios do motor.

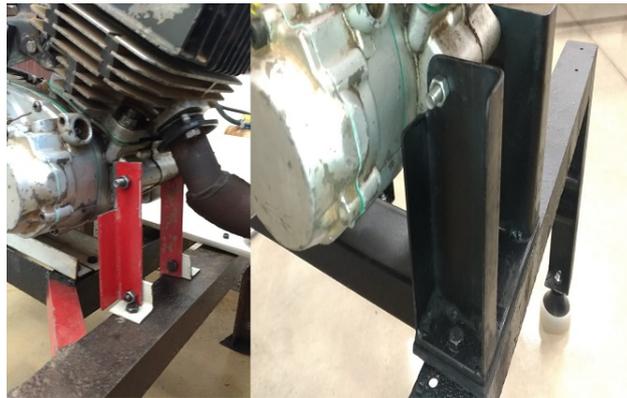


Figura 3.10: Modificação dos apoios do motor.

3.3 Instrumentação

3.3.1 Sensor de Rotação / Sensor PMI

Para a leitura da rotação de saída do motor optou-se por utilizar um sensor indutivo NPN LJ12A3-4-Z/BX (figura 3.11), devido a sua fácil utilização e alta frequência de comutação (500 Hz).



Figura 3.11: Sensor indutivo NPN LJ12A3-4-Z/BX (Normal Aberto).

Para a aplicação do sensor uma peça foi modelada no *SolidWorks* para que posteriormente fosse impressa em uma impressora 3D. Para se aumentar a precisão do sensor, foi definido que a peça contaria com quatro/dez pontos de medição distribuídos ao redor da circunferência, sendo assim, que a cada revolução o sensor contaria com quatro pulsos.

Com este sensor, a rotação máxima que pode ser obtida será de 125/50 rotações por segundo (7500/3000 RPM), pois com quatro/dez pontos de medição a frequência limite do sensor seria atingida com estes valores.

O motor da Yamaha RD135 tem uma rotação máxima de 8000 RPM, e sua saída, quando este está engatado na 5ª marcha, sua saída apresenta uma rotação máxima de 2240 RPM. Através do levantamento destes valores pode se observar que o sensor indutivo é capaz de realizar estas medições facilmente.

A peça modelada pode ser vista na figura [3.12](#).

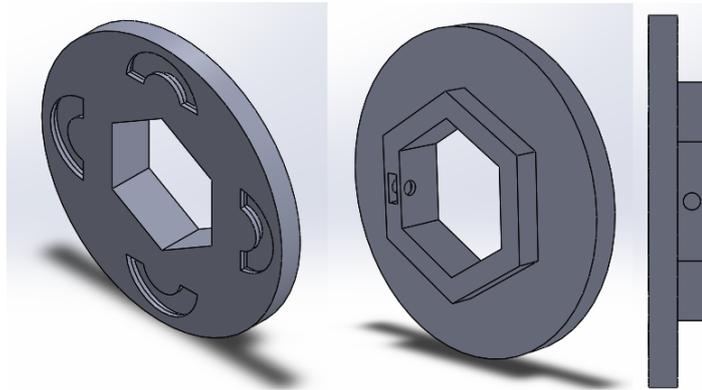


Figura 3.12: Modelagem da peça para o sensoriamento da rotação.

As partes metálicas do sensor foram adicionadas na etapa de impressão, como pode ser visto na figura [3.12](#). A peça posicionada no eixo de saída do motor pode ser vista na figura [3.14](#).



Figura 3.13: Posicionamento da parte metálica durante a etapa de impressão da peça auxiliar.

Para o apoio do sensor indutivo um protótipo foi projetado no *SolidWorks*. A primeira versão deste apoio consiste em uma peça com altura de 130mm, sendo essa a distância

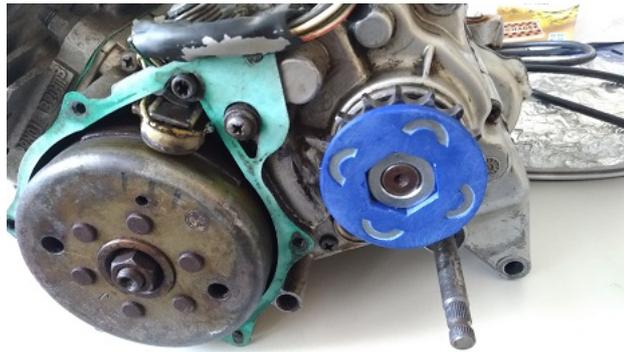


Figura 3.14: Peça auxiliar do sensor posicionada no eixo de saída do motor.

entre a base de madeira presente na estrutura de aço e a peça auxiliar para medir a rotação. O protótipo e seu posicionamento na planta podem ser vistos na figura [3.15](#).

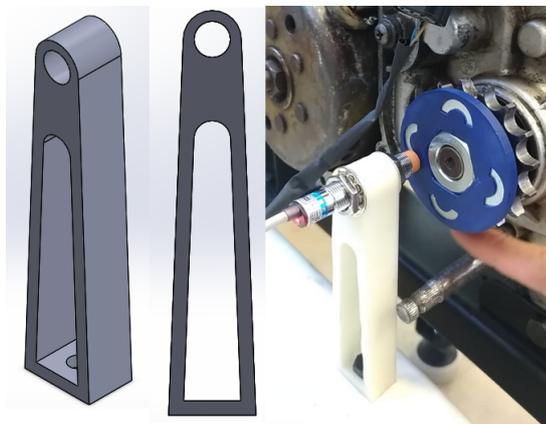


Figura 3.15: Protótipo de apoio do sensor indutivo para medição de velocidade.

Para uma melhor precisão da rotação de saída a peça auxiliar foi substituída por uma versão com mais pontos de prova. A nova peça é mostrada na figura [3.16](#).



Figura 3.16: Peça auxiliar para medição da velocidade na saída do motor com 10 pontos metálicos.

Com o objetivo de obter a informação da posição do pistão e otimizar o tempo da injeção de combustível foi necessária a aplicação de um sensor de PMI (Ponto Morto

Inferior), onde, ao passar por este ponto e iniciar o movimento ascendente, o virabrequim provoca uma pressão negativa no interior do cárter, o que promove a abertura da válvula reed. Para este sensor foram utilizados um ponto de metal acoplado a tampa do motor e um sensor indutivo para sua detecção durante a rotação. Os suportes de ambos, do ponto metálico e o do sensor indutivo foram impressos em impressora 3D. O modelo dos suportes e a sua aplicação na planta podem ser vistos na figura 3.17. O sensor PMI também pode ser utilizado para se medir a rotação do motor. Com um sensor indutivo de 500Hz de comutação e com um único ponto de medição é possível se obter uma rotação de até 30000 RPM.

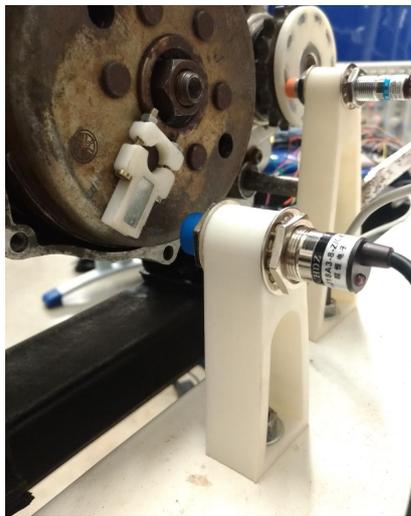


Figura 3.17: Sensor PMI e suporte para sensor indutivos posicionados no bloco do motor.

3.3.2 Acionamento da válvula borboleta

A admissão do ar é um fator importante para promover o aumento da velocidade em um motor de combustão interna, uma vez que a proporção de massa de combustível em relação a massa de ar deve ser mantida constante a fim de se obter uma mistura estequiométrica. Em um corpo de injeção eletrônica, a vazão de ar para a admissão é orientada de acordo com a abertura da válvula borboleta. Para se possibilitar o controle do movimento da válvula borboleta acoplou-se um micro servomotor MG90S em seu eixo.

O micro servomotor MG90S possui um torque de 1.8 kgf·cm quando alimentado com 5V, o que é mais que o suficiente para o movimento da válvula borboleta, onde deve vencer apenas o atrito, que chega a ser desprezível.

Para o acoplamento foi modelado um suporte que foi acoplado ao corpo de injeção. O suporte foi inicialmente fabricado em impressão 3D afim de se reduzir os erros da prototipagem, após se definir um suporte que atendia bem a estabilidade do acoplamento, executou-se usinagem do mesmo. O modelo do suporte e seu acoplamento podem ser vistos na figura 3.18.

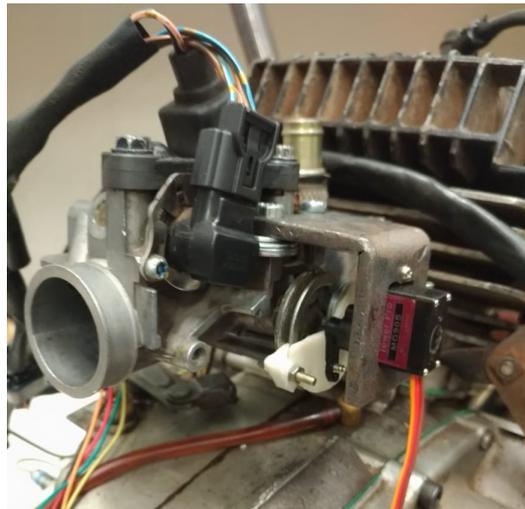


Figura 3.18: Suporte do servomotor para acionamento da válvula borboleta.

