

Gustavo Lemos Schwartz

**Projeto de placa eletrônica controladora de
Válvula *Throttle***

Campos dos Goytacazes

2021

Gustavo Lemos Schwartz

Projeto de placa eletrônica controladora de Válvula
Throttle

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão do Instituto Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão. Área do Programa: Sistemas para Engenharia. Linha de Pesquisa: Sistemas Embarcados.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – IFF
Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão
Programa de Pós-Graduação

Orientador: Prof. D.Sc. Rogerio Atem de Carvalho

Campos dos Goytacazes

2021

Biblioteca Anton Dakitsch
CIP - Catalogação na Publicação

S982p Schwartz, Gustavo Lemos
Projeto de placa eletrônica controladora de VálvulaThrottle / Gustavo Lemos Schwartz - 2021.
47 f.: il. color.

Orientador: Rogerio Atem de Carvalho

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos Goytacazes, RJ, 2021.
Referências: f. 44 a 47.

1. VálvulaThrottle. 2. Motor à Combustão. 3. Modelagem. 4. Controle. 5. Prototipação. I. de Carvalho, Rogerio Atem, orient. II. Título.

Gustavo Lemos Schwartz

Projeto de placa eletrônica controladora de Válvula *Throttle*

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão do Instituto Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão. Área do Programa: Sistemas para Engenharia. Linha de Pesquisa: Sistemas Embarcados.

Trabalho aprovado. Campos dos Goytacazes, ____ de _____ de _____:

Prof. D.Sc. Rogerio Atem de Carvalho

Orientador

Instituto Federal Fluminense – IFF

**Prof. D.Sc. Rodrigo Martins
Fernandes**

Instituto Federal Fluminense – IFF

**Prof. D.Sc. Eduardo Atem de
Carvalho**

Universidade Estadual do Norte Fluminense
- UENF

Campos dos Goytacazes

2021

Este trabalho é dedicado ao meu pai Gustavo Areias Schwartz, por sempre me apoiar nas escolhas difíceis da vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me auxiliaram no desenvolvimento deste projeto, em destaque a todo o pessoal do Polo de Inovação Campos dos Goytacazes (PICG) e, especialmente, ao sempre prestativo professor e amigo Edson Simões dos Santos, sem estas pessoas este trabalho não poderia ser realizado. Agradeço também a todos que me apoiaram para que este projeto fosse concluído num momento pessoal delicado, especialmente familiares e amigos.

*"O show deve continuar
Eu irei enfrentar tudo com um sorriso
Eu nunca irei desistir
Avante - com o show"
Roger Taylor / John Deacon / Brian May / Freddie Mercury*

RESUMO

O motor à combustão é a máquina motriz mundial desde o século XIX, trazendo mobilidade e progresso aos países dos mais aos menos desenvolvidos. Uma das partes mais importantes de alguns motores à combustão é a chamada Válvula *Throttle*, também conhecida como válvula borboleta, cujo objetivo é controlar a passagem de ar (comburente da reação) ou mistura combustível para a admissão do motor, controlando, assim, sua velocidade e torque. O objetivo deste trabalho é construir um protótipo de placa eletrônica de controle para válvulas *throttle* que possa substituir a original em caso de defeito, com baixo custo. Foram desenvolvidos diversos modelos do sistema dinâmico da válvula a fim de poder representá-la de maneira mais fiel possível e, deste modo, auxiliar na confecção de um controlador simples e confiável para o protótipo. Após testes realizados com a placa de substituição, notou-se que é possível a realização do objetivo proposto, porém o microcontrolador utilizado não é robusto e potente o suficiente para tal, fazendo-se necessário embarcar o software em hardware superior.

Palavras-chave: Válvula *Throttle*; Motor à combustão; Modelagem; Controle; Prototipação.

ABSTRACT

The combustion engine has been the worldwide driving engine since the 19th century, bringing mobility and progress to the countries from the most to the least developed ones. One of the most important parts of some combustion engines is the so-called Throttle Valve, also known as butterfly valve, whose objective is to control the passage of air (reaction oxidant) or fuel mixture for the intake of the engine, controlling, thus, its speed and torque. The objective of this work is to build a prototype of an electronic control board for throttle valves that can replace the original one in case of a defect, with low cost. Several models of the dynamic system of the valve have been developed to be able to represent it as faithfully as possible and, thus, assist in making a simple and reliable controller for the prototype. After tests carried out with the replacement board, it was noted that it is possible to achieve the proposed objective, but the microcontroller used is not robust and powerful enough for this, making it necessary to embed the software on better hardware.

Keywords: Throttle Valve; Combustion engine; Modeling; Control; Prototyping.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de Válvula <i>throttle</i>	13
Figura 2 – Áreas de conhecimento da busca	17
Figura 3 – Válvula F-Series	19
Figura 4 – Comparação do número de voltas na mola	20
Figura 5 – Placa Arduino MEGA 2560	21
Figura 6 – Ponte-H	22
Figura 7 – Sensor de Posição	22
Figura 8 – Modelo do Sistema	23
Figura 9 – Não-linearidades do Sistema	24
Figura 10 – Diagrama de Blocos do Modelo	26
Figura 11 – Entrada senoidal	26
Figura 12 – Resposta à entrada senoidal	27
Figura 13 – Resposta à entrada em degrau	27
Figura 14 – Diagrama de blocos para levantamento do Modelo II	29
Figura 15 – Simulação com modelo em paralelo com o sistema	30
Figura 16 – Diagrama de blocos da simulação em paralelo.	30
Figura 17 – Diagrama de blocos dos regressores do modelo.	31
Figura 18 – <i>SetPoint</i> , Resposta do sistema e Sinal de Controle	32
Figura 19 – Resposta do modelo ao controlador otimizado	34
Figura 20 – Resposta do sistema real ao controlador otimizado	34
Figura 21 – Contador de <i>Duty Cycle</i> do sinal PWM	36
Figura 22 – Diagrama de blocos do algoritmo principal	36
Figura 23 – Diagrama de blocos do algoritmo de calibração	37
Figura 24 – Subsistema do algoritmo de calibração	38
Figura 25 – Esquemático da Placa Eletrônica	39
Figura 26 – Parte frontal da placa eletrônica	39
Figura 27 – Verso da placa eletrônica	40
Figura 28 – Comparação do <i>Setpoint</i> com a resposta do sistema real ao controlador	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	<i>Corrente Contínua</i>
ECU	<i>Engine Control Unit (Unidade de Controle de Motor)</i>
GNV	<i>Gás Natural Veicular</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit (Protocolo de Comunicação)</i>
INPI	<i>Instituto Nacional de Propriedade Intelectual</i>
PI	<i>Proporcional-Integral</i>
PID	<i>Proporcional-Integral-Derivativo</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation (Modulação de Largura de Pulso)</i>
RLS	<i>Recursive Least Squares (Mínimos Quadrados Recursivos)</i>
S.I.	<i>Sistema Internacional de medidas</i>
T_s	<i>Tempo de amostragem (Sample Time)</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contexto Geral	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivos Gerais	13
1.2.2	Objetivos Específicos	13
1.3	Justificativa	13
1.4	Estrutura do trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Estado da arte	15
2.2	Estado da técnica	16
3	DESENVOLVIMENTO	18
3.1	Materiais	18
3.1.0.1	A Válvula <i>Throttle</i>	18
3.1.0.2	O Microcontrolador	20
3.1.0.3	Ponte-H	21
3.1.0.4	Sensor de Posição	22
3.2	Modelagem	23
3.2.0.1	Modelo I	23
3.2.0.2	Estimação de Parâmetros do Modelo I	26
3.2.0.3	Modelo II	28
3.3	Controle e Prototipagem	31
3.3.1	Controle	31
3.3.2	Algoritmo do Microcontrolador e Calibração	35
3.3.3	Prototipagem	38
4	RESULTADO E CONCLUSÃO	41
4.1	Resultado	41
4.2	Conclusão	42
4.3	Trabalhos Futuros	43
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta um contexto geral no qual o objeto deste estudo está inserido, assim como os objetivos gerais e específicos deste trabalho e a justificativa para tal. No final do capítulo é mostrado como o trabalho foi estruturado textualmente.

1.1 Contexto Geral

Motores a combustão são, há mais de um século, a força motriz mundial. A origem exata de tal engenho é pouco precisa, sendo atribuída a invenção do motor de combustão interna, especificamente, aos italianos Eugenio Barsanti e Felice Matteucci em meados do século XIX ([FORRESTER, 2020](#)).

Os motores de combustão interna são, de modo geral, divididos entre os de ciclo Otto (movidos a Gasolina, Etanol, GNV, etc.) e os de ciclo Diesel (movidos a Diesel). Nos motores de ciclo Otto a mistura combustível-comburente é inflamada a partir de uma faísca gerada por uma vela, já os motores do ciclo Diesel não necessitam de faísca pois o Diesel em alta pressão entra em ignição espontânea ([BRUNETTI, 2012](#)).

Apesar das indústrias energética e automobilística sofrerem mudanças ao passo que o mundo moderno troca, aos poucos, sua fonte energética do petróleo para combustíveis menos poluentes, os motores a combustão interna ainda são massivamente presentes na indústria, nas ruas e nas residências mundo a fora, tendo o Petróleo e seus derivados mais de 30% da repartição da oferta interna de energia brasileira ([EPE, 2019](#)).

No momento de transição de motores a combustão de combustíveis fósseis para motores elétricos, o Etanol e o GNV se destacam como combustíveis intermediários a esse processo. O primeiro por ser um combustível de origem vegetal, renovável e o segundo por se tratar de um combustível fóssil menos poluente que os demais com ausência de enxofre e menor emissão de gases poluentes como o gás carbônico ([MACHADO; MELO; LASTRES, 2007](#)).

O que permite o controle da velocidade de rotação ou força (ou ainda potência) de um motor é o fluxo de mistura combustível-comburente que entra na câmara de combustão. Via de regra, quanto mais mistura, mais forte a explosão interna e maior a potência do motor. Em motores movidos a GNV, por exemplo, quem regula esse fluxo é a válvula *throttle*, comumente conhecida como válvula borboleta. Em outros motores que possuem bicos injetores de combustível, como é o caso de motores a Gasolina, a válvula *throttle* controla somente a quantidade de ar (comburente) que entra na câmara de combustão. A Figura 1 ilustra uma válvula *throttle*.

Figura 1 – Exemplo de Válvula *throttle*

Fonte: [Bischoff et al. \(2013\)](#)

1.2 Objetivos

Nesta seção estão explicitados os Objetivos Gerais e Específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivos Gerais

O objetivo deste trabalho é a construção de um protótipo de placa eletrônica de controle e calibração de uma válvula *throttle* em substituição à placa original, para fins de manutenção corretiva de modelos similares defeituosos, bem como para estimular a futura produção de um equipamento 100% nacional.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Modelar matematicamente o sistema eletromecânico composto pelo corpo da válvula e o motor elétrico desta;
- Projetar um controlador da posição da válvula (posicionador), com base no modelo do sistema, capaz de receber calibrações externas de parâmetros do sistema;
- Construir protótipo de placa eletrônica com o máximo de componentes definidos por software (reduzindo o número de componentes físicos na placa);
- Testar a válvula com a nova placa em ambiente relevante.

1.3 Justificativa

O escopo da presente dissertação é parte de um projeto de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) realizado em parceria entre o Instituto Federal Fluminense e uma empresa brasileira. A principal motivação deste trabalho é desenvolver uma alternativa nacional para a placa controladora de válvula borboleta que possua funcionalidades específicas para otimizar os processos de ajustes e manutenção da empresa parceira,

com um custo menor que as alternativas importadas. Estima-se que a utilização da placa controladora objeto desta dissertação trará uma redução dos tempos de ajuste e manutenção, bem como uma redução dos custos e riscos inerentes ao processo de importação das placas de controle atualmente utilizadas pela empresa.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em quatro partes ou capítulos. A primeira parte é esta Introdução, que mostra um pouco do contexto geral no qual o assunto deste trabalho está inserido, assim como os objetivos e a justificativa deste.

A segunda parte (Revisão Bibliográfica) trás à tona trabalhos e tecnologias similares a este projeto, mostrando semelhanças e diferenças entre estes.

A terceira parte (Desenvolvimento) demonstra como foi feito este trabalho: os materiais utilizados, o processo de modelagem e controle do sistema dinâmico alvo do estudo e a criação do protótipo eletrônico deste.

A quarta e última parte (Resultado e Conclusão) mostra os resultados obtidos e a conclusão tirada deste estudo, assim como propostas de continuidade como trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo mostra trabalhos e tecnologias que se assemelham com o objeto de estudo deste trabalho (válvula *Throttle*) entre artigos científicos e patentes, a fim de promover a reflexão de onde este trabalho está inserido e como se diferencia dos demais.

2.1 Estado da arte

A base de busca escolhida foi o Scopus da Elsevier, por ser uma das bases mais importantes e mais conhecidas mundialmente, se tratando de artigos científicos. A estratégia de busca poderia ser restrita, porém como o assunto já é bastante específico (válvulas *throttle*), preferiu-se fazer uma busca mais abrangente, utilizando somente o termo principal ("throttle valve" OR "throttle valves") entre títulos, resumos e autores, e buscando entre os artigos mais relevantes para o autor, além de artigos interessantes encontrados esporadicamente pelo Google Acadêmico.

