

RAFAEL AUGUSTO MIRAGAIA MENDES MAHLER

Controlador Digital para Válvula Borboleta

Rafael Augusto Miragaia Mendes Mahler

Controlador Digital para Válvula Borboleta

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

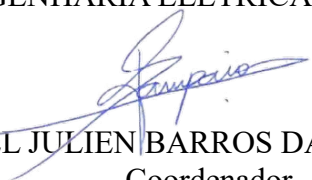
Orientador (a): Samuel Euzédice de Lucena

M214c	<p>Mahler, Rafael Augusto Miragaia Mendes</p> <p>Controlador digital para válvula borboleta / Rafael Augusto Miragaia Mendes Mahler – Guaratinguetá, 2022.</p> <p>41 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 35-37</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzédice de Lucena</p> <p>1. Sistemas inteligentes de controle. 2. Microprocessadores. 3. Controladores programáveis. I. Título.</p> <p>CDU 621.381</p>
-------	--

RAFAEL AUGUSTO MIRAGAIA MENDES MAHLER

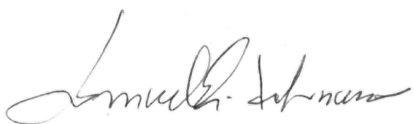
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Prof. Dr. DANIEL JULIÊN BARROS DA SILVA SAMPAIO
Coordenador

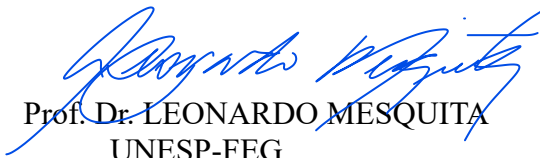
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. DANIEL JULIÊN BARROS DA SILVA SAMPAIO
UNESP-FEG



Prof. Dr. LEONARDO MESQUITA
UNESP-FEG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida e oportunidades que me foram concedidas;

Agradeço aos meus pais, *William Camilo Mahler* e *Malú Regina Miragaia Mendes Mahler*, que não pouparam esforços em me oferecer o melhor que podiam;

Agradeço ao meu irmão, *Pedro Henrique Miragaia Mendes Mahler*, por toda ajuda que me prestou em todos meus momentos de dificuldades;

Agradeço ao meu orientador, *Professor Dr. Samuel Euzédice de Lucena*, por seu incentivo e orientações na minha trajetória acadêmica;

Agradeço ao *Professor Dr. Daniel Julien Barros da Silva Sampaio*, pelo intercâmbio acadêmico na Alemanha, experiência que foi uma das mais marcantes dos meus anos acadêmicos;

Agradeço de modo especial aos amigos e colegas que dividiram comigo as salas de aula, me ajudando e compartilhando conhecimentos;

Agradeço aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, pela dedicação em promover o conhecimento.

RESUMO

Muitos são os avanços que têm possibilitado a melhoria de diversas tecnologias utilizadas nas indústrias de maneira geral. Na indústria automotiva, um desses avanços foi o surgimento do corpo de borboleta em detrimento do antigo carburador. Um componente responsável pela admissão de ar, o corpo de borboleta é uma válvula eletrônica que, quando comandada corretamente (comando esse feito através do pedal do acelerador), controla a entrada de ar na câmara de combustão do veículo, controlando então a velocidade do motor e, conseqüentemente, a velocidade do veículo. O trabalho trata de desenvolver um controlador digital do tipo PID com um microcontrolador de 8 bits (PIC18F4550) com o objetivo principal de trazer estabilidade à válvula e fazê-la seguir o comando de um potenciômetro. Feito em linguagem C, o algoritmo incorpora técnicas e métodos do controle discreto validando, dessa forma, a teoria envolvida em seu funcionamento.

PALAVRAS-CHAVE: Corpo de borboleta. Controlador digital. PID.

ABSTRACT

Many are the advances that have allowed the improvement of many technologies used in industries in general. In automotive industry, one of these advances was the emergence of throttle valve to the detriment of carburator. A component responsible for air intake, the throttle valve is an electronic valve that when operated correctly (command done by means of accelerator pedal) controls the air intake in the vehicle's combustion chamber, then controlling the engine's velocity and, consequently, the vehicle's velocity. The work is about developing a digital PID controller with a 8 bit microcontroller (PIC18F4550) with the main goal of bring stability to the valve and make it follow the command of a potentiometer. Done in C language, the algorithm incorporates techniques and methods of discrete control validating, in this way, the theory involved in its operation.

KEYWORDS: Throttle valve. Digital controller. PID.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Carburador	11
Figura 2 – Corpo de borboleta	12
Figura 3 – Gerenciamento eletrônico da válvula	13
Figura 4 – Sensor TPS	14
Figura 5 – Sensor TPS x Ângulo de rotação	14
Figura 6 – Diagrama de blocos de um controlador PID	16
Figura 7 – Curva de resposta do Método de Ziegler-Nichols	18
Figura 8 – Diagrama de blocos do controlador do corpo de borboleta	19
Figura 9 – Sistema completo com circuito de controle, potência e válvula	20
Figura 10 – Circuito no Proteus	21
Figura 11 – Microcontrolador	21
Figura 12 – Circuito AN0	22
Figura 13 – Circuito da válvula borboleta	22
Figura 14 – Circuito AN1	23
Figura 15 – Resposta da válvula em malha aberta	24
Figura 16 – Inicializações do A/D e PWM	25
Figura 17 – Função do Conversor A/D	26
Figura 18 – Definição dos parâmetros	26
Figura 19 – Definição das constantes e cálculo do erro	27
Figura 20 – Configuração do gerador de sinais	28
Figura 21 – Resposta do controlador P	28
Figura 22 – $K = 0,45$	29
Figura 23 – $K = 0,6$	29
Figura 24 – Resposta do controlador PI	29
Figura 25 – $K = 0,2$	30
Figura 26 – $K = 0,1$; $T_i = 0,9$	30
Figura 27 – $K = 0,15349$; $T_i = 0,3$	30
Figura 28 – Resposta do controlador PID	32
Figura 29 – $K = 0,20466$; $T_i = 0,42158$; $T_d = 0,01$	32
Figura 30 – $K = 0,20466$; $T_i = 0,42158$; $T_d = 0,2$	32
Figura 31 – Resposta da válvula	33
Figura 32 – Integração numérica	38

Figura 33 – Diferenciação numérica	38
Figura 34 – Curva para implementação do método	40

LISTA DE SÍMBOLOS

$u(t)$	Sinal do controlador PID analógico
K_p	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
K_d	Ganho derivativo
T_i	Constante de tempo do integrador
T_d	Constante de tempo do derivador
$e(t)$	Sinal de erro analógico
k	Variável de discretização do instante de tempo
u_k	Sinal do controlador PID digital no instante kT
u_{k-1}	Sinal do controlador PID digital no instante $(k - 1)T$
K	Ganho proporcional no domínio digital
e_k	Sinal de erro digital no instante kT
e_{k-1}	Sinal de erro digital no instante $(k - 1)T$
e_{k-2}	Sinal de erro digital no instante $(k - 2)T$
T	Período de amostragem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	ESTUDOS E MOTIVAÇÕES TECNOLÓGICAS	11
2.1	CARBURADOR	11
2.2	CORPO DE BORBOLETA	12
2.3	CONTROLADOR PID	15
3	DESENVOLVIMENTO	19
4	RESULTADOS	24
4.1	PARÂMETROS PELO MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS	24
4.2	INICIALIZAÇÕES E FUNÇÕES NO MICROCONTROLADOR	25
4.3	VIZUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS	27
4.3.1	Gerador de sinais	27
4.3.2	Controlador P	28
4.3.3	Controlador PI	29
4.3.4	Controlador PID	31
5	CONCLUSÃO	34
	REFERÊNCIAS	35
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	37
	APÊNDICE A – Método de Tustin (Regra trapezoidal)	38
	APÊNDICE B – Método de Ziegler-Nichols para a válvula	40

1 INTRODUÇÃO

Os avanços científicos têm promovido diversas melhorias no modo como a tecnologia é utilizada. O setor automotivo tem aumentado suas inovações acompanhando o crescimento da indústria digital. O corpo de borboleta eletrônico surgiu da necessidade dos sistemas de injeção eletrônica serem cada vez mais confiáveis para manter as emissões de poluentes em níveis baixos (YOSHIMURA, H. N. et al., 2003).

Para compreender corretamente o funcionamento do corpo de borboleta, deve-se primeiramente entender o sistema de dosagem de combustível do motor. Anteriormente, o equipamento responsável pela dosagem de combustível a ser introduzido na corrente de ar era o carburador (SANTOS, 1982). A ideia básica desse sistema é que, através do pedal, seja admitida na câmara de combustão a quantidade ideal de ar para que este seja misturado com o combustível e consequentemente altere a velocidade do motor.

Com o surgimento da injeção eletrônica, os veículos passam a conter a chamada ECU (Engine Control Unit), deixando os motores mais eficientes e menos poluentes (ANDREOLI, 2012). Com isso, a ECU passa a comandar todas as funções do veículo, inclusive a mistura ar/combustível necessária para o correto funcionamento do motor.

A válvula borboleta surge nesse contexto. Ela apresenta um sensor que indica a sua posição de abertura, controlando, dessa forma, a quantidade de ar admitida na câmara. Assim, através do pedal do acelerador, o sinal é enviado a ECU e processado para que a válvula seja acionada na mesma proporção.

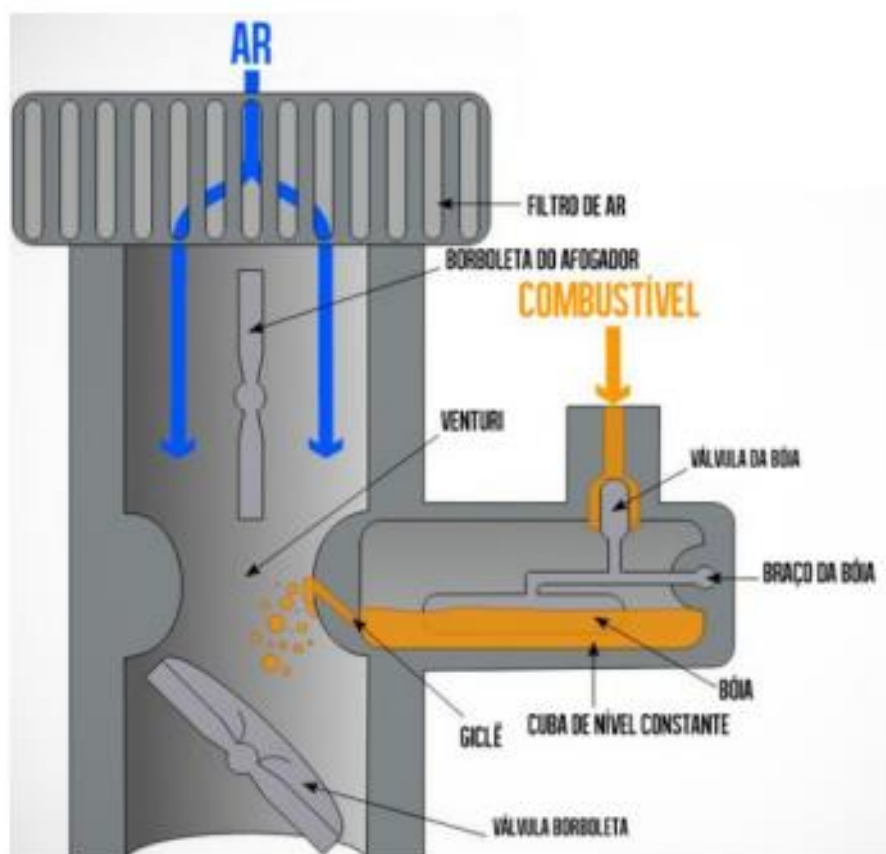
Neste trabalho, apresenta-se um desenvolvimento da ação de controle para o corpo de borboleta, utilizando a técnica de controle PID (Proporcional, Integral, Derivativo). Foi realizado um estudo em que se propõe obter as condições de estabilidade da válvula no domínio digital, encontrando, através de um método empírico, certas condições que, quando processadas de maneira correta por um microcontrolador, façam com que a válvula se mantenha na posição de abertura desejada na mesma medida que um potenciômetro (acelerador). Portanto, para o desenvolvimento adequado, devem ser conhecidos os limites de operação do equipamento e também devem ser feitas certas considerações a respeito de algumas características.