3.3.3 Injeção Eletrônica

O Corpo de Injeção eletrônica presente na planta corresponde ao modelo para a motocicleta Honda CG 150 e pode ser visto na figura 3.19. O sistema também conta com o sensor triplex, que possui um sensor de posição da válvula borboleta conhecido como TPS (*Throtthe Position Sensor*), sensor de temperatura do ar da admissão IAT (*Intake Air Temperature*) e o sensor que mede a pressão absoluta no coletor de admissão MAP (*Manifold Absolute Pressure*).



Figura 3.19: Corpo de injeção eletrônica completo (Honda CG 150).

Sabe-se que a cada revolução em um MCI de dois tempos ocorre uma etapa de combustão, onde é desejado uma mistura estequiométrica de ar/combustível. Para se obter uma mistura rica dois fatores são importantes a serem mensurados: o tempo de abertura do bico injetor e o fluxo de combustível de acordo com este tempo de abertura.

Após uma pesquisa, não se encontrou dados sobre a vazão disponibilizada pelo bico injetor presente no corpo de injeção. Assim, foi iniciada a etapa de calibração do bico injetor, com o objetivo de encontrar sua taxa de vazão mássica de combustível de acordo com o seu tempo de abertura.

Para os testes com o bico injetor desenvolveu-se um código através da plataforma Arduino, que foi utilizado como gerador de pulsos para a abertura do bico injetor através do circuito de chaveamento, composto pelo transistor de média potência TIP 122. O transistor é utilizado como chave para que a energia da fonte de computador modelo LC-B450E seja direcionada para o acionamento do bico injetor, que é atuado com uma tensão de 12V. O circuito de chaveamento pode ser visto na figura [3.20](#).

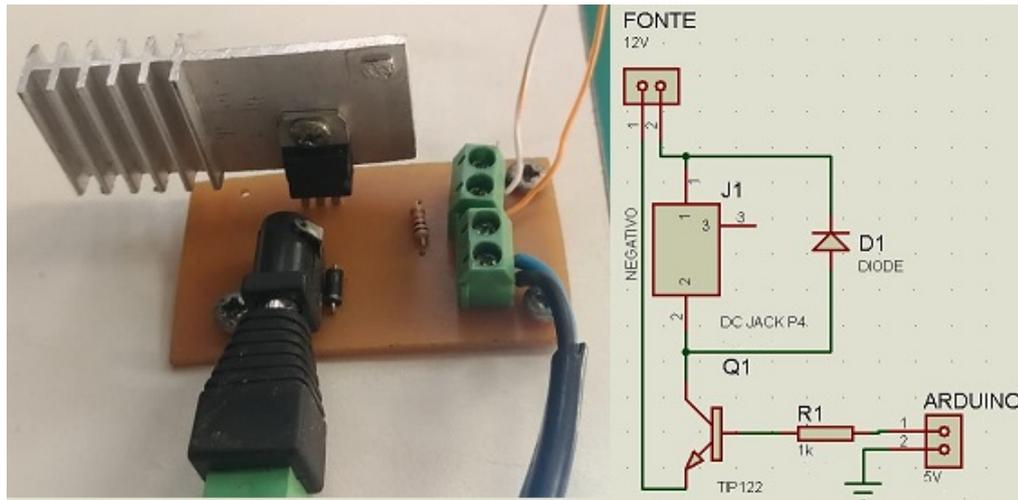


Figura 3.20: Circuito com TIP 122 para o chaveamento para abertura do bico injetor.

O combustível foi direcionado a partir do reservatório do Fiat Uno para o bico injetor através de duas bombas: uma bomba de gasolina 12V para partida à frio e uma bomba de combustível da moto Honda NXR 150 com pressão de 3 bar. A bomba de partida à frio foi utilizada para se direcionar a gasolina do reservatório para a outra bomba, que possui um regulador de pressão com a função de ajustar a pressão para o bom funcionamento do bico injetor.

Para se determinar a vazão mássica de combustível utilizou-se uma balança de precisão e um béquer, ambos disponibilizados pelo Laboratório de Química do CEFET-MG campus V. Os instrumentos podem ser vistos na figura [3.21](#).



Figura 3.21: Balança de precisão e béquer utilizados para medição da massa de combustível entregue.

Os ensaios ocorreram da seguinte maneira: o bico injetor recebe 50 pulsos para sua abertura, 5 pulsos por segundo para se padronizar. Modificando-se o tempo de abertura, o tempo de fechamento também era modificado a partir de um cálculo simples. Após o término dos pulsos, a massa do combustível era mensurada, e o processo se repetia por 3 vezes em cada tempo de abertura previamente escolhido. Com os valores de massa do combustível, uma média foi feita, e assim, determinou-se o fluxo para cada tempo de abertura.

Um ponto de partida para o início da calibração foi encontrar o tempo de abertura do bico injetor. Até 1,2 ms não foi possível medir uma quantidade significativa de combustível. O tempo de abertura do bico injetor foi alterado de 1,3ms até 10ms em acréscimos de 0,1ms, 0,5ms e 1ms em certos intervalos para se verificar o tempo de abertura.

Com os dados, obteve-se uma curva linear da massa de combustível entregue pelo tempo de abertura em função do tempo de abertura do bico injetor a partir do método dos mínimos quadrados dado pelas equações 2.8 a 2.13. A curva final pode ser vista na figura 3.22. As equações finais, com os valores de m , b e seus respectivos desvios padrões podem ser vistos nas equações 3.2 à 3.4 a seguir.

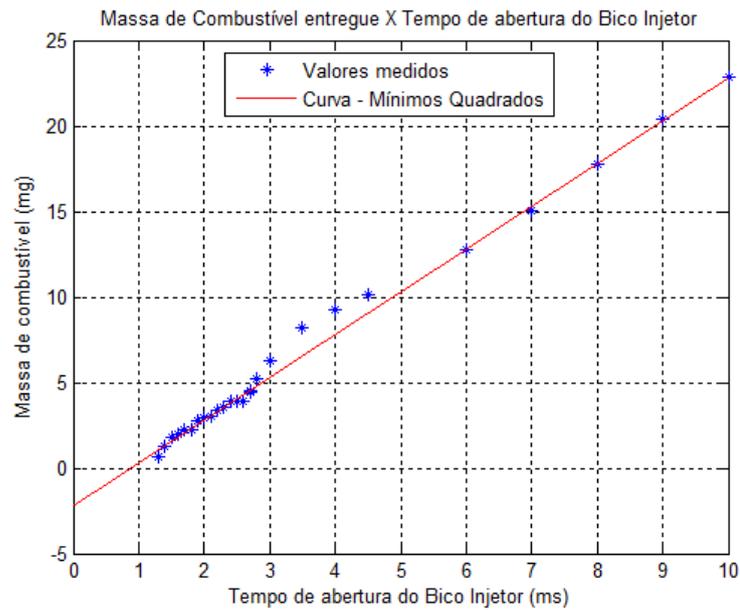


Figura 3.22: Curva linearizada da massa de combustível entregue a partir do tempo de abertura do bico injetor, obtida através do método dos mínimos quadrados.

$$Combustvel_{mg} = 2,499057 * TAbertura_{ms} - 2,215662 \quad (3.1)$$

$$m = 2,499057 \pm 0,016082304 \quad (3.2)$$

$$b = -2,215662 \pm 0,069326309 \quad (3.3)$$

$$s_{qo} = 0,198220758 \quad (3.4)$$

3.3.4 Sensor Triplex

O sensor triplex é composto por 3 sensores: sensor MAP (*Manifold Absolute Pressure*), sensor TPS (*Throttle Position Sensor*) e o sensor IAT (*Intake Air Temperature*). Estes sensores são utilizados para se estimar a vazão mássica do ar através do corpo de injeção através das medições da pressão ocasionada pela rotação do pistão, posição da abertura da válvula borboleta e a temperatura do ar que esta sendo admitido.

Para o ajuste dos dados em curvas foi utilizado o software *MATLAB* e sua ferramenta *CurveFit*. A seguir será apresentado o método de calibração dos sensores:

Sensor de Pressão de Admissão (MAP)

Para a calibração do sensor de pressão, verificou-se o nível de tensão do sensor durante a medição da pressão atmosférica. Na cidade de Divinópolis no dia 29/09/2018 através de sites de previsão de tempo obteve-se que o valor menssurado se referia a uma pressão

de 98kPa. Com esta informação e em posse de uma tabela de referência com os valores de tensão do sensor de acordo com a pressão **INJECTOR-REHAB**, identificou-se o sensor como 2 Bar MAP. Após essa definição, utilizou-se os valores obtidos pela tabela para o ajuste, resultando na seguinte equação:

$$Press\tilde{a}o = 3.96 * V_{sensor} + 8.142 \quad (3.5)$$

Sensor de Posição da Válvula Borboleta (TPS)

A calibração do sensor de posição da válvula borboleta foi executada através dos valores obtidos com o acionamento do servomotor. Primeiramente, posicionou-se o servomotor com sua referência no ângulo 0 e a válvula borboleta em sua posição inicial parcialmente fechada (α_0), em seguida variou-se os ângulos do servomotor até que a válvula borboleta se encontrasse totalmente aberta (90°). O valor de acionamento do servomotor que resultou na abertura total da válvula borboleta foi de 70° , a partir deste valor, adotou-se como ângulo inicial da válvula borboleta como sendo 20° , e a partir daí, com a variação do ângulo do servomotor foi possível obter a seguinte equação para o ângulo da válvula borboleta (α):

$$\alpha = 23.08 * V_{sensor} - 4.628 \quad (3.6)$$

Sensor de Temperatura do Ar de Admissão (IAT)

Para a calibração do sensor de temperatura fez-se uso do aquecimento do cartucho de uma extrusora de impressão 3D. O sensor foi posicionado em contato com o cartucho, que foi aquecido de 40 à 100°C . Com os valores da resistência do sensor medidos foi possível obter uma aproximação exponencial representada pela seguinte equação:

$$Temperatura = 1634 * e^{-0.01068x} + 109.3 * e^{-0.0007749x} \quad (3.7)$$

3.4 Interface Gráfica

Para a comunicação da planta com o computador foi desenvolvida uma interface gráfica através do *NetBeans IDE*. Uma vez que o *NetBeans* apresenta uma grande comunidade no mundo todo é bem simples de se utilizar e desenvolver interfaces.

