

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

ADRIANO RECH

**DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS
DE CONTROLE PARA *ELECTRONIC THROTTLE CONTROL* COM
VARIÇÃO NO SINAL DE ENTRADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2015

ADRIANO RECH

**DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS
DE CONTROLE PARA *ELECTRONIC THROTTLE CONTROL* COM
VARIAÇÃO NO SINAL DE ENTRADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica, do Departamento acadêmico de Eletrônica (DAELE), da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Max Mauro Dias Santos

PONTA GROSSA

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa

Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso Superior de Engenharia Eletrônica



TERMO DE APROVAÇÃO

DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE
CONTROLE PARA *ELECTRONIC THROTTLE CONTROL* COM VARIAÇÃO NO
SINAL DE ENTRADA

por

Adriano Rech

Este(a) Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado(a) em 07 de Dezembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel / em Engenharia Eletrônica. O(a) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Max Mauro Dias Santos
Prof.(a) Orientador(a)

Benedito Alencar de Arruda
Membro titular

Abraham Eliás Ortega Paredes
Membro titular

Paulo Sérgio Pařangaba Ignácio
Membro titular

RESUMO

RECH, Adriano. Desenvolvimento prático e simulação de estratégias de controle para *electronic throttle Control* com variação no sinal de entrada. 2015. Trabalho de conclusão de curso – Curso superior em Engenharia Eletrônica, Ponta Grossa, 2015.

Esta pesquisa apresenta uma abordagem prática e teórica de estratégias de controle aplicáveis em *Electronic Throttle Control* com variação no sinal de entrada. *Electronic Throttle Control* (ETC) é uma tecnologia automotiva para aceleração de automóveis, onde ocorre entrada de ar para o motor de acordo com a posição do pedal do acelerador, fazendo uso de sistemas e componentes eletrônicos. Neste projeto é apresentado o comportamento do sistema em malha aberta, o desenvolvimento de um compensador PID para controle da válvula e o experimento prático de um controle desenvolvido em plataforma arduino. Todas as configurações apresentadas foram testadas com os sinais: onda senoidal, triangular, quadrada e dente de serra e posteriormente realizadas análises. Os resultados mostraram que o ETC com controle PID apresenta uma boa resposta mediante a diversos tipos de entrada e satisfaz os requisitos demandados por esta aplicação. Também é possível concluir que, apesar da aplicação em arduino ser satisfatório para estudos acadêmicos, o mesmo não apresenta um bom nível de confiabilidade e rapidez para uso comercial.

ABSTRACT

This research presents a practical and theoretical approach of control strategies applicable in Electronic Throttle Control with changing of the input signal. Electronic Throttle Control is an automotive technology for acceleration systems, where occurs air intake to the engine according to the accelerator pedal position, using electronic systems and components. This project presents the system behavior in open loop, the development of a PID compensator for controlling the valve and the practical experiment of a controller developed in Arduino platform. All the configurations have been tested with signals such as sine wave, triangle, square and sawtooth with perform analysis. The results showed that the ETC with PID control performs a good response by many types of input and satisfies the requirements demanded by this application. It is also possible to conclude that, despite the system in Arduino to be suitable for academic studies, it does not present a good level of reliability and setting time for commercial purpose.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Motor de Combustão interna.....	14
Figura 2 – Princípio de funcionamento de um motor quatro tempos.....	15
Figura 3 – Sistema de controle mecânico de aceleração.....	16
Figura 4 – Sistema completo ETC.....	17
Figura 5 – Relação entre torque e massa de ar quando taxa ar-combustível muda.....	19
Figura 6 – Dois atrasos entre o sinal de controle e a resposta ao torque.....	19
Figura 7 – Sistema de controle ETC.....	20
Figura 8 – Corpo da válvula borboleta eletrônica.....	21
Figura 9 – Diagrama de blocos do sistema.....	22
Figura 10 – Diagrama de blocos do sistema.....	26
Figura 11 – Velocidade angular para uma entrada degrau.....	27
Figura 12 – Modelo da mola da válvula borboleta.....	28
Figura 13 – Modelo do bloco Hard_stop_on.....	29
Figura 14 – Modelo dos atritos.....	29
Figura 15 – Diagrama de bode do sistema em malha aberta.....	30
Figura 16 – Lugar das raízes do sistema em malha aberta.....	31
Figura 17 – Resposta ao degrau unitário em malha fechada.....	31
Figura 18 – Sistema em malha fechada com controlador PID.....	33
Figura 19 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada com compensador PID.....	34
Figura 20 – Bancada utilizada para o projeto experimental.....	35
Figura 21 – Esquema de ligação.....	36
Figura 22 – Diagrama de blocos no labview.....	37
Figura 23 – Painel frontal no labview.....	37
Figura 24 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda senoidal.....	38
Figura 25 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda triangular.....	39
Figura 26 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda quadrada.....	40
Figura 27 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda quadrada.....	40
Figura 28 – Resposta do sistema para uma onda senoidal.....	41
Figura 29 – Resposta do sistema para uma triangular.....	41
Figura 30 – Resposta do sistema para uma onda quadrada.....	42
Figura 31 – Resposta do sistema para uma onda dente de serra.....	42
Figura 32 – Resposta experimental para uma onda senoidal.....	43
Figura 33 – Resposta experimental para uma onda triangular.....	44
Figura 34 – Resposta experimental para uma onda quadrada.....	45
Figura 35 – Resposta experimental para uma onda dente de serra.....	45
Tabela 1 – Resumo dos resultados.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS

ETC	<i>Electronic Throttle Control</i>
PID	Proporcional-Integral-Derivativo
TPS	<i>Throttle Position Sensor</i>
ECU	<i>Electronic Control Unit</i>
CAN	<i>Controller Area Network</i>
CSMA	<i>Carrier Sense Multiple Access</i>
CD+AMP	<i>Collision Detection with arbitration on Message Priority</i>
ASIL	<i>Automotive Safety Integrity Level</i>
ECM	<i>Engine Control Module</i>
BCM	<i>Body Control Module</i>
PMS	<i>Ponto Morto Superior</i>
PMI	<i>Ponto Morto Inferior</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.2 OBJETIVOS.....	10
1.2.1 Objetivo geral.....	10
1.2.2 Objetivo específico	10
1.3 JUSTIFICATIVA.....	11
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	12
2.1.1 Breve histórico do MCI ciclo OTTO	13
2.1.2 Princípio de funcionamento do MCI ciclo OTTO.....	13
2.2 SISTEMA MECÂNICO DE ACELERAÇÃO.....	16
2.3 <i>ELECTRONIC THROTTLE CONTROL SYSTEM</i>	17
2.3.1 Conceituação.....	17
2.3.2 Estrutura	20
2.4 PROJETO DA VÁLVULA BORBOLETA	21
2.4.1 Visão Geral.....	21
2.4.2 Modelo Matemático da Planta	22
2.4.3 Modelo da Válvula Borboleta	25
2.4.4 Projeto do compensador PID para <i>Electronic Throttle Control</i>	30
2.4.5 Projeto Experimental em Plataforma Arduino	34
3 RESULTADOS	37
3.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA EM MALHA ABERTA.....	38
3.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA COM COMPENSADOR PID.....	40
3.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM ARQUITETURA ARDUINO.....	43
3.4 RESUMO DOS RESULTADOS.....	46
4 CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS.....	48
APÊNDICE A.....	50

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística é um dos setores da indústria que mais tem apresentado crescimento nas últimas décadas. A crescente demanda do setor atrai investimentos e pesquisas nesta área, tornando este um dos setores mais promissores em termos de desenvolvimento. Este cenário de grande crescimento demanda, além da ampliação do corpo de engenheiros e tecnólogos para execução de projetos, a incorporação de novas tecnologias, particularmente de dispositivos eletrônicos de sensoriamento e controle designada muitas vezes eletrônica embarcada (GUEDES, 2014).

De acordo com Yuan et al (2008), nos últimos anos os consumidores têm assistido uma convergência de antigos sistemas hidráulicos e mecânicos para sistemas eletroeletrônicos. Um veículo moderno dotado das tecnologias de ponta possui mais de 100 acionamentos elétricos em sua composição tais como servo dispositivos de alto desempenho, na qual é realizado por dispositivos *by-wire*. (YUAN et al, 2008). Os novos sistemas eletrônicos embarcados vêm apresentando soluções cada vez mais efetivas e refinadas na substituição de sistemas puramente mecânicos ou hidráulicos por soluções eletrônicas (GUEDES, 2014).

Considerando exigências governamentais com respeito à poluição causada por combustíveis fósseis e buscas por uma boa taxa de eficiência, os motores a combustão interna têm acompanhado a evolução tecnológica que o ramo da eletrônica vem sofrendo. Com o intuito de cumprir regulamentações governamentais com relação a emissão de poluentes e desenvolvimento de motores com maior eficiência, as montadoras passaram a adotar sistemas de controle eletrônico em seus motores (MILHOR, 2002). Dentre os vários sistemas que compõem um motor de combustão interna, o sistema de admissão de ar automotivo é o maior responsável em manter tais requisitos.

A válvula borboleta é um dos componentes principais no sistema de admissão de ar do motor. De acordo com Zhang (2010). Esta válvula regula diretamente a quantidade de ar que entra no motor, controlando indiretamente a quantidade de combustível queimado em cada ciclo mantendo relativamente constante a taxa ar/combustível.

Para Kim (2007), em veículos convencionais alimentados com motores a gasolina, o pedal de aceleração atua por um acionamento mecanicamente vinculado ao motor de aceleração, na qual regula a entrada de ar do coletor de admissão. Na visão de Pan (2008), nestes sistemas, a válvula borboleta é conectada diretamente ao pedal do acelerador através de cabos. Nesta situação, a válvula borboleta é controlada somente pelo motorista. A válvula borboleta de um motor automotivo tem como função ajustar a entrada da mistura ar-combustível durante a combustão através da mudança do ângulo de abertura da placa da válvula na passa fluxo de ar (PAN, 2008).

Nos sistemas convencionais de aceleração não é considerado a eficiência do combustível, estrada ou condições climáticas na determinação do ângulo da válvula borboleta (PAN, 2008). Desta forma, a eficiência do motor é afetada consideravelmente e o consumo de combustível torna-se mais elevado.

Zhang (2010) compartilha a ideia que, nos últimos anos, com a crescente demanda por motores automotivos de alta performance, os sistemas de controle do acelerador (*Electronic Throttle Control* - ETC) tem se tornado largamente difundida no meio automotivo. O *Electronic Throttle Control* (ETC) é um sistema eletrônico controlador de velocidade do carro que atua de acordo com mudança de posição do pedal de aceleração do condutor bem como outras condições. (LOH, 2007).

Para Yuan (2008), os sistemas ETC usualmente posicionam as válvulas borboleta de acordo com a referência de ângulo de abertura fornecido pela unidade de controle do motor. A unidade de controle usa tabelas de pesquisa com milhares de entradas para definir a combinação ar combustível na qual maximiza a eficiência do combustível e minimiza a emissão de poluentes respeitando as preferências do condutor (YUAN, 2008).

1.1 PROBLEMAS E PREMISSAS

A precisão e confiabilidade de sistemas de controle para ETC são fatores primordiais para garantia do bom funcionamento de sistemas de aceleração para veículos. O controle para estes tipos de sistemas deve ser rápido e funcional tanto quanto seguro e preciso em todas as circunstâncias em que o passageiro for submetido. Neste contexto, testes e verificações são realizadas primeiramente a nível de *software* para posteriormente serem embarcados, verificados e testados a nível de *hardware* e dispositivos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo a respeito do sistema ETC e das estratégias de controle aplicáveis ao mesmo. Será desenvolvido a modelagem do sistema em *software* e posteriormente a simulação, com diferentes sinais na entrada, observando o comportamento na saída. Um projeto experimental em arduíno será desenvolvido e comparado com o sistema simulado.

1.2.2 Objetivo específico

O estudo de sistemas ETC e estratégias de controle são realizadas através de:

- Levantamento bibliográfico sobre *Electronic Throttle Control* (ETC).
- Conhecimento das características da válvula borboleta.
- Modelagem matemática do sistema ETC.
- Modelagem da função de controle do sistema ETC.
- Exploração da arquitetura arduíno.
- Desenvolvimento de técnica compensador PID para uso no ETC.
- Exploração de ferramentas de aplicações automotivas em Matlab.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os sistemas convencionais de aceleração rapidamente se tornaram obsoletos frente as grandes vantagens que o *Electronic Throttle Control* oferece em todos os aspectos.

A construção e modelagem em *software* de sistema de controle para ETC e desenvolvimento experimental se faz necessário, uma vez que, o mesmo proporciona a possibilidade de comparação entre ambas configurações para diferentes estratégias de controle. Sendo o sistema de aceleração crítico, principalmente em termos de segurança funcional, é crucial a aplicação de uma estratégia de controle que garanta o bom desempenho do mesmo. Além disso, tal desenvolvimento contribui para pesquisas na área, seja incentivando a criação de novas tecnologias e na adoção de diferentes componentes, seja no aperfeiçoamento dos já existentes.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este tópico descreve todo o procedimento metodológico abordado no levantamento de informações sobre o sistema ETC, a criação do modelo da válvula borboleta, o desenvolvimento da estratégia de controle e a análise dos resultados obtidos. Todos os testes serão realizados com os seguintes sinais de entrada: onda senoidal, onda triangular, onda quadrada e onda dente de serra.

Um modelo matemático do sistema será definido baseado em estudos desenvolvidos na área. Através do modelo matemático, será construído um modelo em malha aberta do sistema utilizando o *software Mathworks SIMULINK / MATLAB, student version*. Neste modelo, será aplicado sinais testes para verificar o comportamento do sistema em malha aberta.

O fechamento da malha será realizado através de um circuito eletrônico desenvolvido por Guedes (2014). A partir do circuito eletrônico, a função transferência do sistema é definida. Analisando a resposta do sistema em malha fechada com excitação degrau unitário, os parâmetros para o controle Proporcional-Integral-Derivativo são definidos.

Um projeto experimental será realizado utilizando a plataforma arduino em conjunto com a placa NI-DAQ. Será desenvolvido um controle por comparação entre o sinal de entrada e o TPS, e a partir deste, o incremento ou decréscimo do sinal *setpoint*.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Os motores a combustão interna (MCI) são máquinas térmicas que basicamente trabalham com o princípio de transformação de energia. A reação química de queima do combustível transforma energia química em energia térmica, que por sua vez produz trabalho mecânico através do movimento de componentes mecânicos (GUPTA, 2013). Esta tecnologia, proveniente do século XIX, é a principal utilizada na locomoção de pessoas e cargas e sofreu grande desenvolvimento ao longo de sua história.

De acordo com Gupta (2013), com relação ao seu ciclo termodinâmico, os MCI podem ser classificados como:

- Volume constante de calor fornecido ou ciclo Otto.
- Pressão constante de calor fornecido ou Ciclo diesel.
- Volume e pressão parcialmente constante de calor fornecido ou ciclo duplo.
- Joule ou Brayton cycle.

Os MCIs ciclo Otto são caracterizados principalmente pela sua ignição ocorrer através de faísca. Este modelo é comumente utilizado em automóveis de passeio e motocicletas, sendo o modelo mais difundido.

Os motores ciclo diesel são caracterizados pela combustão através de compressão. O ar é comprimido e o combustível é injetado neste fluido comprimido e quente, o que ocasiona a combustão. Esta arquitetura de MCI é utilizada em veículos que necessitam de alto torque tais como: caminhões, trens e navios.

Os Motores ciclo Brayton são utilizados como modelo ideal para turbinas a gás. Este é caracterizado pela sua operação em regime permanente.

