

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA

DANIELLA SILVEIRA MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA EDUCACIONAL PARA O ENSINO
DA TEORIA DE CONTROLE BASEDA NA LEVITAÇÃO EÓLICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO
2019

DANIELLA SILVEIRA MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA EDUCACIONAL PARA O ENSINO
DA TEORIA DE CONTROLE BASEADA NA LEVITAÇÃO EÓLICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Eduardo Coca Salazar

TOLEDO
2019

TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 94

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA EDUCACIONAL PARA O ENSINO DA TEORIA DE CONTROLE BASEDA NA LEVITAÇÃO EÓLICA

por

Daniella Silveira Medeiros

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 10h do dia 5 como requisito parcial para a obtenção do título Bacharel em Engenharia Eletrônica. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado APROVADO.

Daniel Cavalcanti Jeronymo

UTFPR

Djones Aldivo Boni

UTFPR

Andres Eduardo Coca Salazar

COECO

Orientador (a)

Fabio Rizental Coutinho

Coordenador(a) da COELE

Toledo,

09/07/2019

“O termo de aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso”.

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder o dom da vida e ter iluminado meu caminho me dando forças e saúde para concluir mais uma etapa da minha vida. Agradeço a Ele, também, por ter conhecido pessoas muito especiais o que me deram forças para acreditar que meu sonho seria possível.

Aos meus pais Carlos e Elizabete e minhas irmãs Raphaella e Graziella, pela paciência, carinho, compreensão e pelo apoio incondicional, incentivando para continuar sempre, mesmo com todas as adversidades e momentos difíceis durante estes anos de muita dedicação de estudos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Andrés Eduardo Coca Salazar, pelo profissionalismo, comprometimento e dedicação para a realização deste trabalho e o Prof. Gerson Felippini, por ajudar na finalização deste projeto.

Ao meu chefe de estágio Maureu Benvenho e meus colegas de trabalho, que ofereceram materiais e serviços para o desenvolvimento do protótipo.

A todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

À UTFPR, professores e servidores do laboratório de civil e computação, por me auxiliarem no aprendizado e na obtenção do conhecimento através da infraestrutura do *câmpus*.

Por fim, agradeço a todos meus amigos que fizeram parte de minha graduação, principalmente Vanessa Natal, William Fernandes, Gabriel Cacilho com quem partilhei inúmeras madrugadas de estudo, preocupações, ansiedades, alegrias, conhecimentos e amizade.

RESUMO

MEDEIROS, Daniella Silveira. **Desenvolvimento de uma ferramenta educacional para o ensino da teoria de controle baseado na levitação eólica.** 2019. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

O uso de ferramentas educacionais na engenharia é útil na consolidação dos conhecimentos da aula através da experiência prática. Porém, tais materiais didáticos nem sempre estão disponíveis, por serem caros ou de difícil aquisição. Desta forma, o desenvolvimento de uma ferramenta educacional para o ensino de controle, acessível, modificável e de baixo custo, tornou-se necessário. Destarte, um sistema automático de flutuação eólica é um valioso instrumento para facilitar o aprendizado de alguns conceitos de controle. Atualmente, existem ferramentas comerciais, como o DT-CP038, porém são custosos e de difícil modificação. Portanto, neste projeto foi desenvolvida uma ferramenta didática de controle flexível e de baixo custo baseada na implementação de um sistema de levitação eólica afim de assessorar o estudante na compreensão de alguns conceitos como: variáveis e elementos, ações de controle e identificação de sistemas. Para tal, o sistema conta com um sensor ultrassônico que determina a altura do êmbolo, e mediante um PID digital, programado em um microcontrolador, é definida a intensidade adequada para o atuador corrigir o erro entre as alturas desejada e medida. O microcontrolador está conectado a uma interface de *software* que permite visualizar e modificar alguns sinais e parâmetros de forma guiada. Assim, conclui-se que o protótipo poderia ser uma boa ferramenta para o ensino prático da disciplina de controle de sistemas lineares.

Palavras-chave: Ferramentas de ensino. Força eólica. Controle digital.

ABSTRACT

MEDEIROS, Daniella Silveira. **Development of an educational tool for the teaching of control theory based on the wind levitation**. 2019. 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso– Engenharia Eletrônica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2019.

The use of educational tools in engineering is useful in consolidating classroom knowledge through hands-on experience. However, such teaching materials are not always available, because they are expensive or of difficult acquisition. In this way, the development of an educational tool for teaching control, accessible, modifiable and low cost, is necessary. Thus, an automatic wind turbine system is a valuable tool to facilitate the learning of some control concepts. Currently, there are commercial tools, such as the DT-CP038, but they are expensive and difficult to modify. Therefore, in this project it was developed a didactic tool of flexible and low cost control based on the implementation of a wind levitation system in order to assist the student in understanding some concepts such as: variables and elements, control actions and system identification. For this, the system has an ultrasonic sensor that determines the height of the sphere, and by means of a digital PID, programmed in a microcontroller, the intensity is defined for the actuator to correct the error between the desired and measured heights. The microcontroller is connected to a software interface that allows you to viewing and modifying some signals and parameters in a guided way. Thus, it is concluded that it is the prototype could be a good tool for the practical teaching of the discipline of control of linear systems.

Keywords: Teaching tools. Wind power. Digital control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Módulo 2325 - Controle de Temperatura e de Nível.....	22
Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada	24
Figura 3 – Diagrama de sistema de controle em malha fechada.....	25
Figura 4 – Resposta transitória de um sistema de segunda ordem sub- amortecido e suas características.....	27
Figura 5 – Definição gráfica do ângulo β para o cálculo do tempo de subida.....	29
Figura 6 – Exemplo de resposta transitória com oscilação constante.....	32
Figura 7 – Diagrama de Blocos do Controlador Digital.....	35
Figura 8 – Dispositivo amostrador-retentor.....	35
Figura 9 – Sinal analógico amostrado com trens de pulsos.....	36
Figura 10 – Diagrama de blocos de um típico microcontrolador.....	38
Figura 11 – Diagrama de forças atuantes sobre a esfera.....	39
Figura 12 – Diagrama de blocos da ferramenta educacional para o ensino de controle.....	41
Figura 13 – Representação esquemática do projeto proposto.....	42
Figura 14 – Tubo de acrílico usado na implementação do sistema proposto.....	43
Figura 15 – Flutuador cilíndrico impresso em 3D usado na implementação do sistema.....	44
Figura 16 – Sensor Ultrassônico HC-SR04 usado na implementação do sistema proposto.....	45
Figura 17 – Base em PLA para o acoplamento do sensor à base do tubo usado na implementação do sistema proposto.....	46
Figura 18 – Ventilador caracol usado na implementação do sistema proposto.....	47
Figura 19 – Suporte para a ventoinha em 3D usado na implementação do sistema	47
Figura 20 – Estrutura de funil em 3D usado na implementação do sistema proposto.....	48
Figura 21 – Sustentação do atuador e da planta finalizado usado na implementação do sistema proposto.....	49
Figura 22 – Arduino UNO R3.....	50
Figura 23 – Etapa de potência: primeiro protótipo usando um PWM	