2 ESTUDOS E MOTIVAÇÕES TECNOLÓGICAS

2.1 CARBURADOR

Como já dito de maneira sucinta, o corpo de borboleta surgiu como alternativa ao antigo carburador. A tecnologia inovadora está representada no uso de sensores para captar o sinal de abertura da válvula e processá-lo de modo a mantê-la estável na posição indicada pelo acelerador. Como os motores a combustão interna não possuíam gerenciamento eletrônico, o controle do motor era puramente mecânico (SILVA, 2015).

Figura 1 - Carburador



Fonte: Silva (2015).

Aqui notam-se os três componentes principais do carburador:

- Cuba: responsável pelo armazenamento do combustível;
- Venturi: estreitamento na tubulação permitindo que o combustível seja aspirado através do giclê;
- Giclê: orifício que possibilita a passagem do combustível para o coletor de admissão.

Nesse tipo de sistema, o controle do ângulo de abertura da passagem de ar era feito mecanicamente através de um cabo acionado pelo pedal acelerador (SILVA, 2015). Como não havia nenhum tipo de gerenciamento eletrônico, ele apresentava maior perda de combustível, o que de fato representava seu maior problema. No carburador, a dosagem de combustível é determinada somente pela abertura do giclê, fazendo com que haja um maior consumo de combustível, causando então uma maior emissão de poluentes (SILVA, 2015).

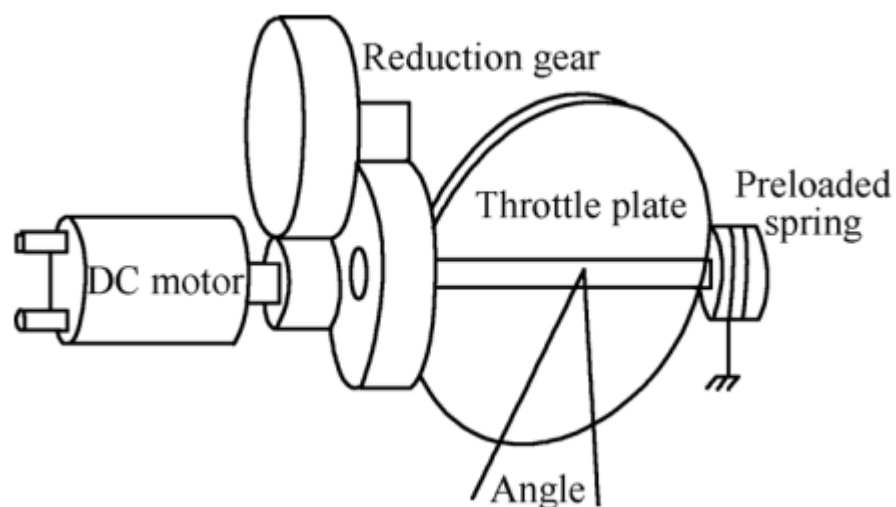
Na imagem nota-se inclusive que a borboleta em si não foi de fato uma novidade que acompanhou as inovações eletrônicas no setor automotivo. A novidade em si foi integrá-la então a um sistema de gerenciamento eletrônico.

2.2 CORPO DE BORBOLETA

Muitos trabalhos acadêmicos e industriais têm sido feitos a fim de se garantir um controle adequado para a válvula. Algumas abordagens sugerem estabelecer um modelo matemático para então se determinar os parâmetros de estabilidade. Outras dizem respeito a uma abordagem mais prática como admitir que a válvula seja linear tornando as variáveis mais fáceis de se trabalhar.

Antes de explicar tais abordagens, deve-se entender a montagem da válvula e os componentes que fazem parte dela.

Figura 2 - Corpo de borboleta



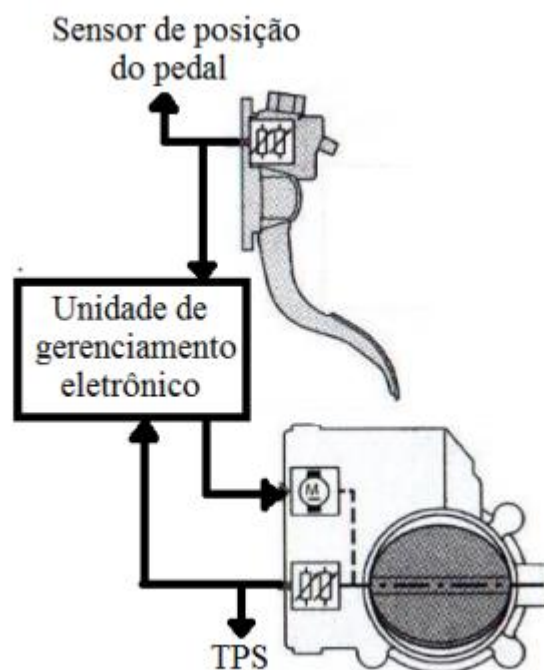
Fonte: Gaeta e Montanaro (2014).

Os componentes básicos do corpo de borboleta são:

- Motor DC;
- Engrenagens de redução;
- Disco;
- Mola não linear.

O processo de controle de abertura para o corpo de borboleta eletrônico (ETC) pode ser definido como um sistema em malha fechada, onde há um sensor que capta a informação do pedal do acelerador, envia para uma unidade de gerenciamento eletrônico que processa e envia para a válvula. O motor DC é alimentado e, juntamente com a ação redutora das engrenagens, é efetuada a rotação do disco. Por fim, um sensor de posição checa o ângulo de abertura e envia novamente para a unidade de gerenciamento.

Figura 3 - Gerenciamento eletrônico da válvula

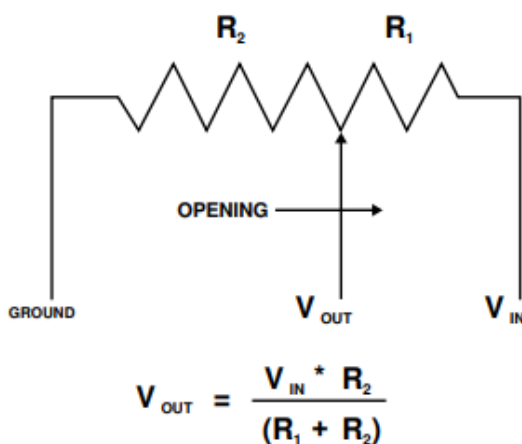


Fonte: Silva (2015).

O sensor de posição da válvula, também chamado de “throttle position sensor” (TPS), é responsável por verificar o ângulo de abertura. Esse sinal é processado pela unidade de gerenciamento e enviado de volta à válvula mantendo-a na posição desejada. Esse é o efeito que a realimentação traz ao sistema. Para a maioria dos sistemas, dois sensores TPS são utilizados de maneira oposta, sendo que um sinal aumenta enquanto o outro diminui com a rotação da válvula. O uso de dois sensores habilita uma capacitação diagnóstica que pode reduzir alguns efeitos indesejados de falhas (DELPHI, 2003). A grande vantagem disso é que o

processador pode reconhecer quando algum dos sensores foi comprometido e garantir que sejam tomadas as medidas adequadas ao invés de se tentar controlar um sinal indesejado (DELPHI, 2003).

Figura 4 - Sensor TPS

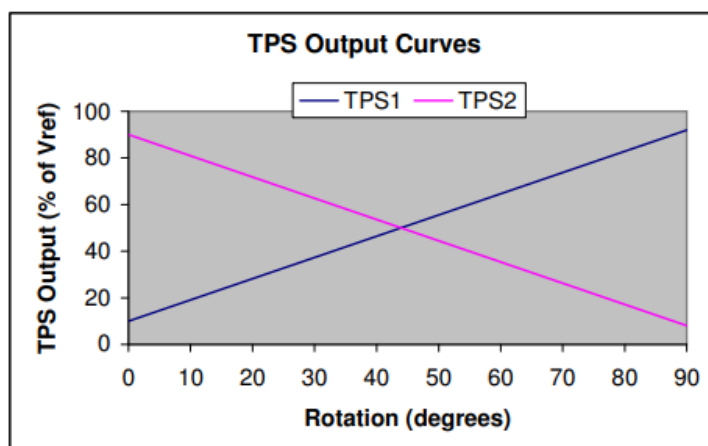


Fonte: Delphi (2003).

Os sensores TPS 1 e TPS 2, como mostra a figura 4, são basicamente dois potenciômetros que operam em sentidos opostos. Como já dito, isso facilita o diagnóstico de falhas e garante que o sistema seja interrompido ao invés de se propagar erros nos sinais de controle.

A unidade de gerenciamento reconhece essas possíveis falhas por meio das curvas desses potenciômetros, verificando a porcentagem da tensão de referência para os ângulos de rotação da válvula.

Figura 5 - Sensor TPS x Ângulo de rotação



Fonte: Delphi (2003).

O gráfico mostra que os sensores (assumidos lineares) apresentam valores bem definidos para cada ângulo apresentado.

Conhecendo o funcionamento do corpo de borboleta, as abordagens de controle sugerem estabelecer um modelo matemático ou se alcançar a estabilidade por métodos experimentais. A primeira deve levar em consideração as não-linearidades do sistema. O controle da dinâmica do corpo de borboleta representa um exemplo perfeito de controle de equipamentos automotivos, sendo que o comportamento do corpo de borboleta é afetado por diversas não-linearidades que podem alterar a performance do sistema (GAETA e MONTANARO, 2014). Elas surgem da interação entre cada um dos componentes que, sendo considerada em uma análise mais aprofundada, garantirá um modelo matemático e controle adequado. A válvula apresenta três complexas não-linearidades, atrito de deslizamento, mola não-linear e folga de engrenagem (AL-SAMARRAIE e ABBAS, 2012).

É válido dizer que para qualquer trabalho que siga essa abordagem, deve-se conhecer as características da válvula em si. Embora estratégias baseadas no modelo sejam eficientes para o controle de equipamentos mecatrônicos automotivos, a performance do controle depende significativamente do conhecimento do modelo da planta (GAETA e MONTANARO, 2014). Não conhecendo as características da planta, surgem técnicas que auxiliam na obtenção de um controlador adequado. As evoluções presentes até aqui mostram como foram realizadas melhorias significativas no sistema de admissão de ar, tornando os meios de controle mais eficientes.

2.3 CONTROLADOR PID

Uma ação de controle, em poucas palavras, deve ser capaz de manter um sistema estável minimizando ao máximo a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída. A estabilidade deve ser alcançada sem oscilações e ruído que possam propagar erro na realimentação. Um controlador deve ajustar o estado de um processo medido por uma variável – a *variável de processo* – para adequar um valor padrão particular chamado de *set point* (ponto de ajuste). A diferença entre eles é chamada de erro (BIBBERO, 1977).

O termo PID refere-se a três características do controlador: Proporcional, Integral, Derivativo. Sua expressão é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Ou ainda,

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Sendo:

$u(t)$: Sinal do controlador

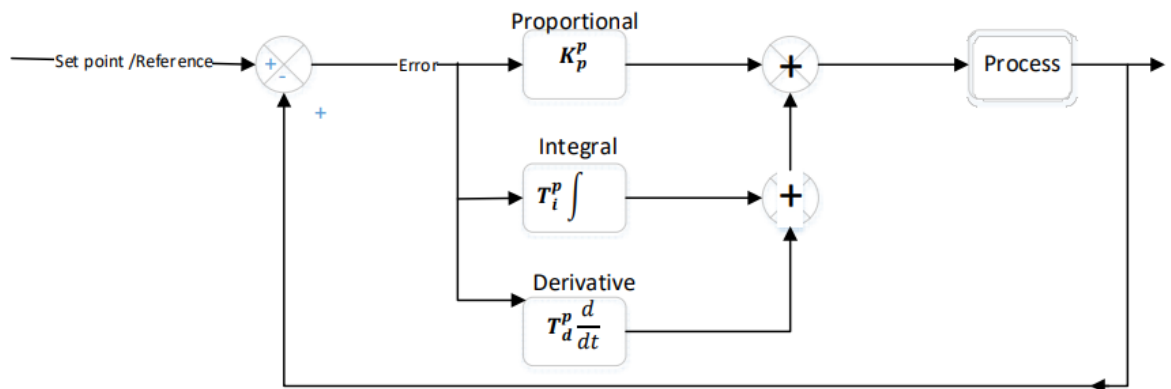
K_p : Ganho proporcional

K_i : Ganho integral

K_d : Ganho derivativo

$e(t)$: Sinal de erro

Figura 6 - Diagrama de blocos de um controlador PID



Fonte: Ige (2018).