2.1.1 Breve histórico do MCI ciclo OTTO

Nicolaus A. Otto e Eugen Langen desenvolveram o motor de pistão livre na Alemanha, em 1867. Ar e combustível misturados tomavam espaço em um cilindro, onde chama de gás era utilizado como ignição durante a parte inicial do curso no sentido para fora para acelerar um pistão, e assim sendo, vácuo era gerado dentro do cilindro. O pistão era trazido na direção para dentro pela pressão atmosférica agindo sobre o pistão do outro lado (GUPTA, 2013). A eficiência termal deste motor era de 11% (GUPTA, 2013).

De acordo com Guedes (2014), o princípio do MCI quatro tempos teve seu início em 1862 pelo físico Francês Aphonse Beau de Rocha. Cita o autor que foi estabelecido uma sequência de eventos, por meio da qual seria possível conseguir economia e eficiência simultaneamente. Rocha desenvolveu a ideia de inflamar o combustível em alta pressão, próximo ao fim da fase de compressão ao invés de queimar o combustível sob pressão atmosférica (GUPTA, 2013). Rocha, entretanto, não construiu um motor baseado em seu princípio. Em 1976, Nicolas August Otto construiu um motor baseado neste princípio e sendo este o ciclo sob o qual o MCI trabalha (GUEDES, 2014; GUPTA, 2013).

2.1.2 Princípio de funcionamento do MCI ciclo OTTO

Através da figura 1, podemos analisar o funcionamento de um motor de combustão interna ciclo Otto. Este tipo de motor é o mais comum entre os carros de passeio. Ele basicamente é composto por uma câmara de combustão onde a mistura ar-combustível é queimada através da faísca de uma vela de ignição. Esta queima gera energia térmica em alta pressão que movimenta o pistão para baixo. O virabrequim, conectado ao pistão através da biela, transfere a energia mecânica para o volante do motor, seguindo assim para a caixa de transmissão (GANESAN, 2012; GUPTA, 2013).

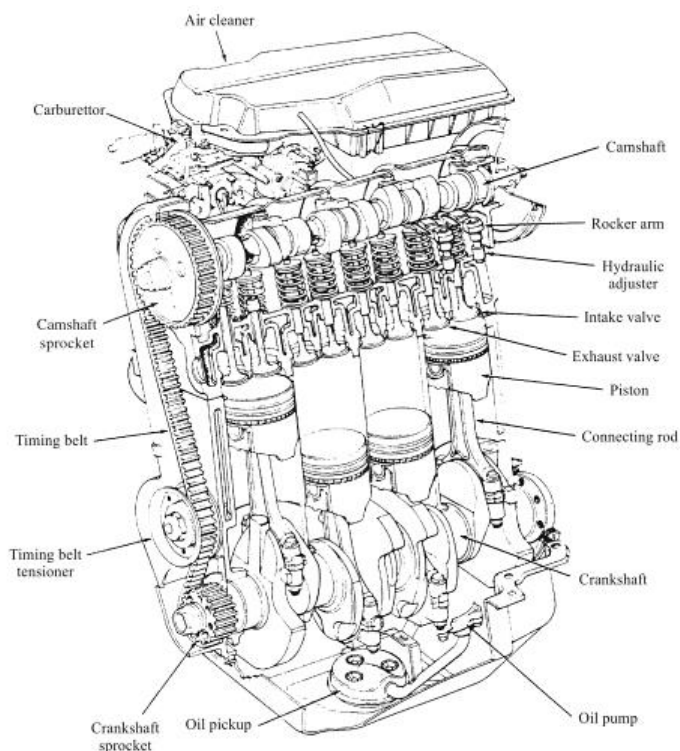


Figura 1 – Motor de Combustão interna.

Fonte: Gupta (2013)

Nos motores quatro tempos, um ciclo de operação é completo em quatro tempos do pistão ou duas voltas do virabrequim, sendo assim, 720° de ângulo de giro de virabrequim é necessário para completar um ciclo (GUPTA, 2013). A medida que o virabrequim realiza seu movimento rotacional, os pistões movem do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI) (GUEDES, 2014).

Cada cilindro de um motor quatro tempos possui válvulas de admissão e escape. As válvulas de admissão são responsáveis por admitir a mistura ar-combustível para dentro do cilindro assim como as válvulas de escape são responsáveis por liberar os gases resultados da combustão da mistura (GUEDES, 2014). Podemos separar cada ciclo de tempo do motor como será explicado a seguir, conforme mostrado na figura 2.

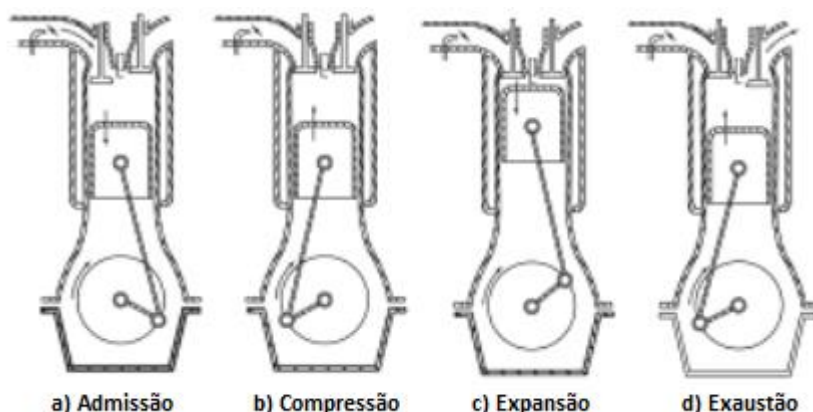


Figura 2 – Princípio de funcionamento de um motor quatro tempos.

Fonte: Ganesan (2012)

a) **Admissão:** Inicia quando o pistão está no centro do PMS e no sentido de movimento para o PMI. Neste momento, as válvulas de admissão estão abertas, as válvulas de escape estão fechadas e a mistura ar-combustível é admitida (GUEDES, 2014; GANESAN, 2012).

b) **Compressão:** Neste momento, ambas as válvulas estão fechadas e o pistão realizará o movimento do PMI para o PMS, realizando a compressão da mistura dentro do cilindro. Momentos antes do pistão atingir o PMS, a faísca de centelha é produzida através do sistema de ignição, causando a queima da mistura comprimida na câmara, elevando a pressão interna do cilindro (GUEDES, 2014; GUPTA, 2013).

c) **Expansão:** A alta pressão da queima da mistura desloca o pistão do PMS para o PMI. Ambas as válvulas de admissão e escape permanecem fechadas neste momento e a energia química produzida pela combustão movimenta o pistão gerando energia mecânica (GANESAN, 2012).

d) **Exaustão:** Nesta etapa, as válvulas de escape são abertas para o escape dos gases gerados pela queima da mistura ar-combustível à medida que o pistão realiza seu movimento do PMI para o PMS. Uma vez finalizado esta etapa, o ciclo recomeça.

2.2 SISTEMA MECÂNICO DE ACELERAÇÃO

Nos sistemas convencionais, a aceleração do motor é realizada através de aparatos mecânicos. O pedal do acelerador é conectado diretamente a válvula borboleta do motor através de cabos, conforme figura 3. Quando o acelerador é pressionado, o cabo causa a abertura da válvula borboleta, ocasionando assim o aumento do volume de ar para dentro do coletor de admissão do motor (RAUSH e LIECHTY, 2008). A medida que o motorista pressiona o pedal do acelerador, mais ar é entregue ao motor, o que proporciona o aumento na aceleração e consequentemente a velocidade (RAUSH e LIECHTY, 2008).

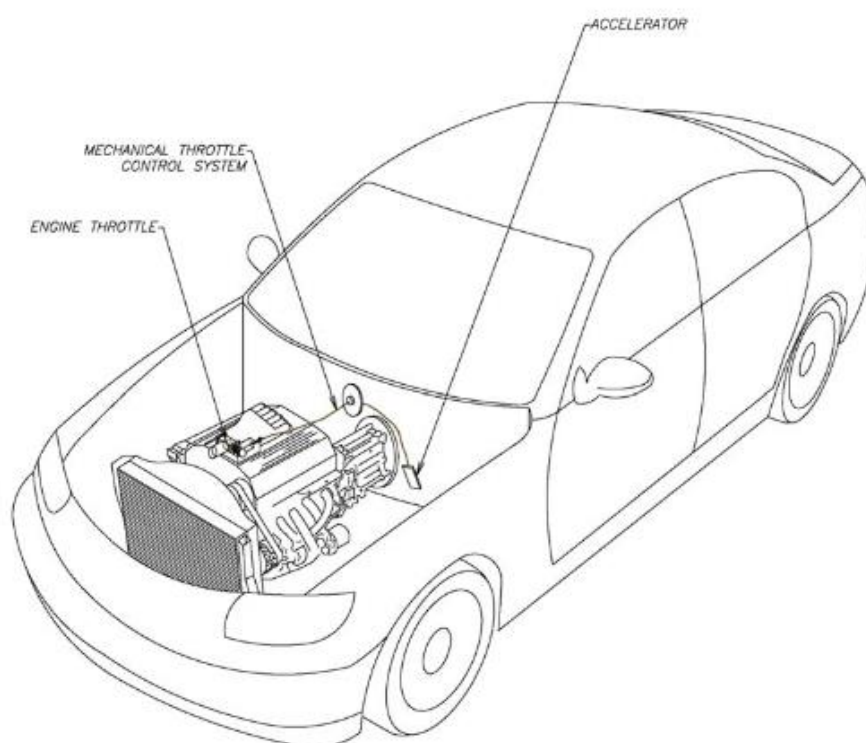


Figura 3 – Sistema de controle mecânico de aceleração

Fonte: RAUSH e LIECHTY (2008).

Neste tipo de sistema, o controle da taxa ar-combustível que entra na câmara de combustão é controlado somente pelo condutor, não havendo nenhuma consideração as condições internas e externas tais como as estradas, condições climáticas, ou mesmo eficiência do combustível (PAN, 2008).

Os pedais com acionamento mecânico trabalhavam em conjunto com os carburadores. O carburador é um dispositivo encarregado de formar a mistura ar-

combustível em cada regime de funcionamento do motor. O ar admitido passa através de um difusor, carregando consigo uma quantidade específica de combustível, ao passo que o acelerador é acionado, a válvula borboleta é movida através de um cabo conectada a mesma, abrindo passagem maior para o ar aspirado no motor (GUEDES, 2014).

2.3 ELECTRONIC THROTTLE CONTROL SYSTEM.

2.3.1 Conceituação

Conforme figura 4, basicamente o sistema ETC (*Electronic throttle control*) substitui todos os aparatos mecânicos presentes nos tradicionais sistemas de aceleração, partindo do pedal do acelerador até a válvula borboleta através de sensores de posição, atuadores e uma unidade de controle eletrônico (WEIKANG et al, 2008).

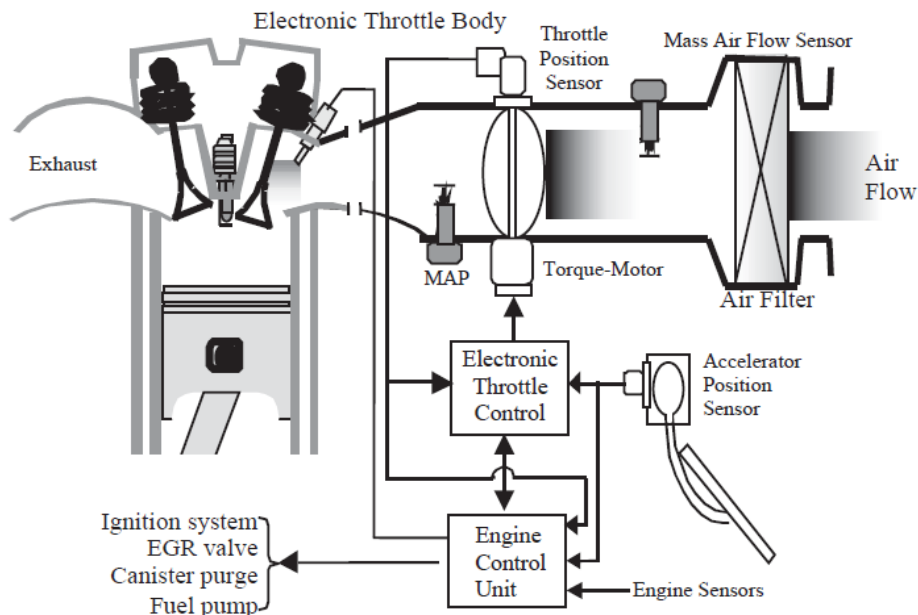


Figura 4 – Sistema completo ETC.

Fonte: CONATSER (2004)

Este sistema apresenta inúmeros benefícios tais como:

- Economia de combustível, uma vez que a mistura ar-combustível é mais precisa.
- Redução de manutenções, considerando a redução de componentes mecânicos.

- Maior precisão na aceleração.
- Facilidade nas mudanças de marchas;
- Dirigibilidade.
- Facilidade de integração de funcionalidades tais como: controle de tração, controle de velocidade e outras aplicações que lidem com gerenciamento de torque.

Um sistema ETC é um dispositivo capaz de controlar o fluxo de ar para dentro do cilindro do motor, sendo assim, a resposta do torque do motor e a precisão da mistura ar / combustível é determinada através do desempenho do sistema ETC (AONO, T. & KOWATARI, 2006). Dentre as aplicações do sistema ETC, podemos citar o *adaptive-cruise-control system*, onde o ângulo do *throttle* é controlado automaticamente através da *Electronic control unit* (ECU), de acordo com a distância do veículo precedido, e a *direct-fuel-injection system*, onde a massa de combustível injetado pode ser mudada para cada ciclo do motor (AONO, T. & KOWATARI, 2006).

Para o MCI obter a melhor queima, traduzindo-se em o melhor desempenho / consumo, a mistura admitida deve estar a mais próxima da mistura estequiométrica. A região estequiométrica é onde ocorre a melhor queima da mistura ar-combustível (AONO, T. & KOWATARI, 2006). Butt at al (2009) compartilha a ideia que, na operação de um MCI, a razão ar/combustível deve ser mantida a mais próxima do valor estequiométrico na finalidade de limitar a emissão de gases e manter, ao mesmo tempo, não apenas a operação desejada do motor, mas também a econômica de combustível.

Se a taxa ar-combustível passar da região estequiométrica para a região *lean*, uma quantidade adicional de massa de ar deve ser tomada na finalidade de compensar o decréscimo de torque devido ao decréscimo de combustível fornecido, conforme apresentado na figura 5 (AONO, T. & KOWATARI, 2006).

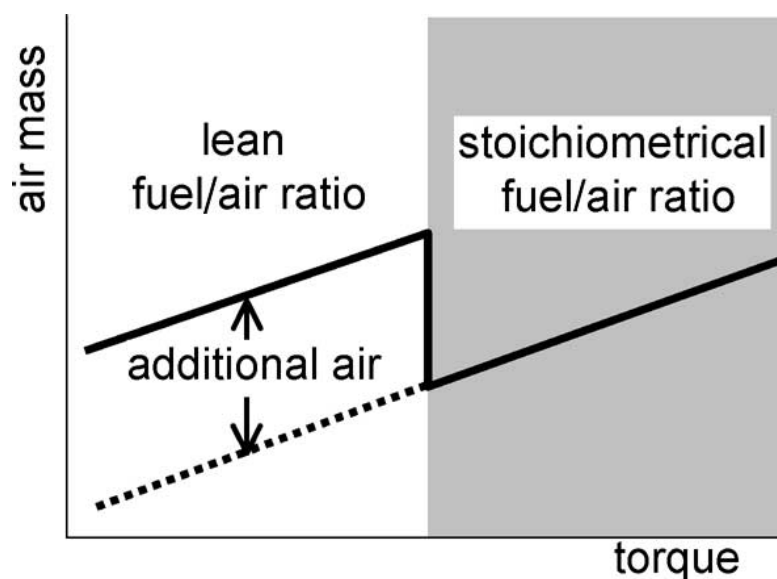


Figura 5 – Relação entre torque e massa de ar quando taxa ar-combustível muda.
Fonte: AONO, T. & KOWATARI (2006).