implementado com transistores.....	51
Figura 24 – Etapa de potência: protótipo final usando o Módulo MOSFET IR520N.....	52
Figura 25 – Fonte de alimentação do sistema com detalhes.....	53
Figura 26 – Potenciômetro do controle manual.....	53
Figura 27 – Conexões elétricas do sistema.....	54
Figura 28 – Caixa de proteção de circuitos elétricos com acabamento.....	55
Figura 29 – Sistema de controle completo finalizado.....	56
Figura 30 – Interface inicial do programa.....	58
Figura 31 – Comunicação Serial para acessar os módulos do <i>software</i>	58
Figura 32 – Interface do módulo de Apresentação.....	59
Figura 33 – Interface do módulo de Sistema de Controle Manual.....	60
Figura 34 – Interface do módulo de Sistema de Controle PID.....	61
Figura 35 – Modelo do ventilador utilizado como atuador no sistema.....	62
Figura 36 – Modelo com as unidades adotadas.....	64
Figura 37 – Dados coletados da rotação do motor x tensão.....	67
Figura 38 – Dados coletados usando mínimos quadrados de 3 a 7 Volts	68
Figura 39 – Resposta da Equação de Linearização.....	68
Figura 40 – Resposta do sistema para entrada ao degrau usada no método de identificação de Mollenkamp	70
Figura 41 – Polos no círculo unitário discreto.....	71
Figura 42 – Resposta do sistema aplicando Ziegler-Nichols.....	72
Figura 43 – Respostas no tempo dos sistemas para diferentes referências.....	73
Figura 44 – Resposta do sistema ante perturbações.....	75
Figura A1 – Elementos da ferramenta educacional.....	87
Figura A2 – Conexões da ferramenta educacional.....	88
Figura A3 – Porta serial para conectar ao módulo desejado.....	89
Figura A4 – Tela do Sistema de Controle Manual.....	90
Figura A5 – Tela do Sistema de Controle PID.....	92
Figura B1 – Gráfico explicativo sobre a linearização.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos controladores estimados mediante o método de Ziegler-Nichols.....	33
Tabela 2 – Características Operacionais do módulo HC-SR04.....	45
Tabela 3 – Especificações operacionais do Arduino UNO.....	50
Tabela 4 – Especificações do módulo MOSFET IRF520N.....	52
Tabela 5 – Parâmetros do sistema de levitação eólica.....	66
Tabela 6 – Resultados do método de Mollemkamp.....	70
Tabela 7 – Resposta transitória do sistema referente aos dados coletados.....	75
Tabela 8 – Tabela de preço do sistema de levitação eólica.....	77
Tabela 9 – Enquete de voluntários para verificar se é um sistema de fácil manuseio.....	77
Tabela 10 –Resultado da enquete.....	78
Tabela A1 – Ligações da ferramenta educacional.....	88

LISTA DE SIGLAS

3D	Terceira Dimensão
A/D	Analógicos-Digitais
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
D/A	Digitais-Analógicos
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Direta)
EDO	Equação Diferencial Ordinária
FT	Função de Transferência
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> (Ambiente Integral de Desenvolvimento)
LGR	Lugar Geométrico de Raízes
MA	Malha Aberta
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Placa de Fibra de Média Densidade)
MF	Malha Fechada
P	Proporcional
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLA	Ácido Polilático
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i> (Policloreto de Vinila)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)
R-H	Ruth-Hurwitz
ROM	<i>Read only memory</i> (Memória apenas para Leitura)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TZ	Transformada Z
Z-N	<i>Zigler-Nichols</i>
ZOH	<i>Zero Order Hold</i> (Retenção de Ordem Zero)

LISTA DE SÍMBOLOS

$G(s)$	Função de transferência de um sistema
$R(s)$	Função de transferência de um sinal básico de entrada
$Y(s)$	Função de transferência da saída de um sistema
$G_{(s)}$	Função de transferência de malha fechada
$H(s)$	Função de transferência do sensor
$G_c(s)$	Função de transferência do controlador
$G_p(s)$	Função de transferência da planta
$\hat{G}_p(s)$	Função de transferência da planta identificada
$y(t)$	Saída do sistema
$y_{tr}(t)$	Resposta transitória do sistema
$y_{ss}(t)$	Resposta permanente do sistema
ω_n	Frequência natural não amortecida
ζ	Fator de amortecimento relativo
t_r	Tempo de subida
β	Fase do polo de Malha Fechada, ângulo usado para calcular o tempo de subida.
ω_d	Frequência natural amortecida
t_p	Tempo pico
t_s	Tempo de acomodação
M_p	Máximo sobressinal
K	Ganho de um sistema
e_{ss}	Erro em estado estacionário
K_p	Ganho proporcional
K_d	Ganho derivativo
K_i	Ganho integral
T_i	Tempo integral
T_d	Tempo derivativo
K_u	Ganho ajustado
θ	Tempo de atraso ou tempo morto da resposta de saída de um sistema

τ	Constante de tempo de um sistema de primeira ordem
ΔY	Variação da amplitude de saída da reposta de um sistema
ΔU	Variação da amplitude da entrada de um sistema
t_i	Instante de tempo no momento i
s	Variável de Laplace
$x[n]$	Sinal discreto no instante n
z	Variável da Transformada Z
$e[k]$	Erro no instante k
T_s	Período de amostragem
$u[k]$	Sinal de saída do controle do PID digital
$r(t)$	Sinal contínuo de referência
$e(t)$	Sinal contínuo de erro
$u(t)$	Sinal contínuo de controle
$s(t)$	Sinal contínuo de saída do sensor
V	Tensão elétrica
T	Intervalos periódicos do período
K_c	Ganho crítico
T_u	Período de oscilação crítico
g	Aceleração da gravidade
P_{atm}	Pressão atmosférica
P_{rotor}	Pressão do rotor
ρ_{ar}	Massa específica do ar
μ_{ar}	Viscosidade absoluta do ar
d_e	Diâmetro do êmbolo
m_e	Massa do êmbolo
r_e	Raio externo do rotor
r_i	Raio interno do rotor
$\dot{\theta}$	Rotação do rotor
D_{tubo}	Diâmetro do tubo
$D_{\hat{e}mbolo}$	Diâmetro do êmbolo
b_e	Largura do êmbolo
e	Espessura da camada de ar entre o tubo e o êmbolo
A_e	Área do êmbolo

P_e

Peso do êmbolo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 JUSTIFICATIVA	20
4 REFERENCIAL TEÓRICO	21
4.1 TEORIA DIDÁTICA NA ENGENHARIA	21
4.1.1 FERRAMENTAS DIDÁTICAS EXISTENTES NO ENSINO DE CONTROLE ...	22
4.2 TEORIA DE CONTROLE ANALÓGICA E DIGITAL	23
4.2.1 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROLE	23
4.2.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	25
4.2.3 RESPOSTA TRANSITÓRIA E PERMANENTE	26
4.2.4 ESTABILIDADE	29
4.2.5 TIPOS DE CONTROLADORES	30
4.2.6 MÉTODOS PARA O PROJETO DE CONTROLADORES	31
4.2.7 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS	33
4.2.8 CONTROLADOR DIGITAL	34
4.3 MICROCONTROLADORES	37
4.4 MODELAGEM DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA	38
5 MATERIAIS E MÉTODOS	41
5.1 DESCRIÇÃO FÍSICA E ESTRUTURAL DO SISTEMA	41
5.2 IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA	54
5.3 INTERFACE DE USUÁRIO	57
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
6.1 MODELAGEM DESENVOLVIDA PARA O SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA	62
6.2 LINEARIZAÇÃO DA MODELAGEM PROPOSTA PARA O SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA	66
6.3 IDENTIFICAÇÃO DE PLANTA	70
6.4 ANÁLISES DA MODELAGEM	71
6.5 SINTONIA DO CONTROLADOR PID	72
6.6 ESTUDO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA	73
7 CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	80

APÊNDICE A – MANUAL DE INSTRUÇÕES	83
APÊNDICE B – DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÕES	94
APÊNDICE C – CÓDIGO IMPLEMENTADO NA PLATAFORMA ARDUINO UNO	100

1 INTRODUÇÃO

A educação é um recurso de mudança social capaz de dispor aos seres humanos à autonomia necessária para optar com sabedoria. Ela desenvolve a formação de muitos cientistas, que nos oferecem a concepção de concretizar os ideais, e, conseqüentemente, nos recompensa com o conhecimento. De acordo com o postulado por Nelson Mandela: “A educação é a arma mais poderosa que se pode usar para mudar o mundo” (PORVIR, 2013).

A formação e a prática profissional do ensino oferecem aos educadores inúmeros desafios, necessitando-se de um permanente estado de atualização de conhecimentos e estratégias de ensino. Considerando essa atividade prática como uma das importantes ferramentas para alcançar a evolução na engenharia.