No *NetBeans IDE* é possível gerar arquivos da categoria Forms GUI Swing, onde é possível criar uma interface gráfica a partir do posicionamento dos itens disponibilizados pela biblioteca swing, ou apenas criar classes Java para incluir os mesmos através de código.

Na interface, foi incluído um JSlider (figura 3.23) que é um controle deslizante, de onde será extraído o valor de RPM desejado em função da sua posição.

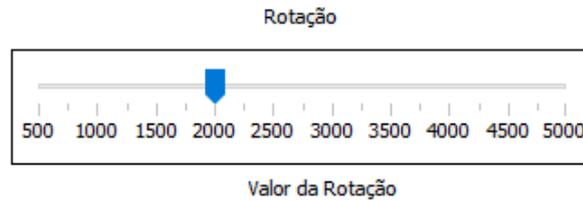


Figura 3.23: Exemplo de JSlider.

Como o objetivo do trabalho é a visualização em tempo real da rotação do motor foi utilizada a biblioteca *jfreechart* para a criação de um gráfico XY (figura 3.24) e uma *thread* para verificar todo dado recebido pela porta Serial. A atual interface pode ser vista na figura 3.25.

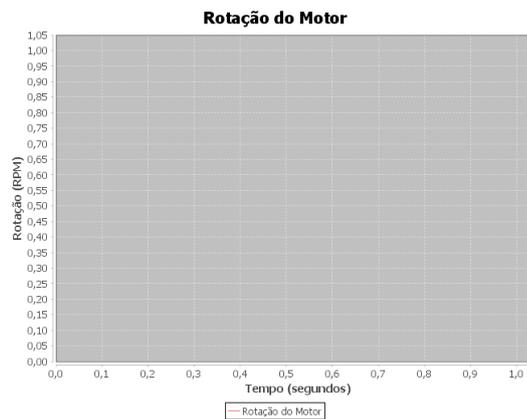


Figura 3.24: Exemplo de gráfico XY para visualização da rotação do motor.

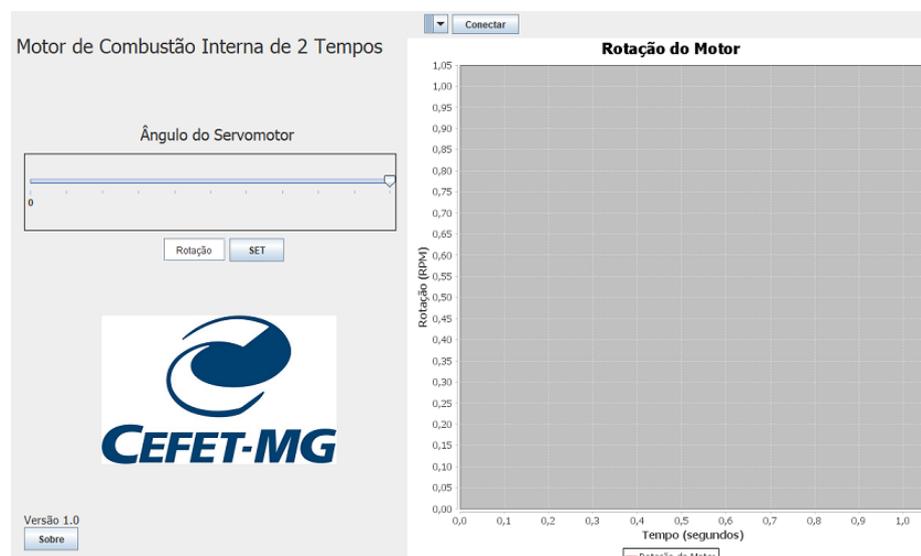


Figura 3.25: Interface atual.

Para a comunicação com o Arduino, foi utilizado a porta Serial, onde a biblioteca *RXTXcomm.jar* foi incluída.

3.5 Testes da instrumentação

A estrutura completa com o tanque de combustível e a fonte de computador pode ser vista na figura [3.26](#).



Figura 3.26: Estrutura completa improvisada para simulação.

Para os primeiros testes da instrumentação, o motor foi posicionado na 5ª marcha, que apresenta uma redução de $0,916 * 3,894 = 3,566904$ em relação a velocidade do motor, de acordo com a tabela que apresenta a relação das marchas para o motor da Yamaha RD135 mostrada na figura [3.27](#).

	RX125		RD135	
	Dentes	Relação	Dentes	Relação
Relação primária	19/74	3,894	19/74	3,894
Relação secundária	35/16	2,188	39/16	2,437
1 Marcha	34/12	2,833	34/12	2,833
2 Marcha	30/16	1,875	30/16	1,875
3 Marcha	26/19	1,368	26/19	1,368
4 Marcha	24/22	1,090	24/22	1,090
5 Marcha	22/24	0,916	22/24	0,916

Figura 3.27: Tabela de relações das marchas dos motores Yamaha RX 125 e RD 135.

Estabeleceu-se uma rotação do motor de 1500 RPM. Com esta rotação o motor deveria apresentar 25 rotações por segundo e cerca de 420 RPM na saída. Definiu-se o tempo

de injeção de 2ms, sendo aplicados em intervalos constantes. O gráfico resultante desta simulação pode ser visto na figura 3.28.

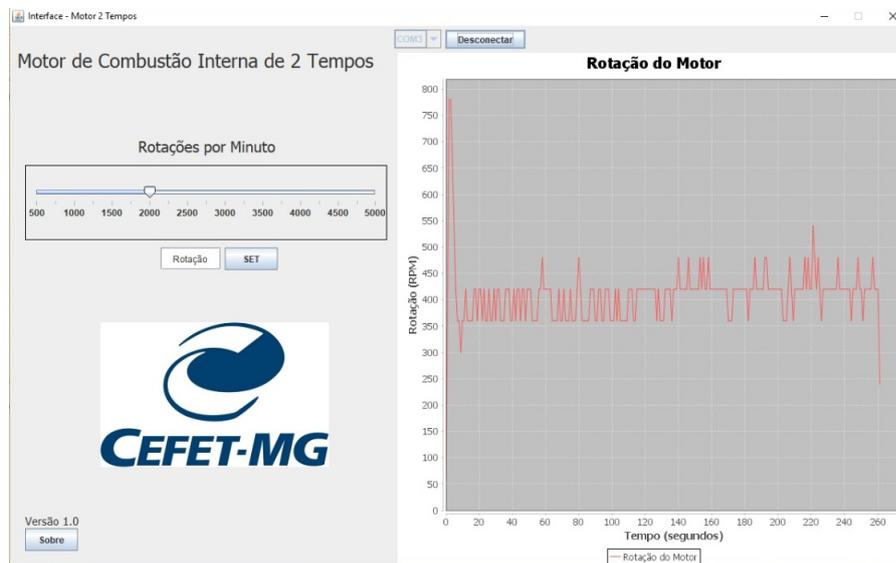


Figura 3.28: Gráfico da rotação do motor.

A partir deste teste, observou-se que o sistema apresentou o funcionamento esperado, com uma rotação de saída de aproximadamente 420 RPM. Com esta rotação observa-se uma redução de 3,57142 em relação a velocidade estabelecida para o motor.

Para melhorar o funcionamento do sistema motor dois tempos foi definido que a injeção de combustível aconteceria no momento em que o sensor PMI se ativasse. Consequentemente a rotação do motor seria calculada de acordo com o número de ativações do sensor PMI em um intervalo de um segundo. A figura 3.29 mostra a rotação do motor obtida em um dos testes.

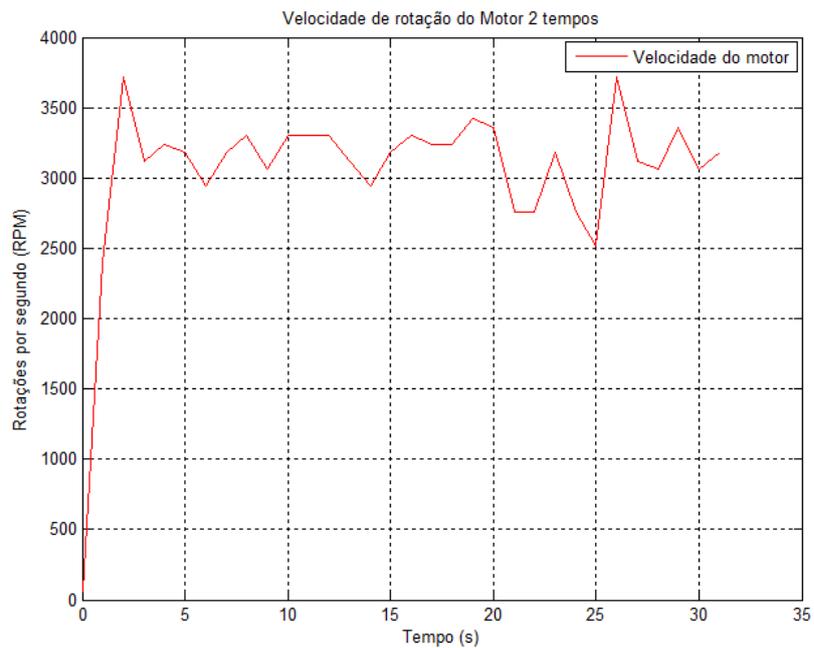


Figura 3.29: Rotação do motor com a válvula borboleta fechada ($\alpha_0 = 20^\circ$, tempo em alta do bico injetor = 2.6732ms).