O torque do motor sofre variação de acordo com o controle *ETC*. Entre a mudança no sinal de controle do *ETC* e a resposta do torque do motor, existe dois atrasos (AONO, T. & KOWATARI, 2006).

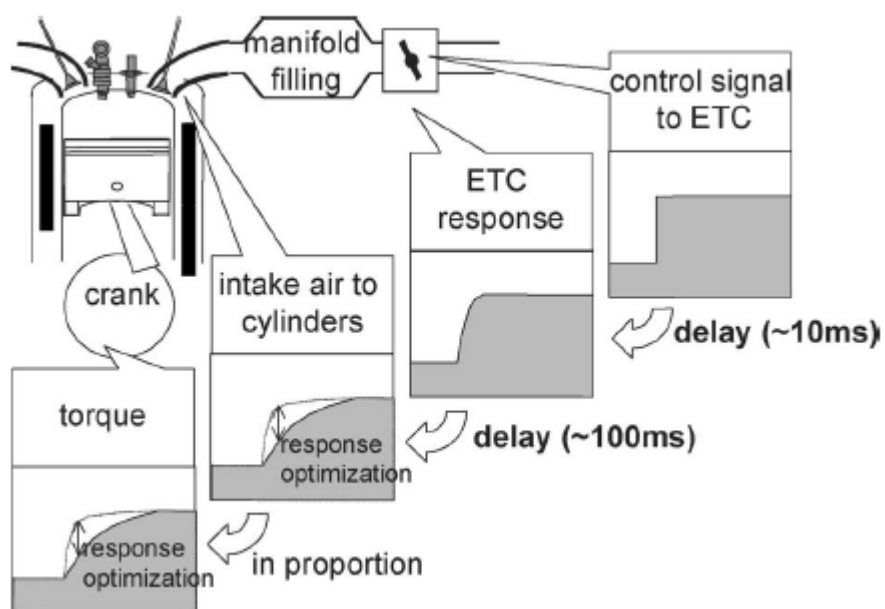


Figura 6 – Dois atrasos entre o sinal de controle e a resposta ao torque
Fonte: AONO, T. & KOWATARI (2006).

De acordo com a figura 6, o primeiro atraso ocorre quando o ETC responde ao sinal de controle, e este corresponde a 10 milissegundos. O segundo atraso

ocorre quando o tubo de distribuição entre o ETC e cilindro do motor é preenchido com ar, este corresponde a 100 milissegundos (AONO, T. & KOWATARI, 2006).

2.3.2 Estrutura

Através de sensores de posição, um sinal da posição do pedal do acelerador é gerado a partir do condutor enquanto o atual ângulo da válvula borboleta é determinado através de *dual throttle position* TPS (ASE, 2006). Todas as informações são processadas na ECU (*electronic control unit*).

Conforme a figura 7, A posição do pedal do acelerador é medido através de um sensor de posição chamado *throttle pedal position sensor*. A leitura da variação de posição é um sinal analógico e representa uma entrada para a ECU-1. A mesma possui interface CAN com a ECU-2 e é responsável pelo controle do sistema ETC. A ECU-2 recebe o sinal do sensor de posição e envia o sinal para o motor DC responsável em ajustar o ângulo da válvula borboleta. Ambos sensores e atuadores estão presentes no *electronic throttle body*.

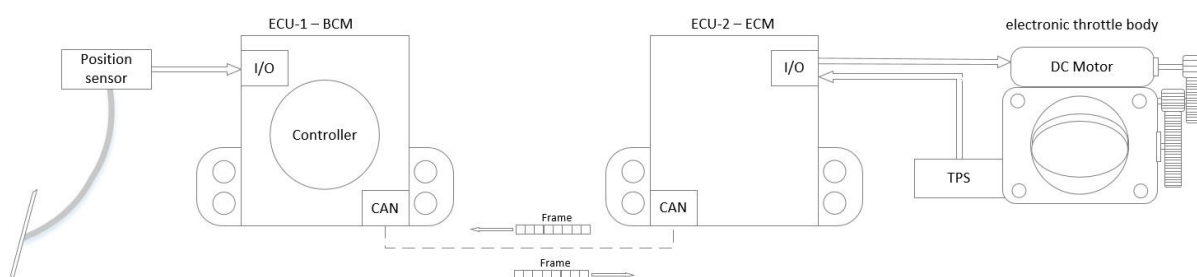


Figura 7 – Sistema de controle ETC.

Fonte: Autoria própria.

A ECU representa qualquer sistema embarcado capaz de controlar um ou mais sistemas elétricos ou subsistemas no veículo. É uma unidade baseada em arquitetura de microprocessadores e protocolos de comunicação, tem representado uma nova tendência na indústria automotiva (SONG et al, 2010). Esta unidade controla os dispositivos internos do automóvel. Este recebe os sinais dos sensores e envia sinais para os atuadores através de uma rede de comunicação. Os valores dos sensores são interpretados internamente através dos controladores e atuação ocorre através dos atuadores.

Um dos principais componentes determinantes em sistemas de aceleração é o corpo da válvula borboleta eletrônica, como mostrado na figura 8. Como sua principal função, este componente regula a taxa ar-combustível que estará presente durante a combustão através da regulação do ângulo de abertura (PAN, 2008). No sistema ETC, o ângulo desta válvula é controlado através de um motor DC e engrenagens, conforme figura 8.

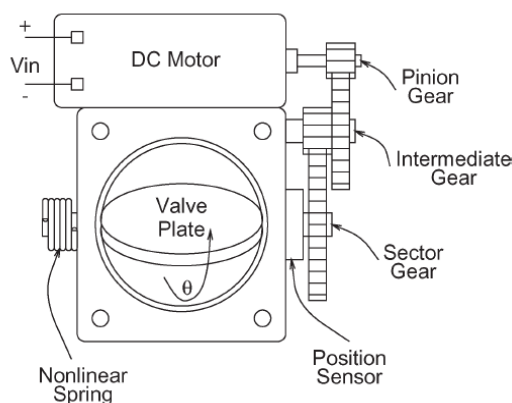


Figura 8 – Corpo da válvula borboleta eletrônica

Fonte: PAN (2008)

A comunicação entre os componentes é feita através da rede *industrial Controller Area Network* - CAN. De acordo com Shin (2014), o protocolo CAN suporta comunicação entre as diferentes ECUs, nas quais são conectadas através de cabos par trançados *half duplex* e adotado de CSMA/CD+AMP (*Carrier Sense Multiple Access / collision Detection with arbitration on Message Priority*). A rede CAN é bastante popular no meio automotivo devido a sua robustez e confiabilidade. A rede CAN assegura uma alta imunidade a ruídos, detecção de erros e coleta de erros (SHIN, 2014).

2.4 PROJETO DA VÁLVULA BORBOLETA

2.4.1 Visão Geral

O controle do sistema seguirá conforme a figura 9. O controlador utilizado será um PID (Proporcional-integral-derivativo). O valor x representa a entrada do sistema, neste caso, o *setpoint*, o sinal de posição ideal que corresponde ao valor

esperado para uma determinada posição do pedal do acelerador, o valor z representa o sinal de controle que controlará a rotação do motor DC (atuador) e o valor de y representa o sinal de saída, lido pelo sensor TPS.

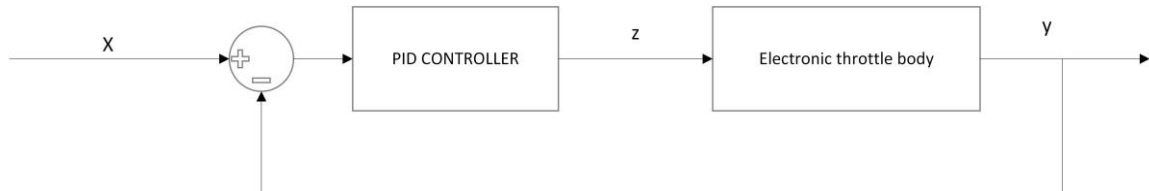


Figura 9 – Diagrama de blocos do sistema

Fonte: adaptado de Guedes (2014)

A planta do sistema é a *electronic throttle body*. Este será descrito fisicamente como sendo motor DC + *throttle* + TPS. O sinal de saída será a posição da válvula borboleta, medido por um sensor. A realimentação do sistema garante o controle em malha fechada.

2.4.2 Modelo Matemático da Planta

2.4.2.1 Equações diferenciais do motor DC

Para o sistema de atuação do ETC, será considerado uma unidade PWM junto a uma ponte H. O PWM determina a polaridade de saída e a ponte H será utilizada para interface entre o microcontrolador e o motor DC (GRIFFITHS, 2002). De acordo com Griffiths (2002), considerando as leis de Kirchoff, para o circuito de armadura temos a equação (1).

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R_a}{L}i - \frac{V_b}{L} + \frac{V_{Bat}}{L}p(t) - \frac{R_{Bat}}{L}i \quad (1)$$

onde $p(t) \in \{-1,0,1\}$

$$V_b = K_T \omega \quad (2)$$

$$T(t) = K_T i \quad (3)$$

Onde:

R_a = resistência da armadura (*ohm*)

$i(t)$ = corrente da armadura (*A*)

L = indutância da armadura (*H*).

R_{Bat} = resistência interna da fonte (*ohm*).

$V_b(t)$ = força contra eletromotriz (*V*)

$T(t)$ = torque na válvula borboleta (*N.m*)

K_T = torque constante no motor ($\frac{N.m}{A}$)

V_{Bat} = tensão sem carga (*V*)

$p(t)$ = PWM

A equação (2) fornece a força contra eletromotriz, na qual é proporcional a velocidade do motor, e a equação (3) fornece o torque aplicado na válvula.

2.4.2.2 Equações diferenciais *throttle*.

O prato da válvula borboleta, as engrenagens de redução e o rotor do motor são considerados como uma única inércia, na qual é atuado pelo torque definido na equação (3) (GRIFFITHS, 2002).

O parâmetro C_s está relacionado com K_s e θ_{eq} através da equação (4):

$$T_s = -K_s(\theta - \theta_{eq}) = -K_s\theta - C_s \quad (4)$$

Ou resolvendo por C_s

$$C_s = -K_s\theta_{eq} \quad (5)$$

O momento devido a viscosidade e o atrito de Coulomb são:

$$T_d = -K_d\omega \quad (6)$$

$$T_f = -K_f \operatorname{sgn}(\omega) \quad (7)$$

Podemos agora expressar a dinâmica do prato da válvula assumindo os momentos do eixo da placa da válvula: considerando que temos quatro momentos agindo sobre o eixo: o retorno da mola (equação (4)), a viscosidade e atrito de Coulomb (equação (6) e equação (7)), e o momento aplicado pelo motor dado pela equação (3).

$$J\dot{\omega}(t) = -K_s(\theta(t) - \theta_{eq}) - K_d\omega(t) - K_f\text{sgn}(\omega) + T(t) \quad (8)$$

Assim sendo, o sistema completo é dado pela equação (9) :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -K_s & -K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ C_s - K_f\text{sgn}(\omega(t)) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ T(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Onde:

K_s = constante da mola ($\frac{N.m}{rad}$)

$\theta(t)$ = Ângulo da válvula borboleta (*rads*)

$\omega(t)$ = velocidade angular da válvula ($\frac{rad}{s}$)

J = soma da inércia da válvula, engrenagens de redução e rotor do motor. ($Kg.m^2$)

K_d = viscosidade ($\frac{N.m.s}{rad}$)

θ_{eq} = ponto zero de deslocamento da mola de retorno do acelerador wrt θ . = θ (*rads*)

C_s = torque constante (torque da mola em $\theta = 0$) (*N.m*)

K_f = constante da mola (*N.m*)

2.4.2.3 Sensores TPS

Para Griffiths (2002), estão presentes no sistema, dois sensores de posição do *throttle*, e um sensor de corrente no motor DC, sendo todos estes analógicos. Os sensores de posição são potenciômetros que, dada uma entrada constante de tensão, são capazes de fornecer uma saída de tensão que varia linearmente entre 0,5 V e 4,5V, de acordo com o ângulo $\Theta(t)$ (GRIFFITHS, 2002). Temos também que, a soma das saídas de tensões dos sensores é igual a tensão de entrada (GRIFFITHS, 2002). O sensor de corrente do motor também fornece tensão de saída que varia linearmente com a corrente do motor (GRIFFITHS, 2002).

De acordo com Griffiths (2002), Com relação a posição da válvula, as variáveis $TPS_1(t)$ e $TPS_2(t)$ representam respectivamente a tensão de saída do sensor 1 e do sensor 2, conforme equações (10) e (11).

$$TPS_1(t) = \alpha V_{ref} + \frac{\beta V_{ref} - \alpha V_{ref}}{\frac{\pi}{2}} \theta(t) + n_1(t) \quad (10)$$

$$TPS_2(t) = V_{ref} - TPS_1(t) + n_1(t) + n_2(t) \quad (11)$$

Onde:

$n_1(t)$ = ruído em $TPS_1(t)$ (V)

$n_2(t)$ = ruído em $TPS_1(t)$ (V)

V_{ref} = tensão constante da fonte (V)

β = fração de V_{ref} para $TPS_1(t)$ em $\theta = \frac{\pi}{2}$

α = fração de V_{ref} para $TPS_1(t)$ em $\theta = 0$

2.4.3 Modelo da Válvula Borboleta

O modelo matemático descrito na sessão 2.4.2 não será utilizado neste trabalho devido à dificuldade de identificação de seus parâmetros físicos, estáticos e dinâmicos.

A identificação dos parâmetros mecânicos da válvula borboleta é algo bastante complexo, uma vez que os mesmos não são facilmente mensurados (GUEDES, 2014). Para este caso, o conhecimento dos parâmetros de características elétricas, explorando uma identificação no modelo caixa preta, permite que o modelo seja aproveitável para diversas válvulas borboletas, com diferentes especificações e características, sem a necessidade de levantamento de todos os parâmetros mecânicos de cada um (GREPL & LEE, 2010) (DEUR et al, 2004). Deur et al, (2004) e Guedes (2014), propõem um modelo de caixa preta em grandezas elétricas, conforme apresentado na figura 10, que consiste em um modelo da força da mola, da força de atrito, uma análise linear do processo, e um bloco Hard_stop_on que apresenta os limites das batentes superiores e inferiores.

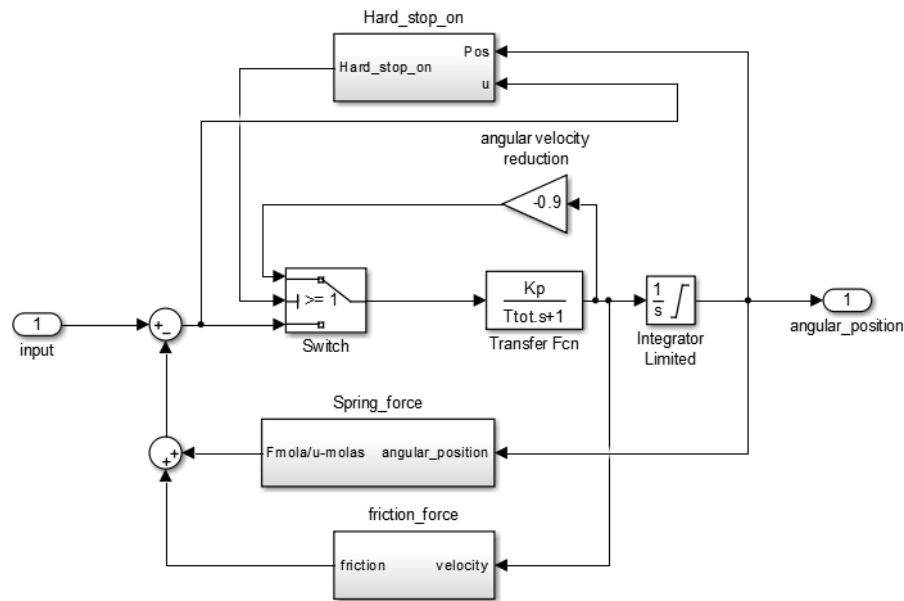


Figura 10 – Diagrama de blocos do sistema

Fonte: adaptado de Guedes (2014)

A equação (12) que rege o modelo para a válvula borboleta da figura 10 consiste em uma análise linear do processo, uma aproximação do modelo original, a partir das respostas aos estímulos de sinais elétricos de entrada na planta real.

$$G_p(s) = \frac{K_p}{T_{tot}s+1} \quad (12)$$

$$K_p = \frac{\omega_{ss}}{\Delta U} ; K_p = K_{ch} K_l / K_{emf}$$

$$\tau_{tot} = T_{em} + T_a$$

$$T_{em} = J / K_a K_v K_{emf}$$

Onde:

$G_p(s)$ = Função de transferência da planta no domínio de Laplace.