O trabalho de [Singh \(2020\)](#) serviu de base para a modelagem do sistema deste trabalho pois demonstra passo a passo a modelagem de uma válvula *Throttle* pelos métodos de Caixa-Cinza e Caixa-Preta. Além do que foi feito por estes autores o presente trabalho envolve outros métodos de estimação de parâmetros para o modelo de Caixa-Cinza.

O trabalho de [Gritli et al. \(2018\)](#) traz uma abordagem complexa do controle adaptativo de uma válvula *Throttle* baseado em observadores não-lineares e modelagem/controlado *fuzzy*. Apesar de terem obtido bons resultados com essa abordagem, a implementação em *hardware* de sistemas de tamanha complexidade é bastante custoso e muitas vezes não-realizável.

O trabalho de [Li et al. \(2017\)](#) apresenta um controle adaptativo por Rede Neural Artificial. Novamente, os resultados são interessantes mas a aplicação exige um hardware potente. A ideia de simplificar ao máximo a complexidade do sistema se dá no objetivo de tornar o dispositivo pouco custoso.

O trabalho de [Gritli, Gharsallaoui e Benrejeb \(2017\)](#) mostra um controle tolerante a falhas no atuador utilizando PID e lógica *fuzzy* com chaveamento de multimodelos. A proposta de chaveamento entre modelos também foi utilizada no presente trabalho para tentar desenvolver um controle tolerante a falhas no sensor de posição, mas como será explicado posteriormente a imprecisão do modelo servindo de referência para o chaveamento do controle não tornou possível um controle tolerante a falhas do sensor.

O trabalho de [Yuan et al. \(2013\)](#) mostra a dificuldade de se obter um modelo de

uma válvula *throttle* devido a suas várias não-linearidades. Contudo, o objetivo é alcançado utilizando um controlador *fuzzy* adaptativo com base num algoritmo genético.

O trabalho de [AL-Samarraie, Badri e Mishary \(2015\)](#) apresenta uma solução matemática (*Integral sliding*) para o controle robusto de uma válvula *throttle*, além de eliminar o problema de *chattering* (trepidação) nativo da solução de controle utilizada.

O trabalho de [Letellier, Chafouk e Hoblos \(2016a\)](#) também se utiliza de um sistema multimodelos para descrever o sistema não-linear de uma válvula *throttle*. Este trabalho também foi base para o presente projeto na tentativa de obter um melhor modelo para o sistema, mas a utilização de multimodelos não foi o bastante para uma predição precisa do sistema.

O trabalho de [Vargas et al. \(2016\)](#) também foi base da tentativa de obter um modelo preditivo onde se estimasse a posição da válvula através de outro estado do sistema. O trabalho referido utilizou-se de um wattímetro e um filtro de Kalman, no presente trabalho utilizou-se a corrente elétrica consumida pela válvula para tentar estimar sua posição. Porém, como explicado mais a frente, a estimação da posição pela corrente não foi bem sucedida.

O trabalho de [Pan, Ozguner e Dagci \(2008\)](#) se utiliza de um observador para estimar outros estados do sistema que não podem ser medidos e um controle pelo método *backstepping* (recursivo).

Pôde-se observar que muitos trabalhos utilizam-se de lógicas *fuzzy*, Redes Neurais Artificiais (RNAs) e observadores de estado para implementar controles adaptativos e robustos para válvulas *throttle*. A exigência de controladores mais robustos pode levar à necessidade de tais métodos mais complexos no design de um produto final de mercado. O presente projeto focou em criar um protótipo que se provasse eficaz mesmo com métodos mais simples de controle. Obviamente, para continuidade deste protótipo visando objetivos mercadológicos, pode-se abrir mão de métodos de baixo custo a fim de garantir procedimentos mais robustos e tolerantes a falhas.

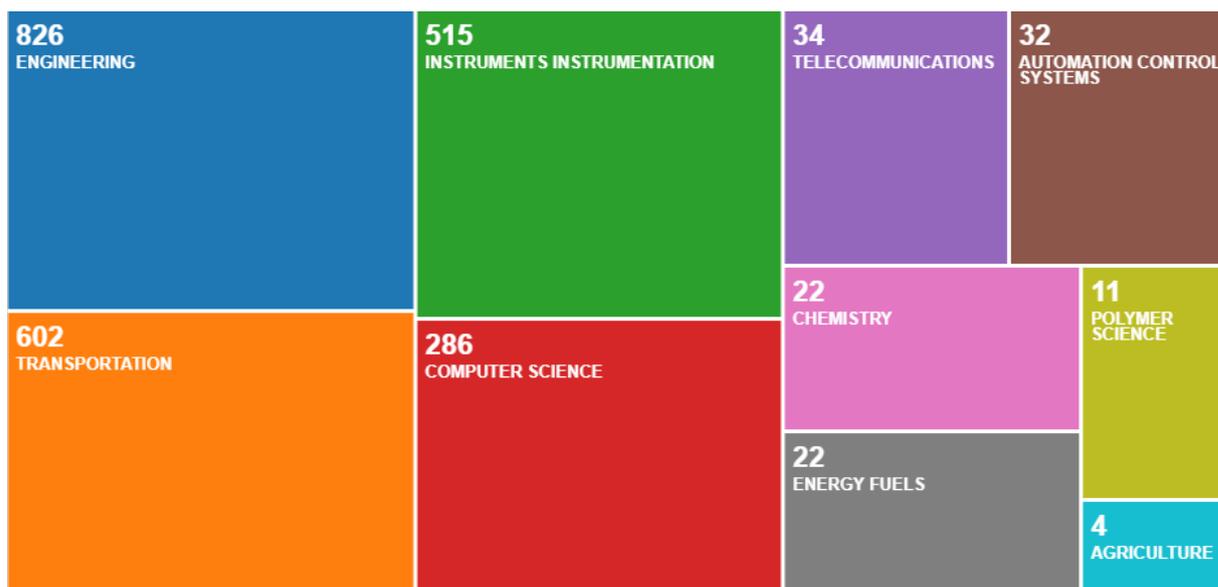
2.2 Estado da técnica

Buscando na base patentária do INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual) pela palavra "*throttle*" não se obteve nenhum resultado, porém buscando pelas palavras "válvula", "borboleta" e "controle" no título, encontrou-se algumas patentes interessantes relacionadas com válvulas tipo borboleta como a patente de [Fredrik Strååt e Sebastian Zamani \(2016\)](#), da empresa sueca SCANIA, que descreve a construção de um atuador para válvula tipo borboleta com retorno por mola e a patente de [Kazunori Kawamura, Futoshi Nishioka e Osamu Kitamura \(2008\)](#), da empresa japonesa HONDA, que descreve

um método de controle para válvulas tipo borboleta, entre outras invenções indiretamente associadas a este tipo de válvula.

Já buscando na base patentária Derwent Innovations Index por tópicos com a palavra "*throttle*" se obteve uma gama de 124.534 resultados. Filtrando por títulos com as palavras "*throttle*", "*valve*", "*control*" e "*electronic*" obteve-se 830 resultados. A Figura 2 mostra a divisão das áreas de conhecimento referentes à busca.

Figura 2 – Áreas de conhecimento da busca



Fonte: Web of Science.

Entre as patentes mais recentes se encontra a patente de [Takuya Ino e Ryuichi Oguro \(2020\)](#) da empresa japonesa Nikki, que descreve um dispositivo de controle para válvulas *throttle* com melhor performance em relação ao desvio entre o sinal de controle e o sinal de posição da válvula.

Uma outra patente da mesma empresa (Nikki) descreve a conversão de uma válvula *throttle* para ser utilizada com motores de ciclo Diesel ([Tanigawa Shota; Takagi Shingo, 2019](#)).

Uma patente da empresa indiana TVS Motor apresenta um sistema de controle que resolve um problema de drenagem de corrente da bateria quando acionada a válvula *throttle* na condição de motor parado ([K Vythilingam et al., 2020](#)).

Além das patentes supracitadas, muitas outras que descrevem dispositivos semelhantes e tecnologias que, diretamente ou indiretamente, são utilizadas em conjunto com válvulas *throttle* são mostradas em resultados de pesquisas, se mostrando uma área restrita em alguns termos, como pesquisas científicas, porém ampla em outros, como invenções de aparatos na mesma área de estado da técnica.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo estão apresentados os materiais utilizados nos experimentos e na prototipagem, a modelagem do sistema em dois métodos diferentes, assim como o controle de posição deste sistema, com ajustes de calibração, além da prototipação de uma placa de circuito eletrônico conectando os componentes do sistema às conexões externas. Todas as simulações de modelagem e estimação de parâmetros foram feitas com o software MATLAB com uma taxa de amostragem base do microcontrolador fixada em $T_s = 0.01s$, enquanto a taxa de amostragem do algoritmo final utilizada foi $T_s = 0.05s$. A versão do MATLAB utilizada foi a R2017b. Todos os códigos utilizados no projeto estão disponibilizados em um repositório no *gitlab* ([SCHWARTZ, 2021](#)).

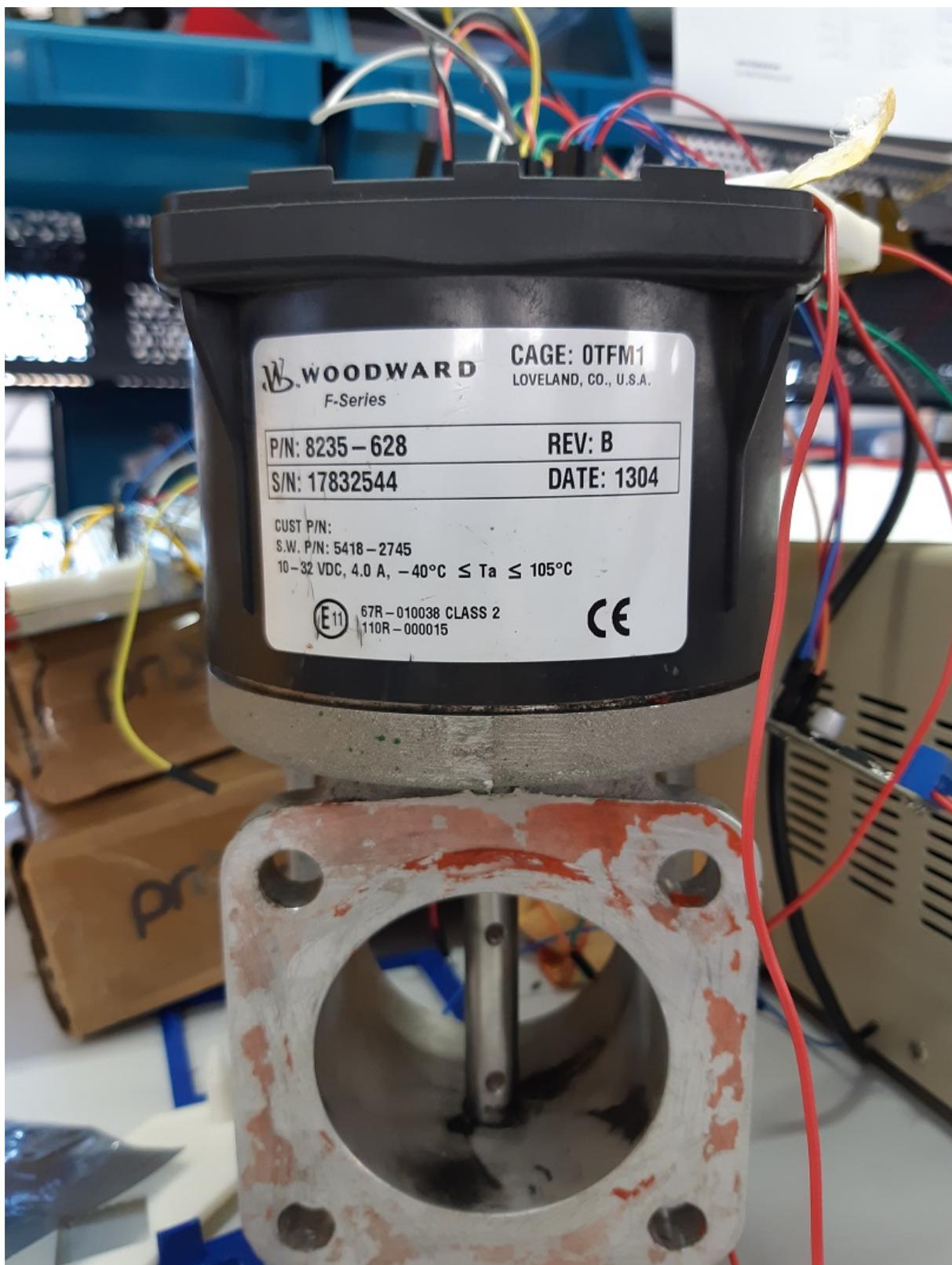
3.1 Materiais

Nesta seção estão apresentados os materiais utilizados nos testes iniciais, na modelagem e na prototipagem final. Nota-se que poucos elementos de *hardware* foram utilizados, seguindo a ideia de fazer o máximo de funções definidas por *software*, no microcontrolador.

3.1.0.1 A Válvula *Throttle*

A válvula alvo do estudo foi uma F-SERIES ITB de numeração 8235-628 da fabricante *Woodward* usada, doada pela empresa parceira. Apesar de usada, a válvula aparentou bom estado de conservação, com todas as suas partes mecânicas íntegras. A mola de retorno não aparentou estar fatigada. Esta válvula tem um curso físico de 70° de rotação ([Woodward, 2020](#)). Na Figura 3 está a fotografia da válvula em questão montada na bancada de testes.