A sintonia do controlador consiste em encontrar cada um dos termos K , T_i e T_d . A abordagem de modelagem do sistema permite obter esses parâmetros. Os modelos tentam ao máximo captar todos os aspectos da válvula, considerando as características do motor DC, engrenagens, mola, etc. Isso de fato é um esforço que busca a estabilidade, porém vale ressaltar que nem todas as válvulas vão apresentar o mesmo modelo. Na ausência do modelo, podem-se realizar experimentos para a obtenção desses parâmetros.

Um controlador do tipo PID pode ser tanto analógico quanto digital. É importante saber que o conceito de se obter a estabilidade em ambos é o mesmo, porém há algumas particularidades que devem ser discutidas. O controlador analógico faz uso de amplificadores operacionais com alguns outros componentes que indicam os parâmetros K , T_i e T_d . Estando essas variáveis bem estabelecidas, a realimentação introduz o sinal de saída novamente no sistema a fim de reduzir o erro e manter a estabilidade. Já um controlador digital funciona com algum processador. As variáveis tratadas devem ser discretizadas para um determinado período

de amostragem, para que o cálculo seja feito pelo processador e enviado à planta. A equação do controlador digital é mostrada utilizando o método de Tustin ou também chamada regra trapezoidal, detalhada no apêndice A:

$$u_k = u_{k-1} + \left(K + K \frac{Td}{T} + K \frac{T}{2Ti} \right) e_k + \left(-K + K \frac{T}{2Ti} + -2K \frac{Td}{T} \right) e_{k-1} + K \left(\frac{Td}{T} \right) e_{k-2}$$

Sendo:

u_k : Sinal do controlador no instante k

e_k : Erro no instante k

K : Ganho proporcional

Ti : Constante de integração

Td : Constante de derivação

T : Período de amostragem

É então escrito um programa para um processador. Ele envia o sinal de controle para a planta e, da mesma forma que o que foi descrito para o controlador analógico, o sinal é realimentado no processador para assim trazer estabilidade ao sistema.

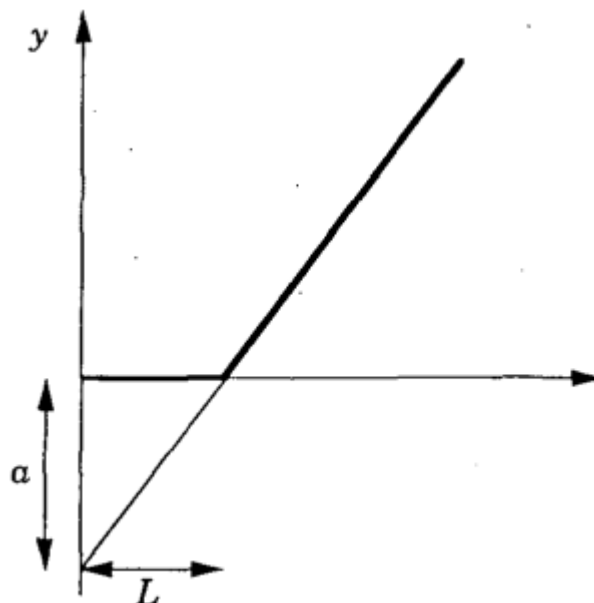
Os métodos de sintonia experimentais foram desenvolvidos, admitindo que o sistema tem um certo tipo de resposta para uma certa entrada. Um desses métodos, que inclusive foi utilizado nesse trabalho, é o Método de Ziegler-Nichols. Os métodos mais eficientes geralmente envolvem o desenvolvimento de alguma forma de processo modelo, então seleciona-se P, I e D baseado no modelo de dinâmica dos parâmetros (PRAKASH et al, 2014). Vale dizer que os métodos de Ziegler-Nichols sofreram modificações, sendo eles:

- Resposta ao degrau
- Resposta em frequência

O método tradicional de Ziegler-Nichols é aplicado para plantas com respostas a uma entrada degrau (KUSHWAH e PATRA, 2014). Ele é baseado no teste em malha aberta de resposta ao degrau, requerendo tornar o processo estável (ERIKSSON, 2008). A aplicação de cada um dos métodos varia um pouco optando-se pelo qual apresenta mais facilidade na implementação, e para esse trabalho foi utilizado o primeiro método.

O método de Ziegler-Nichols em malha aberta é também conhecido como curva de reação do processo (IGE, 2018). O ponto onde a inclinação da resposta ao degrau tem seu máximo é determinado primeiro e a tangente nesse ponto é desenhada. As intersecções entre a tangente e os eixos coordenados fornecem os parâmetros “a” e “L” (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 1995). A resposta pode ser vista dessa forma:

Figura 7 - Curva de resposta do Método de Ziegler-Nichols



Fonte: Åström e Hägglund (1995).

Com isso, os parâmetros podem ser extraídos como de acordo:

Tabela 1 - Sintonia com o Método de Ziegler-Nichols

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$1/a$		
PI	$0,9/a$	$3L$	
PID	$1,2/a$	$2L$	$L/2$

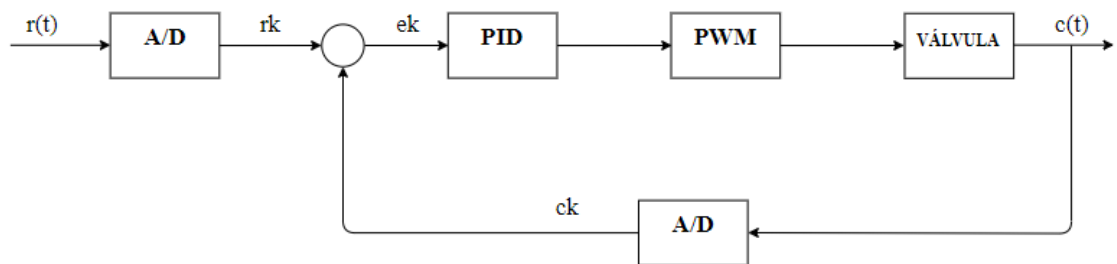
Fonte: Autoria própria.

É válido ressaltar que esse método é agressivo e oscilatório (baixa estabilidade) mas tem boa resposta a perturbação (IGE, 2018). Ele representa então uma excelente alternativa quando não se tem o modelo do sistema a ser controlado, e pode ser empregado a fim de se obter uma boa ação de controle.

3 DESENVOLVIMENTO

O trabalho pode ser visto pelo seguinte diagrama de blocos:

Figura 8 - Diagrama de blocos do controlador do corpo de borboleta



Fonte: Autoria própria.

O projeto aqui apresentado tem o objetivo de controlar um corpo de borboleta com hardware próprio e um programa em linguagem C para um microcontrolador de 8 bits (PIC18F4550). Para ficar melhor explicado, é apresentada a seguir uma lista dos principais componentes utilizados:

- PIC 18F4550
- Corpo de borboleta com código de peça 036.133.062.K/408.238.371.003
- Fonte de alimentação da fabricante Troni e modelo PS-300B-P4
- Analog Discovery da Digilent com função de osciloscópio e gerador de sinal

A válvula em questão é utilizada em carros da Volkswagen, mais especificamente carros Gol e Fox (modelos 1.0 a gasolina). Foram feitos ensaios para verificar a sua resposta e aplicar o método de Ziegler-Nichols para se obter os parâmetros para o controlador.

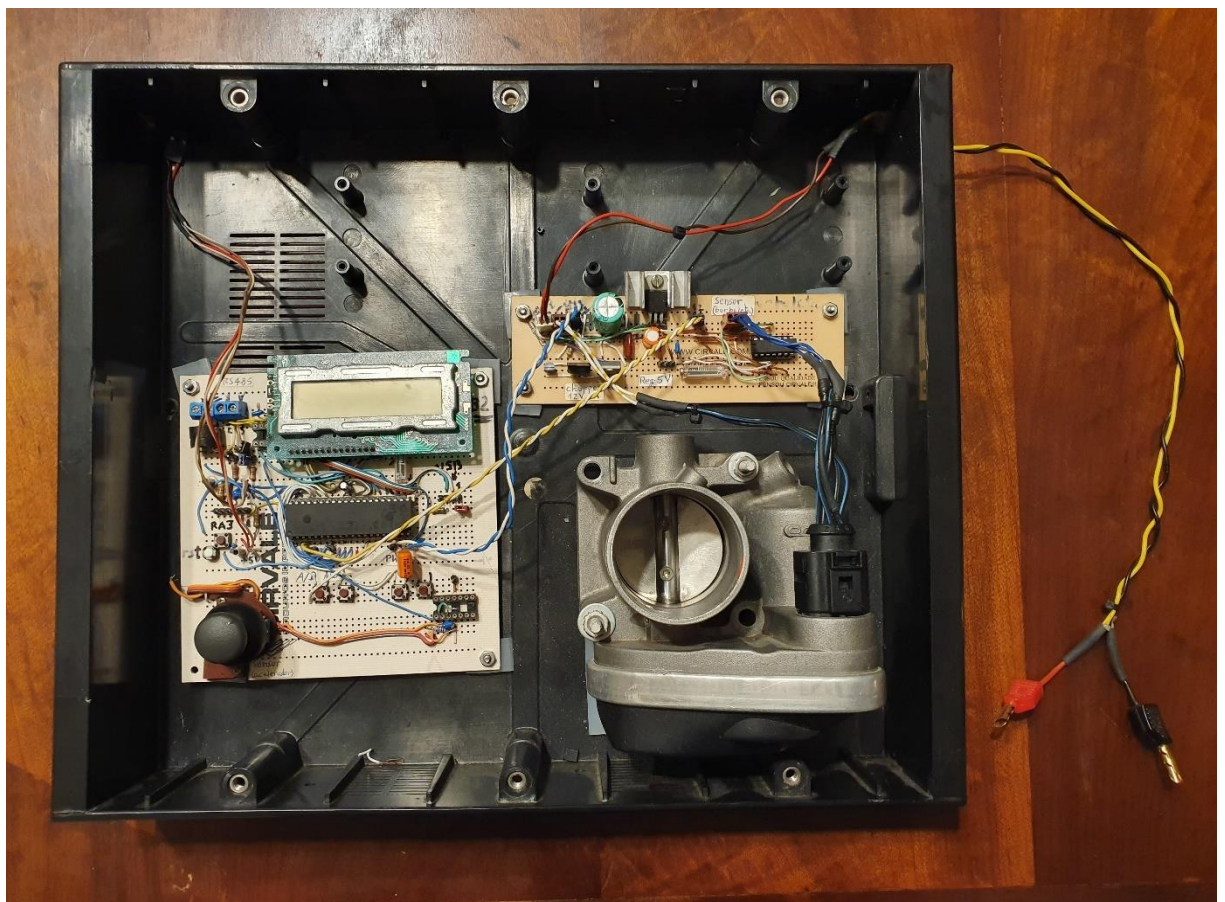
Inicialmente, deve-se entender a dinâmica da válvula. O corpo de borboleta tem alimentação em 12 V e, quando alimentado, chega-se a sua abertura máxima. Vale ressaltar que, sem qualquer tipo de realimentação, a válvula permanece totalmente fechada quando aplicado 0 V e totalmente aberta quando em 12 V. Aqui já nota-se porque é necessária uma ação de controle para esse sistema. A abertura deve responder de acordo com o acelerador para que se tenha o fluxo de ar adequado na câmara de combustão. Um sistema em malha aberta como esse não permite o controle do fluxo de ar e, conseqüentemente, da velocidade do motor. Portanto, apresentado dessa maneira, não poderia ser aplicado em um automóvel.