K_p = Relação de ganhos do sistema.

τ_{tot} = Constante de tempo de resposta total do sistema.

ω_{ss} = Posição final da velocidade angular para um determinado degrau unitário.

ΔU = Variação de tensão elétrica do degrau unitário aplicado.

K_{ch} = ganho do sistema de potência elétrica (ponte H).

K_l = ganho do sistema de engrenagens de transmissão.

T_{em} = Constante de tempo de resposta eletromecânica.

T_a = Constante de tempo de resposta da armadura.

K_a = Ganho da armadura do motor.

Na função transferência da planta, $G_p(s)$, o ganho K_p pode ser estimado de forma experimental, através da curva de velocidade angular $\omega(t)$ (GUEDES, 2014). Conforme figura 11, pode-se estimar a curva de velocidade angular através da aplicação de um sinal elétrico na entrada do sistema, e derivando a posição angular obtida como resposta (DEUR et al., 2004).

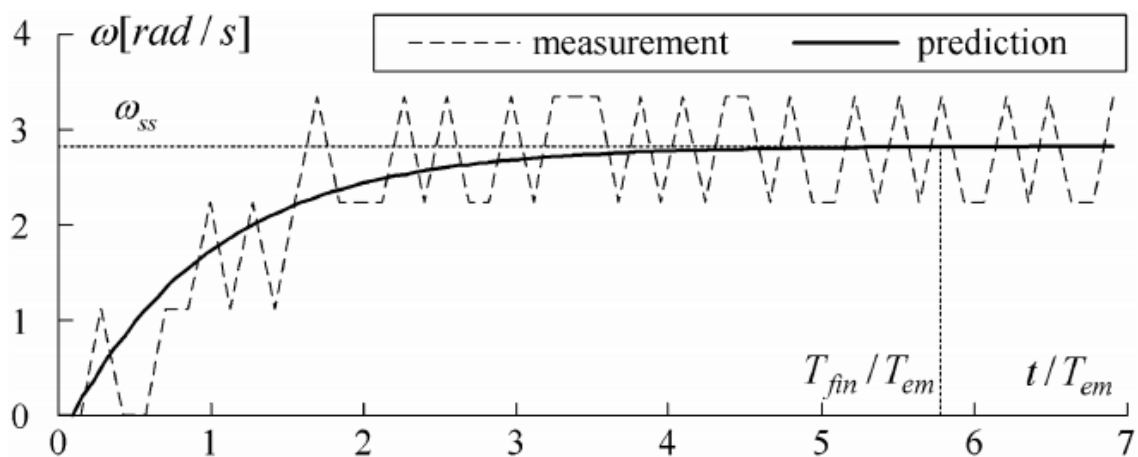


Figura 11 – Velocidade angular para uma entrada degrau

Fonte: DEUR et al., 2004

O parâmetro ω_{ss} corresponde ao valor onde ocorre o estado estacionário da velocidade angular em resposta ao degrau de entrada. Este valor, sobre ΔU , determina uma aproximação experimental para o parâmetro K_p para o modelo. De acordo com Guedes (2014), o parâmetro $\tau_{tot} = T_{em} + T_a$ pode ser aproximado pela equação $T_{fin} = \frac{\theta_{fin} - \theta_0}{\omega_{ss}}$, onde no gráfico da figura 11 também pode ser estimado. O θ_{fin} , representa a posição angular final em estado estacionário e θ_0 a representa a posição angular inicial (GUEDES, 2014). A soma da constante de

tempo eletromecânica do sistema T_{em} e a constante de tempo da armadura T_a resulta no tempo total do sistema τ_{tot} (DEUR et al., 2004).

O modelo da mola é apresentado na figura 12. O comportamento é simulado com duas molas, sendo uma oposta a outra, interligadas pela parada mecânica de LH, com uma constante para cada mola, e característica de rigidez bastante intensa na região próxima de LH (GUEDES, 2014).

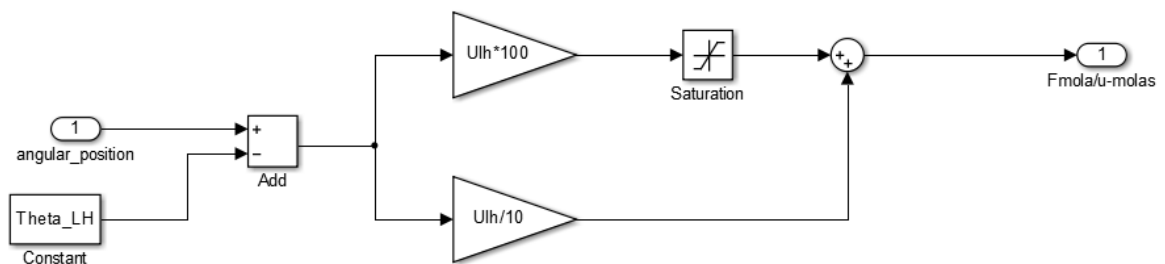


Figura 12 – Modelo da mola da válvula borboleta

Fonte: adaptado de Guedes (2014).

De acordo com Guedes (2014), no sistema real, os limites de curso da válvula borboleta são considerados como $\Theta = 0^\circ$ (válvula totalmente fechada) e $\Theta = 90^\circ$ (válvula totalmente aberta). Considerando a complexidade do tema, a modelagem do choque é considerada neste trabalho de forma bastante rudimentar. No modelo apresentado, é adicionado uma saturação em $\Theta = 0^\circ$ (0 rad) e $\Theta = 90^\circ$ (1,5708 rad) na saída do integrador de posição.

A figura 13 apresenta o modelo do bloco Hard stop On. Este bloco tem a função de anular a velocidade angular quando o integrador de posição satura através de uma realimentação negativa na entrada do integrador de velocidade. De acordo com a figura 13, quando a posição angular ultrapassa 90° (batente superior, representado pela tensão de 4,5V) ou 0° (batente inferior, representado pela tensão de 0,4V), a saída lógica do bloco hard stop on é zero, forçando um fator multiplicativo negativo na finalidade de reduzir ou zerar a velocidade angular, evitando a saturação infinita.

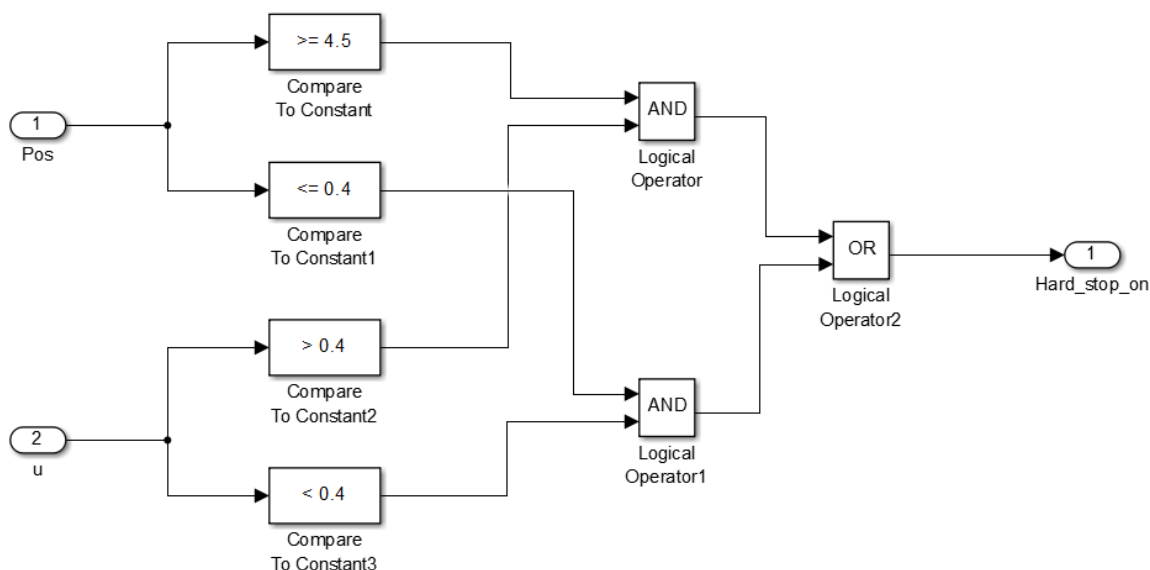


Figura 13 – Modelo do bloco Hard_stop_on.

Fonte: adaptado de Guedes (2014)

O modelo da força de atrito é apresentado na figura 14. As forças de atrito podem ser estimadas através de grandezas elétricas. Para este caso, se a tensão elétrica na entrada ser menor ou igual a tensão de deslocamento (0,05 V para este caso), a constante da tensão de deslocamento entra em atuação, caso seja maior, atua a constante de tensão de atrito de Coulomb.

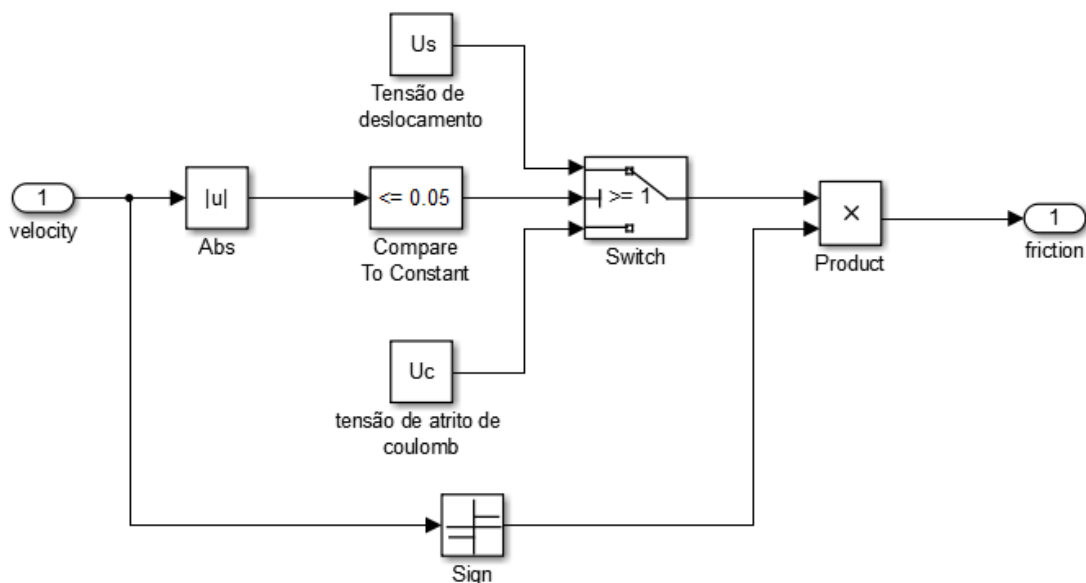


Figura 14 – Modelo dos atritos

Fonte: adaptado de Guedes (2014)

2.4.4 Projeto do compensador PID para *Electronic Throttle Control*

2.4.4.1 Obtenção da Função Transferência

Nesta seção, iremos descrever o processo de obtenção da função transferência e o projeto do compensador PID para a válvula borboleta.

De acordo com Guedes (2014), uma função de transferência da válvula borboleta em malha fechada pode ser aproximada por uma função de segundo grau, na qual pode ser determinada através de um degrau unitário, assumindo o sistema em “caixa preta”. (GUEDES 2014, OGATA 2010).

Para este projeto, foi utilizado a função transferência obtida por Guedes (2014), na qual é analisado um circuito eletrônico que consiste de um comparador entre o sinal do sensor TPS e do sinal de referência, na finalidade de estimar a abertura da válvula a um degrau, em malha fechada. Assim sendo, temos a seguinte função transferência da planta:

$$G_p(s) = \frac{2002,56}{s(s+46,27)} \quad (13)$$

A figura 15 apresenta o diagrama de bode da equação (13), na finalidade de obter a resposta em frequência. Resposta em frequência é a análise do comportamento de um sistema quanto ao seu ganho, em uma certa faixa de frequência. Foi obtado em definir amplitude em decibéis, sendo $A_{R(db)} = 20 \cdot \log A_R$.

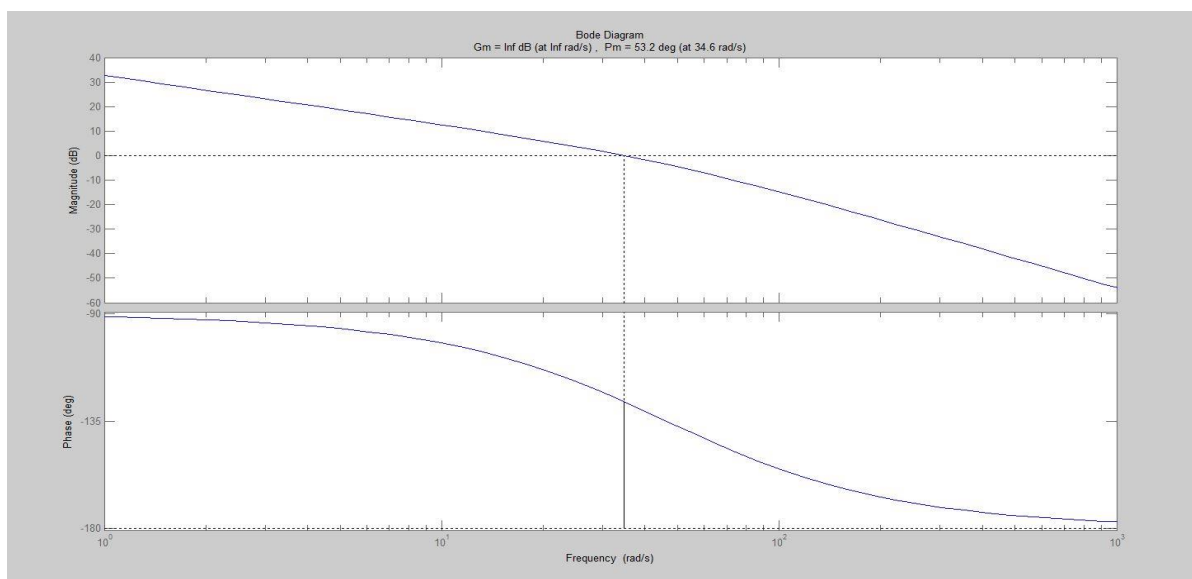


Figura 15 – Diagrama de bode do sistema em malha aberta

Fonte: autoria própria.

De acordo com a figura 15, para este sistema, temos um ganho de margem $G_m = \text{Inf}$ (em inf rad/s) e ganho de fase $PM = 53.2$ graus (em 34.6 rad/s). Pode-se concluir que o sistema em questão apresenta um bom comportamento, devido à alta margem de ganho, garantindo assim robustez e estabilidade.

A figura 16 apresenta o lugar das raízes da equação (13). É possível perceber que o sistema possui dois pólos reais, um em $x = 0$ e $x = -46.27$.