Figura 3 – Válvula F-Series

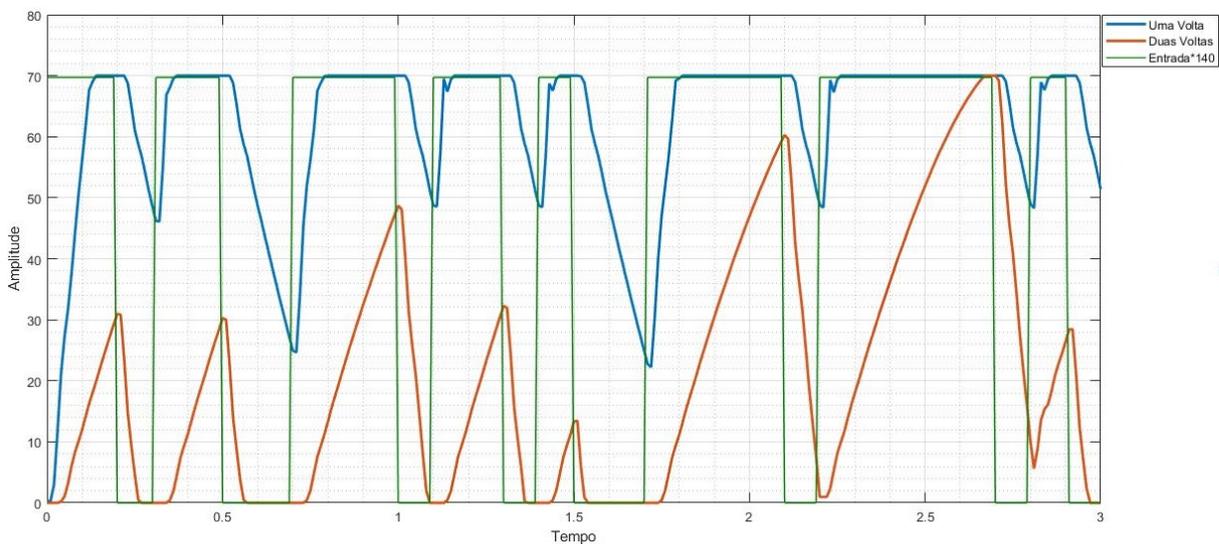


Fonte: Autor.

A válvula *throttle* é uma válvula do tipo borboleta com atuador elétrico e retorno por mola. A montagem da válvula pode ser feita com n voltas da mola, aumentando ou diminuindo seu contratorque.

Ao analisar as curvas de reação da válvula, percebeu-se que com duas voltas de torque o sistema apresentava uma resposta "menos linear" que quando com uma volta, evidenciando uma zona-morta maior. A comparação das curvas de reação do sistema com uma e duas voltas em resposta a uma mesma entrada se apresentam na Figura 4, onde a amplitude das duas curvas é de 0° a 70° e a entrada são *steps* (entrada em degrau) unitários de amplitude igual a 50% do sinal de PWM no atuador da válvula (para efeito de comparação visual, o sinal da entrada no gráfico foi amplificado 140 vezes).

Figura 4 – Comparação do número de voltas na mola



Fonte: Autor.

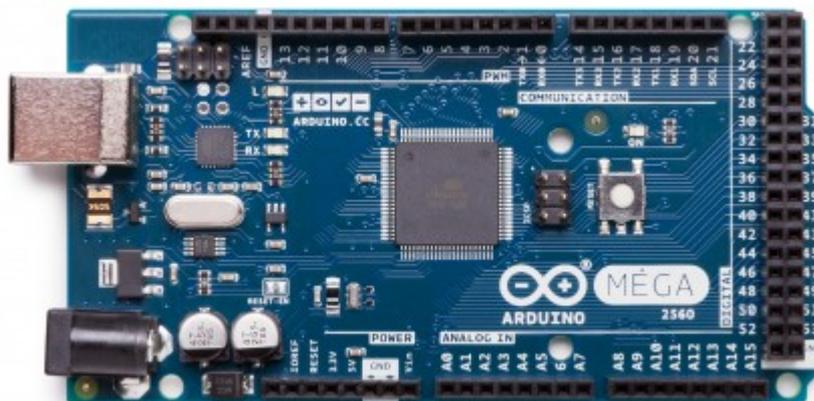
Porém, de acordo com engenheiros da empresa parceira do projeto consultados, seria melhor trabalhar com o contratorque maior na mola de retorno por questões de segurança, pois no caso de uma falha na alimentação, a válvula retornaria mais rápido à posição de fechada. Por isso escolheu-se montar a válvula com duas voltas de torque na mola.

3.1.0.2 O Microcontrolador

O microcontrolador utilizado para a realização das partes deste trabalho, desde a modelagem do sistema até o controle e calibração foi um ATMEL ATmega2560 numa placa de desenvolvimento de código-livre Arduino Mega 2560. Mais conhecido somente como Arduino Mega, esta placa microcontrolada foi criada em 2005 com o objetivo de facilitar projetos educativos na área de programação e robótica. Desde então, vem sendo largamente

utilizado em soluções simples de prototipação e soluções de engenharia (ARDUINO, 2020). A Figura 5 ilustra a placa em questão.

Figura 5 – Placa Arduino MEGA 2560



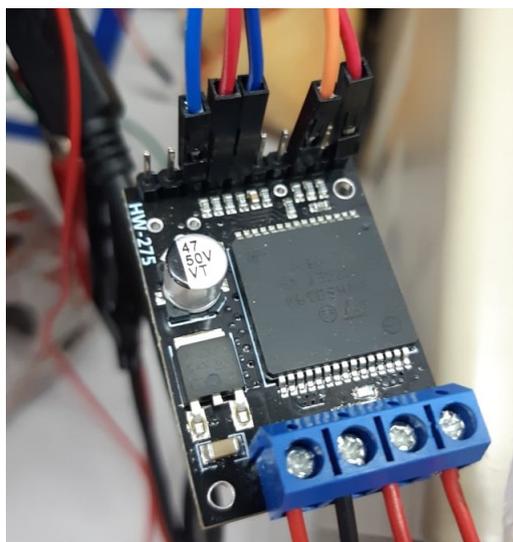
Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>

Este microcontrolador foi escolhido devido à praticidade de poder utilizá-lo com código embarcado diretamente pelo diagrama de blocos do software MATLAB Simulink, através da ferramenta de implementação de hardware do próprio MATLAB (MATHWORKS, 2020). Sem isto, toda a lógica de estimação de parâmetros da modelagem, controle e calibração teria de ser feito em uma linguagem de mais baixo nível como o C, o que deverá ser feito na fase de confecção do produto final a fim de utilizar um microcontrolador mais robusto. Contudo, para este protótipo, julgou-se suficiente a utilização deste microcontrolador.

3.1.0.3 Ponte-H

A Ponte-H é um dos *drivers* controladores de motor mais utilizados em eletrônica. Ele consiste em controlar a potência enviada ao motor por meio de modulação de largura de pulso do sinal de tensão (PWM), através de transistores. O módulo de ponte-H utilizado foi baseado no VN5019A da fabricante STMicroelectronics (STMicroelectronics, 2020), como mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Ponte-H

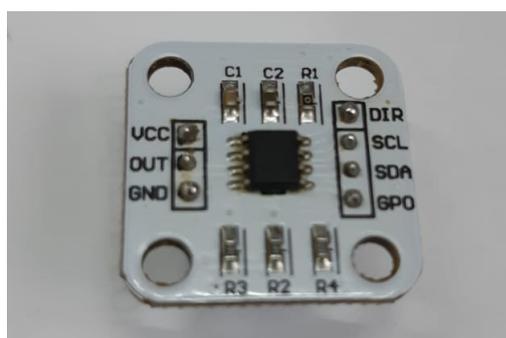


Fonte: Autor.

3.1.0.4 Sensor de Posição

Para medir a posição de abertura da válvula utilizou-se de um sensor magnético (*hall*) do modelo AS5600 do fabricante AMS (AMS, 2020), como mostrado na Figura 7. Este sensor detecta a variação de direção e sentido de um campo magnético e traduz como sinal digital no protocolo I²C. Foi escolhido este tipo de sensor por sua alta precisão de leitura, por sua comunicação digital, além de a válvula já possuir um eixo magnético para a detecção da variação da posição.

Figura 7 – Sensor de Posição



Fonte: Autor.

3.2 Modelagem

Nesta seção estão demonstrados os processos de modelagem do sistema dinâmico. Duas modelagens em métodos diferentes foram realizadas.

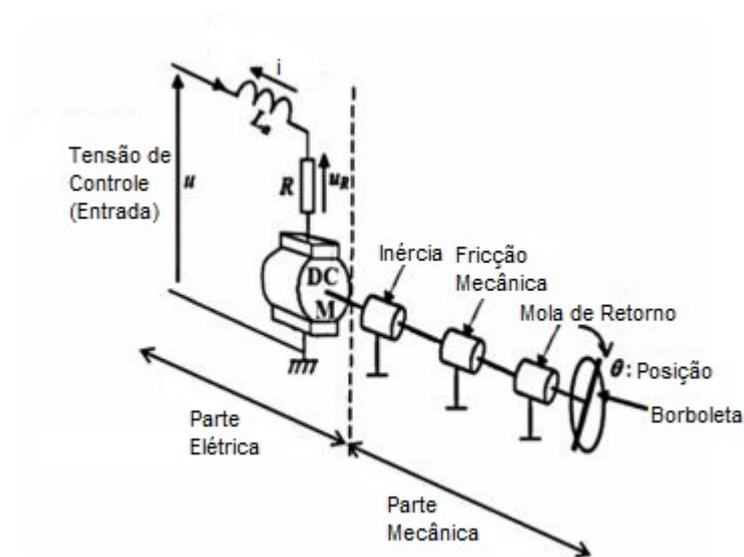
3.2.0.1 Modelo I

A modelagem inicial foi feita no método Caixa-Cinza (*Grey-Box*), onde o sistema é modelado analiticamente e os parâmetros são determinados por estimação baseado em dados coletados do sistema real (SJÖBERG et al., 1995).

A modelagem e a estimação dos parâmetros foram feitas com base no trabalho de Singh (2020), utilizando ferramentas do software MATLAB.

O sistema da válvula pode ser dividido em parte elétrica e parte mecânica, sendo a elétrica composta basicamente por um motor de corrente contínua (CC) e a mecânica pelo eixo com uma borboleta para obstrução da passagem de fluido e uma mola de retorno de posição (por questões de segurança essa mola deve fechar a válvula caso ocorra falta de energia no motor). A Figura 8 ilustra o modelo do sistema.

Figura 8 – Modelo do Sistema



Adaptado de: Letellier, Chafouk e Hoblos (2016b)

Para simplificar o sistema e facilitar a estimação dos parâmetros, resumiu-se a parte elétrica do sistema como um ganho aplicado ao torque de entrada normalizado (de zero a um) da parte mecânica, assim como feito por Singh (2020). Desse modo, o modelo matemático do sistema pode ser representado como um sistema massa-mola de segunda

ordem com um ganho de entrada, como descrito na Expressão 3.1.

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = b\tau(t) \quad (3.1)$$

Onde J é o Momento de Inércia, c é a constante de fricção, k é a constante de rigidez linear da mola, b é a constante de potência do motor e τ é o torque normalizado advindo do motor.

Representando em Espaço de Estados, podemos adotar os estados $x_1 = \theta$ (Posição (ž)), $x_2 = \dot{\theta}$ (Velocidade (ž/s)), $\dot{x}_2 = \ddot{\theta}$ (Aceleração (ž/s²)) e a saída $y = x_1$ (Posição (ž)) (OGATA, 2011). Logo as Equações de Estado e Saída são representadas em 3.2, 3.3 e 3.4.

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.2)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{J}(b\tau(t) - cx_2 - kx_1) \quad (3.3)$$

$$y = x_1 \quad (3.4)$$

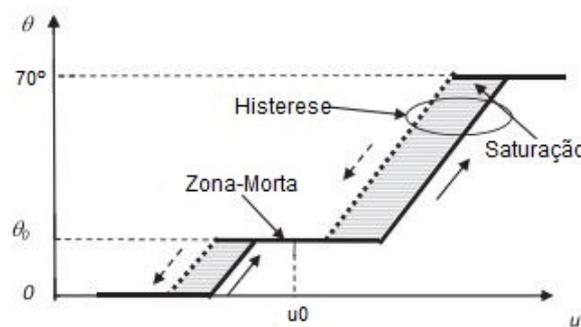
As matrizes de Estado e Saída estão descritas em 3.5 e 3.6.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{J} & -\frac{c}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{b}{J} \end{bmatrix} \tau(t) \quad (3.5)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

A válvula possui não-linearidades explicitadas por Letellier, Chafouk e Hoblos (2016b), principalmente devido à zona-morta de movimento inicial, à saturação física da posição de abertura (de 0 a 70°) e à histerese causada pelo atraso da leitura da posição em relação à posição real da válvula. A Figura 9 ilustra as não-linearidades.