Para ser implementado no PIC18F4550, foi necessária a utilização de alguns recursos:

- Dois canais de conversor A/D (AD0 e AD1)
- Um canal de PWM

No canal AD0 foi conectado um joystick (potenciômetro) para simular o acelerador, mas os testes foram feitos utilizando um gerador de sinais. O PWM foi conectado ao circuito de potência no qual está ligada a válvula. Por fim, um dos sensores TPS da válvula foi conectado ao AD1, fazendo a realimentação e propiciando assim a ação de controle. A alimentação do circuito de controle é de 5 V, feita através do cabo de USB, e para o circuito de potência foi utilizada a fonte de alimentação. Para a realização dos testes, foi utilizado o Analog Discovery como gerador de sinal para o AD0 e dois canais de osciloscópio na entrada e na saída, a fim de verificar se de fato a planta está acompanhando o sinal de entrada. Para a programação do microcontrolador, foi utilizado o software MPLAB X IDE versão 5.45 e o compilador xc8 versão 2.30. O sistema completo é apresentado na figura 9:

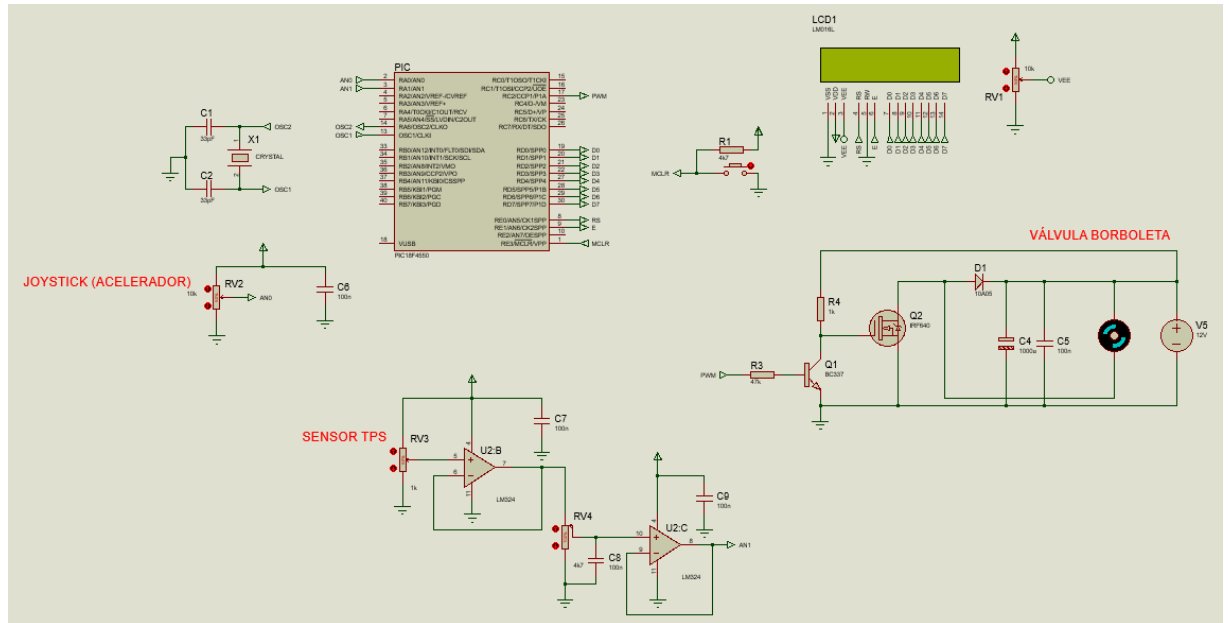
Figura 9 - Sistema completo com circuito de controle, potência e válvula



Fonte: Autoria própria.

Para se ter uma noção melhor do que está apresentado, segue um esquema do circuito utilizando o Proteus:

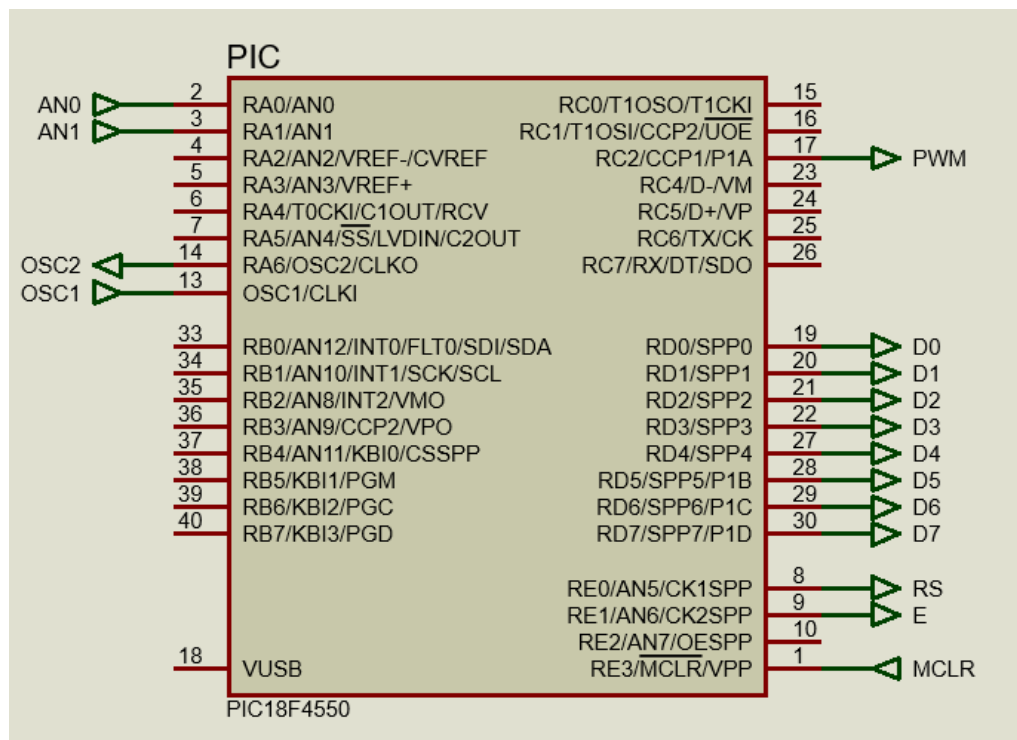
Figura 10 - Circuito no Proteus



Fonte: Autoria própria.

Mostrando agora as partes mais importantes:

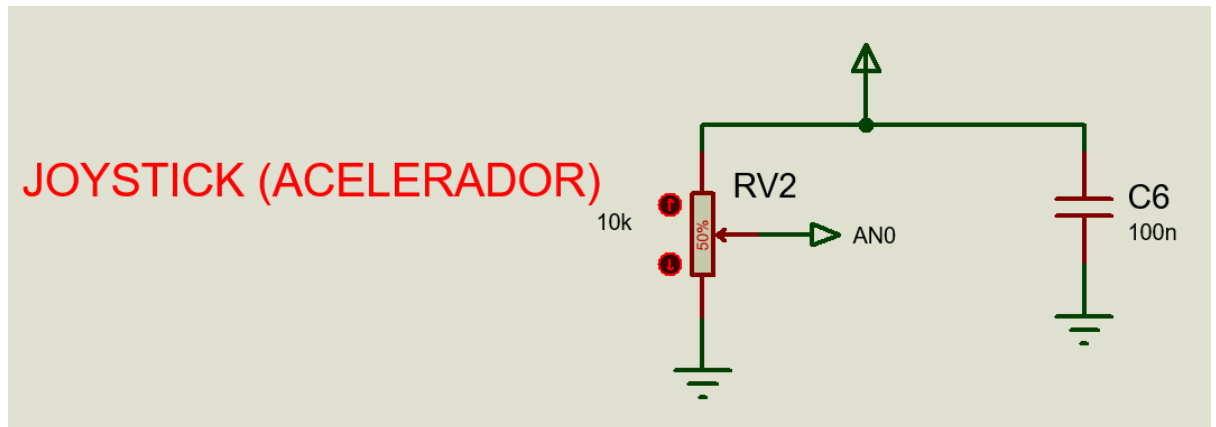
Figura 11 - Microcontrolador



Fonte: Autoria própria.

As ligações no microcontrolador são bem simples, sendo mais importante atentar para os pinos AN0, AN1 e PWM, pois são esses que atuam diretamente no controle da válvula. Aqui faz-se uma observação de que embora a placa apresente a ligação do LCD, o mesmo não foi utilizado, pois a visualização da resposta é feita no osciloscópio.

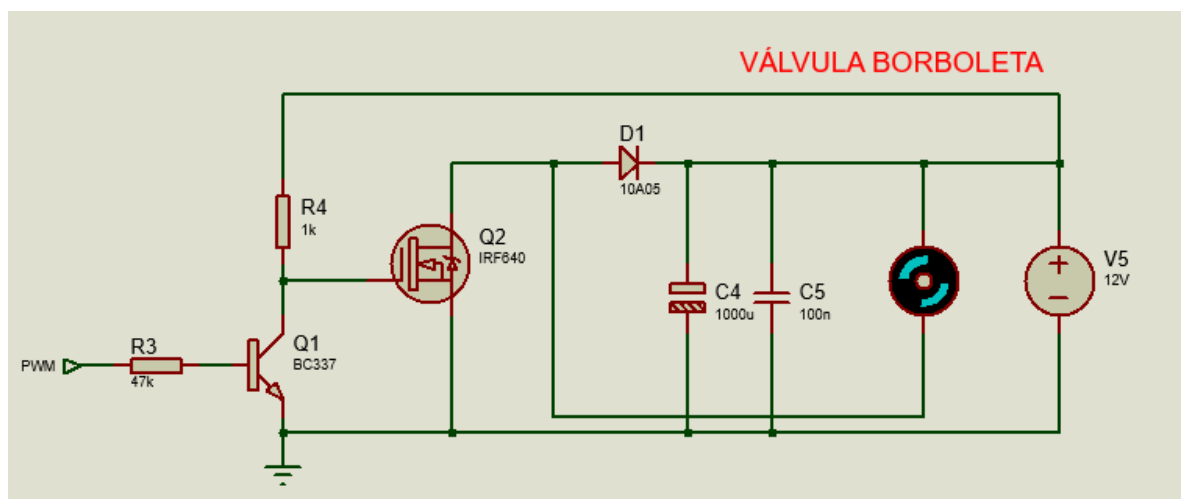
Figura 12 - Circuito AN0



Fonte: Autoria própria.

Aqui o sinal do potenciômetro é enviado ao pino AN0 onde será convertido em um sinal digital para ser utilizado.

Figura 13 - Circuito da válvula borboleta

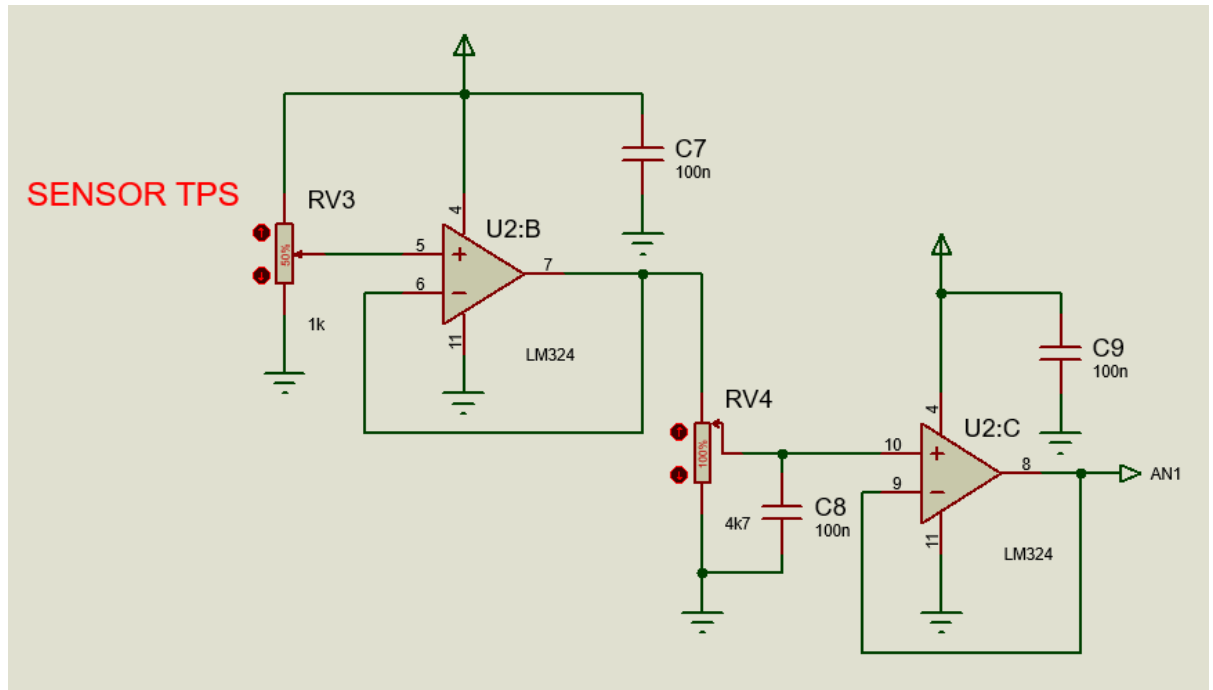


Fonte: Autoria própria.