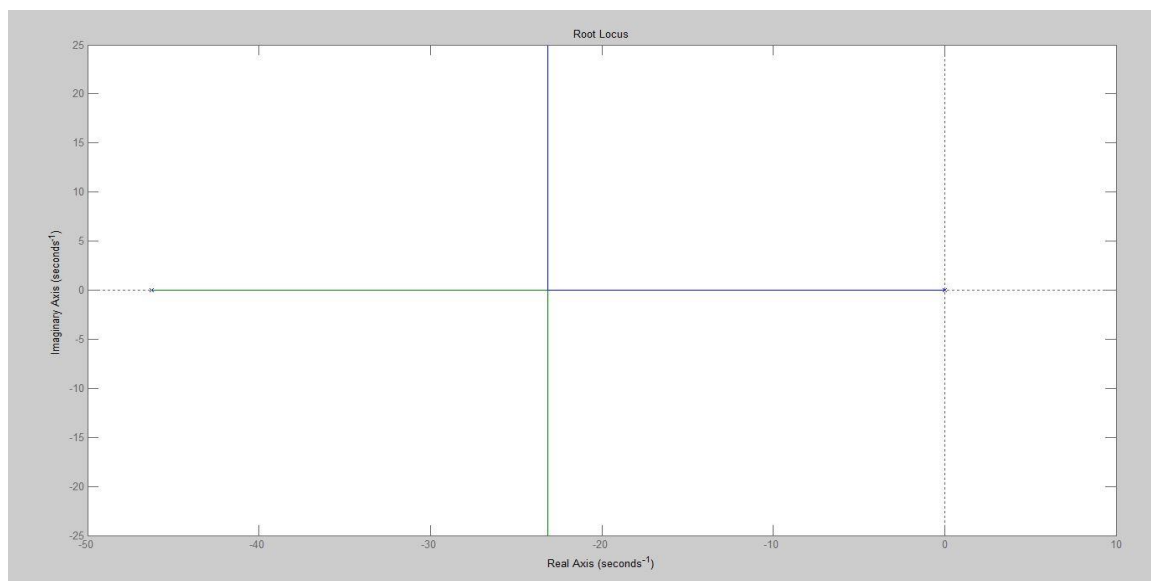


Figura 16 – Lugar das raízes do sistema em malha aberta

Fonte: autoria própria.

A figura 17 apresenta a resposta ao degrau unitário do sistema em malha fechada, com amplitude em volts. Percebe-se que a resposta apresenta um pico de amplitude em $A = 1,15\text{V}$.

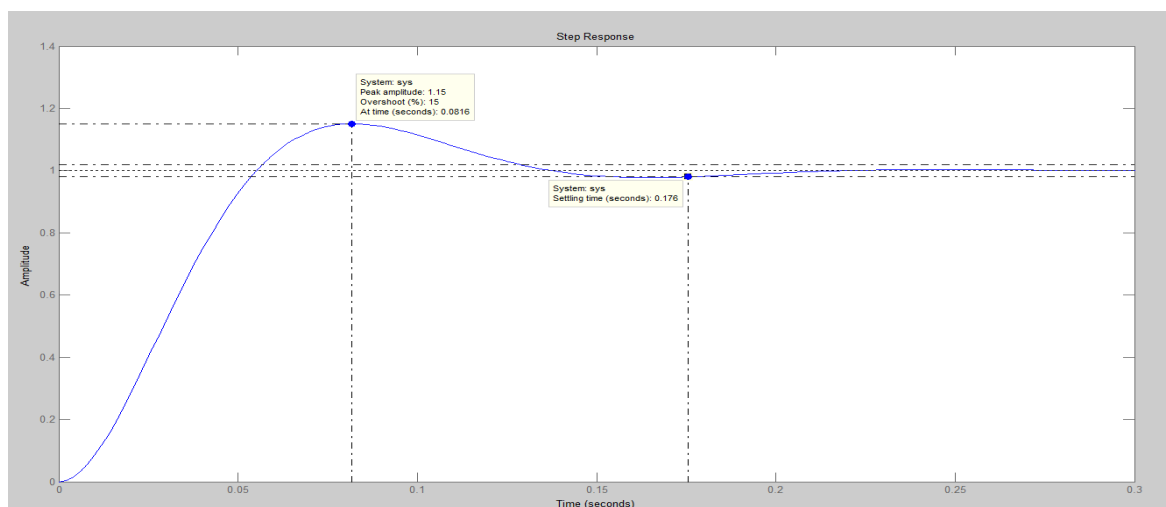


Figura 17 – Resposta ao degrau unitário em malha fechada

Fonte: autoria própria.

Pode-se perceber que a resposta ao degrau unitário não apresenta um bom desempenho. De acordo com a figura 17, a resposta ao degrau do sistema apresenta um tempo de assentamento (tempo necessário para a variável do processo chegar dentro de uma determinada porcentagem do valor final) de 0,176 segundos com um *overshoot* (valor que a variável de processo ultrapassa o valor final) de 15%.

2.4.4.2 Definição do controle PID

A estratégia de controle utilizado para este trabalho será o compensador PID.

De acordo com Ogata (2010), o controlador PID é o mais popular no meio industrial devido a sua robustez, confiabilidade e baixo custo.

De acordo com Deur et al, (2004), engenheiros tem chegado à conclusão que, sistema de controle de um *Electronic Throttle* deveria seguir os seguintes requerimentos:

- Tempo de assentamento da posição do sistema de controle para um degrau unitário deve ser menor do que 100 ms para qualquer ponto de operação e sinal de referência.
- O ponto de erro em estado estacionário deve ser menor que 0.1°.
- O ideal para resposta ao degrau do sistema é não conter *overshoot*. Este requerimento é particularmente importante para o modo de operação em grandes sinais, com o propósito de evitar choques quando atingido o ponto de parada mecânica, nas posições extremas.
- Baixos níveis de perturbação no sinal de posição da válvula e sinal de comando, na finalidade de evitar desgastes excessivos do potenciômetro e da transmissão e perdas do motor.
- Robustez do sistema de controle com respeito a variações nos parâmetros do processo, na qual pode ser causado por desvios, variações de condições externas e obsolescência.
- Simplicidade na estratégia de controle, de tal forma que possa ser possível a implementação em típicos sistemas micro controlados automotivos de baixo custo.

O controle PID foi desenvolvido utilizando o MATLAB simulink em conjunto com a ferramenta SISO Design Tool. O método utilizado foi a variação dos pólos e zeros do sistema junto a variação dos valores de K_p , K_i e K_d . O sistema completo é mostrado na figura 18.

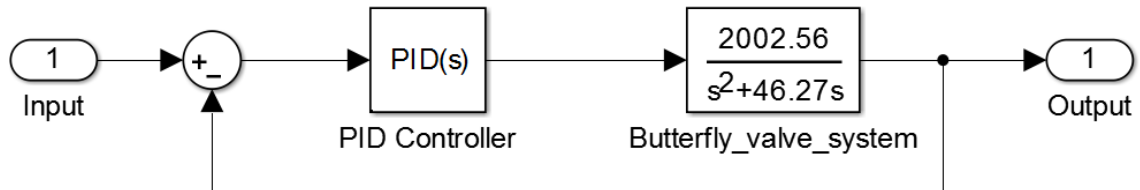


Figura 18 – Sistema em malha fechada com controlador PID

Fonte: autoria própria.

Sendo K_p , K_i e K_d respectivamente os coeficientes dos termos proporcional, integral e derivativo, os parâmetros utilizados para o controlador PID foram:

$$K_p = 0,9739$$

$$K_i = 0,2215$$

$$K_d = 0,2026$$

A resposta ao degrau deste sistema é apresentada na figura 19. Para este sistema, o tempo de assentamento é de 0,0868 segundos com um *overshoot* (valor em que a variável do processo ultrapassou valor final) de 0,194%.

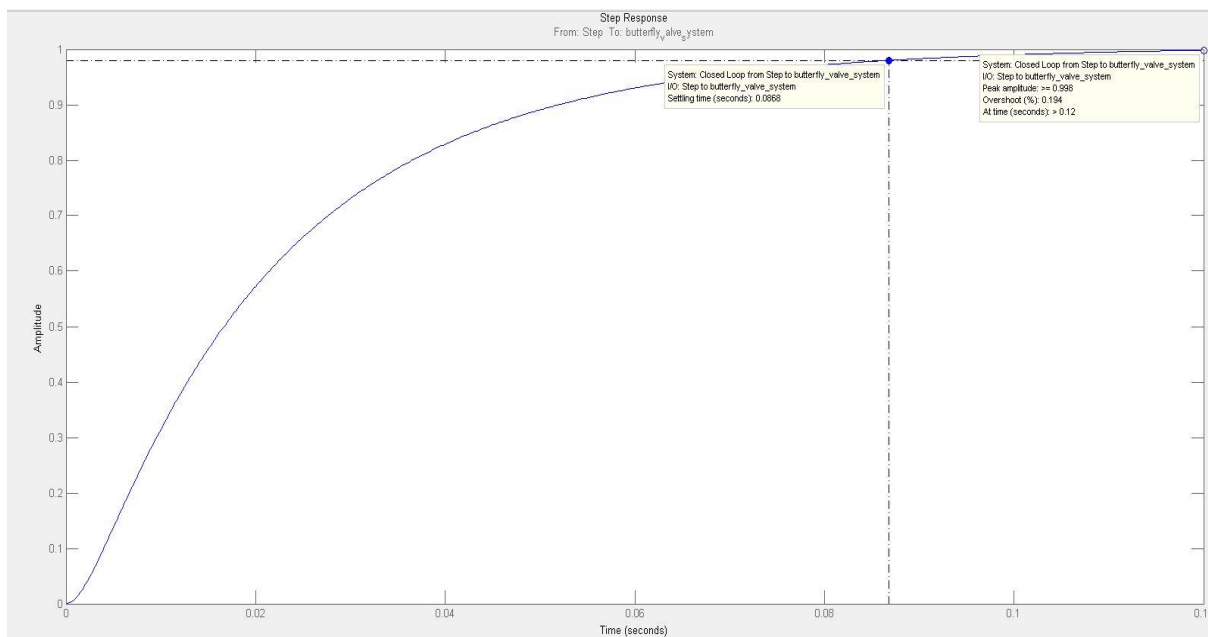


Figura 19 – Resposta ao degrau do sistema em malha fechada com compensador PID

Fonte: autoria própria.

Pode-se notar através da figura 19 que o tempo de assentamento atende a condição estabelecida por Deur (2004), e sendo o *overshoot* pequeno o suficiente para não provocar considerável influência no desempenho do sistema.

2.4.5 Projeto Experimental em Plataforma Arduino

Nesta seção será descrita o desenvolvimento do projeto experimental de controle da válvula borboleta. Para isto, foi utilizado os seguintes materiais:

- Um arduino R3, microcontrolador ATmega328, tensão de operação: 5V, 14 portas digitais, 6 portas analógicas, velocidade de clock de 16MHz.
- Uma fonte de tensão DC de 0 ~ 32V.
- Um transistor TIP120.
- Um diodo.
- DAQ NI USB-6212.
- Um corpo de borboleta Magneti Marelli, alimentação do motor DC: 5V, alimentação do sensor TPS: 5V.

O projeto experimental foi desenvolvido utilizando a plataforma arduino UNO com utilização da ferramenta NI-DAQ. O dispositivo arduino é uma plataforma

hardware bastante utilizado para fins acadêmicos e de protótipo, sua utilização tem sido cada vez mais expressiva em diversas áreas da eletrônica. O sistema completo é ilustrado nas figuras 20 e 21.

O controle foi desenvolvido utilizando linguagem C através da interface arduino. A lógica de programação utilizada foi a comparação constante entre o sinal de entrada e o sinal do sensor TPS. Para cada condição, o setpoint era incrementado ou decrementado. A programação completa pode ser vista no apêndice A.

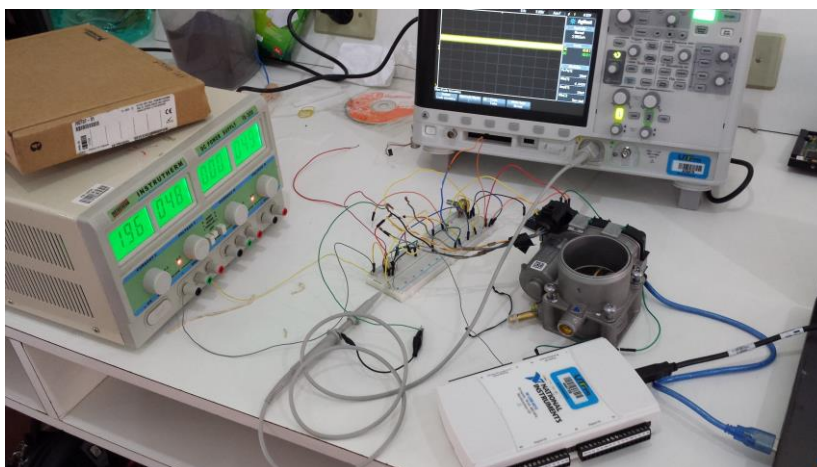


Figura 20 – Bancada utilizada para o projeto experimental

Fonte: autoria própria.

A figura 21 apresenta o esquema de ligação realizado no projeto experimental. A saída da DAQ foi conectada na entrada do *setpoint* da placa arduino. A saída PWM do arduino foi conectado no transistor. Os pólos positivos e negativos do motor DC foram conectados na fonte de tensão e no transistor respectivamente.

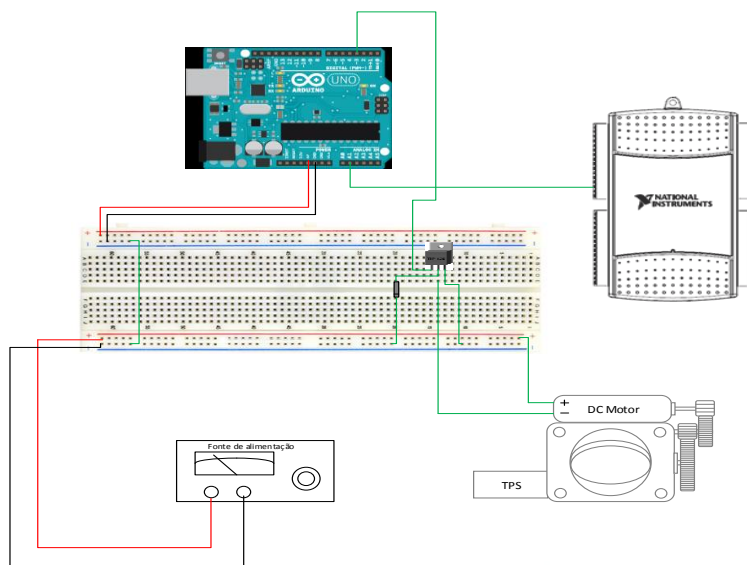


Figura 21 – Esquema de ligação
Fonte: autoria própria.

Para geração do sinal de entrada, foi utilizado a plataforma DAQ em conjunto com o software Labview, conforme figura 22 e 23.

A figura 22 mostra o diagrama de blocos montado. O mesmo constitui de um simulador de sinais conectado ao bloco DAQ Assistant, no modo gerador de sinais. Na entrada do simulador de sinais foi conectado um *slider* no propósito de regular a frequência da melhor forma possível. Um visualizador de gráficos foi implementado para monitorar a geração do sinal.