Figura 9 – Não-linearidades do Sistema



Adaptado de: Letellier, Chafouk e Hoblos (2016b)

A zona-morta foi retirada da equação do modelo com um *bias* aplicado no sinal de entrada enviado ao motor no levantamento das curvas, o que tornou a curva da válvula com duas voltas de mola mais linear, visto que o *bias* compensou um pouco da não linearidade da mola. A histerese (ou retardo de transporte do sinal de entrada) foi de duas amostras de leitura (0.02s), porém não se julgou necessário tirá-la para a modelagem. Restou como componente não-linear somente a saturação física da posição, entre zero e setenta graus. Para representar a saturação foram utilizadas as Expressões 3.7 e 3.8.

$$N_1 = \max(\theta, \theta_{min}) \quad (3.7)$$

$$N_2 = \min(\theta, \theta_{max}) \quad (3.8)$$

As funções *max* e *min* retornam, respectivamente, o valor máximo e mínimo entre os dois parâmetros. Utilizando N_1 como parâmetro de N_2 para ficar com somente uma saída tem-se a Expressão 3.9

$$N = \min(\theta_{max}, \max(\theta_{min}, \theta)) \quad (3.9)$$

Onde θ_{max} é o ângulo máximo (70°) e θ_{min} o ângulo mínimo (0°). Aplicando os valores de saturação a Expressão resulta em 3.10.

$$N = \min(70, \max(0, \theta)) \quad (3.10)$$

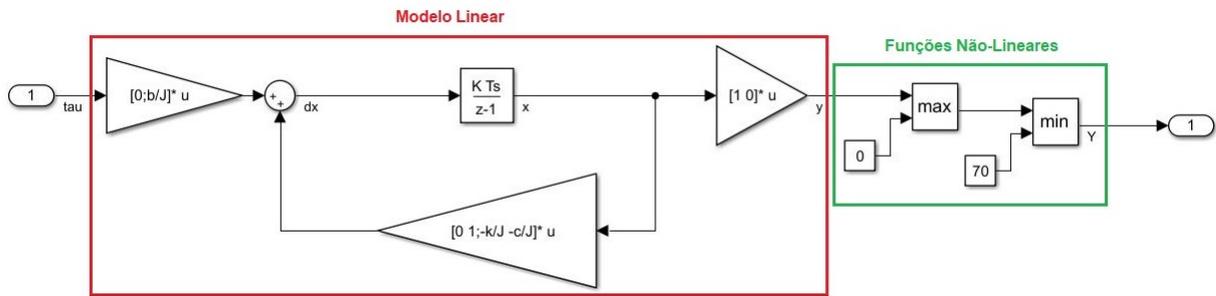
A parte não linear descrita em 3.10 foi adicionada à saída do sistema linear de 3.6 como a Expressão 3.11

$$Y = \min(70, \max(0, y)) \quad (3.11)$$

Portando a representação deste sistema se assemelha ao modelo de Hammerstein-Wiener, onde um sistema não-linear pode ser representado por um bloco linear acompanhado de um ou mais blocos de funções não-lineares (GUO, 2004).

O diagrama de blocos do sistema representado no MATLAB Simulink está demonstrado na figura 10.

Figura 10 – Diagrama de Blocos do Modelo



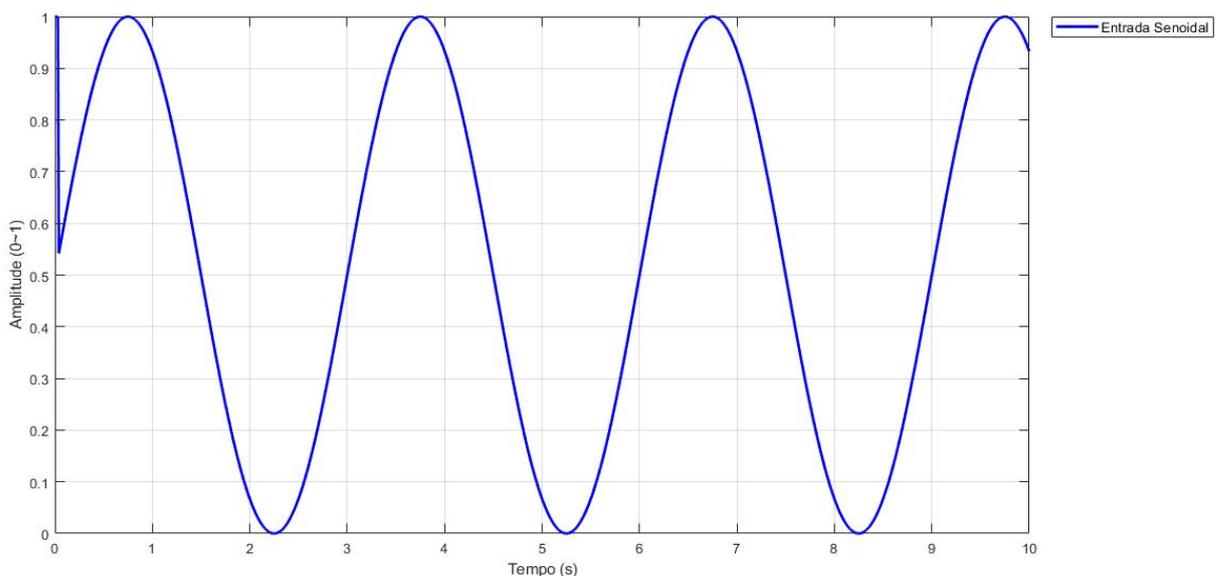
Fonte: Autor.

3.2.0.2 Estimação de Parâmetros do Modelo I

Foram feitos dois experimentos com entradas diferentes aplicadas ao sistema para a coleta das curvas de reação a serem utilizadas na estimação dos parâmetros: uma curva senoidal onde a resposta fosse de maior amplitude e se mantivesse na região mais linear da válvula (sem saturar os valores angulares); e um degrau de máxima amplitude (100% de PWM) aplicado durante os cinco primeiros segundos da simulação para se capturar a resposta mais rápida do sistema.

Na curva senoidal de entrada, mostrada na Figura 11, foi adicionada um impulso de maior amplitude para retirar a válvula da posição de repouso e logo depois a entrada oscilou entre 32.16% e 50.2% da largura de pulso do PWM com uma frequência de $2\pi/3$.

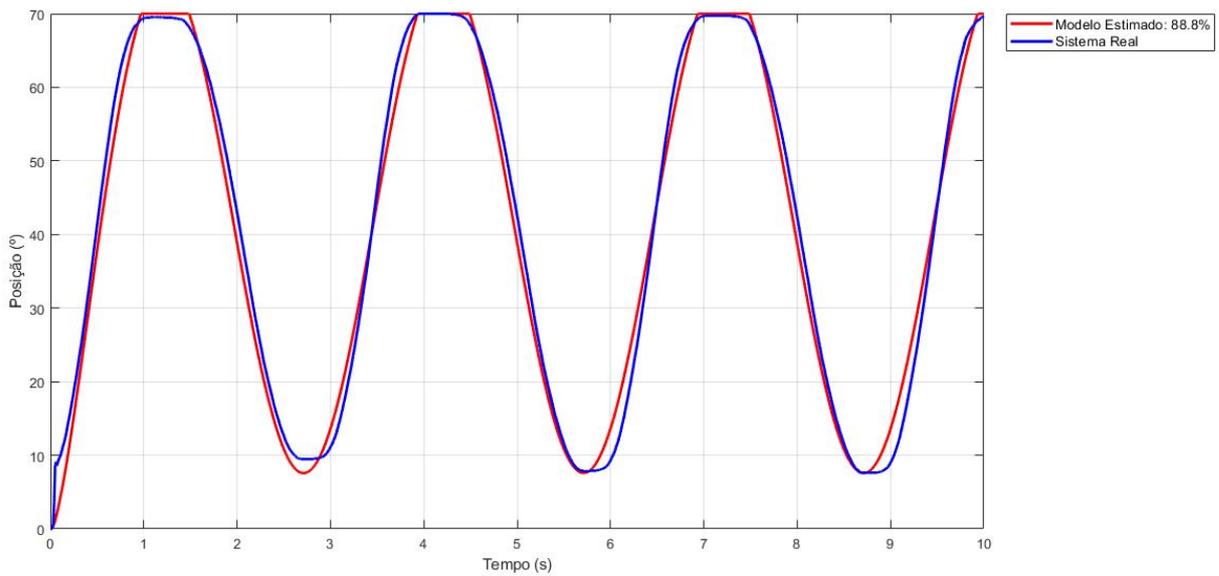
Figura 11 – Entrada senoidal



Fonte: Autor.

Utilizando o modelo apresentado no Subitem 3.2.0.1, o comando *lsqnonlin* do MATLAB (MATHWORKS, 2020) foi utilizado com o método de busca de mínimos quadrados de Levenberg-Marquardt para estimar os valores de c , k , b e J do modelo 3.5. A Figura 12 apresenta a comparação entre a posição real medida do sistema e o modelo estimado em resposta à entrada senoidal.

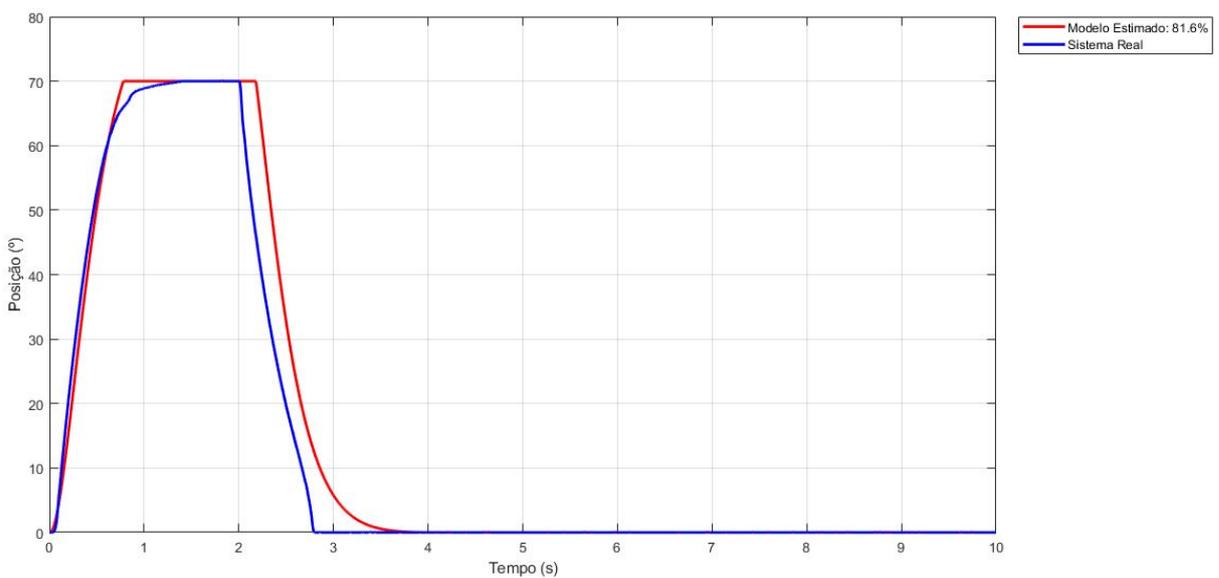
Figura 12 – Resposta à entrada senoidal



Fonte: Autor.

A Figura 13 apresenta a mesma comparação em resposta à entrada em degrau.

Figura 13 – Resposta à entrada em degrau



Fonte: Autor.

Os parâmetros encontrados foram:

$$c = 730.51;$$

$$k = 1516.3;$$

$$b = 1257.5 \text{ e}$$

$$J = 100.3,$$

sendo c , k e b constantes adimensionais e J o momento de inércia medido no S.I. por $kg*m^2$. Porém, como este sistema não foi modelado no S.I., tendo como entrada a porcentagem de largura de pulso do PWM e a saída como posição angular em graus, atribuir uma unidade a J seria impreciso.

Testando o modelo em paralelo com o sistema real percebeu-se, visualmente, o quão difícil se dá esta modelagem pois, apesar de na fase linear (posições intermediárias) o modelo responder bem, nos extremos da válvula (aberta e fechada) o modelo não representou o sistema real, e a histerese da curva de descida em relação à curva de subida também ficou evidente.

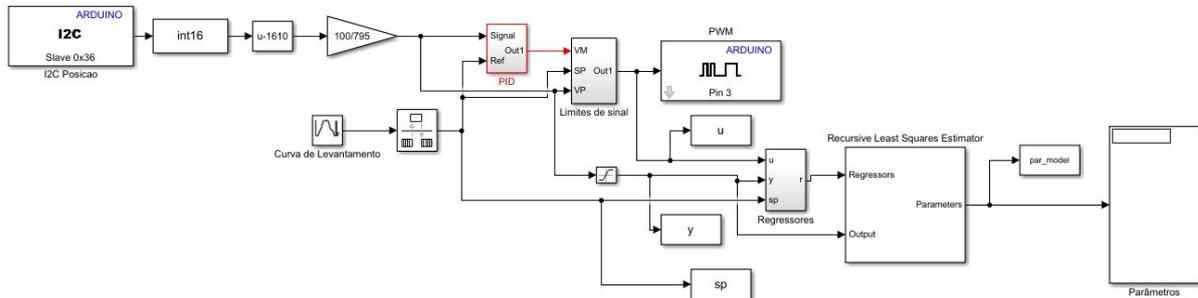
3.2.0.3 Modelo II

Na busca por melhores representações, decidiu-se utilizar um Estimador de Mínimos Quadrados Recursivos (RLS) para estimar parâmetros de um modelo Caixa-Preta (*Black-Box*) com regressores baseados em entradas e saídas atuais e anteriores do sistema (MATHWORKS, 2020). O modelo escolhido, representado na Expressão 3.12, levou em consideração variações de instantes anteriores da entrada u (PWM da tensão enviada à válvula) e da saída θ (Porcentagem da abertura da válvula) e do *setpoint* de posição SP , sendo n o instante atual.

$$\begin{aligned} \theta_n = a_1 u_{(n-1)} + a_2 (u_{(n-1)})^2 + a_3 u_{(n-2)} + a_4 \dot{u}_{(n-2)} + a_5 \theta_{(n-1)} + a_6 \theta_{(n-2)} + a_7 \dot{\theta}_{(n-1)} + \\ a_8 SP + a_9 (SP - \theta_{(n-1)}) \end{aligned} \quad (3.12)$$

A Figura 14 mostra o diagrama de blocos utilizado para a estimação dos regressores do Modelo II. O diagrama do subsistema Regressores se encontra na Figura 17.