Os professores, por sua vez, têm a missão de favorecer o desenvolvimento do aluno, orientando-o nas tarefas, oferecendo-lhe novas leituras ou explicações, sugerindo-lhe investigações, proporcionando-lhe vivências enriquecedoras e favorecedoras à sua ampliação do saber (HOFFMANN, 1994), ou seja, elaborar e aplicar sequências de ensino, de modo que o próprio aluno se insira em uma dinâmica interativa e autônoma para conquistar e promover a própria aprendizagem (ARTIGUE, 2002).

O ensino da engenharia está interligado com a Engenharia Didática, que surgiu na década de 80 no contexto da didática francesa. Com ela, foi viável o desempenho das relações entre a pesquisa e a ação didática em sistemas educacionais e, como instrumento de desenvolvimento, a atribuir um papel às produções de pesquisa da engenharia obtidos na confluência entre o conhecimento teórico e o conhecimento da prática (CARNEIRO, 2005). Nesse sentido, o objeto desta investigação está intimamente relacionado com os recursos da produção de sequências didáticas para o ensino de ciências que têm meios para aprimorar o desenvolvimento, teste e avaliação, como também têm a serventia de um referencial metodológico que integrem pesquisa a análise de um material empírico.

Considerando a engenharia didática como importante ferramenta de ensino para despertar a curiosidade e o interesse do acadêmico, além de propiciar um melhor entendimento da teoria, algumas universidades têm

buscado cada vez mais promover aulas práticas utilizando ferramentas didáticas, pois nessas aulas os alunos têm a oportunidade de interagir com instrumentos e processos específicos relacionados à atuação profissional da engenharia (DAL; ZORZAN; DARONCH, 2013).

A produção de conhecimentos na área de educação tem sido objeto de investigação de diversas pesquisas do tipo “estado da arte”, no qual pesquisadores informam-se e objetivam-se conferir dos utensílios já existentes e criam as possibilidades, tendências e escolhas metodológicas e teóricas para gerar novas produtividades do saber (FERREIRA, 2002).

Tendo em vista que a inclusão da atividade prática em um âmbito estudantil é uma ação satisfatória, então, neste trabalho, foi desenvolvida uma plataforma educacional para o ensino da teoria de controle baseado no sistema de levitação eólica. A construção desse módulo didático para a instituição é uma ótima oportunidade de aperfeiçoar a infraestrutura do laboratório de controle de uma maneira específica e econômica. Em suma, a ferramenta está de acordo com a ementa de controle, sendo ela de fácil uso e modificável, além disso, será evitada a necessidade da universidade adquirir ferramentas comerciais que possuem custo-benefício muito superior ao valor a ser investido na construção de um exemplar próprio. Visto que as ferramentas comerciais existentes, como o módulo 2325 da Datapool que permite fazer experiências de malha de controle de temperatura e nível são instrumentos de alto custo, difícil adaptação e tem elevados custos para a manutenção (DATAPOOL, 2013).

Sem contar que um protótipo construído em uma Instituição de Ensino Superior, pelos seus alunos e professores, resulta em um equipamento de manutenção facilitada, personalizado para uma dada finalidade e proporciona ao mesmo tempo um processo de independência tecnológica, bem como, contato com as tecnologias mais atuais, além de ser uma oportunidade singular para seus construtores sedimentarem grande parte do conhecimento teórico adquirido na sala de aula (CARMO et al, 2008).

Inicialmente, foi projetada uma ferramenta educacional para o ensino da teoria de controle baseada na levitação eólica de um êmbolo. O *hardware* foi estruturado por um sistema mecânico acoplado a um tubo transparente, um ventilador de corrente contínua, um flutuador impresso em 3D, um sensor de posição ultrassônico e circuitos de acionamentos. O sensor ultrassônico foi

usado para mensurar a altura do êmbolo. O PID digital foi programado em um Arduino UNO, o qual determina a intensidade adequada para o atuador corrigir o erro entre as alturas desejadas e medidas. O microcontrolador é flexível a modificações de alguns sinais e parâmetros através da interface de *software*.

Ao término da montagem do protótipo, foi feito um estudo para observar se o produto atingiu os benefícios de uma ferramenta educacional para a compreensão de alguns conceitos de controle.

Considerando-se essas circunstâncias, faz-se necessário situar o leitor no que tange a esta proposta, para tanto, o Capítulo 2 corresponde ao ponto de partida para o projeto, que inclui o objetivo geral e os objetivos específicos. No Capítulo 3 será apresentada a justificativa, no qual são argumentadas as razões plausíveis para tal pesquisa ser lida e desenvolvida. O Capítulo 4 é definido como o referencial teórico, no qual são apresentadas as teorias dos controladores em estudo e suas especificações, incluindo uma breve explicação relacionada com a teoria de microcontroladores. O Capítulo 5 é composto pelos materiais utilizados e a metodologia que foi empregada para a implementação do protótipo educacional, e nele está ilustrado um diagrama de blocos o qual vai referenciar as etapas seguidas no projeto. O Capítulo 6 traz a modelagem do protótipo que foi desenvolvido, como também os experimentos e os resultados do trabalho como um todo. Por fim, o Capítulo 7 é destinado as conclusões.

2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho de conclusão de curso são apresentados neste capítulo, e estão divididos em Objetivo Geral e Objetivos Específicos, onde contempla-se a consolidação de uma base para alcançar o resultado desejado.

2.1 OBJETIVO GERAL

Projetar e desenvolver uma ferramenta educacional que aborda a teoria clássica de controle automático, com a finalidade de auxiliar os professores no ensino e facilitar a compreensão de alguns conceitos importantes aos estudantes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estruturar o projeto físico de apoio pedagógico aos professores que possibilite testar e facilitar o entendimento de conceitos básicos da teoria de controle de forma guiada, prática, experimental e visual;
- Construir uma ferramenta didática de controle que possa ser replicada a um custo baixo de aquisição e manutenção;
- Projetar um sistema de fácil manuseio que possibilite a eficiência e a praticidade;
- Viabilizar a adaptação e modificação para outras configurações de montagem e desenvolvimento futuros, ou em futuros projetos de TCC.

3 JUSTIFICATIVA

A dificuldade de obter uma ferramenta educacional prática para a consolidação de estudos na área de controle foi a preponderante motivação para o desenvolvimento desse projeto de trabalho de conclusão de curso (TCC), uma vez que a ferramenta didática vai estabelecer uma assessoria para desenvolver e suprir algumas deficiências, como a relação entre a teoria e a prática, a visualização física de conceitos estudados na aula e a concretização do aprendizado através da experiência. Mas, como os equipamentos no mercado especializado obtêm elevados preços e são de difícil aquisição e manutenção, se torna benéfico um sistema de controle automático próprio, dado que idealiza um material didático de forma simples, de fácil replicação e de baixo custo, na qual professores e alunos podem facilmente confeccioná-los e incorporá-los em suas aulas trazendo benefícios ao professor no momento de ensinar e ao aluno no instante de aprender. Outro ponto relevante é que as plataformas comerciais não estão projetadas segundo a ementa que devem ser seguidas nas disciplinas de controle de sistemas lineares do curso de engenharia eletrônica e engenharia de computação da UTFPR-Toledo.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados a importância e a evolução da educação na área da engenharia, seguido das fundamentações teóricas necessárias para o projeto em desenvolvimento.

4.1 TEORIA DIDÁTICA NA ENGENHARIA

O aprendizado é o melhor requisito para alcançar novos conhecimentos, pois através dele as pessoas adquirem novas habilidades, e conseqüentemente criam melhores expectativas de desempenho.

Na revista Nova Escola, Ausubel declara que há duas possibilidades para que a aprendizagem ocorra: o conteúdo deve ser potencialmente revelador e o estudante precisa se relacionar de maneira consistente e não arbitrária ao material trabalhado (FERNANDES, 2011).

Posto que a significativa do ensino é incorporada pelo docente, então muitos filósofos e educadores fizeram a análise de como chegar no êxito do ensino-aprendizagem. Por conseguinte, constataram que a didática é uma importante plataforma educacional (ARTIGUE, 2002).