Com o objetivo de se obter um valor de velocidade em regime permanente mais preciso foi adicionado um filtro de média móvel na saída. O sinal da saída do motor com o filtro de média aplicado pode ser visto na figura [3.30](#) abaixo.

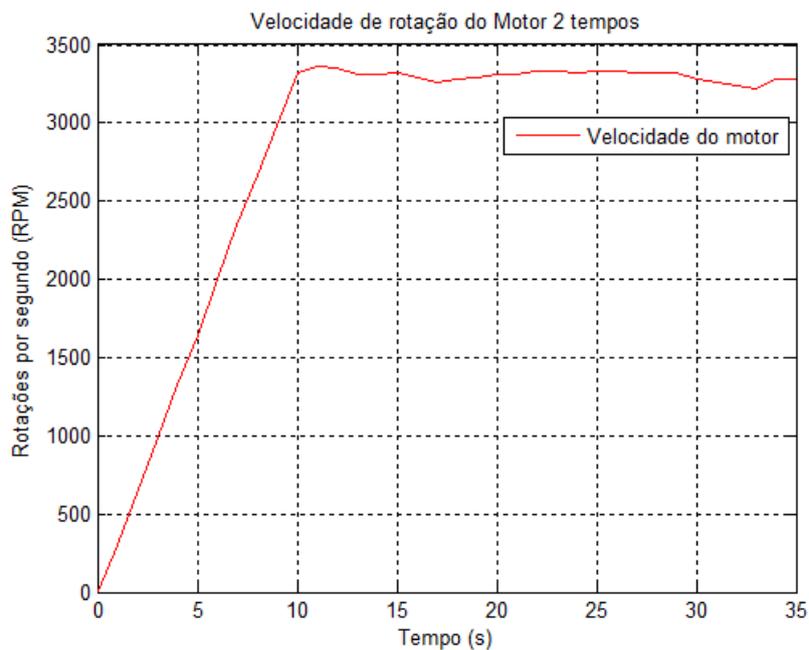


Figura 3.30: Rotação do motor com a válvula borboleta fechada ($\alpha_0 = 20^\circ$, tempo em alta do bico injetor = 2.6732ms) (filtro de média aplicado).

3.5.1 Conclusões do capítulo

Através do levantamento das melhorias necessárias e dos sinais desejados para a modelagem do motor finalizou-se a instrumentação da planta.

Com a melhoria da estrutura da planta foi possível realizar a partida do motor com maior facilidade e mantê-lo mais estável, facilitando assim a sua etapa de instrumentação.

Ao se definir as variáveis a serem manipuladas e controladas, estudou-se a aplicação dos sensores e suas atuais faixas de operação. O sensor indutivo foi o que apresentou ser a melhor opção para a aplicação, devido a sua alta frequência de resposta e sua imunidade à vibração. Com este sensor foi possível se obter tanto a velocidade de rotação do motor (na faixa de 0 à 30000RPM) quanto da sua saída (na faixa de 0 à 2240RPM).

Através do desenvolvimento da interface gráfica estabeleceu-se a comunicação do sistema com a plataforma Arduino, e da plataforma com o computador, possibilitando a obtenção das curvas do sistema. Para se calcular as rotações foi estabelecido um tempo de resposta da interface gráfica de 1s, sendo que o Arduino realiza os cálculos internamente durante este intervalo de amostragem. Com os testes da instrumentação e comunicação com o computador foi possível se confirmar o funcionamento do sistema, e ao se aplicar o filtro de média a curva de rotação do motor se apresentou mais estável.

A próxima etapa será a modelagem do sistema.

Capítulo 4

Modelagem

Neste capítulo primeiramente será apresentado o diagrama de blocos simplificado para uma modelagem do sistema de um MCI dois tempos, juntamente com a explicação de cada bloco. Posteriormente é demonstrado o procedimento utilizado para a identificação do sistema em caixa preta, e para concluir, a validação dos modelos encontrados.

4.1 Modelagem do sistema de um MCI dois tempos

Um modelo de MCI de dois tempos pode ser simplificado através do seguinte diagrama de blocos.

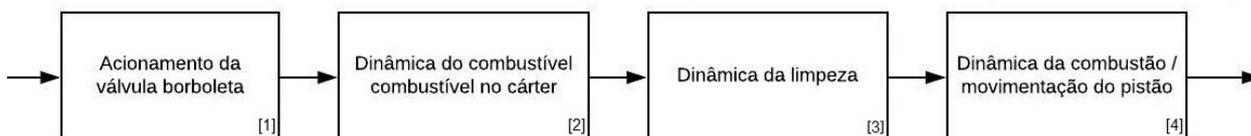


Figura 4.1: Diagrama simplificado para a modelagem de um motor dois tempos.

Resumidamente podemos simplificar o funcionamento de um motor dois tempo como: o acionamento de sua válvula borboleta, controlando a vazão de ar na admissão, a admissão da mistura de ar-combustível no interior do cárter, a admissão da mistura fresca e a exaustão dos gases queimados através da etapa da limpeza, e a combustão após a compressão, gerando o movimento do pistão.

O movimento do pistão influencia nos demais blocos, porém com o objetivo de simplificar e de tornar mais didático esta influência permaneceu oculta no diagrama de blocos.

A seguir serão detalhadas as equações e os modelos presentes em cada um dos blocos, com o tópico secundário relativo ao subscrito. A etapa da exaustão de gases queimados não será abordada neste trabalho.

4.1.1 Acionamento da válvula borboleta

Para a modelagem de uma válvula dois aspectos diferentes podem ser considerados, o primeiro é o movimento da válvula e o segundo é a vazão mássica de ar através dela [ERIKSSON; NIELSEN \(2014\)](#). Neste projeto está presente uma válvula do tipo borboleta, a figura [4.2](#) exibe sua representação, onde o ângulo controla a área de fluxo.

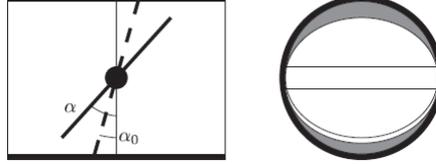


Figura 4.2: Representação de vista de corte do interior do corpo da válvula onde a válvula está fechada com um ângulo α_0 e apresenta um ângulo α . A figura a direita apresenta a vista da área de fluxo (Adaptada de [ERIKSSON; NIELSEN \(2014\)](#)).

Pode-se estimar a vazão de ar através da válvula borboleta a partir da equação [4.1](#) após se assumir algumas suposições sobre o comportamento do fluxo (para mais detalhes sobre a equação ler [GUZZELLA; ONDER \(2009\)](#) seção 2.3.2).

$$\dot{m}(t) = c_d \cdot A(t) \cdot \frac{p_{in}(t)}{\sqrt{R \cdot \vartheta_{in}(t)}} \cdot \Psi \left(\frac{p_{in}(t)}{p_{out}(t)} \right) \quad (4.1)$$

Na equação [4.1](#), c_d é o coeficiente de descarga, $A(t)$ é a área disponível para a passagem do ar no tubo de admissão, Ψ é a função de fluxo, R é a constante universal dos gases, ϑ_{in} é a temperatura na admissão, p_{in} e p_{out} são as pressões de entrada e de saída da admissão.

A área da válvula borboleta pode ser simplificada se assumirmos as seguintes suposições: (i) desconsiderar o eixo da válvula, (ii) a placa é infinitamente fina, (iii) o tubo é circular com diâmetro D , (iv) a válvula está fechada em α_0 . Então a placa é elíptica com um eixo maior de comprimento $D/\cos(\alpha_0)$. Para esta simplificação a área se torna

$$A_{th}(\alpha) = \pi D^2 \left(1 - \frac{\cos(\alpha)}{\cos(\alpha_0)} \right) \quad (4.2)$$

que é simples, porém apresenta erros para grandes aberturas da válvula [ERIKSSON; NIELSEN \(2014\)](#). Se para a modelagem a abertura da válvula for importante, pode-se utilizar a equação detalhada disponibilizada por [HEYWOOD \(1988\)](#) (Eq. (7.18)).

A função de fluxo Ψ , dependendo dos fluidos de trabalho (ar de admissão, gás de exaustão em baixa temperatura, etc) pode ser aproximado pela equação [4.3](#) [GUZZELLA; ONDER \(2009\)](#).

$$\Psi \left(\frac{p_{in}(t)}{p_{out}(t)} \right) = \begin{cases} 1/\sqrt{2} & \text{para } p_{out} < \frac{1}{2}p_{in} \\ \sqrt{\frac{2p_{out}}{p_{in}} \left[1 - \frac{p_{out}}{p_{in}} \right]} & \text{para } p_{out} \geq \frac{1}{2}p_{in} \end{cases} \quad (4.3)$$

4.1.2 Dinâmica do cárter

Para o funcionamento do motor uma mistura ar-combustível deve ser fornecida a ele. Quando o fluxo de ar passa pelo corpo de injeção eletrônica um fluxo de combustível se desloca com ele, no caso deste trabalho, a mistura é admitida para o cárter.