Figura 14 – Diagrama de blocos para levantamento do Modelo II



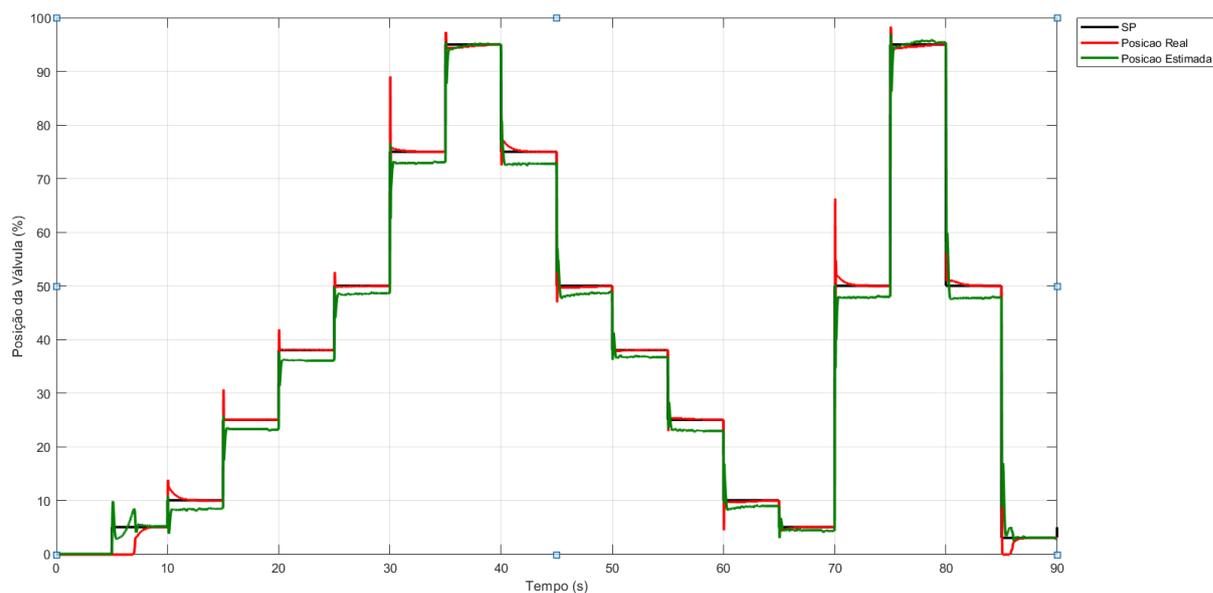
Fonte: Autor.

Os parâmetros obtidos pelo Estimador foram:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= 827.5165 \times 10^{-6}; \\
 a_2 &= 29.7891 \times 10^{-6}; \\
 a_3 &= -3.6983 \times 10^{-3}; \\
 a_4 &= 729.2041 \times 10^{-6}; \\
 a_5 &= 2.0966; \\
 a_6 &= -1.5929; \\
 a_7 &= -7.8728 \times 10^{-3}; \\
 a_8 &= 495.9266 \times 10^{-3}; \\
 a_9 &= -477.0257 \times 10^{-3}.
 \end{aligned}$$

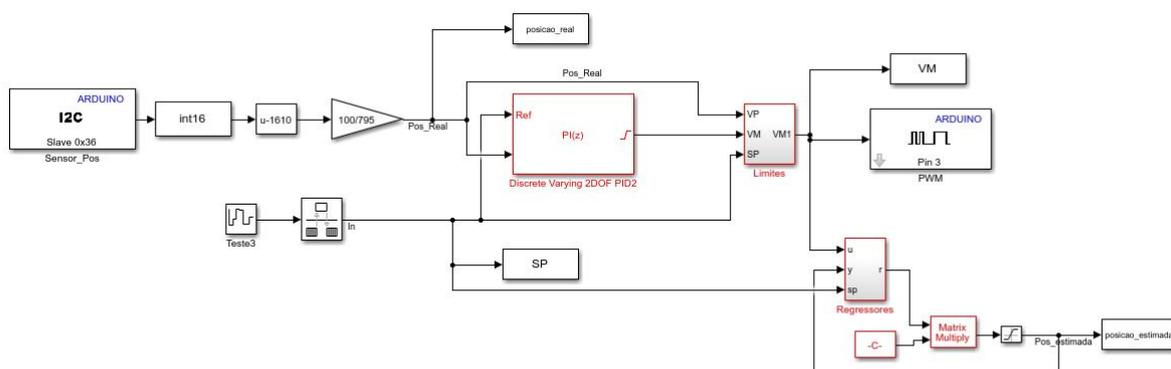
A Figura 15 mostra a comparação das respostas do sistema real (em vermelho) com o modelo regressivo (em verde). Ambas curvas mostram a reação dos sistemas à ação de um controlador PI, cuja referência (*setpoint*) é uma curva em forma de degrau variável (o diagrama de blocos desta simulação em paralelo pode ser visto na Figura 16). Na Figura 17 pode-se verificar os regressores do modelo.

Figura 15 – Simulação com modelo em paralelo com o sistema



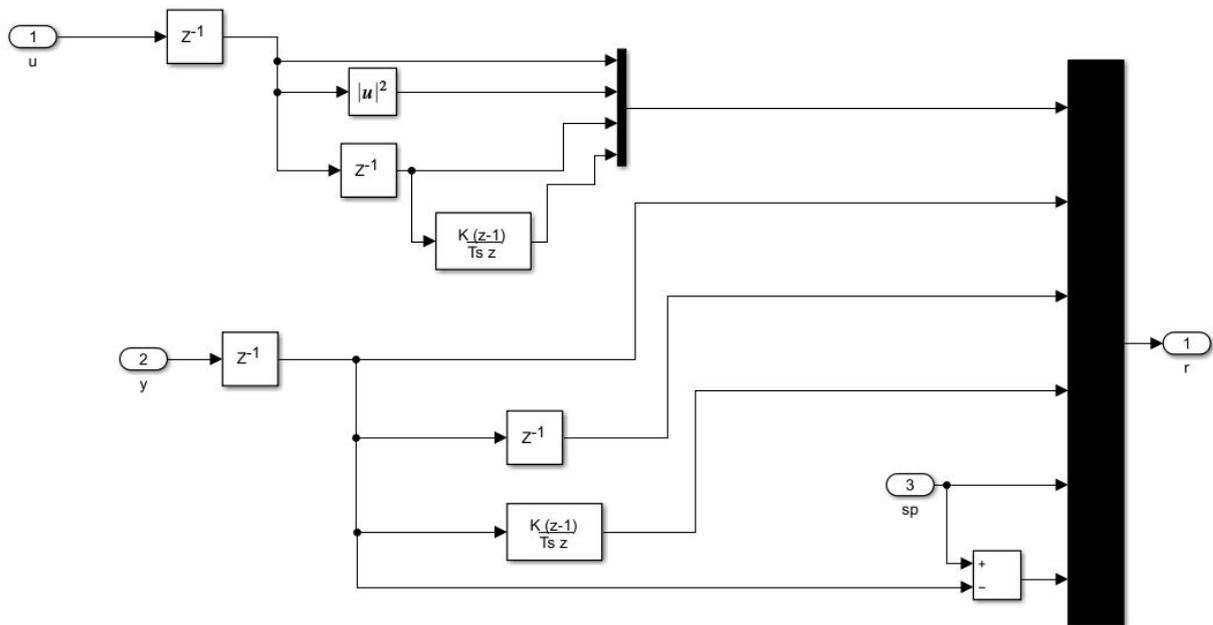
Fonte: Autor.

Figura 16 – Diagrama de blocos da simulação em paralelo.



Fonte: Autor.

Figura 17 – Diagrama de blocos dos regressores do modelo.



Fonte: Autor.

Nota-se que o erro de regime permanente do modelo em relação ao sistema real é menor que 5%, portanto o modelo responde satisfatoriamente a uma mesma entrada.

3.3 Controle e Prototipagem

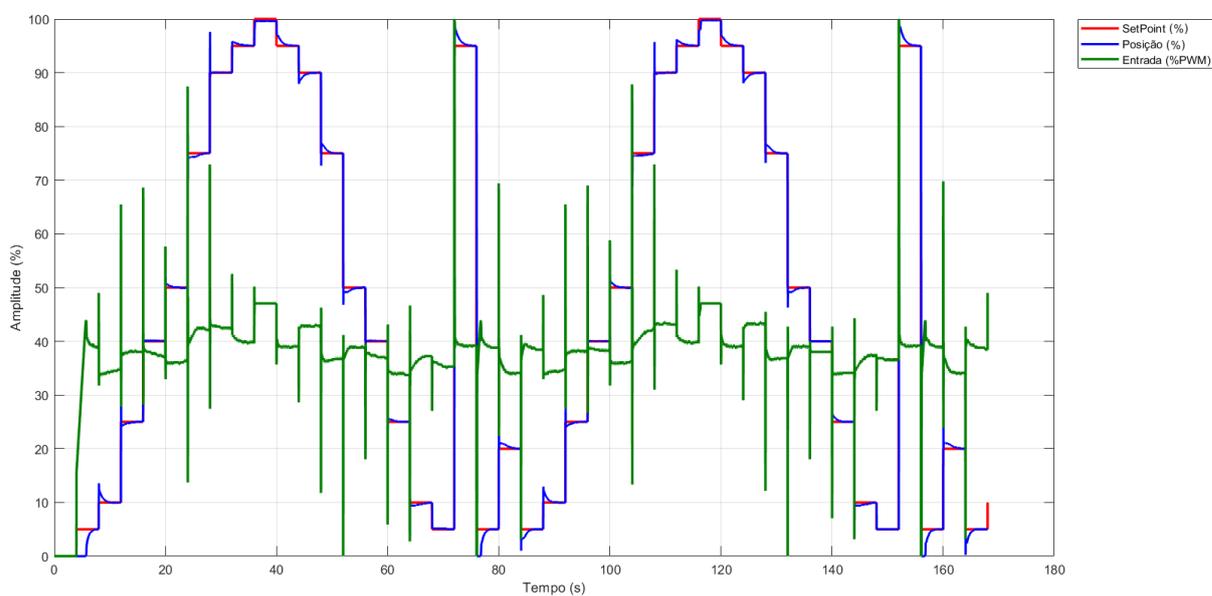
Nesta seção estão apresentados os processos de design de um controlador para a posição da válvula com base no segundo modelo extraído do sistema, como demonstrado na seção anterior. Também está demonstrado como foi pensado o algoritmo de controle no microcontrolador e a prototipagem da placa eletrônica interfaceando este microcontrolador e seus periféricos.

3.3.1 Controle

O objetivo inicial de se obter um modelo o mais fiel possível do sistema era de desenvolver um controle tolerante a falhas do sensor de posição, porém ao substituir o sinal do sensor pela posição estimada do modelo pôde-se observar que a forte não-linearidade da resposta do sistema em relação ao sinal de controle (também não-linear devido à característica de sinal pulsante do PWM), como se pode ver na Figura 18, não permitiriam um bom controle baseado somente no modelo. A Figura 18 demonstra, num mesmo gráfico, o sinal de referência de controle (*setpoint*) e a posição real da válvula, ambos em porcentagem de abertura, e o sinal de controle em porcentagem de largura de pulso (PWM). Nota-se que o sinal de controle emite pulsos de alta amplitude e frequência,

levando quase instantaneamente a válvula à posição de referência.

Figura 18 – *SetPoint*, Resposta do sistema e Sinal de Controle



Fonte: Autor.

Optou-se, então, por utilizar um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para o controle de posição de abertura da válvula baseado no sensor de posição acoplado ao eixo desta. Foi decidido retirar a ação derivativa (D) do controlador, pois esta poderia trazer problemas na mudança abrupta de *setpoint* entre outras possíveis questões envolvendo variações rápidas do sinal da variável de processo (LI; ANG; CHONG, 2006). Além disto, o controlador PI (Proporcional-Integral), por si só, demonstrou um desempenho satisfatório.