A didática é o estudo daquilo que se relaciona com o saber dos alunos, não só pelos assuntos a serem aprendidos, como também o modo pela qual os estudantes se apropriam desses conteúdos. A didática pode ser definida como os trabalhos dos conteúdos que precedem a aula, enquanto a pedagogia se preocupa com a interação em sala de aula (GAUTHIER, 1998).

Baseando nessas afirmações, Brousseau, estruturado pelos trabalhos de Artigue, concretizou os ideais e pressupostos da criação da Engenharia Didática, a qual refere-se a um processo empírico que objetiva conceber, realizar, observar e analisar as situações didáticas (ARTIGUE, 1991). Esse processo empírico na engenharia está relacionado com as ferramentas didáticas, que são ferramentas de auxílio para a realização de experimentos e possibilita ao operador montar diversos sistemas variando seus parâmetros, se familiarizando com os componentes e ao mesmo tempo visualizando na prática a teoria apresentada em aula (BROUSSEAU, 2002).

4.1.1 FERRAMENTAS DIDÁTICAS EXISTENTES NO ENSINO DE CONTROLE

Os laboratórios das faculdades relacionam o estudante de engenharia com as plataformas didáticas para que desenvolva habilidades e possa atender as necessidades humanas. Além disso, esses laboratórios também podem servir como utensílio para a preparação da criatividade dos estudantes, permitindo a eles desenvolverem inúmeras aplicações com as mesmas metodologias e refletir esta experiência ao mundo real (PEKELMAN; MELLO, 2004).

Um dos recursos didáticos existentes de ensino que vêm sendo desenvolvidos em muitas universidades são os *softwares* de simulações. Eles por sua vez, proporcionam através de inúmeras possibilidades de funcionamento prático de simulação diversas questões ensinadas, um exemplo é o *Labview*.

Dentre os módulos didáticos para o ensino de controle existentes no mercado está o módulo 2325 (DATAPOOL, [2018]). Este módulo, mostrado na Figura 1, aborda os conteúdos da teoria de controle e permite fazer experiências de malha de controle de temperatura e nível, como também identifica e modela sistemas dinâmicos de aquecimento e nível de reservatórios, o qual é composto por um reservatório com aquecimento resistivo e transdutor de temperatura, servobomba e transdutor de nível.

Figura 1 – Módulo 2325 – Controle de Temperatura e de Nível



Fonte: Datapool, 2018.

Este módulo e outros, como o módulo TNPV2101, TNPV2325 e 2208 infelizmente têm custo alto para os laboratórios, devido aos tipos de instrumentos que eles são confeccionados, sem contar que são de difíceis adaptações, custo de manutenção elevados, não têm uma interface de *software* com o usuário (DATAPOOL, [2018]).

4.2 TEORIA DE CONTROLE ANALÓGICO E DIGITAL

Os sistemas de controle já são exercidos desde os primórdios do nosso planeta, um exemplo antigo é o ciclo biológico (NISE, 2002). Mas, de acordo com Ogata (1998), o primeiro trabalho significativo em controle automático foi um controlador centrífugo para o controle de uma máquina a vapor no século XVIII, esse trabalho foi executado por James Watt.

Desde então, os sistemas de controle vêm se desenvolvendo rapidamente. Hoje, temos inúmeras aplicações em sistemas de controle nas indústrias, nos comércios, nos hospitais, nos parques de diversões e nos sinais de trânsito. Como pode ser visto, esta área é de grande utilidade no desenvolvimento tecnológico, portanto é estudada em vários cursos de engenharia.

Desta forma, a seguir será realizada uma breve revisão dos tópicos mais importantes da teoria de controle, tanto analógico quanto digital, e que foram usados no decorrer deste projeto.

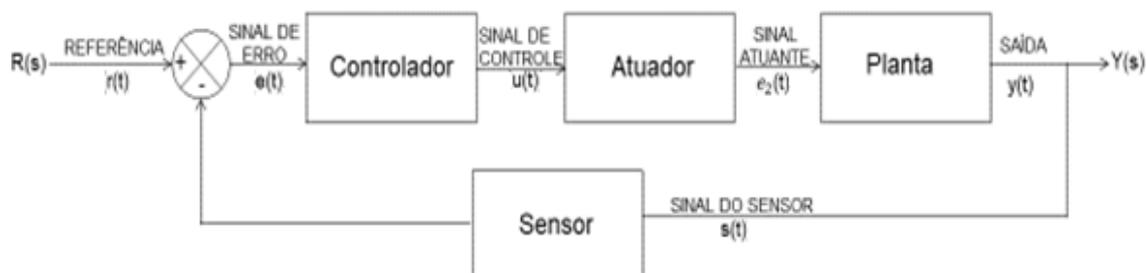
4.2.1 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS DE CONTROLE

Para desenvolver ou criar uma análise sobre sistemas de controle é fundamental a compreensão de alguns princípios básicos, que serão ilustrados na Figura 2 (OGATA, 2002).

- **Planta:** É o objeto físico a ser controlado, ou seja, é a parte de um equipamento que interage com as outras partes para realizar uma determinada operação.
- **Variável controlada:** É a condição que é medida e fornecida pela planta como variável de saída.

- **Referência:** Valor desejado da variável controlada e especificado na entrada do sistema de controle.
- **Variável manipulada:** É a condição alterada pelo controlador para manipular um comportamento desejado na saída.
- **Perturbações:** É quando o sistema age de forma indesejada por motivos de sinais externos afetarem a variável controlada.
- **Sensor:** Dispositivo que produz um fenômeno mecânico ou elétrico que está correlacionado à variável do processo de medida, ou seja, eles fornecem as informações necessárias para as quais as ações do controle são baseadas. Deste modo, podemos dizer que eles são os olhos dos controladores e, portanto, quando acontece algum defeito nos instrumentos de medida podem acarretar um impacto significativo no controlador.

Figura 2 – Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, Nise (2002) relata que um sistema compõe em subsistemas e processos que têm o propósito de controlar suas saídas. Estes sistemas de controle podem ser descritos como:

- **Malha aberta (MA):** São sistemas nos quais não existe a realimentação e sua saída não é mensurada para realizar a correção (OGATA, 2002).
- **Malha fechada (MF):** São sistemas com realimentação, no qual há um sinal de erro, que é representado como a diferença entre o sinal de referência e o sinal do sensor, que é uma amostra da saída. O controlador é acionado para reduzir o erro e fornecer o valor necessário para que o atuador aja na planta de tal forma que esta

possa devolver uma saída mais próxima do valor desejado (sinal de referência). Na Figura 2 é mostrado um sistema de controle em malha fechada.

4.2.2 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A representação matemática da dinâmica do sistema é conhecida como função de transferência (FT), e é denotada como $G(s)$. Especificamente a FT é definida como a relação entre a entrada $R(s)$ e a saída de um sistema $Y(s)$, isto é (NISE, 2002):

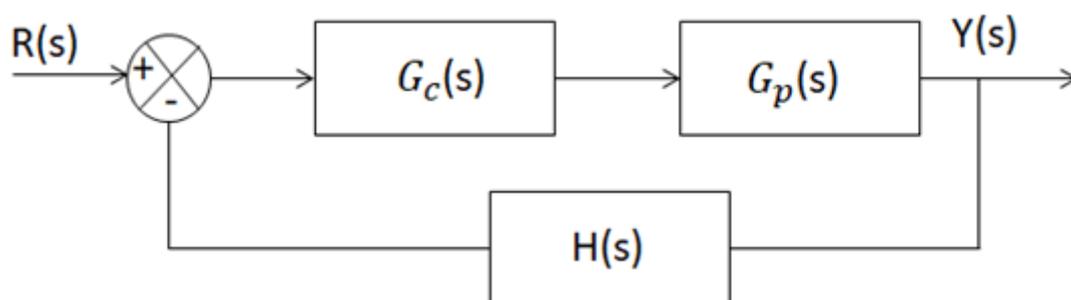
$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)}. \quad (1)$$

Para um sistema com realimentação negativa, como mostrado na Figura 3, a FT de malha fechada pode ser calculada a partir da FT de malha aberta da seguinte forma:

$$G_f(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_p(s)H(s)}, \quad (2)$$

onde $H(s)$ é a FT do sensor, $G_c(s)$ a FT do controlador e $G_p(s)$ a FT da planta.