Uma tese que serviu de base para o modelo apresentado aqui foi a de [ANDERSSON; WYCKMAN \(2015\)](#). O modelo escolhido para esta tese é um modelo de três estados tratando tanto *Wall wetting* como a mistura de gás no interior do cárter. Abaixo estão apresentados os modelos para a dinâmica do combustível e concentração de combustível no cárter .

Para a modelagem da dinâmica do combustível [ANDERSSON; WYCKMAN \(2015\)](#) se baseou no modelo desenvolvido por Aquino (1981), que originalmente estava representado no domínio do tempo, mas está representado no domínio θ utilizando substituição de variável apresentada na tese [\(ANDERSSON; WYCKMAN \(2015\)\)](#) equação 3.1).

$$\frac{d}{d\Theta}m_{ww} = X \frac{\dot{m}_{f,inj}}{2\pi} - \frac{1}{\omega\tau}m_{ww} \quad (4.4)$$

$$\frac{\dot{m}_{EV}}{2\pi} = (1 - X) \frac{\dot{m}_{f,inj}}{2\pi} + \frac{1}{\omega\tau}m_{ww} \quad (4.5)$$

Onde X é o parâmetro do percentual de impacto do combustível, ω é a velocidade angular do virabrequim e τ o tempo de ebulição.

Este modelo apresenta um estado m_{ww} que é a massa relacionada ao *wall wetting*, com a entrada $\dot{m}_{f,inj}$ que é a massa de combustível injetada pelo carburador e saída \dot{m}_{EV} que é a massa de combustível evaporada.

O modelo da concentração de combustível no cárter possui dois estados. Sendo eles $m_{tot,cc}$ e m_{EV} . As entradas deste modelo são $\dot{m}_{EV,in}$ que é a massa de combustível evaporada na entrada , $\dot{m}_{a,cc,in}$ que é a massa de ar que entra no cárter e $\dot{m}_{a,cc,out}$ que é a massa de ar que sai do cárter. A saída é $\dot{m}_{f,out}$ que é a massa de combustível que sai do cárter.

$$C = \frac{m_{EV}}{m_{tot,cc}} \quad (4.6)$$

$$\frac{d}{dt}m_{tot,cc} = \dot{m}_{EV,in} + \dot{m}_{a,cc,in} - \dot{m}_{tot,cc,out} \quad (4.7)$$

$$\frac{d}{dt}m_{EV} = \dot{m}_{EV,in} - C\dot{m}_{tot,cc,out} \quad (4.8)$$

$$\dot{m}_{EV,out} = C\dot{m}_{tot,cc,out} \quad (4.9)$$

Os modelos apresentados na tese foram todos discretizados para o tempo de amostragem de uma revolução. A proposta dos modelos é encontrar valores de X e τ que apresentem um comportamento realístico da dinâmica do cárter. Isto foi feito atribuindo valores

medidos como entradas e saídas para o modelo construído no *Simulink* e utilizando-o como estimador de parâmetros.

Outro artigo que vale a pena ser citado é o de [NAGAO; SHIMAMOTO \(1968\)](#) onde se realiza o estudo do volume do cárter na relação de entrega da massa de ar para o interior do cilindro na etapa de limpeza. O autor, após considerar que fluxo no interior do cárter é um processo adiabático chegou a definir fórmulas para a vazão do ar no interior do cárter.

4.1.3 Dinâmica da limpeza

Um grande problema na modelagem de um MCI de dois tempos é descrever o processo de limpeza. Desde o seu primeiro desenvolvimento, diferentes tipos de sistemas de limpeza foram projetados. Os três mais conhecidos hoje em dia são: limpeza cruzada, em loop e uniflow. A qualidade dos processos aumentam nesta ordem, sendo o de limpeza cruzada o mais simples [MERKER G. P.; GERSTLE \(1997\)](#).

Os parâmetros que avaliam a eficiência do processo de limpeza são: eficiência de carga η_C , a eficiência de limpeza η_S , a relação de entrega λ_S , a fração de massa de carga fresca nos gases da exaustão β . Eles são definidos como:

$$\eta_C = \frac{m_{fC}}{m_0} = \frac{\text{massa de carga entregue conservada}}{\text{volume deslocado x densidade do ar no ambiente}} \quad (4.10)$$

$$\eta_S = \frac{m_{fC}}{m_{fC} + m_{bg}} = \frac{\text{massa de carga entregue conservada}}{\text{massa de carga no interior do cilindro}} \quad (4.11)$$

$$\lambda_S = \frac{m_i}{m_0} = \frac{\text{massa de carga entregue}}{\text{volume deslocado x densidade do ar no ambiente}} \quad (4.12)$$

Os modelos encontrados na literatura podem ser classificados como zona única ou multi-zona, com uma subclassificação de fase única ou multifase. Zonas, são regiões que contém certo volume do interior do cilindro, devemos definir três delas: zona de carga fresca, zona de mistura e zona de curto circuito. Fase é uma parte de uma sequência temporal [MERKER G. P.; GERSTLE \(1997\)](#).

O modelo escolhido para este estudo foi o modelo de múltipla zona de BENSON/BADHAM. Os modelos multi zona possuem as seguintes suposições: Pressão constante, temperatura constante na zona, zonas diferentes podem ter diferentes temperaturas e não há transferência de calor entre as zonas.

O conceito de zona/fase definidas pelo modelo de BENSON/BRADHAM podem ser vistas na figura [4.3](#).

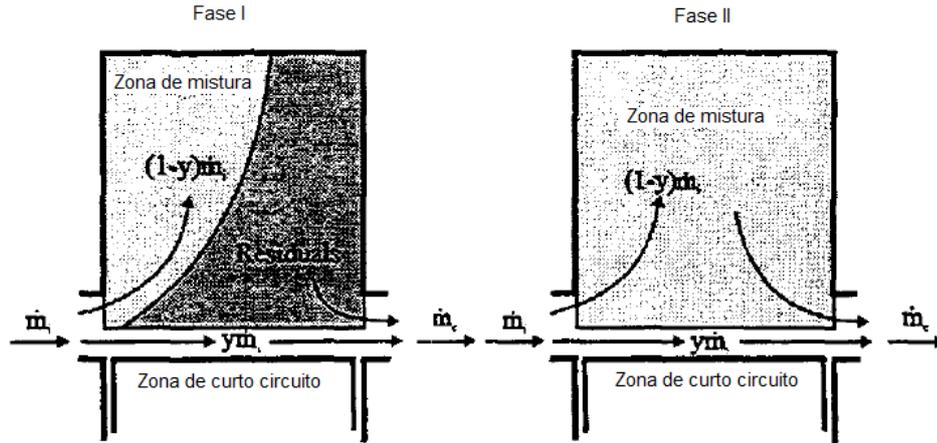


Figura 4.3: Conceito de zona/fase de acordo com o modelo BENSON/BRADHAM. Adaptado de [MERKER G. P.; GERSTLE \(1997\)](#).

As eficiências de limpeza e carregamento podem ser determinadas por:

$$\eta_C = \begin{cases} (1-y)\lambda_S; & \text{para } \lambda_S < \frac{x}{1-y} \\ 1 - (1-x)e^{x-(1-y)\lambda_S}; & \text{para } \lambda_S \geq \frac{x}{1-y} \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\beta = \begin{cases} y; & \text{para } \lambda_S < \frac{x}{1-y} \\ 1 - (1-y)(1-x)e^{x-(1-y)\lambda_S}; & \text{para } \lambda_S \geq \frac{x}{1-y} \end{cases} \quad (4.14)$$

Onde y é a fração de massa de mistura fresca que passa direto para a exaustão e x é a relação de deslocamento dada por: $x = \frac{V_{bg}}{V_{th}}$, onde V_{bg} é o volume de gases queimados e V_{th} é o volume do interior do cilindro.

4.1.4 Dinâmica da combustão / movimento do pistão

Muitos métodos foram desenvolvidos para modelar o processo de combustão em um motor, o método mais simples envolve modelos zero-dimensionais e os mais complexos utilizam modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*) multi-dimensionais. [LEWIS \(2014\)](#) apresenta o desenvolvimento de um novo modelo quasi-dimensional de um MCI de dois tempos com limpeza em loop, mostrando grande foco na etapa da combustão, através da análise do deslocamento em massa da frente da chama devido ao movimento rotativo criado pelo processo de limpeza. Para maiores informações sobre a modelagem da combustão em um MCI dois tempos ler [LEWIS \(2014\)](#) capítulo 4.