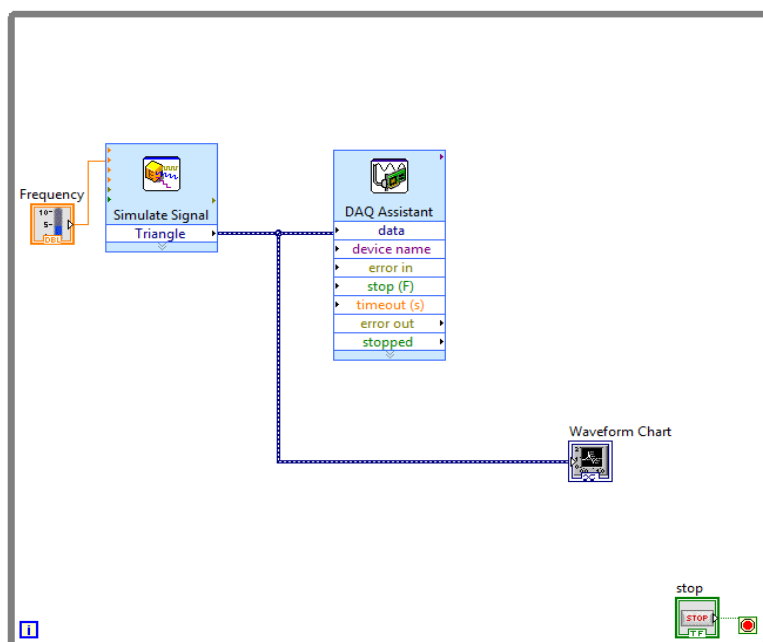


Figura 22 – Diagrama de blocos no labview

Fonte: autoria própria.

A figura 23 apresenta o painel frontal em 2D no labview. Neste painel é apresentado a forma de onda gerada na entrada do arduino e um *slider* responsável em realizar a variação da frequência da forma de onda gerada.

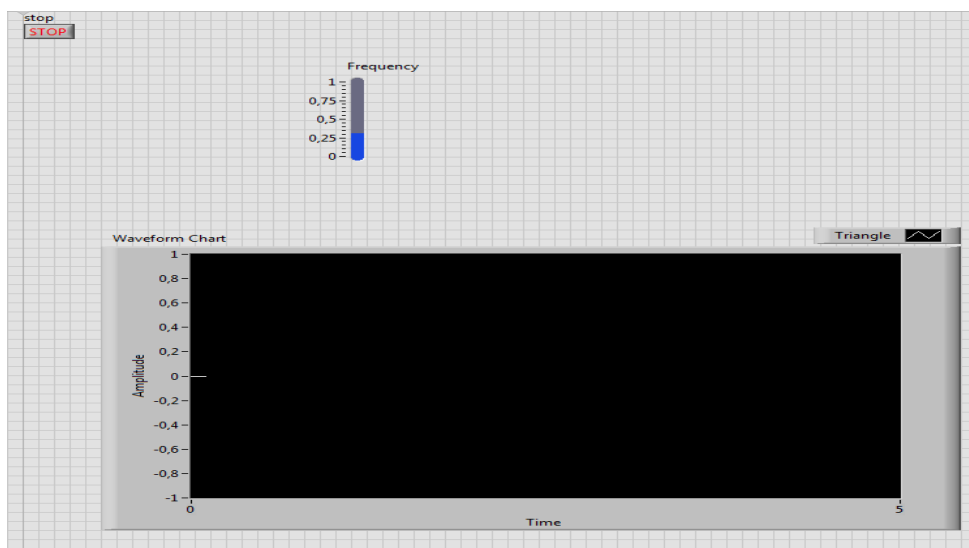


Figura 23 – Painel frontal no labview

Fonte: autoria própria.

A saída DAQ é ligada na entrada A1 do arduino. O sinal PWM é então gerado através do arduino e entregue ao transistor TIP120 junto a um diodo. Para alimentação da válvula, é utilizado uma fonte DC externa devido à alta corrente demandada.

3 RESULTADOS

Nesta seção apresenta-se os resultados obtidos com a simulação dos modelos apresentados na seção 2.4.3 e 2.4.4 e do procedimento experimental desenvolvido na seção 2.4.5. Serão organizados os resultados por seções, apresentando em cada uma delas, os testes com os sinais: onda senoidal, onda triangular, onda quadrada, dente de serra, considerando estes como sendo nosso sinal de entrada proveniente do sensor do pedal do acelerador. A saída do sistema utilizada neste trabalho será na escala de 0,4V até 4,5V.

3.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA EM MALHA ABERTA.

A figura 24 apresenta o comportamento da válvula borboleta, em um sistema em malha aberta, para uma entrada senoidal de 0,33 Hz. Podemos notar que o sinal de saída não acompanha o sinal de entrada e o sinal do TPS, saturando antes do mesmo atingir seu pico.

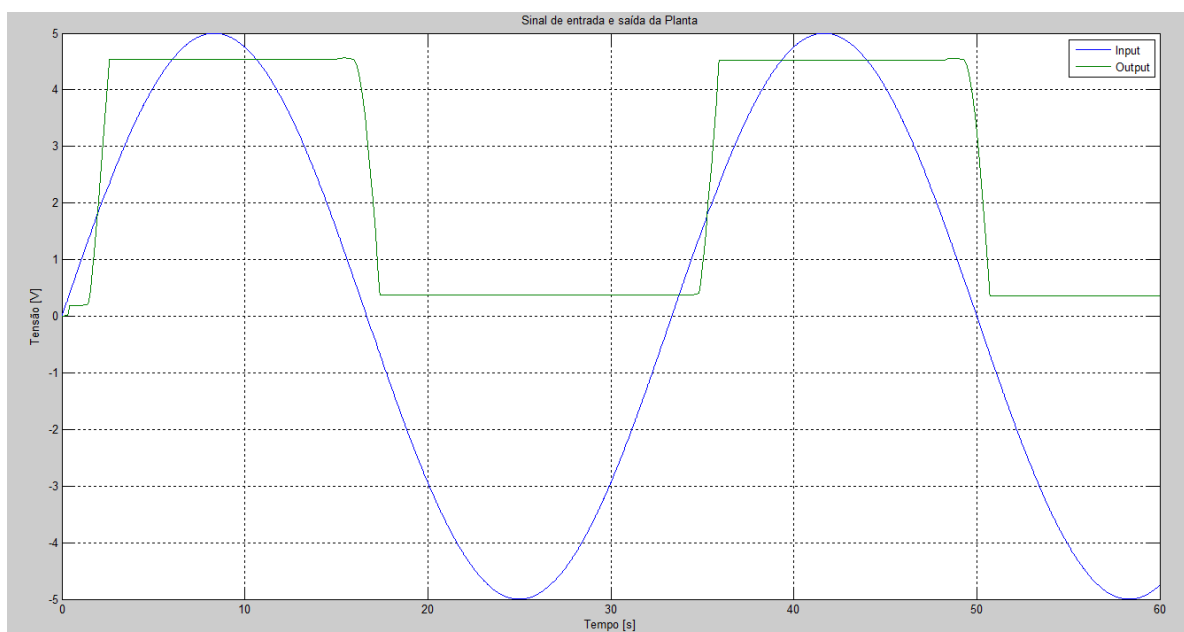


Figura 24 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda senoidal

Fonte: Autoria Própria

A figura 25 apresenta a resposta do sistema a uma excitação em onda triangular. Pode-se perceber que o sinal de saída não atinge seu ponto mínimo de tensão, o que demonstra que a válvula borboleta permanece mais de 50% aberta. Este fenômeno ocorre devido à alta taxa de variação de tensão pelo tempo, somado ao atraso entre o sinal de entrada e saída.

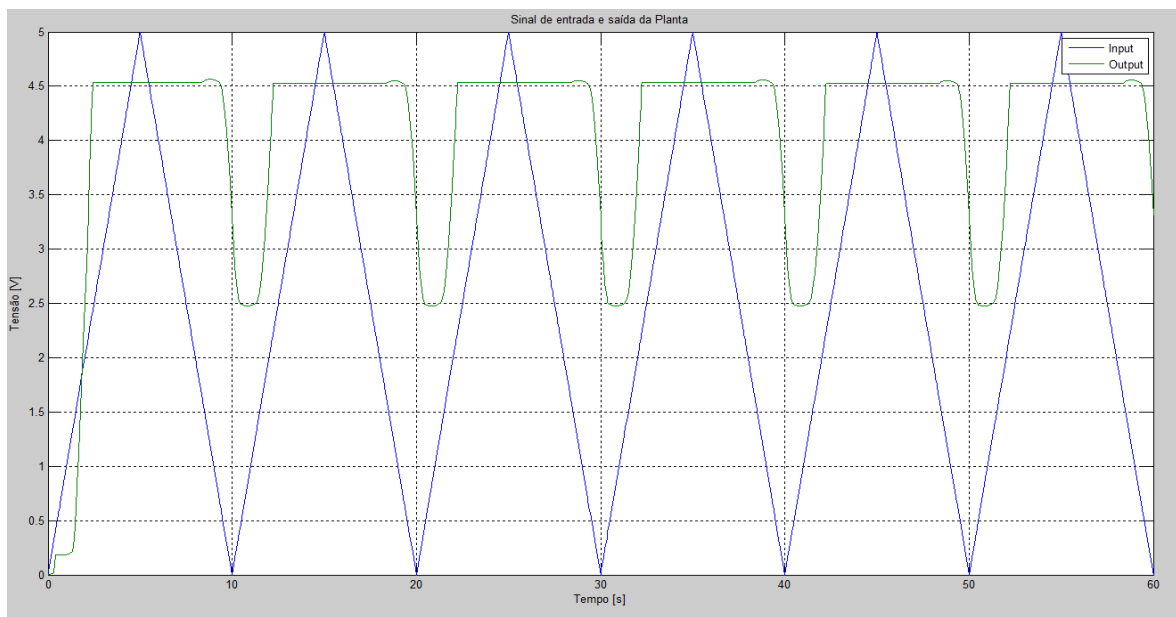


Figura 25 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda triangular

Fonte: Autoria Própria

A figura 26 apresenta a resposta do sistema a uma excitação em onda quadrada. A resposta do sensor TPS não acompanha o decréscimo de tensão da entrada, porém, para esta entrada, o sinal de saída apresentou o melhor resultado se comparado aos obtidos nas figuras 24 e 25.

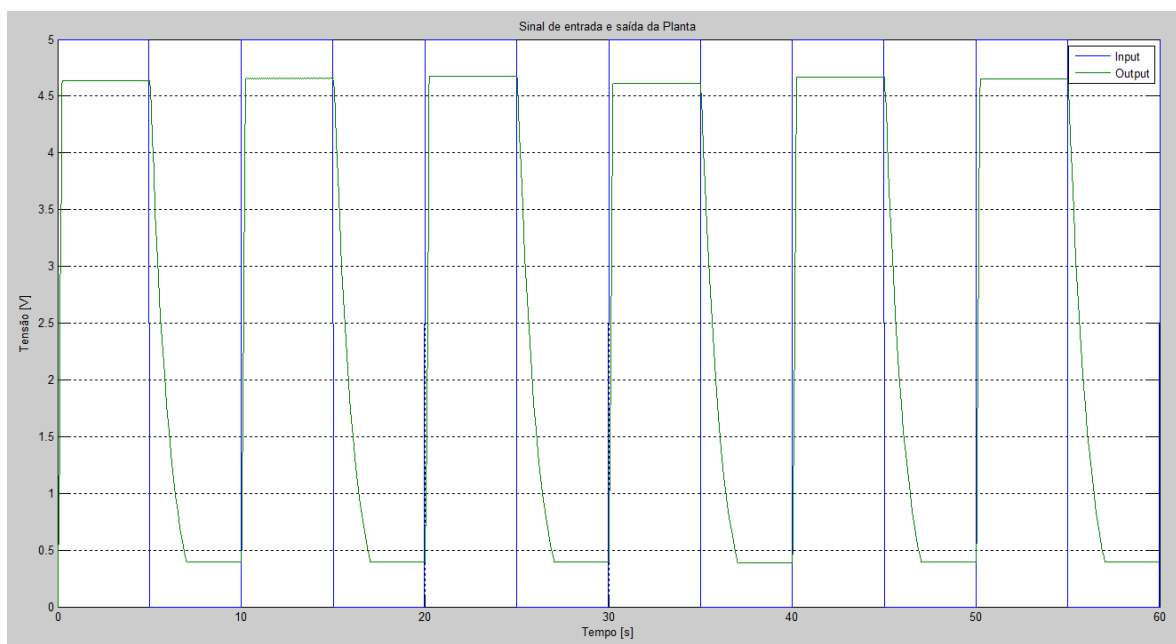


Figura 26 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda quadrada

Fonte: Autoria Própria.

A figura 27 apresenta a resposta do sistema a uma excitação em dente de serra. A saída apresenta resposta semelhante a excitação em onda triangular, alterando na escala de tensão máxima e mínima. A diferença de tensão na excitação em onda triangular é de 2V, enquanto na tensão em onda dente de serra é de 2,1V aproximadamente.

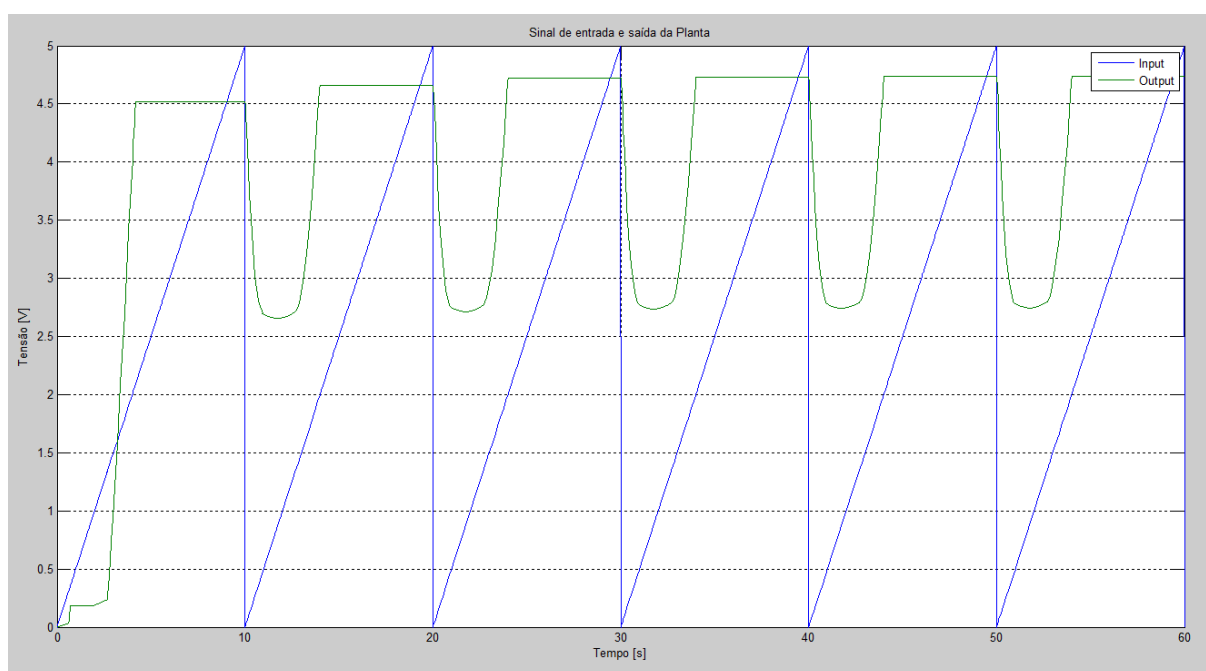


Figura 27 – Resposta da válvula borboleta a uma excitação em onda quadrada

Fonte: Autoria Própria.

3.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA COM COMPENSADOR PID.

Nesta seção será apresentado os resultados da simulação descritos na seção 2.4.4. Pode-se observar através das figuras 28, 29,30 e 31 que a resposta do sistema em malha fechada para um compensador PID é bastante satisfatória, apresentando rápida resposta e confiabilidade. O sinal de saída do sistema apresenta cortes em 4,5V e 0,4V, por ser estes os limites de leitura do sensor TPS.