Figura 3 – Diagrama de sistema de controle em malha fechada



Fonte: Autoria própria.

Geralmente a FT fica em função de uma divisão de polinômios em s , sendo que as raízes do polinômio do numerador são chamadas de zeros e as do denominador de polos. A ordem do polinômio do denominador dá a ordem do sistema, e este, quando igualado a zero, recebe o nome de equação característica. Para o sistema discreto a função de transferência tem as mesmas características da FT de sistemas contínuos, porém fica em função de uma divisão de polinômios em z , como mostrado na Equação (3).

$$G(z) = \frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{b_0 z^m + b_1 z^{m-1} + \dots + b_{m-1} z + b_m}{a_0 z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_{n-1} z + a_n}. \quad (3)$$

4.2.3 RESPOSTA TRANSITÓRIA E PERMANENTE

O estudo da resposta temporal de um sistema de controle apresenta dois segmentos: a parte transitória que é a resposta que o sistema oferece ao percorrer um período de tempo de funcionamento, ou seja, o tempo que o sistema leva para “acomodar” ou “reagir” a uma nova entrada. Já a outra é a parte de regime permanente, o qual é caracterizado como a resposta do sistema para ciclos longos de funcionamento (DA SILVA, 2000). Dessa forma, a resposta do sistema, $y(t)$, é dada por:

$$y(t) = y_{tr}(t) + y_{ss}(t), \quad (4)$$

onde $y_{tr}(t)$ é a resposta transitória e $y_{ss}(t)$ é a resposta permanente.

O desempenho em regime transitório de um sistema é avaliado, em geral, pela resposta temporal do sistema a uma entrada do tipo degrau unitário.

Para descrever as características da resposta transitória de segunda ordem, temos duas grandezas de malha fechada que ficam em função desses parâmetros e das características da resposta no tempo (NISE, 2002):

- **Frequência natural não amortecida** (ω_n): A frequência de oscilação do sistema de amortecimento.
- **Fator de amortecimento relativo** (ζ): Descreve a oscilação da resposta de um sistema independente da escala de tempo, e permite classificar o sistema, assim:

$\zeta > 1$ sistema super amortecido.

$\zeta = 1$ sistema criticamente amortecido.

$\zeta < 1$ sistema sub-amortecido.

Para um sistema de segunda ordem a FT padrão está dada por:

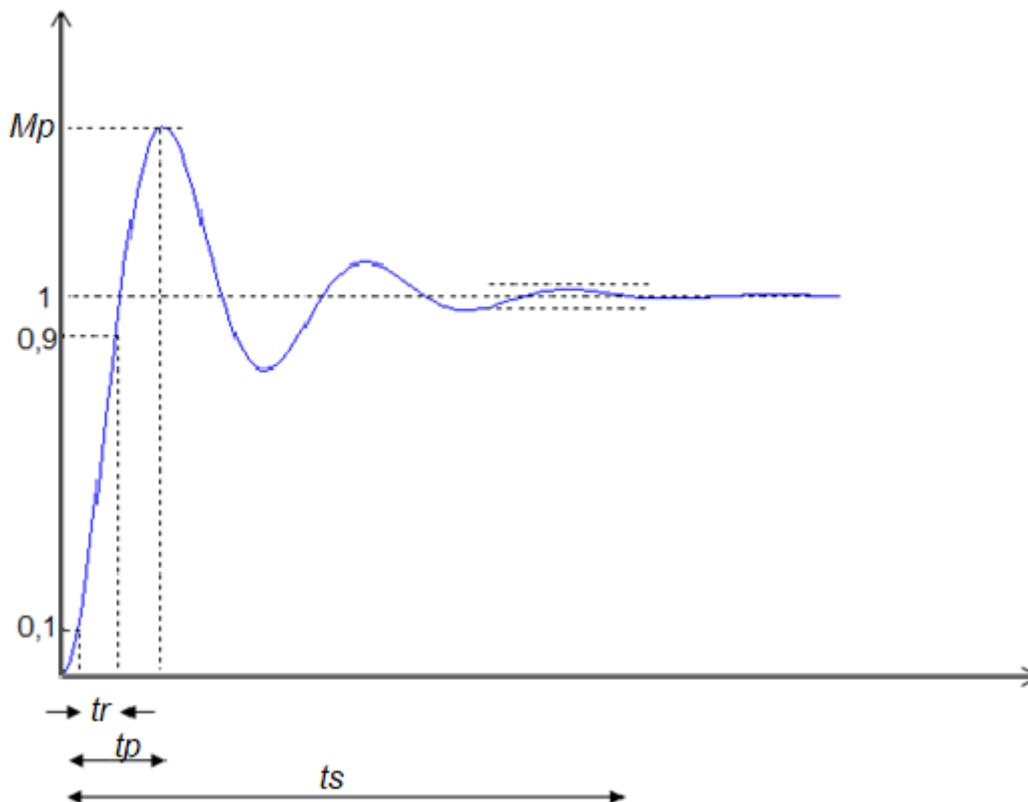
$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

Portanto os polos também ficam em função dos anteriores parâmetros, assim:

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} = -\sigma \pm j\omega_d, \quad (6)$$

onde ω_d é a frequência natural amortecida e σ é o fator de amortecimento real.

Figura 4 – Resposta transitória de um sistema de segunda ordem sub-amortecido e suas características



Fonte: Adaptado de NISE, 2002.

Depois de compreender essas grandezas, podemos prosseguir, em funções delas, com as especificações usadas em sistema de segunda ordem, as quais são mostradas na Figura 4 e descritas a seguir:

- ❖ **Máximo sobressinal (M_p):** Máximo valor de pico da curva de resposta medido com relação ao valor unitário (OGATA, 1998). Este parâmetro é dado em percentual e calculado assim:

$$M_p (\%) = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \times 100\% . \quad (7)$$

- ❖ **Tempo de acomodação (t_s):** Tempo necessário para que a curva de resposta alcance valores dentro de uma faixa em torno do valor final e alí permaneça. Esta faixa varia entre $\pm 2\%$ ou $\pm 5\%$ da porcentagem absoluta do valor final, e a qual pode ser calculada segundo os anteriores critérios como segue (OGATA, 1998):

$$t_s = \frac{K_1}{\zeta\omega_n}; \quad K_1 = \begin{cases} 4, \text{critério} \rightarrow \pm 2\% \\ 3, \text{critério} \rightarrow \pm 5\% \end{cases} . \quad (8)$$

- ❖ **Tempo pico (t_p):** Tempo necessário para que a resposta atinja o primeiro pico do máximo sobressinal, o qual é calculado como segue (OGATA, 1998):

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} . \quad (9)$$

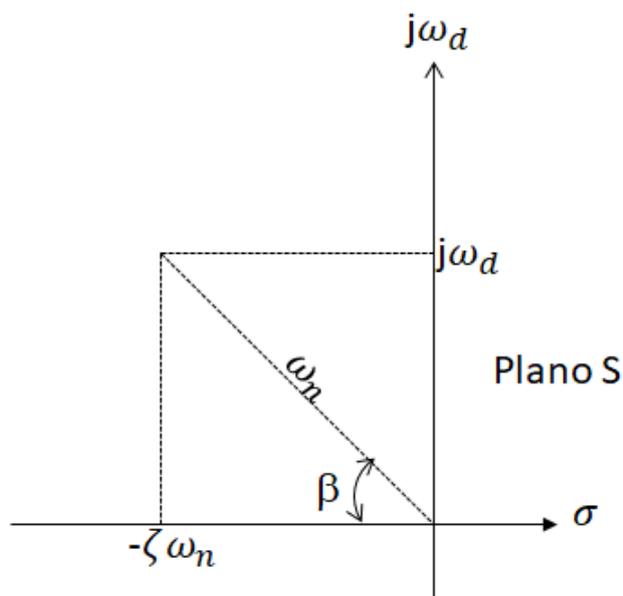
- ❖ **Tempo de subida (t_r):** Tempo necessário para que a resposta passe de 10% a 90% ou também de 0 a 100% do seu valor final, o qual pode ser calculado como:

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} , \quad (10)$$

onde β é o ângulo de fase do polo de malha fechada entre as partes real e imaginária do plano s, conforme mostrado na Figura 5, e β é dada por:

$$\operatorname{tg}^{-1} \beta = \frac{\omega_d}{\zeta \omega_n}. \quad (11)$$

Figura 5 – Definição gráfica do ângulo β para cálculo do tempo de subida



Fonte: Autoria própria.