Utilizando o modelo do Subitem 3.2.0.3 foi possível obter uma sintonia ótima do controlador por meio do mesmo algoritmo de otimização utilizado em 3.2.0.2. Observou-se ainda um melhor desempenho utilizando um Controlador PI com dois graus de liberdade, o que ajudou a reduzir o erro médio da resposta do sistema e tornou o controle mais robusto a distúrbios (VITECKOVA; VITECEK, 2019). A equação do controlador PI discreto com dois graus de liberdade na forma paralela utilizado se encontra na Expressão 3.13 (MATHWORKS, 2009).

$$P(b.r - y) + I.Ts \frac{1}{z - 1} (r - y) \quad (3.13)$$

Onde P é o ganho Proporcional, b é o peso do *setpoint*, r é a referência de controle, y é a resposta atual do sistema, I é o ganho Integrativo e Ts é o Tempo de amostragem do sistema (0.01s).

A otimização utilizando o modelo resultou em tais parâmetros:

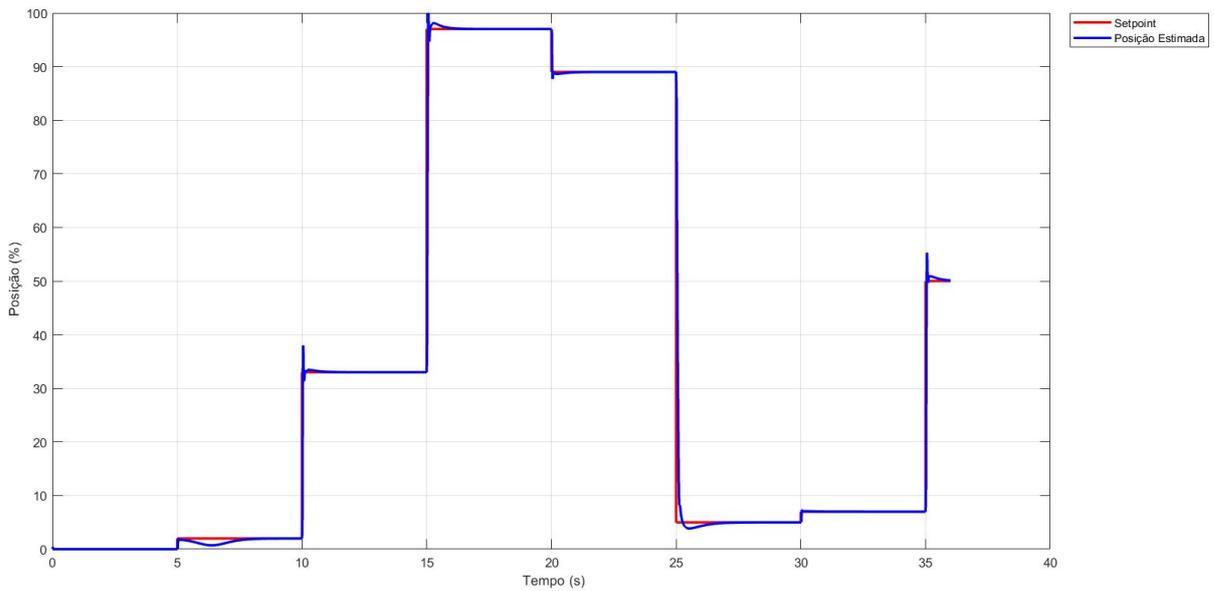
$$P = 5.3513;$$

$$I = 45.378$$

$$b = 1.0738$$

A Figura 19 mostra a resposta do modelo com o controlador otimizado. Percebe-se que o modelo apresentou um sobressinal máximo de aproximadamente 5% em relação ao curso total da válvula (no tempo de 10s no gráfico), e um tempo de acomodação de aproximadamente 2.2s, dentro do envelope de 2% (entre 5s e 7.2s no gráfico), demonstrando a ausência de erro em regime permanente após esse tempo.

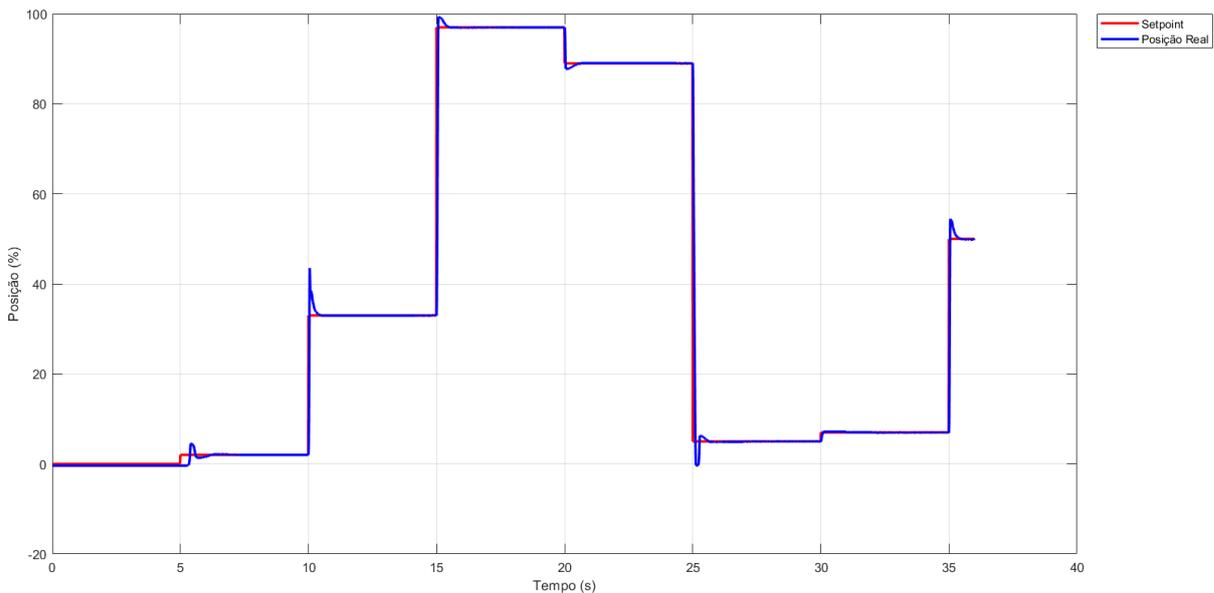
Figura 19 – Resposta do modelo ao controlador otimizado



Fonte: Autor.

A Figura 20 mostra a resposta do sistema real ao mesmo controlador otimizado. Nota-se que o sobressinal foi significativamente maior quando comparado ao modelo (10.7% no tempo de 10s no gráfico) e o tempo de acomodação máximo foi de 0.6s (entre 5s e 5.6s no gráfico), não demonstrando erro em regime permanente após esse tempo.

Figura 20 – Resposta do sistema real ao controlador otimizado



Fonte: Autor.

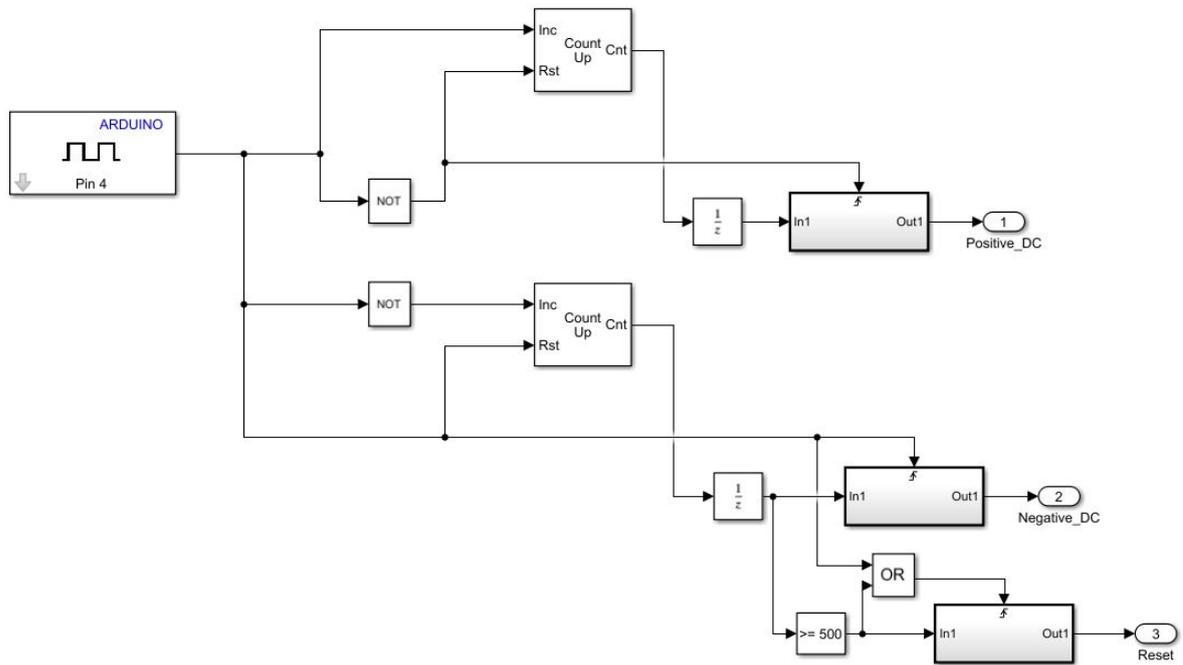
Conclui-se que o sistema real respondeu bem ao controle otimizado pelo modelo mesmo na região menos linear (menos de 10% de abertura da válvula) e que o modelo reage de modo similar ao sistema real onde há o maior sobressinal (região de 10s no gráfico) e o maior tempo de acomodação (região de 5s no gráfico). Na iminência de sair da inércia, tanto o modelo quanto o sistema real demoram mais a responder (tempo maior de acomodação entre 0 e 5% de abertura da válvula). Ao sair desta região de pequena abertura e saltar para uma região média de abertura (entre 30% e 40%), tanto o modelo quanto o sistema real apresentam seus maiores sobressinais.

3.3.2 Algoritmo do Microcontrolador e Calibração

O sinal de referência da posição da válvula é recebido na forma de um sinal PWM vindo do ECU (Módulo utilizado para controle de motores). Este sinal deve ser interpretado pelo sistema eletrônico da válvula para que possa ser usado de referência no controle de posição desta. Para isso, foi feito um interpretador do ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) do sinal PWM no próprio microcontrolador. Poderia ter sido utilizado um componente específico para isso na placa, mas adicionaria custo e fugiria da proposta de utilizar o máximo de componentes definidos por software.

A Figura 21 mostra o diagrama de blocos da lógica de contagem do *Duty Cycle* utilizando contadores básicos. A lógica consiste basicamente em contar o tempo que a entrada fica em nível lógico alto e o tempo que fica em nível lógico baixo, e correlacionar os dois com o período total do sinal. O desafio foi colocar o leitor de PWM para rodar a uma taxa de amostragem bem maior do que o programa principal, já que o sinal PWM de entrada poderia chegar a 1KHz (Um KiloHertz). Para isso colocou-se essa parte do programa rodando a 100KHz (Cem KiloHertz), obedecendo às regras de amostragem de Nyquist para fazer a leitura com resolução de 1% do PWM, enquanto o programa principal continuou com o tempo de amostragem de 0.05s ou 200Hz .

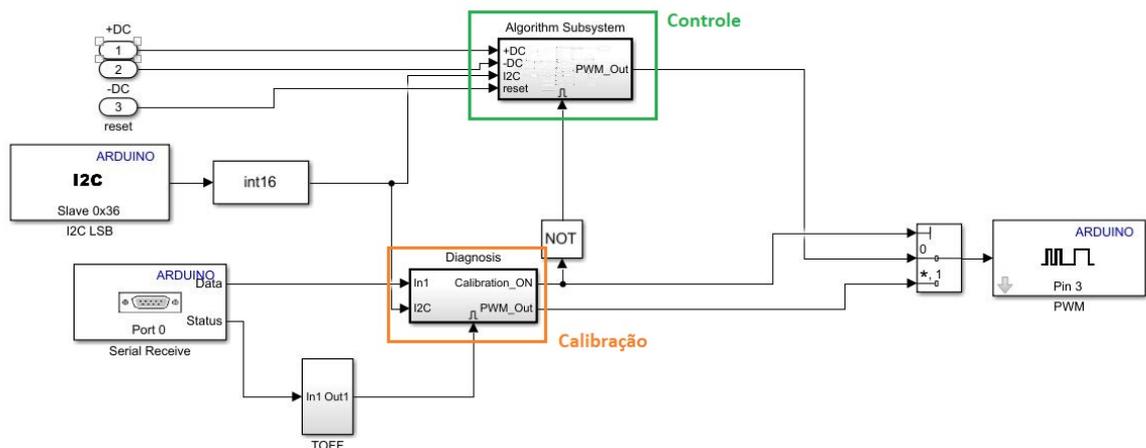
Figura 21 – Contador de *Duty Cycle* do sinal PWM



Fonte: Autor.

O restante do algoritmo principal consistiu em um módulo de controle e um módulo de calibração, como pode ser visto no diagrama de blocos da Figura 22. De início, o módulo de calibração serviu apenas para gravar os valores da posição inicial (θ_0) e final (θ_f) do sensor magnético.