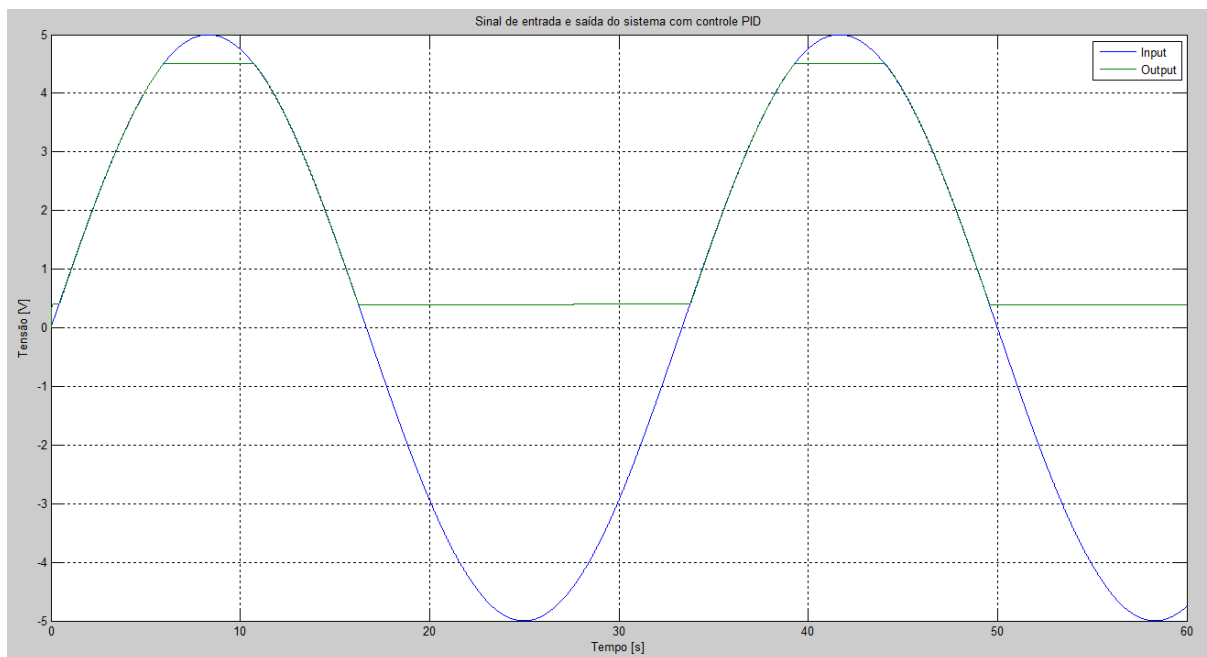


Figura 28 – Resposta do sistema para uma onda senoidal

Fonte: Autoria Própria.

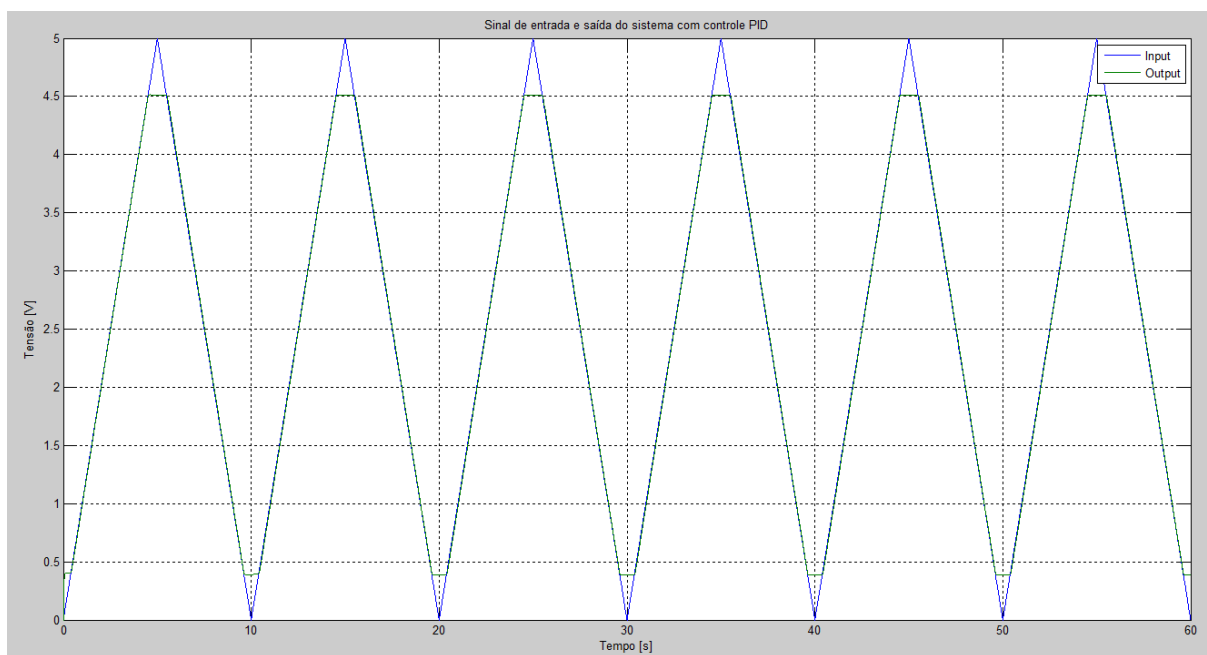


Figura 29 – Resposta do sistema para uma triangular

Fonte: Autoria Própria.

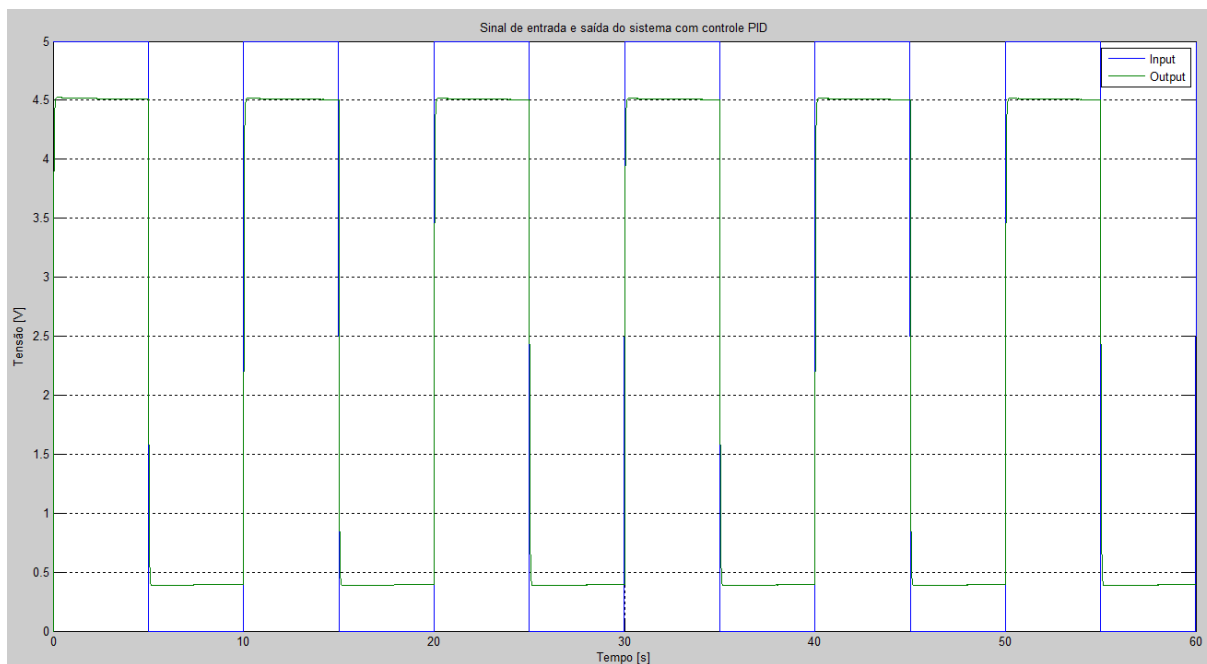


Figura 30 – Resposta do sistema para uma onda quadrada

Fonte: Autoria Própria.

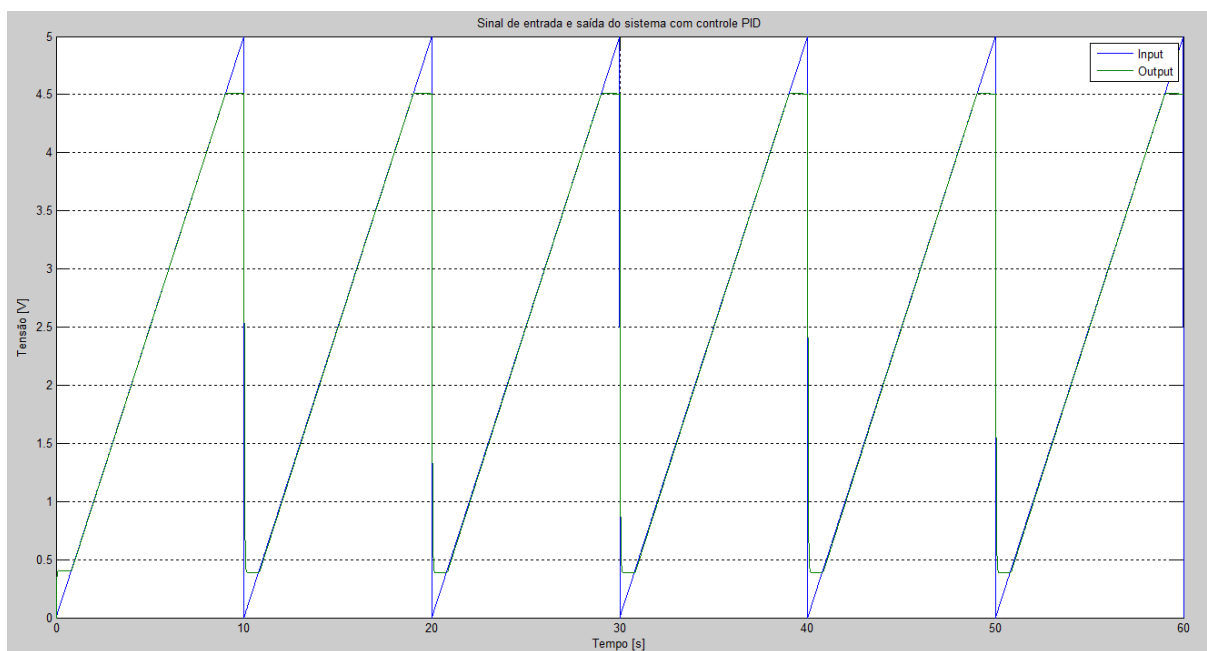


Figura 31 – Resposta do sistema para uma onda dente de serra

Fonte: Autoria Própria.

Pode-se perceber que, em todos os testes apresentados, o sistema apresenta uma resposta bastante rápida e com baixo sobressinal, fiel ao propósito do controle, porém, para este sistema, é apresentada condições ideais de

comportamento. Assim, não foram considerados os efeitos que a mola e o atrito podem ocasionar no sistema.

3.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM ARQUITETURA ARDUINO.

Nesta seção é apresentado os testes experimentais para o circuito descrito na seção 2.4.5. Os testes foram realizados com sinais de 5,71V de amplitude e 0,33 Hz de frequência. O sensor TPS apresentou corte em 3,86V e tensão inicial de 0V. Para os testes, apenas foi considerado o semi ciclo positivo, sendo o único efetivamente relevante para este projeto. O sinal de cor verde representa a entrada e de cor amarela representa a saída.

A figura 32 apresenta a resposta do sistema para uma onda senoidal. O sinal de saída apresenta um atraso com relação ao sinal de entrada, aproximadamente 0,625s. Este se deve principalmente ao comportamento da mola, que necessita de determinada força oposta para vencer a inércia, demais razões podem ser atribuídas ao controle, menos preciso, a arquitetura utilizada, e aos atrasos no sinal.

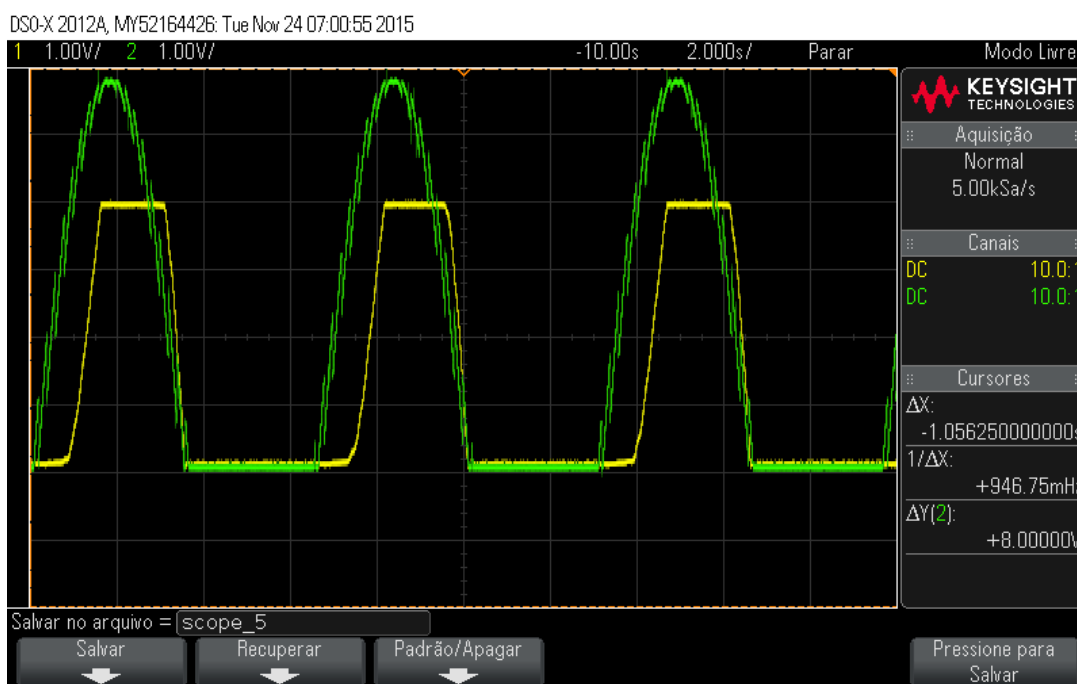


Figura 32 – Resposta experimental para uma onda senoidal

Fonte: Aatoria Própria.

A figura 33 apresenta a resposta do sistema para uma onda triangular. A resposta apresenta características semelhantes ao sinal de entrada de onda senoidal, com um atraso consideravelmente grande (aproximadamente 0,78s) devido a progressão linear da tensão de entrada.

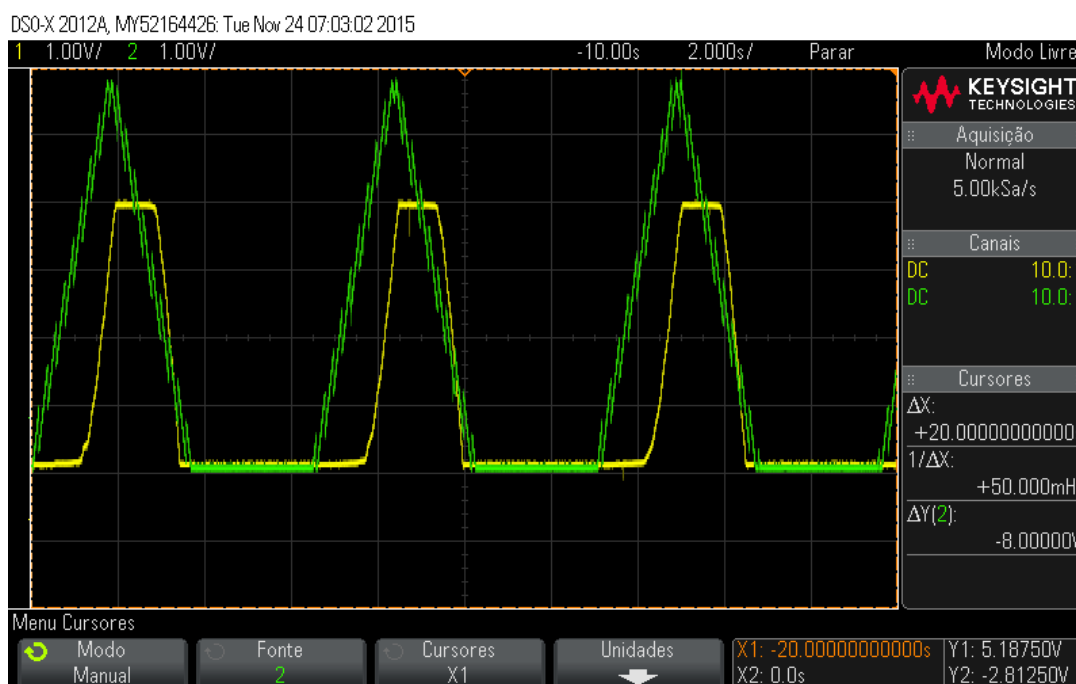


Figura 33 – Resposta experimental para uma onda triangular

Fonte: Aatoria Própria.