4.2.4 ESTABILIDADE

A estabilidade de um sistema é determinada pelas suas perturbações e pela sua resposta às entradas, ou seja, um sistema é estável quando se conserva em repouso a não ser que seja excitado por uma fonte externa, mas o sistema volta em equilíbrio. Portanto, quando toda sequência limitada de entrada produzir uma sequência limitada de saída considera-se que ela é estável (DISTEFANO, 1975). O sistema é dito instável se a resposta natural crescer sem limites, pois irá causar danos ao sistema, às instalações próximas, ou à vida humana (NISE, 2002).

O processo de verificar se o sistema é estável envolve o conceito da equação característica, a qual é determinada igualando o denominador da FT a zero. E as raízes desta são conhecidas como polos da função de transferência em malha fechada. Conforme mencionado por Distefano (1975), para o sistema

ser estável todas as partes reais das raízes da equação características do sistema têm que estar alocadas na parte negativa do plano s , pois vai assegurar que a resposta ao impulso diminua exponencialmente com o tempo.

Desta forma, percebe-se que há vários métodos para determinar a estabilidade, porém o mais comum é o método de Rough-Hurwitz (OGATA, 2010).

4.2.5 TIPOS DE CONTROLADORES

Em diversos processos industriais os controles automáticos são muito utilizados, podendo ser encontrados diferentes tipos, como: Proporcional (P), Proporcional Integral (PI) e Proporcional Integral Derivativo (PID). A seguir serão descritos cada um deles.

- 1. CONTROLE PROPORCIONAL (P):** Trata-se de um vínculo entre o ganho proporcional e o erro, que gera um valor de atuação no circuito. É operado para beneficiar a resposta transitória de um sistema, porém não consegue eliminar o erro da resposta em regime permanente, somente concede a assistência para o reduzir, pois o mesmo aumenta o sobressinal (OGATA, 2010). A função de transferência é dada por:

$$G_c(s) = K_p, \quad (12)$$

onde K_p é o ganho proporcional.

- 2. CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL (PI):** É a união da ação proporcional e integral para aperfeiçoar a resposta transitória e eliminar o erro em regime permanente. A função de transferência é dada por:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad (13)$$

onde T_i é denominado de tempo integral, igual a $\frac{K_p}{K_i}$, onde K_i é a constante integral.

3. CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID): É

um controlador com a junção de três controladores: proporcional, integral e derivativo (OGATA, 2002). Este controlador é usado geralmente em sistemas de segunda ordem por unir as melhorias das ações que os ordena (NISE, 2009). A FT deste controlador está dada por:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (14)$$

onde T_d é o tempo derivativo que é igual a $K_p \times K_d$, onde K_d é o ganho derivativo. Quanto maior o ganho proporcional K_p maior a velocidade de resposta do sistema, porém, mais oscilatório. O tempo integral T_i é responsável por eliminar o erro em regime permanente. Já o tempo derivativo T_d é responsável por tornar o sistema mais estável (CHEN, 1993).

4.2.6 MÉTODOS PARA O PROJETO DE CONTROLADORES

Um projetista, antes da elaboração de um controlador, deverá escolher a ação de controle adequada para o sistema controlado, pois cada sistema tem parâmetros que se desejam controlar, sejam esses no domínio do tempo ou no domínio da frequência (OGATA, 2010).

Existem diversas técnicas para o cálculo dos parâmetros do controlador, tanto analíticas quanto empíricas. Dentro das analíticas podem ser encontradas: método comparativo entre equações características, usando o Lugar Geométrico das Raízes (LGR), e alocação de polos e projeto de observadores usando o método de espaço de estados (OGATA, 2010). Dentro dos métodos experimentais, mais conhecidos como métodos de sintonia,

encontram-se os famosos métodos de Ziegler-Nichols (Z-N) (OGATA, 2010). A seguir será descrito o método em malha fechada.

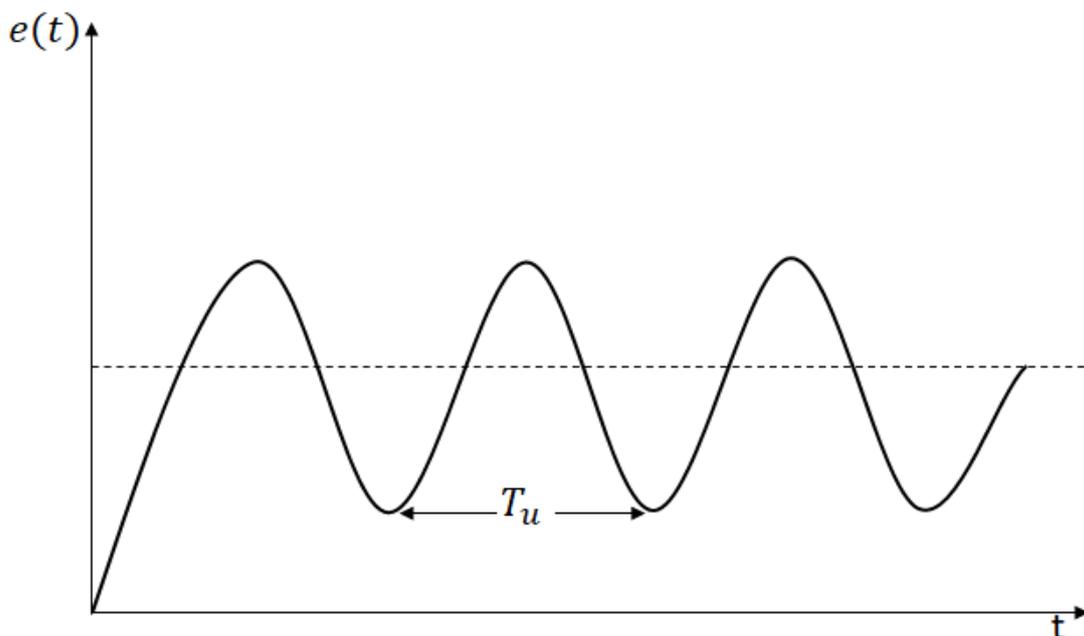
Os métodos de Ziegler-Nichols foram introduzidos em 1942 e hoje são considerados clássicos. Esses métodos são aplicados para obter uma mesma resposta pré-especificada para um sistema de malha fechada, onde tem-se uma resposta ao degrau unitário, na qual a amplitude do segundo sobressinal é aproximadamente 25% da amplitude do primeiro sobressinal (Chen, 1993).

Deste modo, o método Ziegler-Nichols tem os seguintes passos:

- a) reduzir as ações integral e derivativa ao seu efeito mínimo;
- b) iniciar o processo de ganho reduzido;
- c) aumentar o ganho até que a variável controlada entre em oscilações com amplitude constante, conforme ilustrado na Figura 6, onde neste ponto o ganho é chamado de K_u e o período das oscilações T_u .

Portanto, os parâmetros dos controladores são definidos de acordo com a Tabela 1.

Figura 6 – Exemplo de resposta transitória com oscilação constante



Fonte: Adaptado de CHEN, 1993.

Tabela 1 – Parâmetros dos controladores estimados mediante o método de Ziegler-Nichols

Tipo de controlador	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{T_u}{K_u}$	∞	0
PI	$\frac{0.9T_u}{K_u}$	$\frac{K_u}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2T_u}{K_u}$	$2K_u$	$0.5K_u$

Fonte: Autoria própria.