Para a modelagem do movimento do pistão seguiu-se os passos do artigo publicado por [DUYGU; KARABULUT \(2016\)](#). Em uma análise do movimento do pistão, foram obtidas 5 equações relacionadas ao movimento dinâmico e 4 relações cinemáticas. Adotando-se θ como o ângulo formado pelo movimento do virabrequim com o eixo vertical, e sua posição inicial como a posição do pistão em PMI, a orientação de acordo com a figura [4.4](#)

com rotação no sentido anti-horário, a partir da segunda lei de Newton para movimentos lineares e rotacionais foi possível se obter as seguintes equações:

$$m_p \frac{d^2 y_p}{dt^2} = F_{by} - F_w + F_{ch} - C_p \dot{y}_p - F_\infty \text{sgn}(\dot{y}_p) - C_s F_{bx} \text{sgn}(\dot{y}_p) \quad (4.15)$$

$$m_b \frac{d^2 x_b}{dt^2} = F_{bx} - F_{kx} \quad (4.16)$$

$$m_b \frac{d^2 y_b}{dt^2} = F_{ky} - F_{by} \quad (4.17)$$

$$I_b \frac{d^2 \psi}{dt^2} = F_{ky} \lambda \text{sen} \psi + C_{km} (\dot{\theta} - \dot{\psi}) + M_f - F_{kx} \lambda \text{cos} \Psi \quad (4.18)$$

$$I_{kr} \frac{d^2 \theta}{dt^2} = M_s - M_q - F_{ky} R \text{sen} \theta + F_{kx} R \text{cos} \theta - C_{km} (\dot{\theta} - \dot{\Psi}) - M_f - M_\tau \quad (4.19)$$

Onde F_{bx} e F_{by} são as componentes em x e y da força que a biela exerce no pistão, F_{ch} é a força exercida pela pressão no interior do cárter, F_w é a força exercida pelos gases no pistão, F_{kx} e F_{ky} são as forças vertical e horizontal aplicadas pelo pino da manivela na biela, F_∞ é a força de atrito do bloco de anel, M_f é o momento gerado pelo atrito dependente de carga no rolamento da manivela, M_τ é o momento gerado pelo atrito dependente de carga nos rolamentos principais, M_s é o momento do motor de arranque e M_q é o momento externo aplicado ao motor. C_s é o coeficiente de atrito na superfície lateral do pistão, C_p é o coeficiente de amortecimento viscoso lateral no pistão e C_{km} é o coeficiente de amortecimento viscoso torcional no rolamento da biela.

Para as relações cinemáticas temos:

$$\Psi = \arcsen \left[\frac{R}{\lambda} \text{sen} \theta \right] \quad (4.20)$$

$$y_p = -R \text{cos} \theta + \lambda \text{cos} \Psi + h_p \quad (4.21)$$

$$y_b = -R \text{cos} \theta + \lambda_c g \text{cos} \Psi \quad (4.22)$$

$$x_b = (\lambda - \lambda_c g) \text{sen} \Psi \quad (4.23)$$

Onde θ é a posição angular do virabrequim em respeito a posição inicial, Ψ é o ângulo da biela em relação ao eixo do cilindro, y_p é a posição do pino do pistão em y e x_b e y_b são as posições x e y do centro de gravidade da biela.

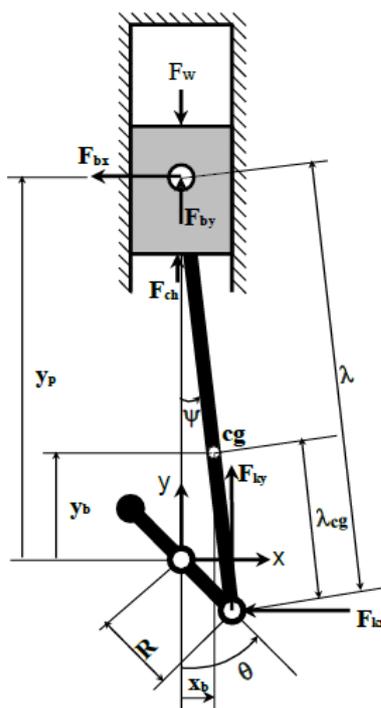


Figura 4.4: Mecanismo do pistão e coordenadas

Em [DUYGU; KARABULUT \(2016\)](#) também é apresentado a simulação destas equações, utilizando-se como entrada o momento de arranque e mantendo-se o movimento de acordo com a pressão no interior do cilindro F_w . O perfil de pressão que é gerado a cada ciclo do pistão foi obtido a partir de simulações da liberação de calor no interior do cilindro.

Uma outra análise bem simplificada do movimento do pistão pode ser vista em [NEFF \(2013\)](#).

4.2 Modelagem do sistema MCI dois tempos em caixa preta

Para uma análise a partir das equações dinâmicas dos diferentes processos que ocorrem no interior do MCI de dois tempos seria necessário um maior sensoriamento de suas informações. Como atualmente na planta objetivo deste estudo não há como se obter informações sobre sua dinâmica interna através de seus atuais sensores, decidiu-se realizar a identificação do seu sistema através de um modelo caixa preta. Primeiramente foi necessário se calibrar o atuador.

O atuador do sistema se baseia no acionamento da válvula borboleta para o controle da passagem de ar e o controle da injeção de combustível através do bico injetor.

De maneira a executar o sistema a partir de apenas um sinal de entrada, definiu-se que este seria o sinal de referência enviado ao servo para o posicionamento da válvula

borboleta e que a vazão de combustível estaria relacionada com o ângulo de abertura.

A quantidade de combustível necessária para se permitir um bom funcionamento do motor foi obtida a partir de uma adaptação da equação de vazão mássica de ar para o cilindro de motores disponível em [GUZZELLA; ONDER \(2009\)](#) (seção 2.3.3) e testes realizados utilizando diferentes tempos de acionamento do bico injetor. Com isso foi possível se estabelecer uma relação linear entre a abertura da válvula borboleta e o tempo de injeção de combustível para um limite de velocidade adotado.

A seguir serão apresentadas as identificações e validação dos modelos de acionamento da válvula borboleta e do sistema motor dois tempos. Para a identificação dos sistemas foi utilizado a ferramenta *System Identification Toolbox* do MATLAB (comando *ident*).

4.2.1 Acionamento da válvula borboleta

Para este projeto optou-se por se modelar o movimento da válvula borboleta, devido a possibilidade de se obter sua posição e a falta de sensores para se adquirir a vazão mássica do ar. Através do acoplamento do servomotor é possível estabelecer uma relação linear com o movimento do servo e da válvula. O modelo simplificado do sistema de servomotor com a válvula é apresentado na equação [4.24](#) a seguir [ERIKSSON; NIELSEN \(2014\)](#).

$$\alpha = H_{valvula}(s) * \alpha_{ref} \quad (4.24)$$

Onde α_{ref} é o sinal de entrada para o servo, $H_{valvula}$ é a função de transferência da válvula e α é o ângulo da válvula borboleta.

Após a atuação e obtenção da resposta do sistema [4.5](#), foi possível a identificação do modelo que representa o movimento da válvula borboleta $H_{valvula}(s)$ (equação [4.25](#)) foi obtido. O ângulo de abertura da válvula borboleta foi adquirido através do nível de tensão do sensor TPS. A faixa de abertura desejada para a borboleta é de 20° até 30° (Sendo assim, uma abertura de até 10° no servomotor, pois 20° é o ângulo inicial da válvula borboleta).

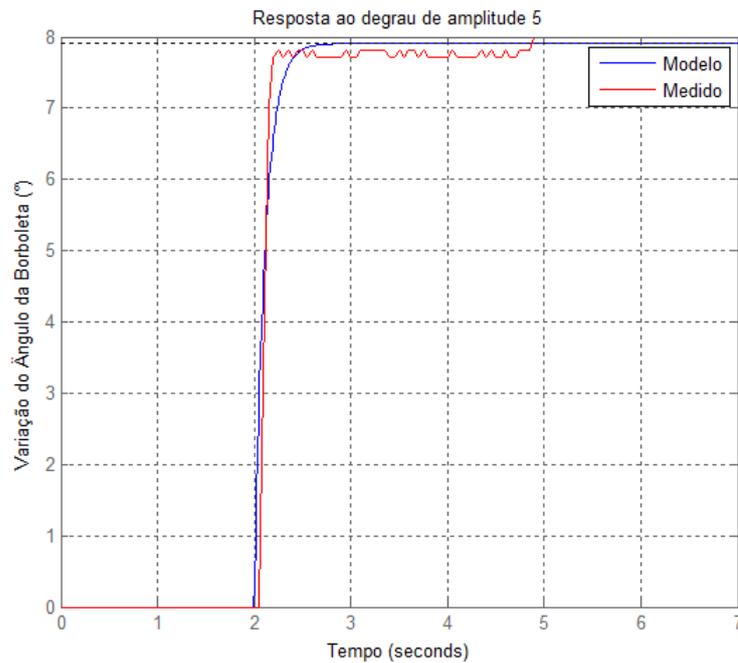


Figura 4.5: Identificação do modelo de acionamento da válvula borboleta. (Resposta ao degrau de amplitude 5).

$$H_{valvula}(s) = \frac{1.2513}{0.062072s + 1} \quad (4.25)$$

4.2.2 Bico Injetor

Durante a calibração do bico injetor, foi possível se obter a curva de sua dinâmica. Como seu comportamento era semelhante a um sistema de primeira ordem levantou-se um modelo cujos parâmetros foram ajustados de acordo com a resposta adquirida. A resposta do modelo e sua equação podem ser vistas abaixo na figura [4.6](#) e na equação [4.26](#).