A figura 34 apresenta a resposta do sistema para uma onda quadrada. É possível observar que o sistema apresenta a melhor resposta para este tipo de sinal de entrada. O tempo de atraso é de aproximadamente 0,375s. Neste cenário, devido a um aumento drástico no sinal de entrada, a corrente entregue ao motor DC também terá um aumento drástico, proporcionando uma força contrária a inércia, bem maior que casos anteriores.

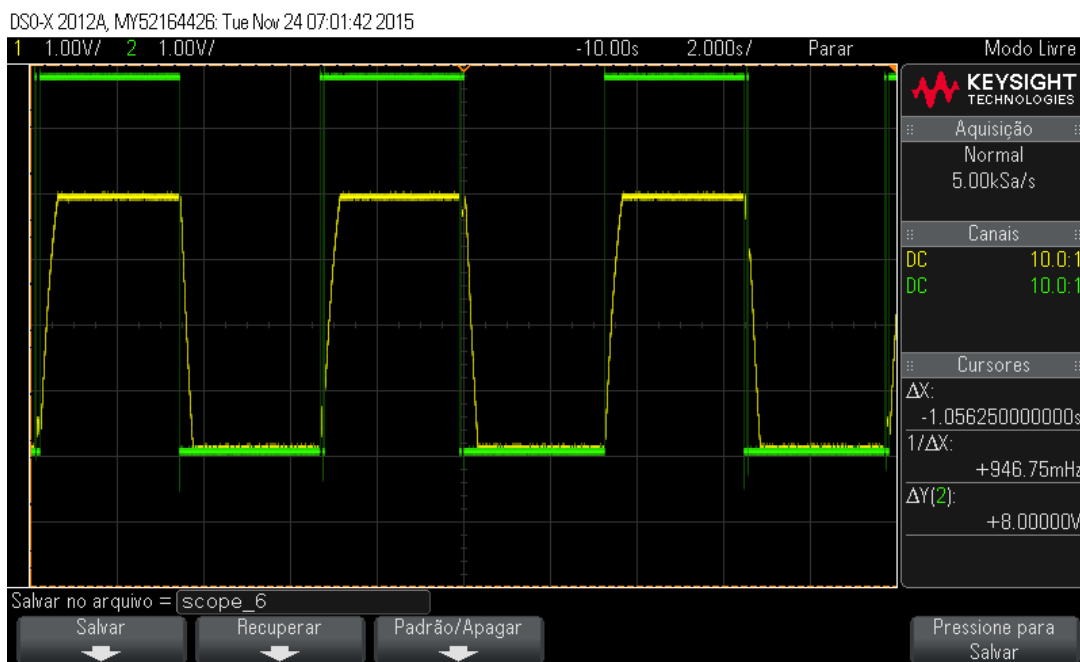


Figura 34 – Resposta experimental para uma onda quadrada

Fonte: Autoria Própria.

A figura 35 apresenta a resposta do sistema para uma onda dente de serra. Para esta entrada, a saída do sensor apresenta o maior atraso, aproximadamente 1,87s, sendo este o pior resultado. O mesmo ocorre devido a mola exigir uma força maior para sair da inércia na região de repouso da mola.

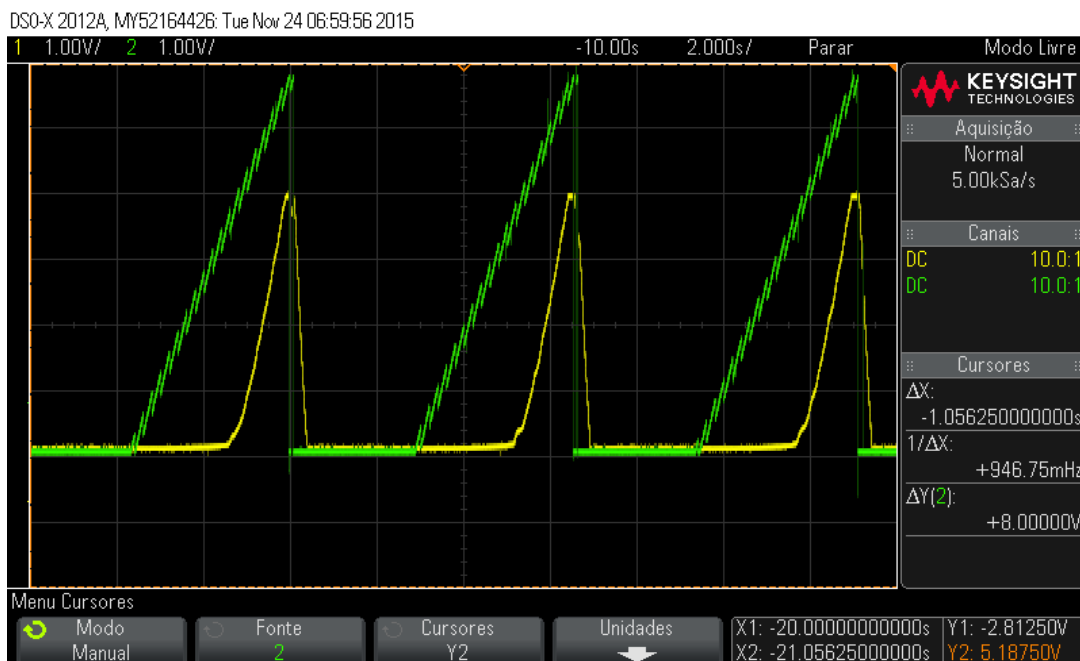


Figura 35 – Resposta experimental para uma onda dente de serra

Fonte: Autoria Própria.

Pode-se notar através dos diversos sinais apresentados que, o comportamento da mola exerce uma grande influência no sistema como um todo, devido seu comportamento não linear e a sua inércia. A mesma apresenta uma forte atuação na região *Limp Home* (região de repouso) e mais suave quando distante dela (GUEDES,2014).

3.4 RESUMO DOS RESULTADOS.

A tabela 1 apresenta um resumo dos resultados obtidos no decorrer deste projeto. Nesta seção são comparados os atrasos encontrados, em valores aproximados, entre o sinal de entrada e o sinal de saída para cada forma de onda, representados em segundos.

Tabela 1 – Resumo dos resultados

Modelo do projeto	Onda senoidal (s)	Onda triangular (s)	Onda quadrada (s)	Onda dente de serra (s)
Simulação em malha aberta	3,94	3,48	1,852	4,46
Simulação com compensador PID	0,0868	0,0868	0,0868	0,0868
Projeto experimental com arduíno	0,625	0,78	0,375	1,87

Fonte: Autoria Própria.

4 CONCLUSÃO

Este projeto realizou o estudo de estratégias de controle para *eletronic throttle control* utilizando de ferramentas de *software* e sistemas físicos através de experimentos. Através das respostas de simulação do sistema em malha aberta, foi possível observar o comportamento da válvula para assim definir parâmetros que resultassem no desenvolvimento do sistema de controle.

Um ponto bastante característico em testes tanto em simulação quanto experimental é o comportamento apresentado pela mola. É possível notar que, o atraso entre o sinal de entrada e o medido no TPS é maior a medida que a tensão sofre uma menor variação sobre o tempo. Esta característica pode ser explicada pelo fato da mola apresentar um coeficiente de amortecimento diferente a cada momento de abertura ou fechamento da válvula, e a própria inercia que atua como força oposta.

O sistema ETC com compensador PID apresentou resultados muito satisfatórios durante as simulações. A rápida resposta do sistema e o baixo valor de *overshoot* fazem deste controlador uma ótima opção de uso em sistemas ETC, uma vez que algumas condições físicas que foram desprezadas neste projeto, sejam consideradas em seu desenvolvimento, principalmente em termos de comportamento da mola.

A utilização de plataforma arduíno para controle ETC pode ser satisfatória a nível acadêmico, experimental ou desenvolvimento de protótipo, mas não é uma boa opção se considerado a nível comercial. Pela sua baixa confiabilidade e lento nível de resposta, esta plataforma não seria capaz de transmitir a segurança necessária no desenvolvimento da funcionalidade proposta em um sistema deste porte, considerando ainda as diversas condições climáticas que o mesmo estaria exposto.

Mediante os resultados adquiridos neste projeto, é possível, como um futuro trabalho, desenvolver outras técnicas de controle para válvula borboleta, aplicando ferramentas de verificação e de validação com a finalidade de se estabelecer um comparativo entre os sistemas experimentais.

REFERÊNCIAS

AONO, T., e KOWATARI, T. **Throttle-control algorithm for improving engine response based on air-intake model and throttle-response model**. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 53(3), 915-921. 2006.

ASE – AUTOMOTIVE SERVICE EXCELLENCE, **Advanced Engine Performance Specialist Test, Composite Vehicle Type 3 Reference Booklet**, disponível em: www.ase.com, acessado em: 13 de Outubro de 2006.

BUTT, Q. R., et al. **Estimation of automotive engine parameters: part i: Discharge coefficient of throttle body**. *Applied Sciences and Technology (IBCAST), 2009 6th International Bhurban Conference on*. IEEE, 2009.

CONATSER, R. et al. Diagnosis of automotive electronic throttle control systems. **Control Engineering Practice**, v. 12, n. 1, p. 23-30, 2004.

DEUR, Joško, et al. **An electronic throttle control strategy including compensation of friction and limp-home effects**. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 40.3 (2004): 821-834.

GANESAN, V. **Internal combustion engines**. McGraw Hill Education (India) Pvt Ltd, 2012.

GREPL, R.; LEE, B. **Modeling, parameter estimation and nonlinear control of automotive electronic throttle using a rapid-control prototyping technique**. *International Journal of Automotive Technology, the Korean Society of Automotive Engineers*, p. 601-610, 2010.

GRIFFITHS, Paul G. **Embedded software control design for an electronic throttle body**. 2002. Tese de Doutorado. University of California, Berkeley.

GUEDES, Marcos Antônio de Carvalho. **Estudo de compensadores para a válvula borboleta eletrônica automotiva**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2014

GUPTA, Hari N. **Fundamentals of internal combustion engines**. PHI Learning Pvt. Ltd., 2013.

HILLENBRAND, Martin et al. **Failure mode and effect analysis based on electric and electronic architectures of vehicles to support the safety lifecycle ISO/DIS 26262**. In: *Rapid System Prototyping (RSP), 2010 21st IEEE International Symposium on*. IEEE, 2010.

JEON, Seo-Hyun et al. **Automotive hardware development according to ISO 26262**. In: *Advanced Communication Technology (ICACT), 2011 13th International Conference on*. IEEE, 2011. p. 588-592.

KIM, Daekyun, et al. **"Control of integrated powertrain with electronic throttle and automatic transmission."** *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* 15.3 (2007): 474-482.

LOH, R. N. K., et al. **"Modeling, parameters identification, and control of an electronic throttle control (ETC) system."** *Intelligent and Advanced Systems, 2007. ICIAS 2007. International Conference on*. IEEE, 2007.

MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo 2002.

OGATA, K., e YANG, Y, Modern control engineering, 5th edition, 2010.

PAN, Yaodong, UMIT Ozguner, e OGUZ Hasan Dagci. "**Variable-structure control of electronic throttle valve.**" *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.11 (2008): 3899-3907.

RAUSH, J. R., LIECHTY, J. R. **Throttle Control Malfunction**, Throttle System, Journal of Failure Analysis and Prevention, Oct 2008, Vol.8, pp.406-409.

SHIN, Changmin. **A framework for fragmenting/reconstituting data frame in Controller Area Network (CAN).** In: Advanced Communication Technology (ICACT), 2014 16th International Conference on. IEEE, 2014. p. 1261-1264.

SONG, Chau-Chung, et al. **Study of a vehicular drive-by-wire system based on FlexRay protocol.** SICE Annual Conference 2010, Proceedings of. IEEE, 2010.

YUAN, Xiaofang, YAONAN Wang, and LIANGHONG Wu. "**SVM-based approximate model control for electronic throttle valve.**" *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 57.5 (2008): 2747-2756.

WEIKANG, Qian; LI, Wang; Lingjun, Xie; Yifang, Zeng. **Practical Solution for Automotive Electronic Throttle Control Based on FPGA.** Signal Processing, ICSP 2008. 9th International Conference on, 2008.

ZHANG, Yang; HAYASHI, Hiroshi; KURIHARA, Nobuo. **Quick response of electronic throttle control by expanding SMC.** In: Advanced Computer Control (ICACC), 2010 2nd International Conference on. IEEE, 2010. p. 159-163.

ZHANG, Yang; KURIHARA, N. **An integral variable structure compensation method for electronic throttle control with input constraint.** In: Advanced Computer Control (ICACC), 2011 3rd International Conference on. IEEE, 2011. p. 492-496.

APÊNDICE A

Código para simulação de ETC em MATLAB.

```
%Parâmetros da Simulação / Código baseado no estudo de GUEDES (2014)
sim_step = 1.0417e-04; %1.0417e-04 para 60s
sim_duration = 59.9999;
tempo_simul=[0:sim_step:sim_duration];
%Parâmetros da Válvula
% PARAMETROS CALCULADOS POR GUEDES (2014)
Kp = 30.52/5; % Kp = Wss/DeltaU = 30.52/5
Ttot = 0.044; % Ttot = 0.044 = 0.09 - ((1.57-0.169)/30.52) = Ttol= Ta+Tem =
Tfin - ((Theta_fin - Theta0)/Wss)

Uc = 0.42; % Uc = 0.735 =(2.337-0.866)/2; =====> Otimizado: 0.42
Ulh = 1.497; % Ulh = 1.65 = (1.602-(-1.6985))/2; =====> Otimizado: 1.497
Us = 0.15*Uc ; % Us = aproximadamente 15% de Uc = 0.11
Theta_LH = 0.169; % Angulo da Posicao LH [rad] = LH = 0.169rad = 9.7°
%Parâmetros TPS
TPS_max = 4.5;
TPS_min = 0.48;.
```

Código para simulação de ETC em C++ para arduíno.

```
int pot=0;
int trans=9;
int tps = A1;
int led=2;
int setpoint;
int valtps;
float aux; // auxiliar pedal
float auxtps; // auxiliar tps
float valPot; // entrada analogica pedal

void setup() {
  //TCCR2B = TCCR2B & 0b11111000 | 0x01; // PWM to 32 KHz
  Serial.begin(9600);
  pinMode (trans,OUTPUT);
  pinMode(led,OUTPUT);
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  valPot=analogRead(pot);
  valtps = analogRead(tps);
  aux=map(valPot,0,1023,0,255);
```

```
auxtps = map(valtps,862,59,0,1023);  
//analogWrite(trans,aux);  
Serial.println(valPot,10); // view the port  
  
while(valtps>valPot)  
{  
  setpoint--;  
  setpoint = constrain(setpoint,0,255);  
  analogWrite(3,setpoint);  
  delay(2);  
  valPot=analogRead(pot);  
  valtps = analogRead(tps);  
}  
  
while (valtps<valPot)  
{  
  setpoint++;  
  setpoint = constrain(setpoint,0,255);  
  analogWrite(3,setpoint);  
  delay(2);  
  valPot=analogRead(pot);  
  valtps = analogRead(tps);  
}  
}
```