Figura 22 – Diagrama de blocos do algoritmo principal

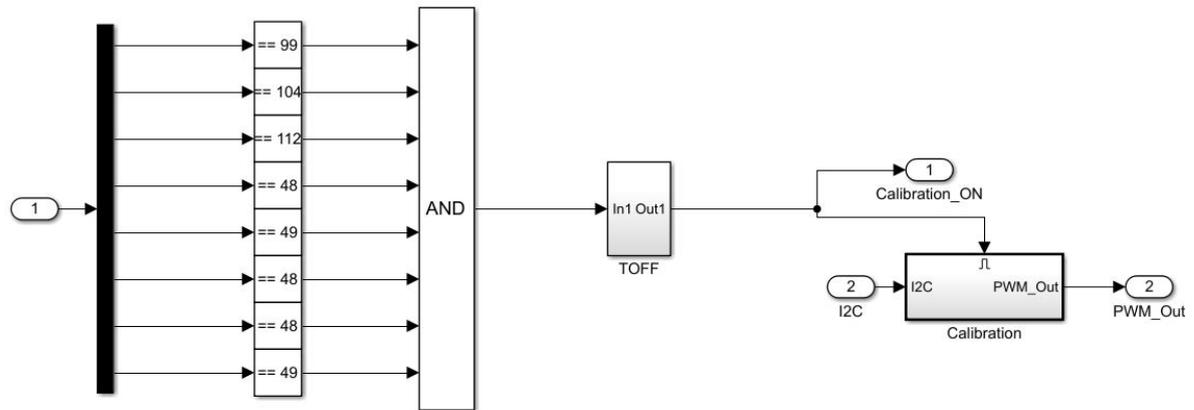


Fonte: Autor.

Para esta calibração de zero e *span*(amplitude) foi criado um código para quando o dispositivo recebesse um código específico de calibração pela porta Serial (No exemplo, um byte contendo os valores [99, 104, 112, 48, 49, 48, 48, 49]), a válvula autoexecutasse

a calibração de zero e *span*, gravando seu valor inicial e o final após abrir e fechar completamente. Esta lógica pode ser conferida no diagrama da Figura 23.

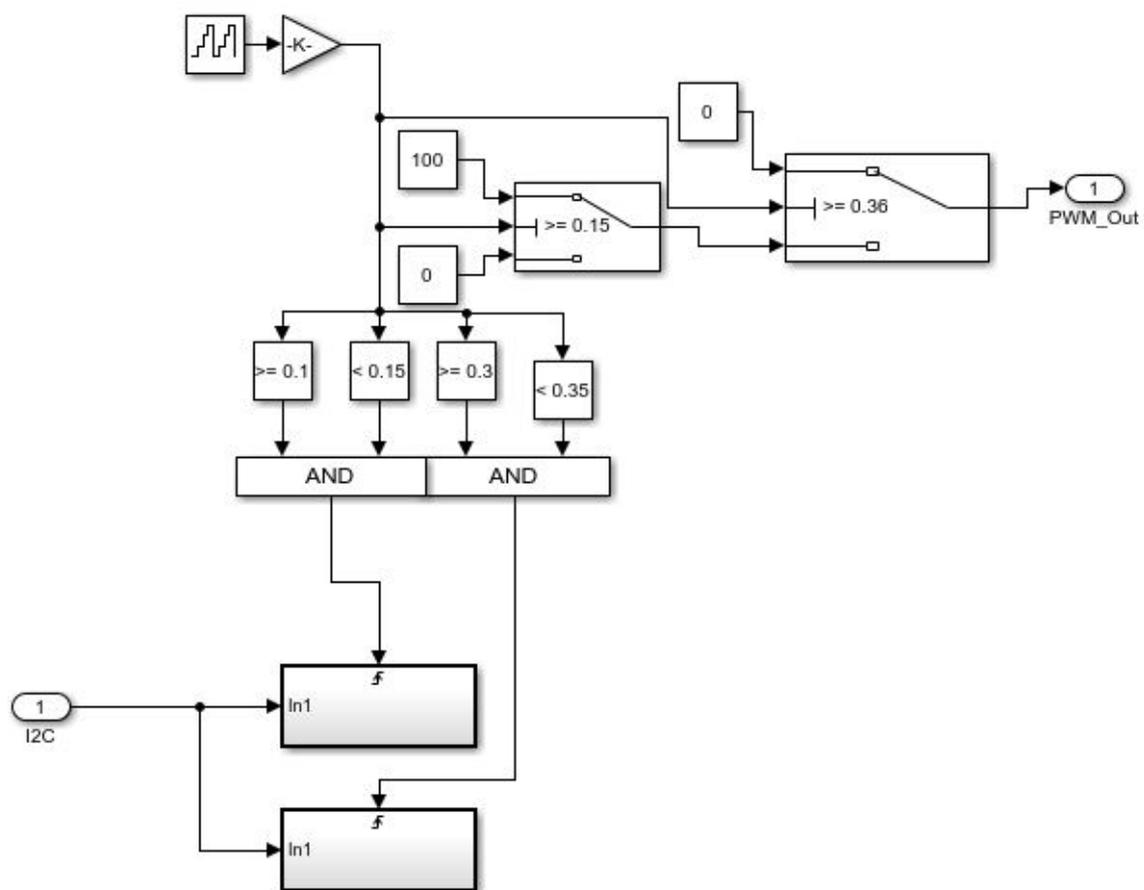
Figura 23 – Diagrama de blocos do algoritmo de calibração



Fonte: Autor.

Na Figura 24 tem-se o subsistema de calibração. Quando este subsistema é ativado, um contador gerencia a gravação das posições de 0% e 100% na memória do microcontrolador. Quando o tempo deste contador é maior ou igual a 0.1s e menor que 0.15s, o motor da válvula recebe 0% de sinal de controle e o algoritmo grava o valor mínimo (0%) de abertura da válvula na memória. Entre 0.15s e 0.36s o motor da válvula recebe 100% do sinal de controle e o algoritmo grava o valor máximo (100%) de abertura da válvula na memória.

Figura 24 – Subsistema do algoritmo de calibração

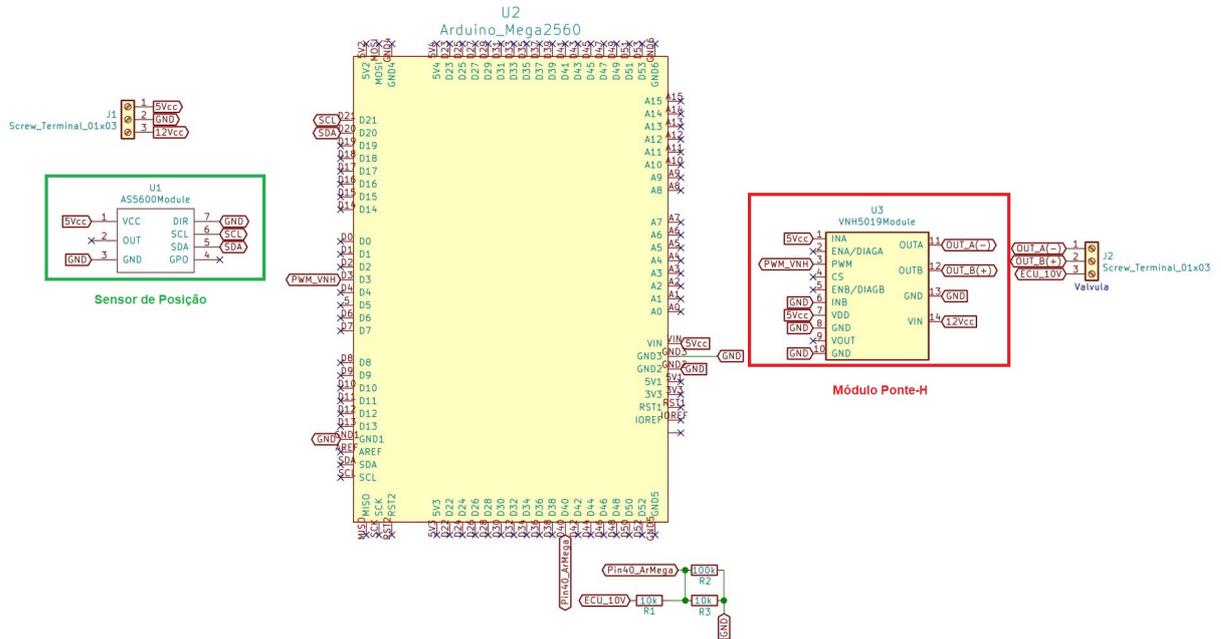


Fonte: Autor.

3.3.3 Prototipagem

O projeto do protótipo da placa eletrônica foi feito com os componentes testados nas etapas anteriores, com auxílio do software KiCad. O esquemático das conexões dos componentes está demonstrado na Figura 25.

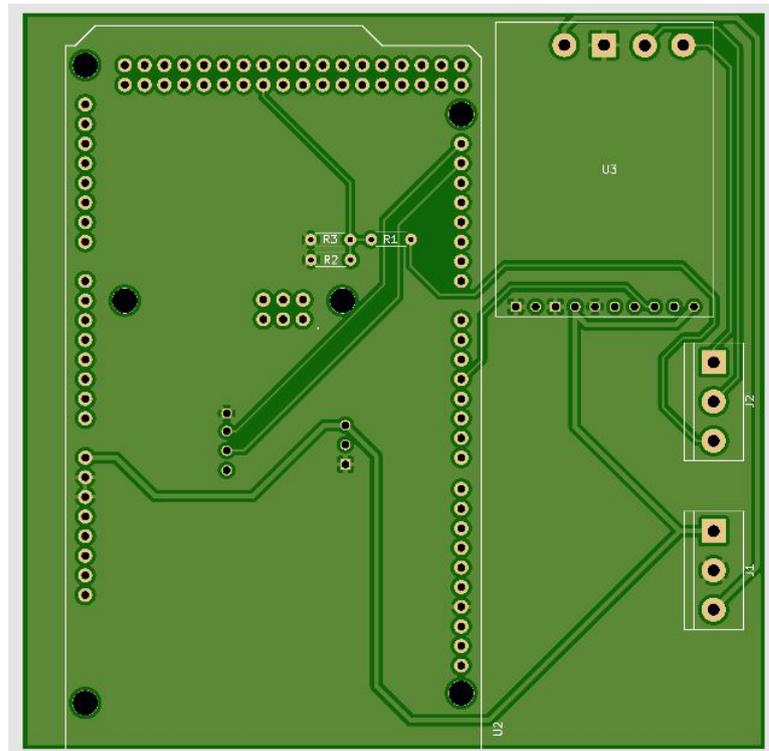
Figura 25 – Esquemático da Placa Eletrônica



Fonte: Autor.

As Figuras 26 e 27 ilustram, respectivamente, a parte frontal e o verso da placa eletrônica.

Figura 26 – Parte frontal da placa eletrônica



Fonte: Autor.

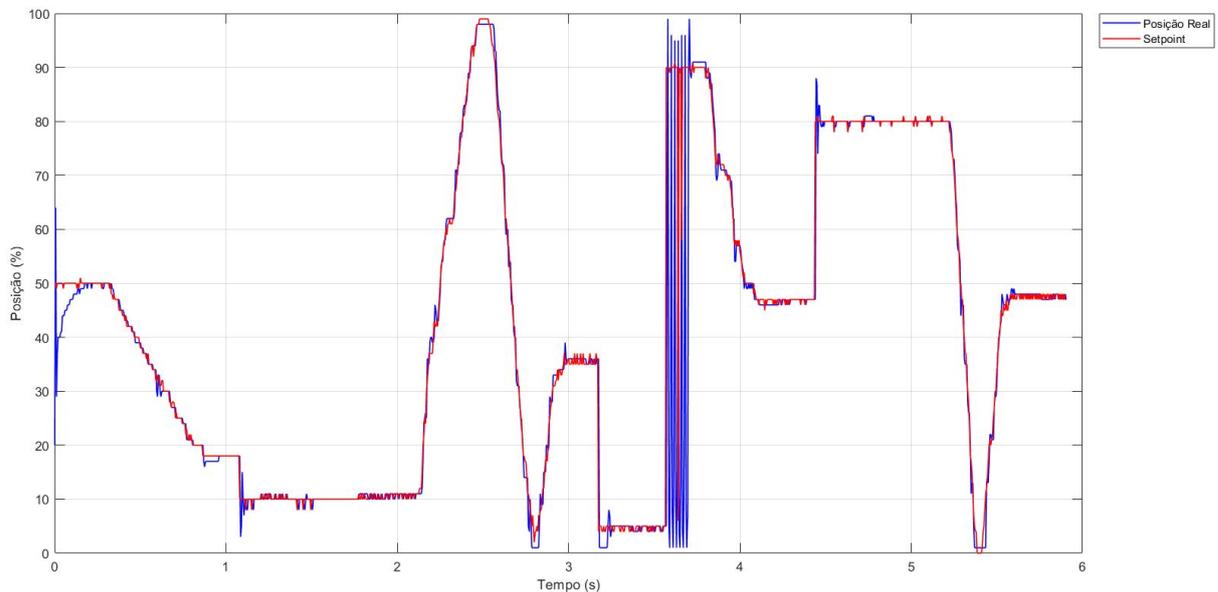
4 RESULTADO E CONCLUSÃO

Neste capítulo estão apresentados o resultado do controle da posição da válvula com o protótipo eletrônico projetado, bem como a conclusão deste trabalho mostrando os desafios cumpridos e os que ainda se mantiveram presentes, além de instruções para trabalhos subsequentes a este que venham, por ventura, a transformar este protótipo num produto de mercado.

4.1 Resultado

Ao final, foram realizados alguns testes para comprovar o desempenho da placa controladora. Na Figura 28 temos representado um destes testes, onde o sinal de referência da posição (*Setpoint*) foi configurado no ECU e enviado via sinal PWM para a interpretação do microcontrolador, e o sinal de posição real da válvula foi observado em reação ao controle da nova placa eletrônica.