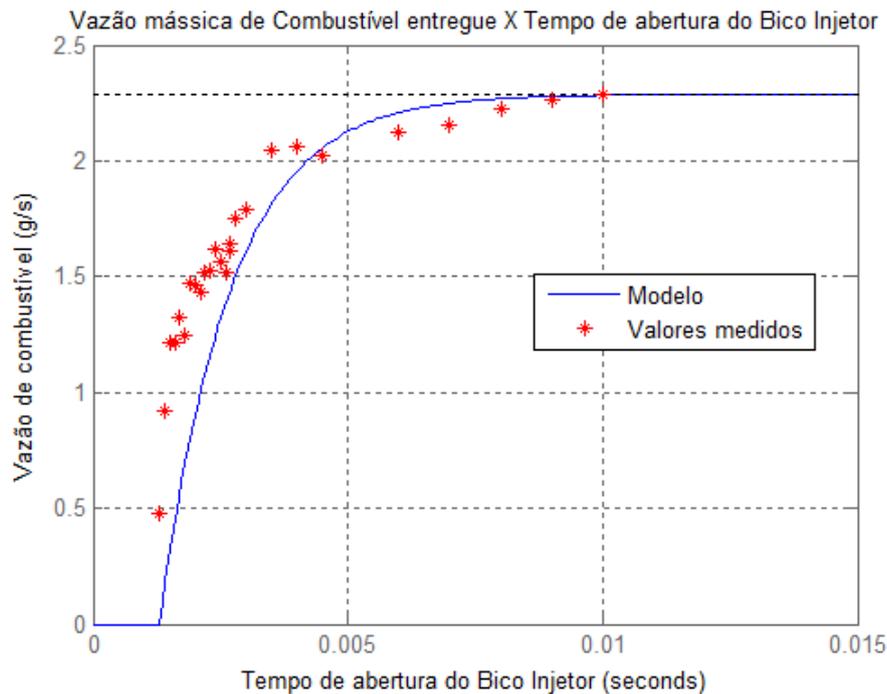


Figura 4.6: Dinâmica da vazão do bico injetor.

$$B(s) = \frac{2.2876}{0.0014s + 1} e^{-0.0013\theta s} \quad (4.26)$$

4.2.3 Motor dois tempos

Para obtenção dos dados para levantamento do modelo, ajustou-se o valor inicial do tempo de injeção de combustível para uma velocidade de partida de 2200 RPM que será seguida de uma abertura da válvula borboleta de 5° .

Por motivos de limitações na comunicação do arduino com o simulink no quesito de tempo de amostragem, foi necessário obter os dados da rotação através da comunicação do arduino com a interface Java. A velocidade do motor foi obtida com tempo de amostragem de 1 segundo. A curva obtida ao se aplicar o degrau de 5° na válvula borboleta e a resposta do modelo ao mesmo sinal de entrada podem ser vistas na figura [4.7](#). O modelo obtido através destes dados da é apresentado na equação [4.27](#) abaixo.

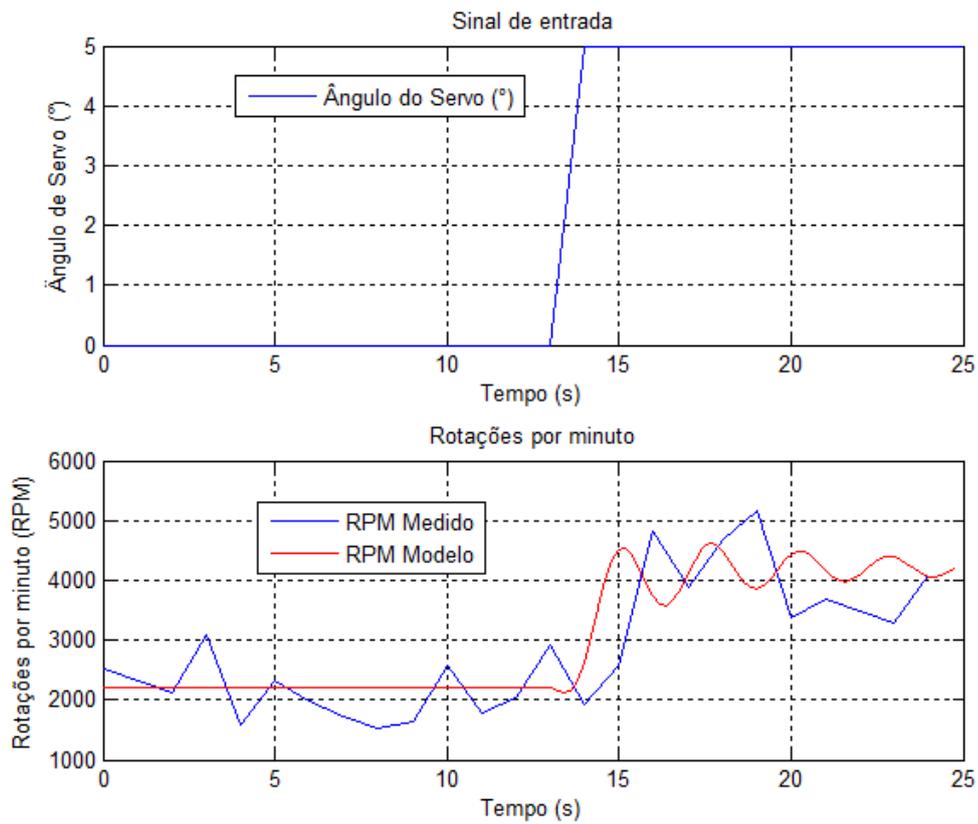


Figura 4.7: Rotação do motor (DADOS: inicial: $\alpha_0 = 20^\circ$, tempo de injeção = 2.6732ms; após step: $\alpha = 25^\circ$, tempo de injeção = 3.5665ms) (Tempo de amostragem de 1s).

$$M_{2T}(s) = \frac{-9.889s + 36.52}{0.1813s^3 + 0.2287s^2 + 1.116s + 1} \quad (4.27)$$

Um outro modelo foi obtido para um sinal da saída com filtro de média aplicado. O sinal de saída filtrado é mostrado na figura 4.8 juntamente com o sinal do modelo, cuja equação (4.28) é apresentada em sequência.

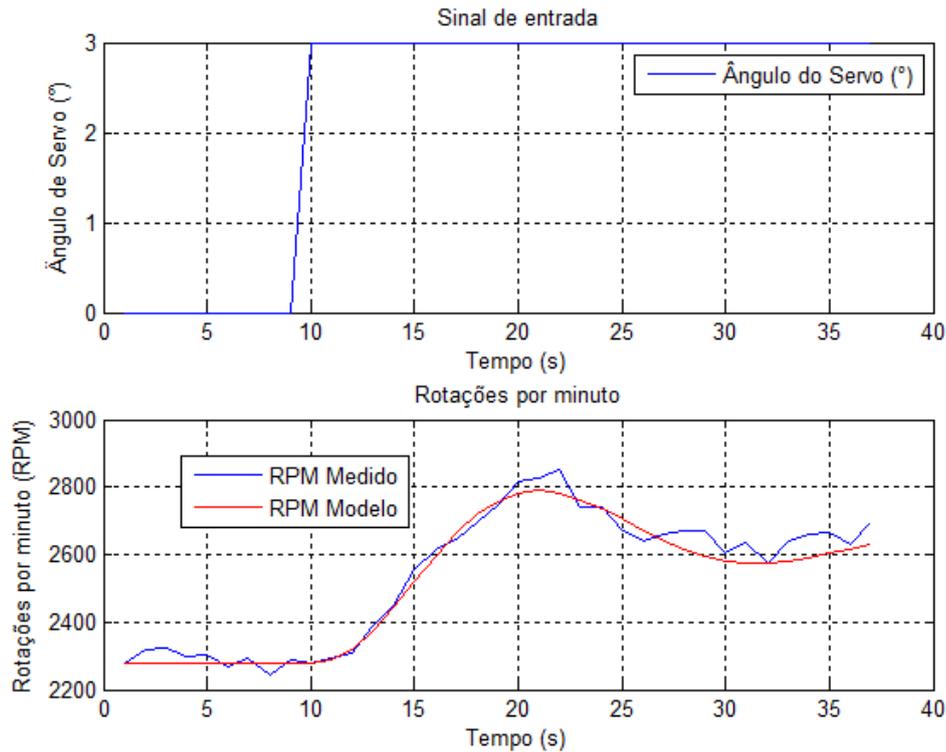


Figura 4.8: Rotação do motor (DADOS: inicial: $\alpha_0 = 20^\circ$, tempo de injeção = 2.6732ms ;após step: $\alpha = 23^\circ$, tempo de injeção = 3.2092ms) (Tempo de amostragem de 1s).

$$M_{2T_{filtrado}}(s) = \frac{119.5}{4.745s^3 + 11.16s^2 + 2.157s + 1} \quad (4.28)$$

4.3 Validação dos modelos encontrados

A validação dos modelos encontrados ocorreu através da comparação entre as curvas das respostas dos sistemas físicos e dos modelos a um mesmo sinal de entrada. O sinal de entrada utilizado para a validação é diferente do utilizado para a identificação.

4.3.1 Acionamento da válvula borboleta

A validação do modelo adotado do acionamento da válvula borboleta foi obtido após se variar o ângulo do servomotor em diferentes valores. O modelo apresentou cerca de 70% do comportamento do sistema após ser acrescentado a ele um ganho estático de 1.4. O modelo com os dados de validação pode ser visto na figura [4.9](#).

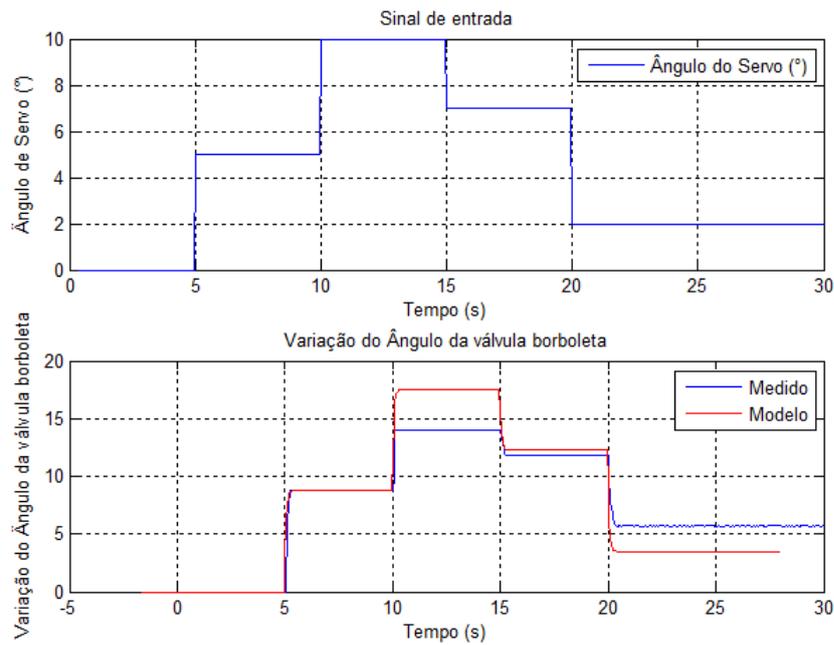


Figura 4.9: Validação do modelo do acionamento da valvula borboleta.