O circuito de potência acima recebe o sinal vindo do PWM e é responsável pelo controle de abertura da válvula. Nota-se também que ele é ativo baixo, o que significa que quando o sinal de PWM está em 0 V a válvula fica totalmente aberta. O PWM envia o sinal do

processamento da equação de controle pelo microcontrolador para esse circuito fazendo com que a válvula fique na posição desejada.

Figura 14 - Circuito AN1



Fonte: Autoria própria.

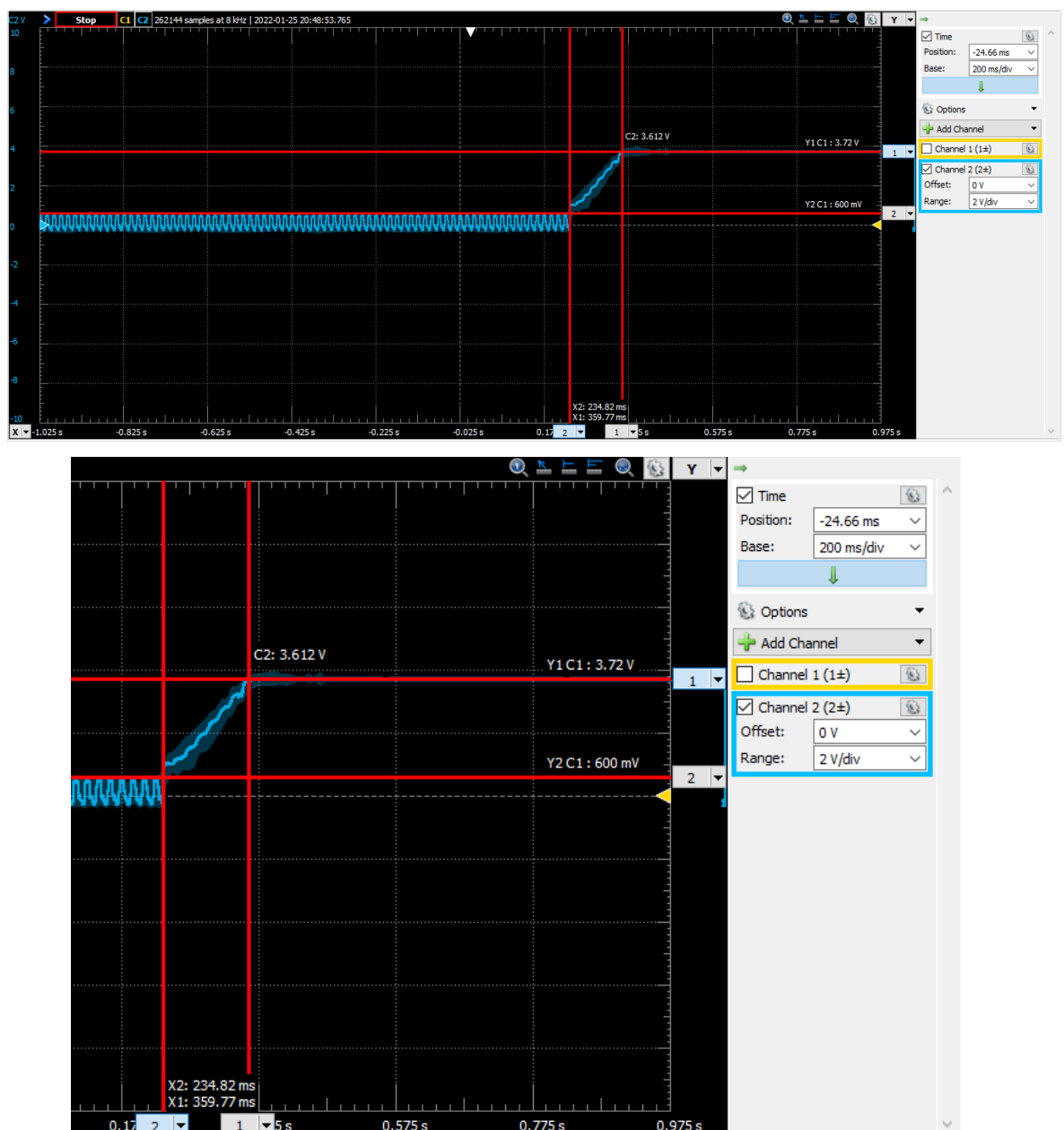
Como já foi dito, a válvula apresenta um sensor de posição que pode ser simplesmente representado por um potenciômetro. Por facilidade, o resistor RV4 foi mantido em sua máxima resistência não havendo, portanto, qualquer perda do sinal do sensor. A saída deste circuito é realimentada de volta ao microcontrolador através do pino AN1, fazendo com que o processo recomece.

4 RESULTADOS

4.1 PARÂMETROS PELO MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS

Para sintonia dos parâmetros do controlador, foi aplicado o método de Ziegler-Nichols como apresentado anteriormente. Com a válvula em malha aberta, é aplicada a alimentação de 12 V, para se obter sua resposta:

Figura 15 - Resposta da válvula em malha aberta



Fonte: Autoria própria.

Com os cursores, foram encontrados os instantes dos valores mínimo e máximo da válvula. O desenvolvimento do método se encontra no apêndice B. Aplicando-o, encontra-se que “a” e “L” são:

$$a = 5,863;$$

$$L = 0,21079;$$

Assim, K, Ti e Td podem ser encontrados utilizando as fórmulas descritas na tabela 1:

Tabela 2 - Parâmetros da válvula

Controlador	Kp	Ti	Td
P	0,17055		
PI	0,15349	0,63237	
PID	0,20466	0,42158	0,10539

Fonte: Autoria própria.

4.2 INICIALIZAÇÕES E FUNÇÕES NO MICROCONTROLADOR

O algoritmo é bem simples, pois é apenas a escrita da equação para um PID digital. Deve-se ter atenção somente para as inicializações corretas dos canais de conversor A/D e PWM. Elas foram feitas na função principal para depois ser chamada a função do PID.

Figura 16 - Inicializações do A/D e PWM

```

102 void main() {
103     OSCCON = 0b01110000;
104
105     ////////////
106     ADCON0 = 0b00000001; //Conversor A/D habilitado, sem conversão em progresso, AN0
107     ADCON1 = 0b00001101; //AN0 entrada analógica, Vref+ = Vdd, Vref- = Vss
108     ADCON2 = 0b10110110; //Fosc/64, 16Tad, justificado a direita
109     ////////////
110
111     TRISA = 0b10001111; // 6:Osc2/5:tx485/4:dir485/3:Prog/2:AN2/1:AN1/0:AN0
112     TRISB = 0b00000111; // 76:IO,IO/5:BTtooth/4:Buzina/3:Relé1/2:E1/1:IO/0:E2
113     TRISC = 0b10011000; // 76:RX,TX/54:D+,D-/3:nãoExiste/2:CCP1/1:CCP2/0:Relé2
114     TRISD = 0b00000000; // 7654:mil,cem,dez,uni (7seg)/3210:dcba (7seg)+d7-d4 (GLCD)
115     TRISE = 0b11111000; // Só existem RE3:RE0. 3:mclr-vpp/210:rs,e,rst (glcd)
116
117     ////////////
118     PR2 = 0xFF; // 1. Período do PWM: (chute) F_portadora: ~2941 Hz.
119     CCP1L = 0x00; // 2. Chute (Duty cycle). Era 0x10.
120     TRISCbits.RC2 = 0; // 3.
121     T2CON = 0b00000010; // 4. (Fosc/4)/16 = 48MHz/64=750kHz (~1,33us); T2 off
122     T2CONbits.TMR2ON = 1;
123     CCP1CON = 0b00001100; // 5. DC1B1=DC1B0=0; Modo PWM.
124     ////////////

```

Fonte: Autoria própria.

Para utilizar os canais AN0 e AN1, foi desenvolvida a função **conversor_AD** com um parâmetro para escolher o canal 0 quando se quer adquirir os valores da referência, ou o canal 1 para receber os valores do sensor TPS.

Figura 17 - Função do Conversor A/D

```

247 //Inserir 0 ou 1 para selecionar o canal.
248 //0 para AN0
249 //1 para AN1
250 void conversor_AD(char canal){
251     ADCON0bits.CHS0 = canal;
252
253     GO = 1; //ADCON0bits.GO_DONE = 1;
254     while(DONE==1); //ADCON0bits.GO_DONE == 1
255
256     amostra = (float)(ADRESH<<8) + ADRESL; //Movendo o valor de ADRESH um byte para a esquerda
257
258     if(canal == 0){
259         rk = amostra;
260     }
261
262     else
263         ck = amostra;
264 }

```

Fonte: Autoria própria.

O algoritmo do controlador foi feito na função **PID** para ser chamada na função principal. Isso facilita a organização e mudança dos parâmetros para os testes referentes ao método implementado.

Figura 18 - Definição dos parâmetros

```

309 void PID() {
310     //Valores obtidos pelo método de Ziegler-Nichols
311     #define K 0.05
312     #define Ti 0.632373
313     #define Td 0.0
314     #define T 0.001
315
316     //#define K 0.1
317     //#define Ti 1.0
318     //#define Td 0.0
319     //#define T 0.001
320
321     //#define K 0.1
322     //#define Ti 0.9
323     //#define Td 0.0
324     //#define T 0.001

```

Fonte: Autoria própria.

Figura 19 - Definição das constantes e cálculo do erro

```

541 //TRAPEZOIDAL
542 #define c1 (K + (K*(Td/T)) + (K*(T/(2*Ti))))
543 #define c2 (-K + (K*(T/(2*Ti))) - (2*K*(Td/T)))
544 #define c3 (K*(Td/T))
545
546 float ek, ek_1, ek_2;
547 float uk, uk_1;
548
549 uk = 0.0;
550 ek = 0.0;
551 ek_1 = 0.0;
552
553 while(1){
554     ek_2 = ek_1;
555     ek_1 = ek;
556
557     conversor_AD(0);
558     ek = rk;
559
560     conversor_AD(1);
561     ek = ek - ck;

```

Fonte: Autoria própria.

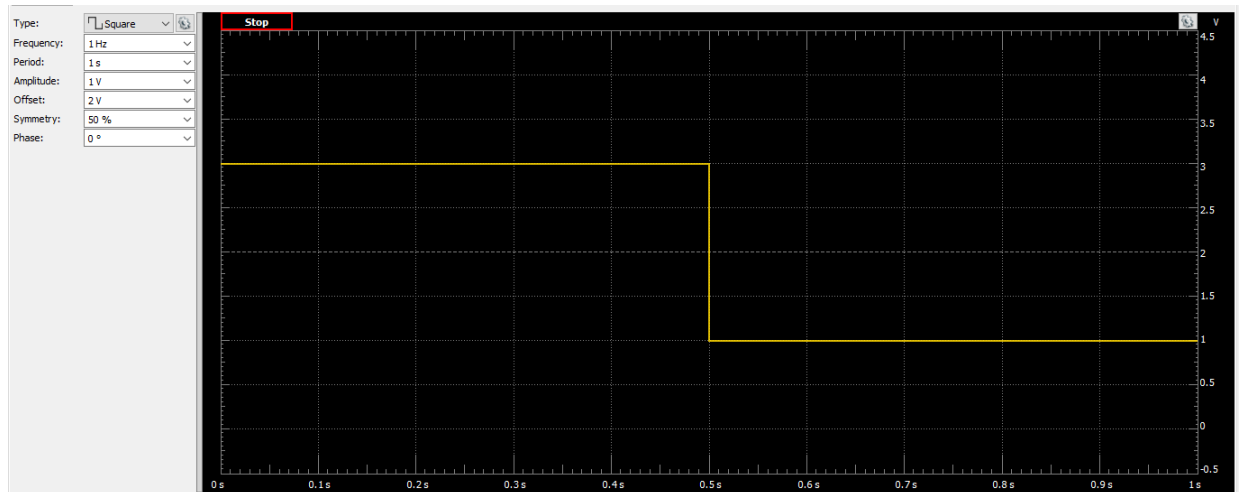
Adquirindo os dados por meio de **conversor_AD(0)** e **conversor_AD(1)**, calcula-se o erro e, em seguida, escreve-se a equação do controlador digital enviando o sinal de controle para o PWM.