4.2.7 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Para poder analisar uma planta e/ou projetar um controlador é necessário conhecer a FT da planta, no entanto, nem sempre ela é conhecida, portanto é necessário aplicar um método para identificá-la. A seguir será apresentado o método de identificação de Mollenkamp.

Método de identificação de Mollenkamp: Este método foi desenvolvido para o sistema de segunda ordem, que são sistemas superamortecidos ou subamortecidos, os quais têm, respectivamente, a seguinte função de transferência (COELHO, 2004).

$$G_1(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}, \quad (15)$$

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K\omega_n^2 e^{-\theta s}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (16)$$

onde τ_1 e τ_2 são instantes de tempo.

Para determinar os parâmetros da FT é necessário determinar os valores de três instantes de tempo t_1 , t_2 e t_3 da resposta ao degrau. Os quais são os instantes que o valor da saída é respectivamente 15%, 45% e 75% do valor final. Para calcular os parâmetros da FT são aplicadas as seguintes equações:

$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1}, \quad (17)$$

$$\zeta = \frac{0.805 - 5.547(0.475 - x)}{x - 0.356}, \quad (18)$$

$$f_2(\zeta) = \begin{cases} 2.6\zeta - 0.6, & \zeta \geq 1 \\ 0.708(2.811)^2, & \zeta < 1 \end{cases}, \quad (19)$$

$$\omega_n = \frac{f_2(\zeta)}{t_s - t_1}, \quad (20)$$

$$f_3(\zeta) = 0.922(1.66)^\zeta, \quad (21)$$

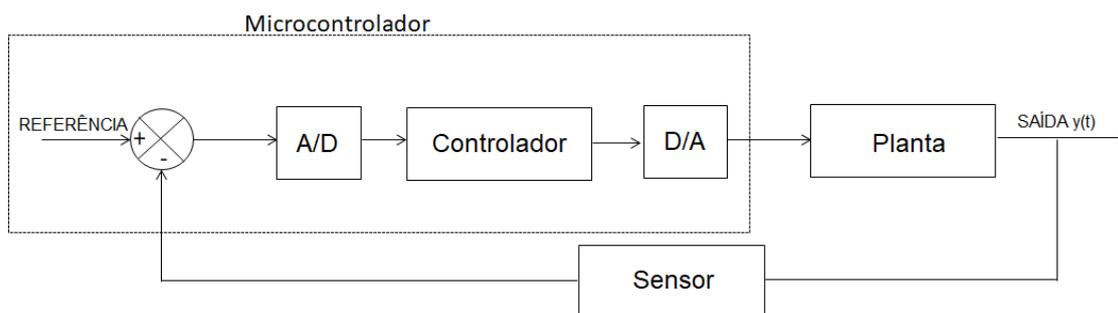
$$\theta = t_2 - \frac{f_3(\zeta)}{\omega_n}, \quad (22)$$

$$\tau_{1,2} = \frac{\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}}{\omega_n}. \quad (23)$$

4.2.8 CONTROLADOR DIGITAL

O controle digital é um controlador que foi adaptado para poder ser usado em um computador, microcontrolador, ou microprocessador, que emite e exerce a função de processamento dos dados, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Digrama de Blocos do Controlador Digital



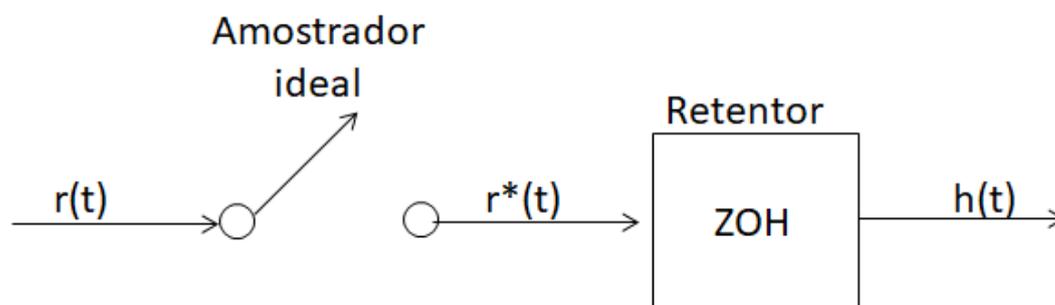
Fonte: Autoria própria.

Na configuração do sistema acima, o controlador recebe o erro de forma digital e executa cálculos a fim de proporcionar um sinal de controle digital. As vantagens do controlador digital são: ter uma flexibilidade, custo baixo, sensibilidade reduzida ao ruído dos sinais e melhor facilidade de configurar e implementar os controles de maior complexidade via *software*, ou seja, o algoritmo de controle (DORF, 1998).

Sistemas de controle discretos têm o aspecto de possuir sinais na forma de trens de pulso ou digitalmente codificados, e o processo de controle frequentemente possui componentes analógicos. Para os conversores de sinais digital-analógico (D/A) e analógico-digital (A/D) é necessário acoplar o componente digital ao dispositivo analógico (KUO; GOLNARACHI, 2003).

O conversor A/D pode ser representado por um amostrador em série com um extrapolador de ordem zero, denominado ZOH (*zero order hold*). O conjunto amostrador-retentor de primeira ordem é ilustrado na Figura 8.

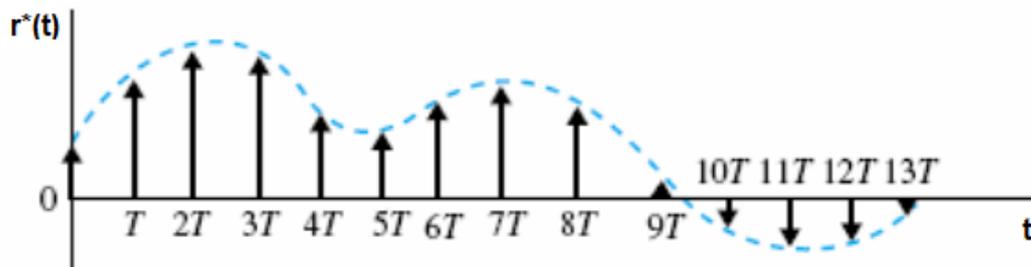
Figura 8 –Dispositivo amostrador-retentor



Fonte: KUO, 2003.

Após a passagem pelo amostrador, o sinal analógico se torna em um trem de pulsos, onde cada pulso é amostrado em intervalos periódicos T , como pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Sinal analógico amostrado com trem de pulsos



Fonte: KUO, 2003.

Após a amostragem de retenção, a conversão analógico-digital converte o valor amostrado em um número binário.

Para obter uma representação matemática pode ser usada a transformada Z, a qual é usada para modelar assim os sistemas com dados amostrados por meio de funções de transferência, permitindo a análise e o projeto de sistema em tempo discreto (NISE, 2002).

A transformada Z de um sinal discreto $x[n]$ é definida como:

$$X(z) = Z\{x[k]\} = \sum_{k=0}^{\infty} x[k]z^{-k} . \quad (24)$$

O método de Tustin ou transformada bilinear baseia-se na transformação de Z para W, e vice-versa. A aplicação de tal método é eficiente, pois tem a propriedade de transformar uma função de transferência contínua estável, em uma função de transferência discreta estável. O que torna esse método benéfico. O método de Tustin diz que o plano W pode obter valores do plano z fazendo a seguinte permuta:

$$W = \left(\frac{z-1}{z+1} \right) \frac{2}{T} . \quad (25)$$

A sua região de estabilidade no plano W será o interior do círculo unitário e na origem do plano z (NISE, 2002).

Após ter a função de transferência pulso da planta convertida em W , $G(W)$ é possível fazer análises e projetos semelhantes ao caso análogo, por exemplo, é possível aplicar o critério de estabilidade de Routh-Hurwitz. No entanto, com relação ao projeto de controladores, algumas considerações são necessárias.