Observa-se que o modelo apresenta um bom comportamento para os sinais em torno de 5° . Através desta resposta optou-se por se realizar a identificação do motor através de aberturas próximas de 5° .

4.3.2 Validação do modelo do motor

Para a validação do modelo do MCI dois tempos foram aplicados degraus de diferentes amplitudes para a abertura da válvula borboleta. A comparação das curvas da resposta da planta e do modelo é apresentada na figura [4.10](#) abaixo. O modelo abaixo escolhido foi o encontrado através da análise do sinal com o filtro de média ([4.28](#)), por apresentar resultados mais precisos na validação.

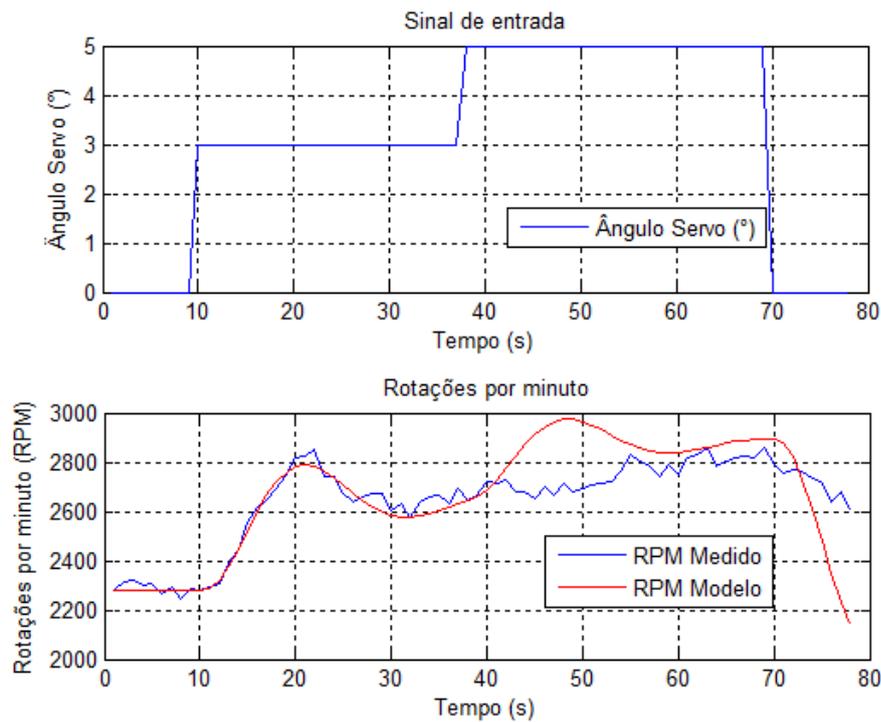


Figura 4.10: Validação do modelo do motor (com filtro de média).

Quando comparada a dinâmica das curvas, é fácil perceber que o modelo realmente apresenta um comportamento semelhante ao da planta real.

A diferença a partir do segundo degrau entra em aspectos ainda não observados durante o funcionamento do motor, como o aumento de sua temperatura no decorrer de seu funcionamento e o acúmulo de combustível no interior do cárter, o que altera o seu rendimento. Como é possível observar, a velocidade do motor aumenta lentamente após se alterar o ângulo do servo válvula borboleta para 5° , sendo que após a alteração do ângulo a taxa de injeção de combustível é constante.

4.3.3 Conclusões do capítulo

Após o estudo das diferentes etapas que compõem o sistema de motor dois tempos observou-se que seria inviável se modelar o sistema através do método caixa branca, uma vez que diversas etapas deveriam ser consideradas como constantes (pois não há sensoriamento), não representando assim a realidade.

Com a modelagem através do método caixa preta obteve-se modelos com precisão de 70% para a válvula borboleta e de cerca de 50% para o sistema MCI dois tempos.

Considerações Finais

Aqui são apresentadas as considerações finais, as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento do trabalho e as propostas de continuidade para o estudo.

5.1 Conclusões

A conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso termina o início de uma pesquisa sobre o possível aumento da eficiência dos motores de combustão interna através do controle de suas variáveis sem alteração de seus componentes.

Após se estudar os diferentes processos que compõem o sistema de motor dois tempos observou-se que sua modelagem em caixa branca sem a observação de sua dinâmica interna acarretaria em um modelo não representativo do funcionamento real do motor. Mediante a esta observação, se torna importante destacar que para um melhor estudo deste sistema e para sua modelagem através de suas equações dinâmicas, a sua instrumentação em seu interior também deve ser considerada.

Através da atual instrumentação da planta física foi possível se observar a dinâmica de um MCI dois tempos através de uma simples definição da configuração de seus atuadores e desenvolvendo a sua modelagem em caixa preta. Com a planta didática instrumentada é possível o levantamento de vários modelos do MCI dois tempos de acordo com o ajuste de seus atuadores.

Com a instrumentação da planta, é possível se observar em tempo real:

- Rotação do Motor (virabrequim);
- Rotação da saída do Motor;
- Ângulo da válvula borboleta.

Com a atual configuração dos atuadores e a modelagem através do método caixa preta, com um tempo de amostragem de 1 segundo, obteve-se modelos com precisão de 70% para

a válvula borboleta e de cerca de 50% para o sistema MCI dois tempos.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

Como continuidade do trabalho propõe-se a utilização da planta para se continuar o estudo sobre os motores de combustão interna, sendo possível a realização dos seguintes trabalhos:

- Instalação de um sensor de temperatura no corpo do motor para medição de temperatura externa;
- Modelagem da dinâmica do combustível no interior do cárter de um MCI dois tempos;
- Modelagem da etapa de limpeza de um MCI dois tempos;
- Modelagem da combustão;
- Análise da vibração da planta;
- Dimensionamento da exaustão de um MCI dois tempos.

Referências

- ANDERSSON, J.; WYCKMAN, O. *Modeling of Fuel Dynamics in a Small Two-Stroke Engine Crankcase*. 2015.
- ATKINSON, C. M. *et al. Numerical simulation of a two-stroke linear engine-alternator combination*. [S.l.]: SAE Technical Paper, 1999.
- BLAIR, G. P. *Design and simulation of two-stroke engines*. [S.l.]: Society of Automotive Engineers Warrendale, PA, 1996.
- BOZZA, F.; TUCCILLO, R.; DE FALCO, D. *A two-stroke engine model based on advanced simulation of fundamental processes*. [S.l.]: SAE Technical Paper, 1995.
- DOEBELIN, E. O.; MANIK, D. N. *Measurement systems: application and design*. , [S.l.], 2007.
- DUYGU, İ.; KARABULUT, H. *Dynamic and Thermodynamic Examination of a Two-Stroke Internal Combustion Engine*, page: 141-154. *Politeknik Dergisi*, [S.l.], v.19, n.2, 2016.
- ERIKSSON, L.; NIELSEN, L. *Modeling and control of engines and drivelines*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014.
- FERGUSON, C. R.; KIRKPATRICK, A. T. *Internal combustion engines: applied thermosciences*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- GAMMON, N. *Arduino - Timers and counters*. *Disponível em:* <<http://www.gammon.com.au/timers>>. 2012.
- GUPTA, H. N. *Fundamentals of internal combustion engines*. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
- GUZZELLA, L.; ONDER, C. *Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.

- HEYWOOD, J. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 1.ed. [S.l.]: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1988.
- INJECTOR-REHAB. *Injector-Rehab - Map Sensors*. Disponível em:< <http://injector-rehab.com/shop/mapsensor.html>>. Acessado em Setembro de 2018.
- ION, F.; PETRESCU, R. V. *An otto engine dynamic model*. 2015.
- JIANG, S. *Numerical analysis of two-stroke engine with direct injection and jet ignition*. 2015.
- KUNZ, J.; STUDER, M. Determining the modulus of elasticity in compression via Shore-A hardness. *Kunststoffe international*, [S.l.], v.96, n.6, p.92–94, 2006.
- LEWIS, D. *A quasi-dimensional spark ignition two stroke engine model*. 2014.
- MARTINS, J. *Motores de combustão interna*. [S.l.]: Publindústria, 2006.
- MERKER G. P.; GERSTLE, M. *SAE Technical Paper Series - Evaluation on Two Stroke Engines Scavenging Models*. 1997.
- NAGAO, F.; SHIMAMOTO, Y. The effect of crankcase volume and the inlet system on the delivery ratio of two-stroke cycle engines. *SAE Transactions*, [S.l.], p.175–193, 1968.
- NEFF, C. A Simplified Model of the Internal Combustion Engine. *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One+ Two*, [S.l.], v.5, n.1, p.5, 2013.
- NETBEANS, I. Disponível em< <http://www.netbeans.org>>. Acesso em, [S.l.], v.11, 2008.
- PULKRABEK, W. W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. United States ed.ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1997.
- TURESSON, M. *Modelling and simulation of a two-stroke engine*. Göteborg, Sweden, 2009.
- YUM, K. K. *et al.* Simulation of a two-stroke diesel engine for propulsion in waves. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, [S.l.], v.9, n.4, p.351–372, 2017.