4.3 VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

4.3.1 Gerador de sinais

O gerador de sinais foi configurado para gerar uma onda quadrada de frequência 1 Hz com valores entre 1 V e 3 V. Isso foi feito devido as tensões no TPS quando a válvula está totalmente fechada e aberta. Quando está fechada, a tensão no TPS é aproximadamente 0,87 V, e aberta 3,8 V. Portanto, gerando um sinal entre esses dois valores, é possível checar se o controlador está de fato adequado para os parâmetros estabelecidos. A configuração do gerador se faz da seguinte maneira:

Figura 20 - Configuração do gerador de sinais



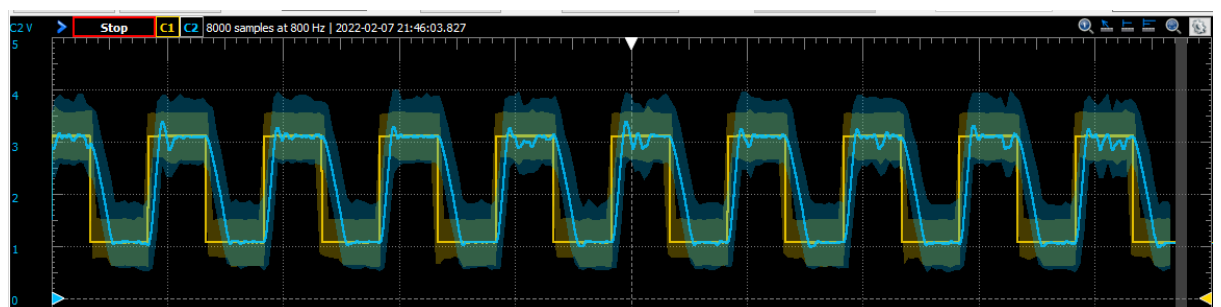
Fonte: Autoria própria.

Para os resultados a seguir, foi considerado um período de amostragem de 1 ms.

4.3.2 Controlador P

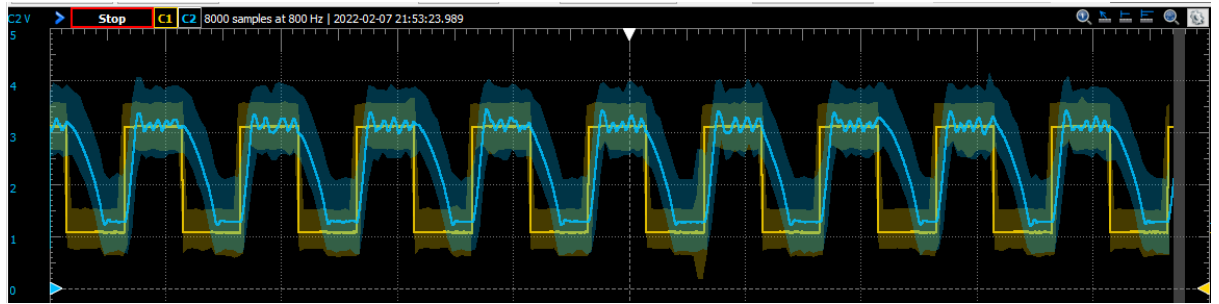
Com os parâmetros obtidos pelo método, testa-se o valor de K calculado na Tabela 2:

Figura 21 - Resposta do controlador P

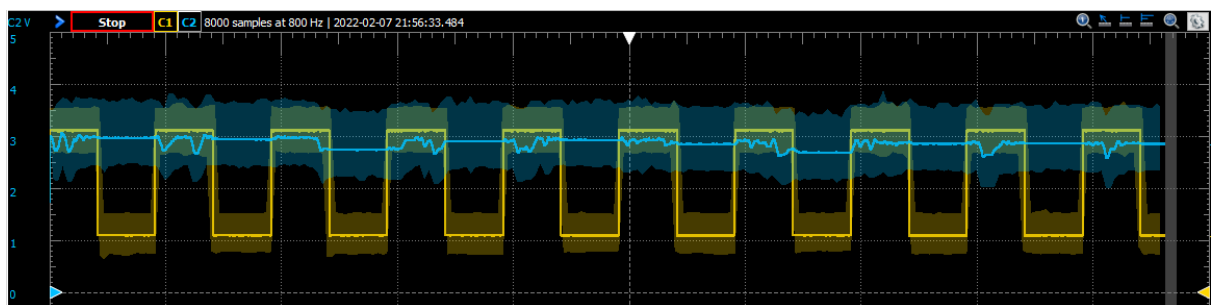


Fonte: Autoria própria.

Efetuando-se mais testes, percebe-se que o aumento do ganho causa um aumento no erro, até que a válvula para de responder de maneira adequada. Seguem alguns exemplos:

Figura 22 - $K = 0,45$ 

Fonte: Autoria própria.

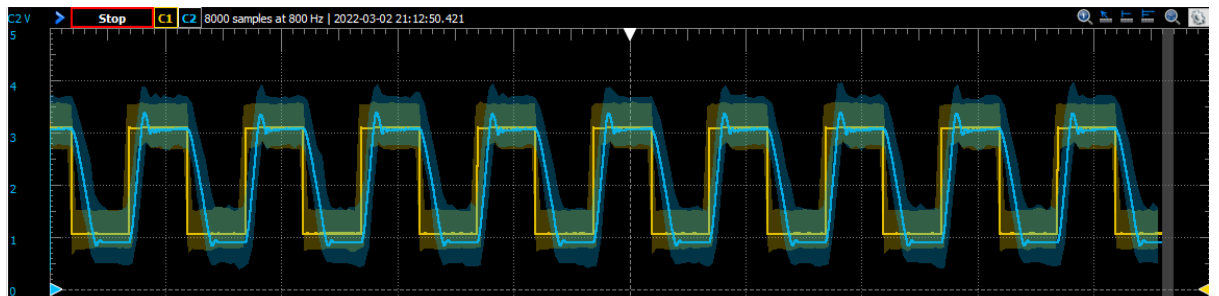
Figura 23 - $K = 0,6$ 

Fonte: Autoria própria.

Esse controlador ainda apresenta algumas oscilações no valor máximo da saída. Porém aqui já se percebe a eficiência do método de Ziegler-Nichols, visto que um controlador P respondeu bem com o parâmetro K previamente calculado.

4.3.3 Controlador PI

Figura 24 - Resposta do controlador PI

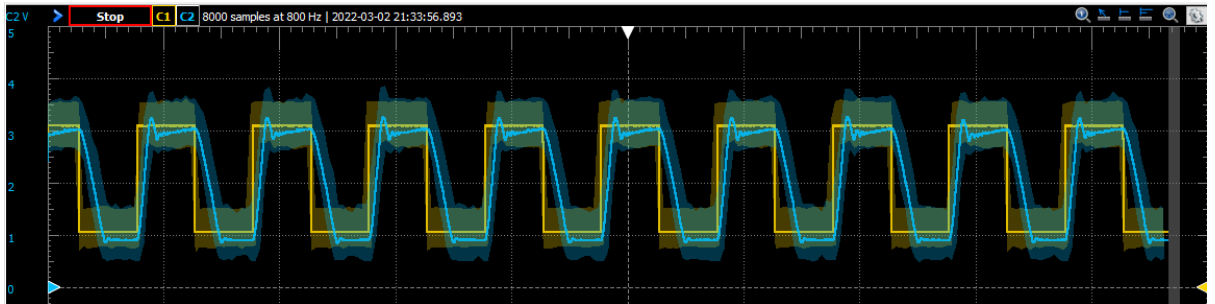


Fonte: Autoria própria.

Para um controlador PI, nota-se que não existem mais oscilações no valor máximo do sinal de saída. Isso é uma característica do próprio controlador. As oscilações são retiradas devido a ação integral que mantém o erro mínimo (zero) no estado estacionário (IGE, 2018).

Um aumento no ganho proporcional causa uma piora no sinal do controlador.

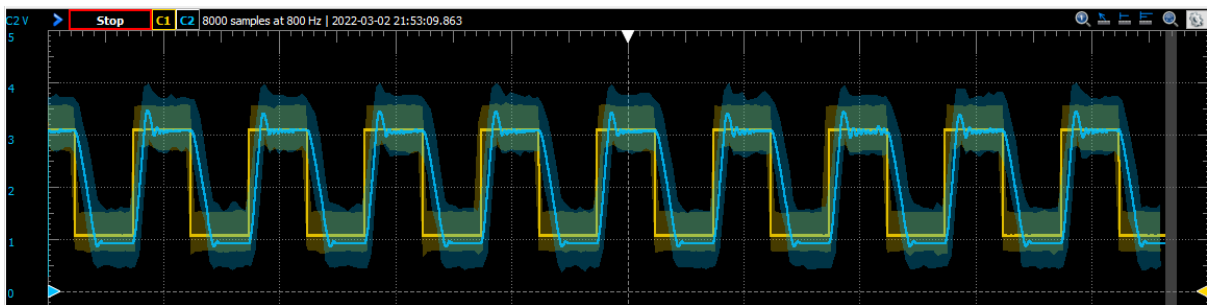
Figura 25 - $K = 0,2$



Fonte: Autoria própria.

Aumentos no parâmetro “Ti” não trouxeram efeitos de melhoria significativos no sinal de controle. Nessa condição, o controlador tende mais a um controlador proporcional que já foi testado.

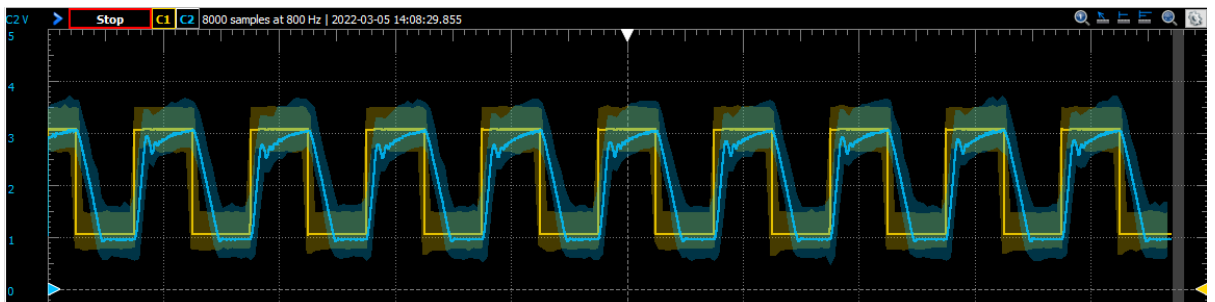
Figura 26 - $K = 0,1$; $T_i = 0,9$



Fonte: Autoria própria.

A diminuição do valor de “Ti” causa uma piora no sinal:

Figura 27 - $K = 0,15349$; $T_i = 0,3$



Fonte: Autoria própria.

Observando atentamente essas figuras torna-se relevante falar um pouco da ação da mola na abertura e fechamento da válvula. Quando o sinal de PWM é aplicado no circuito de potência, a válvula (já com a ação do controlador) se abre seguindo a onda quadrada previamente estipulada como variável de ajuste. Leva um certo tempo para abrir pois isso é característico do sistema. A ação integral então, deixa o valor de erro mínimo para o valor máximo da entrada, realizando exatamente o que se deseja. Quando o sinal de referência volta para o estado mínimo, não existe na válvula um circuito que promova uma rotação contrária para o motor. Dessa forma, o retorno da válvula para a posição de fechamento é feito totalmente pela mola, sendo por isso visto nas figuras um intervalo de tempo maior, em comparação com a subida, para se estabelecer na posição mínima.