Figura 28 – Comparação do *Setpoint* com a resposta do sistema real ao controlador



Fonte: Autor.

É notável através da região entre 3.5s e 4.5s da Figura 28 que o sistema deu indícios de instabilidade por causa da alta variação da leitura do PWM do *Setpoint*. Isso mostra que o microcontrolador utilizado já operava no seu limite de processamento quando utilizada uma frequência de sinal de PWM de referência maior ou igual a 300Hz, indicando *overrun* (sobrecarga) deste.

Detectou-se que o problema era limite de *hardware* pois quanto mais complexo fosse o software (algoritmo de calibração, controle, leitura de PWM) mais instável o controle se tornava.

Além disto, o algoritmo de leitura do PWM, por operar numa frequência muito superior ao restante dos algoritmos, causava mais instabilidade no controle quanto maior fosse a frequência do sinal PWM. Numa frequência baixa ($10Hz$) o controle parecia completamente funcional, porém quando se ia aumentando a frequência este começava a se tornar instável. Para frequências superiores a $300Hz$ o sistema já se tornava incontrolável. Como a frequência que o *hardware* original suportava era de $300Hz$ a $1kHz$, a utilização deste protótipo em substituição à placa eletrônica original não seria possível.

4.2 Conclusão

Conclui-se que, para substituição de placa eletrônica original de controle de uma válvula *Throttle*, este protótipo não é válido, sobretudo para leitura de sinais de referência em PWM de altas frequências, sendo limitado pelo *hardware* no qual foram implementados os algoritmos de controle.

O *hardware* utilizado somente poderia ser validado para tal objetivo, se fosse utilizado um outro *hardware* específico para a leitura de sinal PWM da referência do controle. Porém, para utilizar a estratégia de utilizar o menor número de componentes físicos possíveis, focando no *software* embarcado, a melhor solução para este caso seria a substituição do microcontrolador por um mais potente, incluindo a possibilidade de um microcontrolador multi-núcleo para separar *threads* de leitura e controle.

A recomendação para continuação deste trabalho é utilizar um microcontrolador como o ESP32 da fabricante Espressif programando-o em C/C++ para um melhor desempenho embarcado. Este microcontrolador possui frequência de processamento de até $240MHz$ além de possuir dois núcleos de processamento (ESPRESSIF, 2021). Deste modo, seria possível utilizar um núcleo para a leitura de PWM e o outro núcleo ficaria responsável pelo restante do processamento.

Todos os testes foram realizados em laboratório e portanto não refletem as condições reais de trabalho da válvula no campo. Devido a restrições causadas pela pandemia de COVID-19 não se pôde testar o protótipo em ambiente de trabalho junto à empresa parceira, ficando como pendência futura da continuidade deste trabalho.

Contudo, este trabalho dá um passo importante ao fomentar a criação de novas tecnologias nacionais, incentivando a indústria brasileira a inventar novos equipamentos e nacionalizar a infraestrutura das operações de engenharia no território nacional, com fim de tornar nosso mercado mais atraente e competitivo, aumentando a riqueza produzida no

país e ajudando a manter o capital financeiro e laboral no mercado interno.

4.3 Trabalhos Futuros

Com base na conclusão previamente discutida, algumas sugestões de continuação deste trabalho emergem:

1. Utilizar *hardware* acessório para leitura de PWM e conversão do valor de referência a uma taxa de transmissão menor ou igual à taxa de atualização do algoritmo principal do microcontrolador;
2. Traduzir algoritmo em diagrama de blocos do Simulink para linguagem mais comum para programação *bare-metal* como C/C++ ou MicroPython, inclusive com a ferramenta Matlab Code do Matlab;
3. Utilização de outro microcontrolador com mais de um núcleo de processamento para separação de *threads* de leitura de sinal em alta frequência e controle;
4. Utilização de microcontrolador com seção dedicada a leitura e interpretação de sinais em PWM;
5. Utilização de microcontrolador com frequência de processamento alta o suficiente para realizar a execução de todo o algoritmo sem provocar *overrun*;
6. Utilização da potência consumida pelo motor da válvula (tensão e corrente elétrica) para obter um modelo matemático mais preciso.

REFERÊNCIAS

- AL-SAMARRAIE, S. A.; BADRI, A. S.; MISHARY, M. H. Integral Sliding Mode Control Design for Electronic Throttle Valve System. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, v. 11, n. 3, p. 72–84, set. 2015. ISSN 1818-1171. Publisher: Al-Khwarizmi College of Engineering – University of Baghdad. Disponível em: <<https://doaj.org>>. Citado na página 16.
- AMS. *AS5600*. 2020. Disponível em: <<https://ams.com/as5600>>. Citado na página 22.
- ARDUINO. *Arduino - AboutUs*. 2020. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>>. Citado na página 21.
- ATMEL. *ATmega328P Datasheet*. 2021. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf>. Citado na página 40.
- BISCHOFF, B. et al. Learning Throttle Valve Control Using Policy Search. In: HUTCHISON, D. et al. (Ed.). *Advanced Information Systems Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. v. 7908, p. 49–64. ISBN 978-3-642-38708-1 978-3-642-38709-8. Título da Série: Lecture Notes in Computer Science. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-40988-2_4>. Citado na página 13.
- BRUNETTI, F. *Motores de Combustão Interna*. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2012. v. 1. ISBN 978-85-212-0708-5. Citado na página 12.
- EPE. *Balanco Energético Nacional 2019*. Brasil, 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>. Citado na página 12.
- ESPRESSIF. *ESP32 Series Datasheet*. 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.
- FORRESTER, R. The Invention of the Internal Combustion Engine and the Motor Car. fev. 2020. Disponível em: <<https://hcommons.org/deposits/item/hc:28591/>>. Citado na página 12.
- Fredrik Strååt e Sebastian Zamani. *ATUADOR DE VÁLVULA BORBOLETA DE RETORNO DE MOLA, MÉTODO DE CONTROLE DO MESMO E CONJUNTO DE VÁLVULA BORBOLETA*. 2016. BR 11 2018 013035 4 A2. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=1480091&SearchParameter=V%C1LVULA%20BORBOLETA%20CONTROLE%20%20%20%20%20%20&Resumo=&Titulo=>>>. Citado na página 16.
- GRITLI, W.; GHARSALLAOUI, H.; BENREJEB, M. Fault Tolerant Control Based on PID-type Fuzzy Logic Controller for Switched Discrete-time Systems: An Electronic Throttle Valve Application. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, v. 2, n. 6, p. 186–193, dez. 2017. ISSN 24156698. Disponível em: <<https://astesj.com/v02/i06/p23/>>. Citado na página 15.

GRITLI, W. et al. Electronic Throttle Valve Takagi-Sugeno Fuzzy Control Based on Nonlinear Unknown Input Observers. *International Journal of Computers, Communications & Control*, v. 13, n. 5, p. 808–823, out. 2018. ISSN 18419836. Publisher: Fundatia Agora. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=iih&AN=132139383&site=ehost-live>>. Citado na página 15.

GUO, F. A new identification method for Wiener and Hammerstein systems. *Forschungszentrum Karlsruhe*, 2004. Disponível em: <<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/fzk/6955/6955.pdf>>. Citado na página 25.

K Vythilingam, V Ramanathan, L T Parimi e P Raghavendra. *Electronic throttle control system for vehicle, has electronic control unit that controls motor driving signal towards throttle motor to actuate throttle valve and control power supply to it based on predetermined conditions*. 2020. IN202041016392-A. Disponível em: <http://apps-webofknowledge.ez135.periodicos.capes.gov.br/full_record.do?product=DIIDW&search_mode=GeneralSearch&qid=3&SID=7AiPgacdYSK3tANLpJh&page=2&doc=19>. Citado na página 17.

Kazunori Kawamura, Futoshi Nishioka e Osamu Kitamura. *SISTEMA E MÉTODO DE CONTROLE DE VÁLVULA BORBOLETA PARA MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA*. 2008. PI 0804622-0 B1. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController?Action=detail&CodPedido=784013&SearchParameter=V%C1LVULA%20BORBOLETA%20CONTROLE%20%20%20%20%20%20%20&Resumo=&Titulo=>>>. Citado na página 16.

LETELLIER, C.; CHAFOUK, H.; HOBLOS, G. Reconstruction-based interval observer dedicated to fault detection: Application to a throttle valve. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, v. 30, n. 2, p. 317–335, fev. 2016. ISSN 0890-6327. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez135.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/acs.2591>>. Citado na página 16.

LETELLIER, C.; CHAFOUK, H.; HOBLOS, G. Reconstruction-based interval observer dedicated to fault detection: Application to a throttle valve. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, v. 30, n. 2, p. 317–335, fev. 2016. ISSN 1099-1115. Publisher: John Wiley & Sons, Ltd. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez135.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1002/acs.2591>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

LI, Y.; ANG, K.; CHONG, C. PID control system analysis and design - Problems, remedies, and future directions. *IEEE control systems*, v. 26, 2006. Citado na página 33.

LI, Y. et al. Extended state observer-based intelligent double integral sliding mode control of electronic throttle valve. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 9, n. 12, p. 1687814017737981, dez. 2017. ISSN 1687-8140. Publisher: SAGE Publications. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1687814017737981>>. Citado na página 15.

MACHADO, G. B.; MELO, T. C. C. d.; LASTRES, L. F. M. *Utilização de Gás Natural em Motores e Cenário do Uso no Brasil*. CENPES: [s.n.], 2007. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/premiotecnologia/pdf/TecnologiaGas_GasNatural_Motores.pdf>. Citado na página 12.

- MATHWORKS. *Simulate continuous- or discrete-time two-degree-of-freedom PID controllers - Simulink*. 2009. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/releases/R2017b/simulink/slref/pidcontroller2dof.html>>. Citado na página 33.
- MATHWORKS. *lsqnonlin with a Simulink Model - MATLAB & Simulink*. 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/lsgnonlin-with-a-simulink-model.html>>. Citado na página 27.
- MATHWORKS. *Online Recursive Least Squares Estimation - MATLAB & Simulink*. 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/ident/ug/online-recursive-least-squares-estimation.html>>. Citado na página 28.
- MATHWORKS. *Simulink Support Package for Arduino Hardware*. 2020. Library Catalog: www.mathworks.com. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40312-simulink-support-package-for-arduino-hardware>>. Citado na página 21.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5. ed. São Paulo (SP): Pearson Prentice Hall, 2011. OCLC: 817229549. ISBN 978-85-7605-810-6. Citado na página 24.
- PAN, Y.; OZGUNER, U.; DAGCI, O. H. Variable-Structure Control of Electronic Throttle Valve. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 55, n. 11, p. 3899–3907, nov. 2008. ISSN 1557-9948. Conference Name: IEEE Transactions on Industrial Electronics. Citado na página 16.
- SCHWARTZ, G. L. *Dissertacao-Valvula*. 2021. Disponível em: <<https://gitlab.com/gustavolschwartz/dissertacao-valvula>>. Citado na página 18.
- SINGH, R. Data based modeling of nonlinear dynamic systems using System Identification Toolbox. *MATLAB Central File Exchange*, 2020. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28618-data-based-modeling-of-nonlinear-dynamic-systems-using-system-identification-toolbox>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 23.
- SJÖBERG, J. et al. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview. *Automatica*, v. 31, n. 12, p. 1691–1724, dez. 1995. ISSN 0005-1098. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0005109895001208>>. Citado na página 23.
- STMicroelectronics. *VNH5019A-E*. 2020. Disponível em: <<https://www.st.com/en/automotive-analog-and-power/vnh5019a-e.html>>. Citado na página 21.
- Takuya Ino e Ryuichi Oguro. *Throttle control device for use in intake system of vehicle engine, comprises throttle opening sensor provided to detect opening of throttle valve as throttle opening signal with electronic control unit to calculate throttle opening command*. 2020. Disponível em: <http://apps-webofknowledge.ez135.periodicos.capes.gov.br/full_record.do?product=DIIDW&search_mode=GeneralSearch&qid=3&SID=7AiPgacdYSK3tANLpJh&page=1&doc=3>. Citado na página 17.
- Tanigawa Shota e Takagi Shingo. *Electronic control throttle apparatus for diesel engine, in which cam-shaped stopper of micro air quantity adjusting device serves as reverse stopper for stopping throttle lever in position slightly opening throttle valve*. 2019. JP2020106009-A. Citado na página 17.

VARGAS, A. N. et al. Unscented Kalman Filters for Estimating the Position of an Automotive Electronic Throttle Valve. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 6, p. 4627–4632, jun. 2016. ISSN 1939-9359. Conference Name: IEEE Transactions on Vehicular Technology. Citado na página 16.

VITECKOVA, M.; VITECEK, A. Standard, Parallel and Series Two Degree of Freedom PID Controllers. In: *2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4. Citado na página 33.

Woodward. *F-SERIES ITB 8235-628*. 2020. Library Catalog: www.woodward.com. Disponível em: <<https://www.woodward.com/en/shop/woodward44-industrial-electric/8235-628>>. Citado na página 18.

YUAN, X. et al. Genetic algorithm-based adaptive fuzzy sliding mode controller for electronic throttle valve. *Neural Computing & Applications*, v. 23, p. 209–217, dez. 2013. ISSN 09410643. Publisher: Springer Nature. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=aph&AN=92624709&site=ehost-live>>. Citado na página 15.