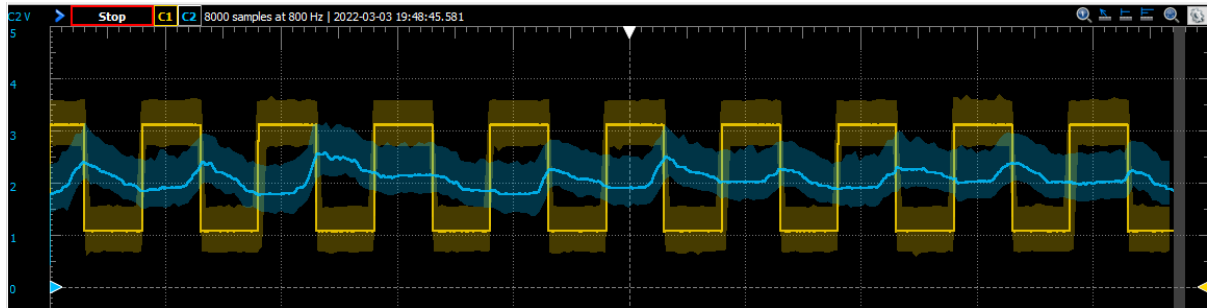
Há ainda a presença de um erro na posição mínima que não pôde ser retirado pelo controlador PI. Esse erro de fato mostra uma característica própria de como o termo integral age no sistema. Quando a variável de ajuste se estabelece em 1 V, a mola faz a função de retornar o disco para a posição de 1 V também. Nesse intervalo de tempo, o erro é negativo, pois a referência é menor que a saída, e esses valores de erro negativo estão sendo somados pela ação integral do controlador. Tem-se então um valor negativo que ultrapassa a posição desejada, não sendo capaz de estabelecer o disco na posição correspondente a 1 V, deixando, conseqüentemente, a válvula totalmente fechada. Nessa condição, tem-se uma tensão com valor de 0,87 V no sensor TPS, o que é muito próximo de 1 V estabelecido na variável de ajuste. A proximidade de valores implica em um valor de erro muito menor, de modo que o termo integral não é capaz de superar o termo negativo anteriormente obtido pelo controlador. Isso mostra que o controlador PI não é capaz de eliminar esse erro dentro do período da variável de ajuste para estabelecer a válvula numa posição de abertura correspondente a 1 V. Como a diferença não é tão significativa, esse erro se torna aceitável, já que o objetivo do controlador em seguir a referência e retirar as oscilações no valor máximo foi alcançado.

Mais uma vez o método de Ziegler-Nichols se mostrou com significativa precisão em fornecer os parâmetros corretos para uma resposta adequada.

4.3.4 Controlador PID

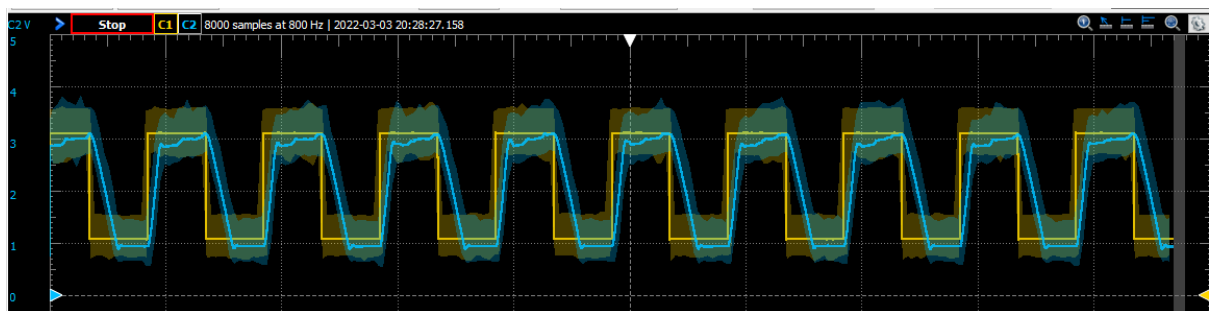
Testando os valores obtidos para um controlador PID, a resposta não ficou adequada aos valores aplicados na entrada. Aparentemente, o acréscimo da ação derivativa não trouxe estabilidade ao sistema.

Figura 28 - Resposta do controlador PID



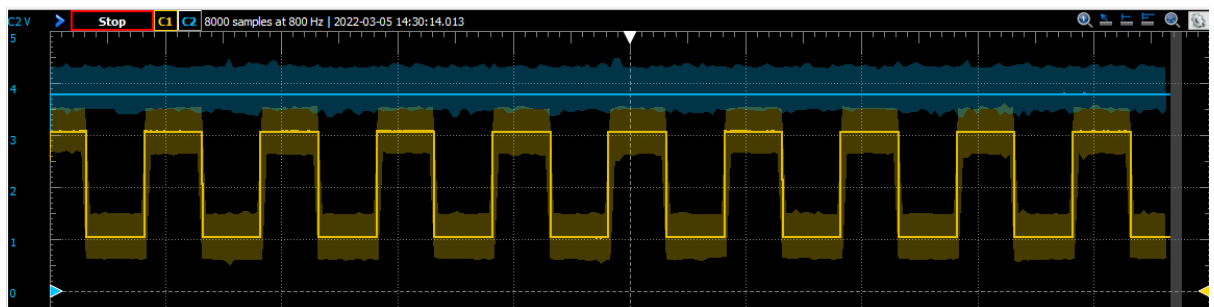
Fonte: Autoria própria.

Diminuindo os valores de “Td”, a válvula passa a apresentar uma resposta melhor. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto menor o valor desse parâmetro, mais próximo o controlador fica de um controlador PI, que já foi testado e verificado.

Figura 29 - $K = 0,20466$; $T_i = 0,42158$; $T_d = 0,01$ 

Fonte: Autoria própria.

Para o valor inicial de $T_d = 0,10539$, nota-se que um pequeno aumento faz com que a válvula se mantenha na posição totalmente aberta sem obedecer ao comando da variável de entrada.

Figura 30 - $K = 0,20466$; $T_i = 0,42158$; $T_d = 0,2$ 

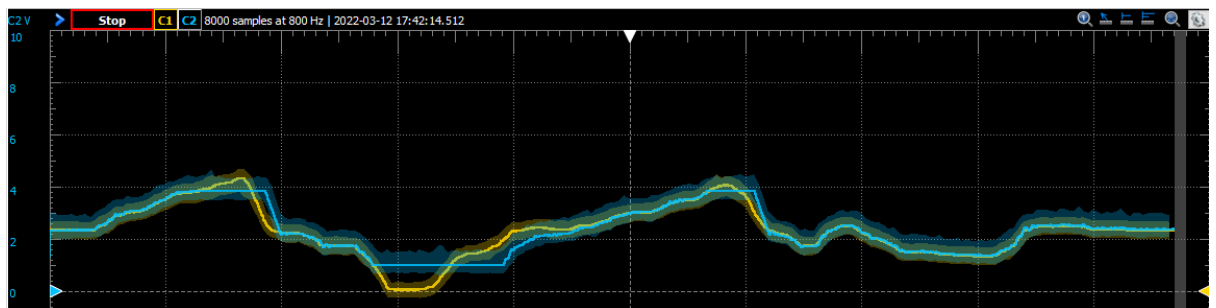
Fonte: Autoria própria.

O estabelecimento de um valor para “Td” não se mostra eficiente para o alcance da estabilidade, pois uma vez que os parâmetros calculados pelo método não foram suficientes para um controle adequado, devem ser efetuados testes até se encontrar um bom valor para esse ganho.

Uma análise rápida dos resultados dos controladores P e PI permitem levantar algumas hipóteses sobre a falha do PID. Primeiramente, nota-se que o tempo de subida fica em torno de 100 ms. Ou seja, é um processo que acontece muito rapidamente, levando a uma rápida redução do erro, e consequentemente a um termo derivativo negativo. A dinâmica de redução de erro leva à conclusão de que seriam necessários ajustes bem específicos em “Td” para uma resposta adequada. A redução de “Td” faz com que o controlador se aproxime mais do controlador PI. Um pequeno aumento, como visto na figura 30, faz com que a saída não siga a entrada. Isso leva à conclusão que a implementação de um controlador PID nesse caso não se mostra viável.

Agora pode-se avaliar a resposta PI utilizando o joystick na referência:

Figura 31 - Resposta da válvula



Fonte: Autoria própria.

Portanto, esses experimentos elucidam que um controlador PI implementado no microcontrolador se qualifica como perfeitamente capaz de realizar o proposto, obedecendo o sinal de entrada e mantendo o sinal de saída estável.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como propósito o desenvolvimento de um controlador, utilizando a técnica PID, para um corpo de borboleta, implementado em um microcontrolador PIC18F4550. Apesar das muitas não-linearidades da válvula, a ação de controle pôde ser muito bem alcançada por meio do Método de Ziegler-Nichols. Como pontos principais destacaram-se os seguintes procedimentos:

- Conversão A/D do sinal de entrada e de saída;
- Atuação do PWM na abertura e fechamento da válvula;
- Implementação do método e alta eficiência dos parâmetros encontrados.

As discussões feitas mostraram a aplicação de um método amplamente utilizado em estudos acadêmicos e práticos para uma técnica de controle eficiente. Os resultados alcançados corroboram a validação da teoria, uma vez que o acompanhamento da variável de ajuste foi feito exatamente como deveria.

O PIC18F4550, bem como o MPLAB X IDE, se mostraram ferramentas capazes de testar um modelo experimental para um equipamento de aplicação significativa na indústria automotiva. A seleção do tipo de controlador (P, PI ou PID) depende, é claro, do que apresentou melhor resultado.

Dos experimentos realizados, conclui-se, portanto, que um controlador PI, feito no PIC18F4550, é possível de ser utilizado a fim de promover um controle adequado para o corpo de borboleta em questão. O não conhecimento do modelo da planta não foi fator impeditivo, já que o Método de Ziegler-Nichols foi desenvolvido justamente para essas condições, fornecendo, então, os parâmetros necessários para a sintonia do controlador.

REFERÊNCIAS

AL-SAMARRAIE, Shibly Ahmed; ABBAS, Yasir Khudhair. Design of electronic throttle valve position control system using nonlinear PID controller. **International Journal of Computer Applications**, v. 59, n. 15, p. 27-34, 2012. Disponível em: <https://research.ijcaonline.org/volume59/number15/pxc3884273.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2022.

ANDREOLI, Alexandre Giordani. **Análise e simulação de mapas base de injeção eletrônica de combustível para motores de ignição a centelha**. 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/75756/000883805.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. **PID controllers: theory, design and tuning**. 2.ed. Research Triangle Park: ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995. Disponível em: <https://aiecp.files.wordpress.com/2012/07/1-0-1-k-j-astrom-pid-controllers-theory-design-and-tuning-2ed.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

BIBBERO, Robert J. **Microprocessors in instruments and control**. Nova York: Wiley-Interscience, 1977.

DELPHI. **ETC Air Control Valve (ETC-ACV)**. Nova York: Rochester, 2003. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5138583/mod_resource/content/5/etc_applications_june2003%20%28lagana%20v1%29.pdf. Acesso em: 13 fev. 2022.

ERIKSSON, Lasse. **PID controller design and tuning in networked control systems**. 2008. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Tecnologia) – Faculty of Electronics, Communications and Automation, Helsinki University of Technology, Espoo, 2008. Disponível em: <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512296347/isbn9789512296347.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2022.

GAETA, Alessandro di; MONTANARO, Umberto. Application of a robust model reference adaptative control algorithm to a nonlinear automotive actuator. **International Journal of Automation and Computing**, p. 377-391, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11633-014-0803-8.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2022.

IGE, Olalekan Olusoji. **Automatic tuning of PID controllers**. 2018. 88 f. Tese (Doutorado em Ciências de Tecnologia da Informação Industrial e Automação) – Faculty of Technology, Natural sciences and Maritime Sciences, University of Southeast Norway, Porsgrunn, 2018. Disponível em: <https://openarchive.usn.no/usn-xmlui/bitstream/handle/11250/2567174/MasterOlusoji%20Ige2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Auto%20tuning%20is%20the%20process,things%20but%20with%20little%20variations..> Acesso em: 25 fev. 2022.

KUSHWAH, Manoj; PATRA, R. Ashish. PID controller tuning using Ziegler-Nichols Method for speed control of DC motor. **International Journal of Scientific Engineering and Technology Research**, v. 3, n. 13, p. 2924-2929, 2014. Disponível em: <http://ijsetr.com/uploads/361425IJSETR1550-497.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022.

PRAKASH, Ch. Bhanu; NAIK, R. Srinu; PRADESH, Andhra. Tuning of PID controller by Ziegler-Nichols algorithm for position control of DC motor. **IJSET-International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology**, v. 1, n. 3, p. 379-382, 2014. Disponível em: https://ijiset.com/v1s3/IJSET_V1_I3_65.pdf. Acesso em: 13 fev. 2022.

SANTOS, Antonio Moreira dos; BENDER, José Cézar. **Carburacão**. São Carlos, 1982. (Apostila). Disponível em: <http://repositorio.eesc.usp.br/bitstream/handle/RIEESC/7540/Carbura%C3%A7%C3%A3o.pdf?sequence=1>. Acesso em: 01 fev. 2022.

SILVA, Cynthia Thamires da. **Modelamento matemático e controle PI de uma válvula borboleta eletrônica**. 2015. 139 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3140/tde-17062016-134956/publico/Cynthia_Thamires_da_Silva_PPGEE_Corrigida_2015.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

YOSHIMURA, Humberto; REGO, A.J.C.; OCHIAI, R.; CAMARGO, A.C.; ABREU, A.P.; MOLISANI, A. Análise de falhas de segmentos de ferrita rejeitada na linha de montagem do corpo de borboleta eletrônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 47., 2003, João Pessoa. **Anais** [...]. João Pessoa, 2003. p. 417 - 428. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/A-Molisani/publication/271138301_Analise_de_falhas_de_segmentos_de_ferrita_rejeitada_na_linha_de_montagem_do_corpo_de_borboleta_eletronico_In_47_Congresso_Brasileiro_de_Ceramica/links/54ccee880cf298d6565c7c5f/Analise-de-falhas-de-segmentos-de-ferrita-rejeitada-na-linha-de-montagem-do-corpo-de-borboleta-eletronico-In-47-Congresso-Brasileiro-de-Ceramica.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ANG, Kiam Heong; CHONG, Gregory; LI, Yun. PID control system analysis, design, and technology. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 13, n. 4, p. 559-576, 2005. Disponível em: <https://eprints.gla.ac.uk/3817/1/IEEE3.pdf?ref=driverlayer.com>. Acesso em: 15 fev. 2022.

ÅSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore; HANG, C.C.; HO, W.K. Automatic tuning and adaptation for PID controllers. **Control Eng. Practice**, v. 1, n. 4, p. 699-714, 1993. Disponível em: https://www.academia.edu/15629374/Automatic_tuning_and_adaptation_for_PID_controllers_a_survey?pop_sutd=false. Acesso em: 25 fev. 2022.

BERNER, Josefin. **Automatic tuning of PID controllers based on asymmetric relay feedback**. 2015. 93 f. Tese (Licenciatura) – Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, 2015. Disponível em: <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/3633151/5463952.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2022.

FORSYTHE, W.; GOODALL, R. M. **Digital control: fundamentals, theory and practice**. Nova York: McGraw-Hill, 1991.

GUEDES, Marcos Antonio de Carvalho. **Estudo de compensadores para a válvula borboleta eletrônica automotiva**. 2014. 155 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-04112014-103319/publico/Dissertacao_MAGuedes.pdf. Acesso em: 10 jan. 2022.

GRIFFITHS, Paul G. **Embedded software control design for an electronic throttle body**. 2002. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – University of California, Berkeley, 2002. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.100.6791&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 13 fev. 2022.

LOH, Robert N. K.; THANOM, Witt; PYKO, Jan S.; ANSON, Lee. Electronic throttle control system: modeling, identification and model-based control designs. **Engineering**, v. 5, n. 7, p. 587-600, 2013. Disponível em: https://www.scirp.org/pdf/ENG_2013071509461423.pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC18F2455/2550/44554550 data sheet 28/40/44-pin, high performance, enhanced flash, USB microcontrollers with nano watt technology**. 2006. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2022.

PUJATTI, Fabrício José Pacheco. **Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico para motores de ignição por centelha**. 2007. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/SBPS-7B6KA6/1/tese_doutorado_fabricio_jos_pacheco_pujatti.pdf. Acesso em: 01 fev. 2022.

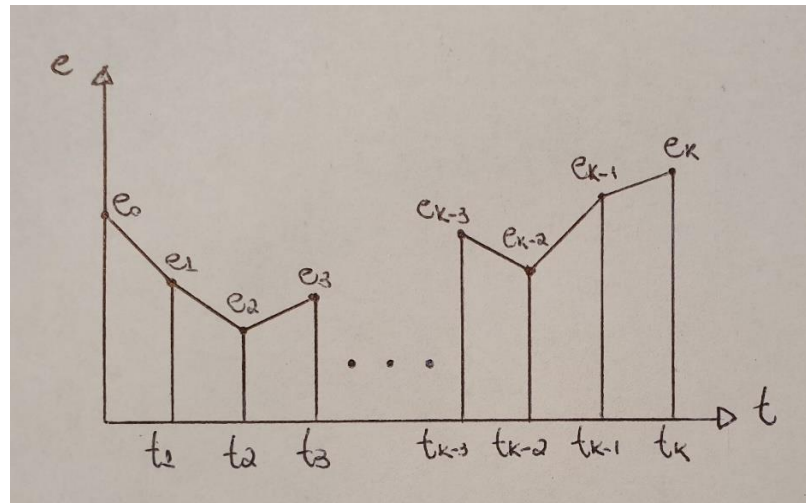
APÊNDICE A – Método de Tustin (Regra trapezoidal)

Para se obter a equação do controlador PID digital pela regra trapezoidal, deve-se primeiramente saber como tratar integral e derivada no domínio digital.

O período de amostragem é $T = t_2 - t_1 = t_k - t_{k-1}$

Integral:

Figura 32 - Integração numérica



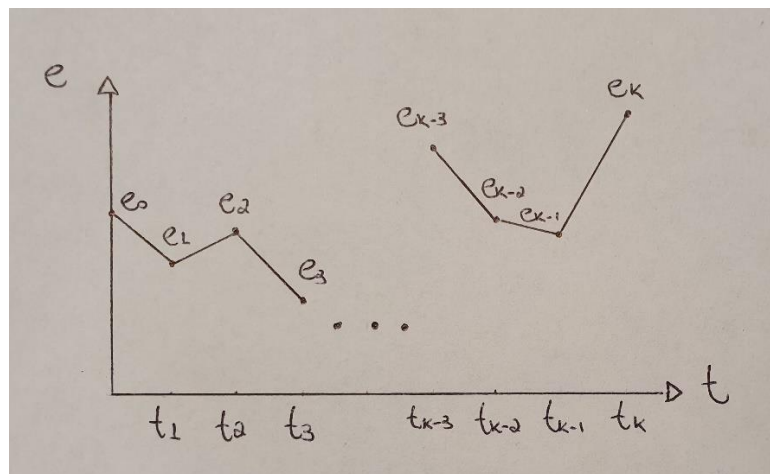
Fonte: Autoria própria.

$$\int_0^{kT} e dt \approx \frac{e_0 + e_1}{2} \cdot T + \frac{e_1 + e_2}{2} \cdot T + \dots + \frac{e_{k-3} + e_{k-2}}{2} \cdot T + \frac{e_{k-2} + e_{k-1}}{2} \cdot T + \frac{e_{k-1} + e_k}{2} \cdot T$$

$$\int_0^{kT} e dt \approx T \left[\frac{e_0 + e_k}{2} + \sum_{i=1}^{k-1} e_i \right]$$

Derivada:

Figura 33 - Diferenciação numérica



Fonte: Autoria própria.

$$\frac{de}{dt}(t = kT) = \frac{e_k - e_{k-1}}{T}$$

Aplicando ao controlador:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{Ti} \int e(t) dt + Td \frac{de(t)}{dt} \right)$$

$$u_k = K \left(e_k + \frac{T}{Ti} \left[\frac{e_0 + e_k}{2} + e_1 + e_2 + \dots + e_{k-1} \right] + Td \frac{e_k - e_{k-1}}{T} \right)$$

$$u_{k-1} = K \left(e_{k-1} + \frac{T}{Ti} \left[\frac{e_0 + e_{k-1}}{2} + e_1 + e_2 + \dots + e_{k-2} \right] + Td \frac{e_{k-1} - e_{k-2}}{T} \right)$$

$$u_k - u_{k-1} = K \left(e_k - e_{k-1} + \frac{T}{Ti} \left[\frac{e_k - e_{k-1}}{2} + e_{k-1} \right] + Td \frac{e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}}{T} \right)$$

$$u_k = u_{k-1} + \left(K + K \frac{Td}{T} + K \frac{T}{2Ti} \right) e_k + \left(-K + K \frac{T}{2Ti} - 2K \frac{Td}{T} \right) e_{k-1} + K \left(\frac{Td}{T} \right) e_{k-2}$$

Por facilidade, considera-se três constantes que depois podem ser definidas no programa do microcontrolador:

$$c1 = \left(K + K \frac{Td}{T} + K \frac{T}{2Ti} \right)$$

$$c2 = \left(-K + K \frac{T}{2Ti} - 2K \frac{Td}{T} \right)$$

$$c3 = \left(\frac{Td}{T} \right)$$

APÊNDICE B – Método de Ziegler-Nichols para a válvula

Da figura 15 são extraídos os valores de mínimo e máximo da válvula, bem como os instantes de tempo em que ocorrem. Assim:

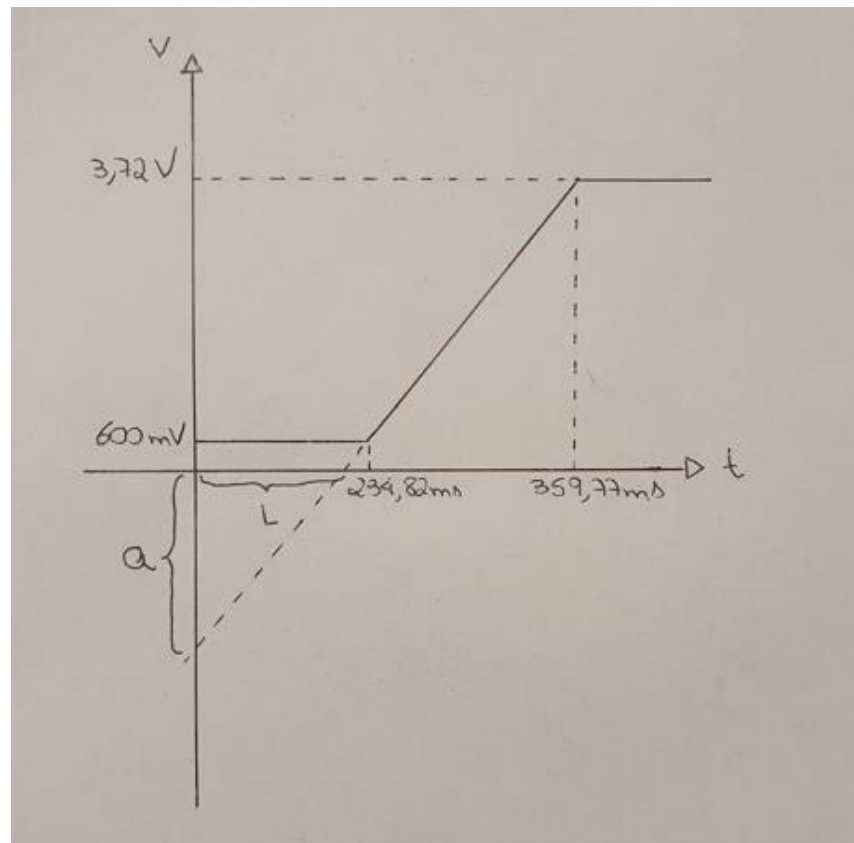
Valor mínimo = 600 mV

Valor máximo = 3,72 V

Tempo de mínimo = 234,82 ms

Tempo de máximo = 359,77 ms

Figura 34 - Curva para implementação do método



Fonte: Autoria própria.

Aproxima-se a resposta da válvula por uma equação de reta da forma:

$$r = m \cdot t + b$$

sendo $b = a + 0,6$

O parâmetro “m” é a inclinação da curva que pode ser obtida por:

$$m = \frac{3,72 - 0,6}{(359,77 - 234,82) \cdot 10^{-3}}$$

$$m = 24,969988$$

Fazendo a mesma analogia, tem-se que “m” também pode ser representado por:

$$m = \frac{3,72 - (a + 0,6)}{(359,77 \cdot 10^{-3}) - 0}$$

Com “m” previamente calculado, “a” pode ser obtido:

$$a = -5,863452$$

A equação da reta fica estabelecida como:

$$r = 24,969988 t + (-5,863452 + 0,6)$$

$$r = 24,969988 t - 5,263452$$

Para encontrar L, faz-se $r = 0$:

$$24,969988 t - 5,263452 = 0$$

$$t = \frac{5,263452}{24,969988} = 210,79 \text{ ms}$$

Portanto, “L” é:

$$L = 0,21079$$