Na implementação do PID é adquirido o PID da seção precedente que se refere a um controlador analógico, mas para poder trabalhar com sinais discretos é necessário adaptar o controlador PID, onde a componente integral é substituída por um somatório, e a derivada por uma diferença de primeira ordem, obtendo a seguinte função de transferência do controlador (CHEN, 1993):

$$G_c(z) = \frac{q_0 z^2 + q_1 z + q_2}{z(z-1)}, \quad (26)$$

onde,

$$q_0 = K_p \left[1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right]; \quad q_1 = -K_p \left[1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{2T_d}{T} \right]; \quad q_2 = K_p \frac{T_d}{T}. \quad (27)$$

4.3 MICROCONTROLADORES

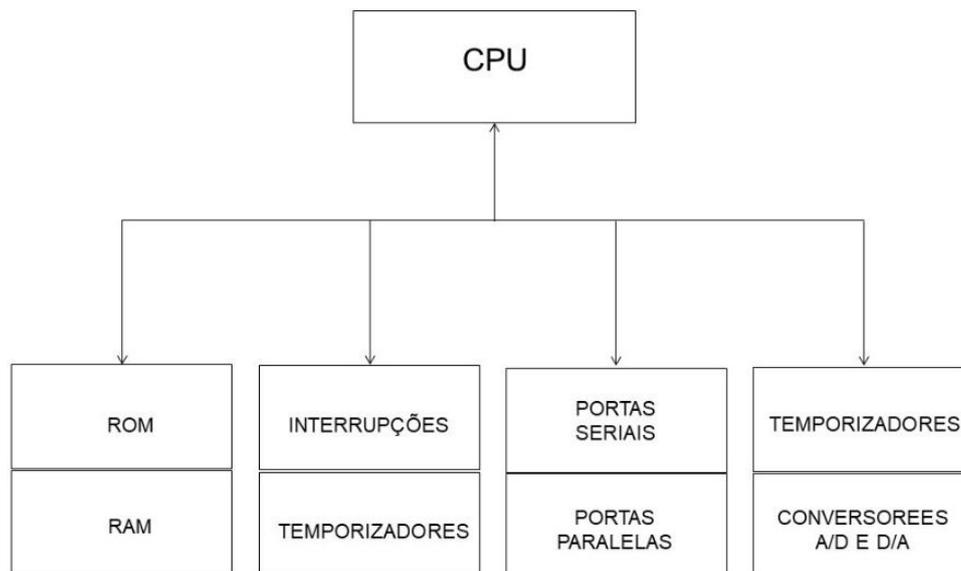
Um microcontrolador é um circuito integrado que apresenta dispositivos e periféricos internos. Através de sua programação, um microcontrolador é capaz de ler valores em seus pinos especificados como entrada e controlar os sinais elétricos nas suas saídas. A sua principal vantagem é que têm uma vasta variedade de interfaces e periféricos com baixo custo. Na Figura 10 é mostrada a arquitetura básica de um microcontrolador.

As facilidades de implementar sistemas de controle com microcontroladores são:

- a) redução do número de componentes;
- b) facilidade manuseio nos algoritmos de controle complexos;
- c) redução no tempo necessário para desenvolver novos projetos;

d) flexibilidade e fácil alteração.

Figura 10 – Diagrama de blocos de um típico microcontrolador



Fonte: Autoria própria.

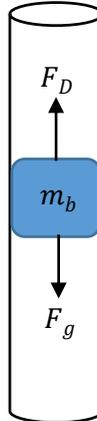
O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica livre, baseado em um microcontrolador com *hardware* e *software* fáceis de serem utilizados. A sua linguagem de programação utilizada é própria da plataforma Arduino, o qual é semelhante à linguagem C/C++, facilitando assim a implementação de programas. Seu ambiente de desenvolvimento, também é próprio, e pode ser facilmente encontrado, por ser de *software* livre (ARDUINO, 2013).

4.4 MODELAGEM DE UM SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA

Propõe-se um simples modelo, em que a dimensão do sistema é simplificada para ser bidimensional. A estrutura do sistema é iniciada a partir da determinação da força do ventilador aplicada no flutuador. A primeira consideração é que o ar flui do ventilador para o flutuador cilíndrico através de um tubo de acrílico fechado. Isto implica que a levitação de ar é um processo pelo qual um objeto é suspenso sem suporte mecânico em uma posição estável, fornecendo uma força para cima que neutraliza a força gravitacional exercida sobre o instrumento. Dado que o movimento horizontal do flutuador é um

equilíbrio assintoticamente estável, as forças verticais que atuam no flutuador ficam localizadas dentro do tubo, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de forças atuantes sobre a esfera



Fonte: Autoria própria.

Aplicando a segunda lei de Newton no sistema, tem-se:

$$\sum F_y = m_b \frac{d^2y}{dt^2} = m_b \frac{dv_b}{dt} , \quad (28)$$

$$m_b \frac{dv_b}{dt} = -F_g + F_D , \quad (29)$$

onde F_g é a força gravitacional e F_D é a força de arrasto que atua sobre o flutuador. As forças mencionadas acima são dadas por:

$$F_g = m_b g \quad (30)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_A A (v_a - v_b)^2 , \quad (31)$$

onde m_b é a massa do objeto a levitar, g é a gravidade, C_D é o coeficiente de arrasto, ρ_A é a densidade do ar, A é a área do objeto exposta ao fluxo de ar ascendente, v_a é a velocidade do ar dentro do tubo e v_b é a velocidade do flutuador.

Combinando as Equações (29), (30) e (31) resulta:

$$m_b \frac{dv_b}{dt} = -m_b g + \frac{1}{2} C_D \rho_A A (v_a - v_b)^2 \quad (32)$$

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho foi arquitetada a uma ferramenta educacional que tem a característica geral de manter um êmbolo em uma altura desejada pelo usuário mediante um sistema de controle, o que permite ser um sistema interativo e visual para a assimilação ou o entendimento de alguns conceitos de controle. Neste capítulo serão apresentados os materiais e as metodologias que foram aplicadas para a desenvolvimento deste trabalho.

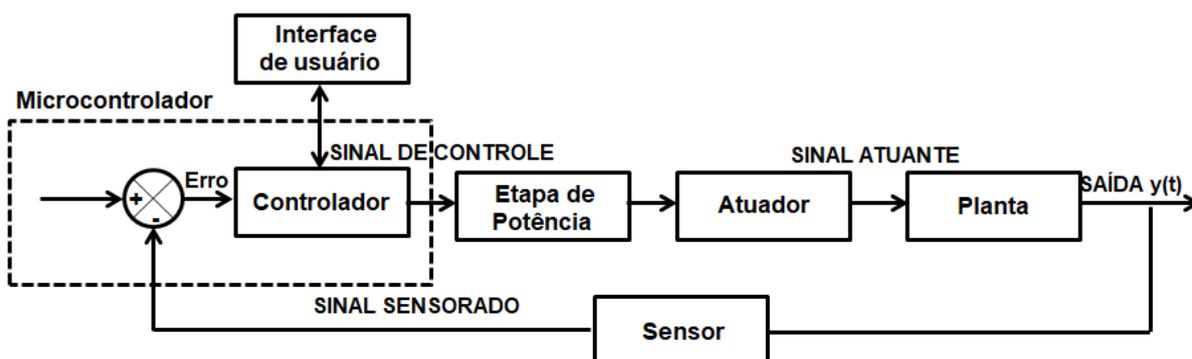
5.1 DESCRIÇÃO FÍSICA E ESTRUTURAL DO SISTEMA

A estrutura do protótipo contém um sensor ultrassônico que tem a funcionalidade de enviar uma onda de alta frequência dentro do tubo transparente e calcular a diferença da altura de uma esfera através da onda refletida, ou seja, a resposta da elevação da bolinha é a diferença do tempo do pulso enviado e o tempo do pulso coletado.

O atuador é assessorado pelo PID digital, que se encontra programado em um Arduino UNO que envia para o atuador a intensidade adequada, de modo que consiga corrigir o erro entre a altura desejada e a medida. O sistema também tem uma conexão do microcontrolador com uma interface de usuário, o qual permite a visualização e a flexibilidade na mudança de sinais e parâmetros.

A Figura 12 representa o diagrama de blocos do sistema de controle com os principais elementos.

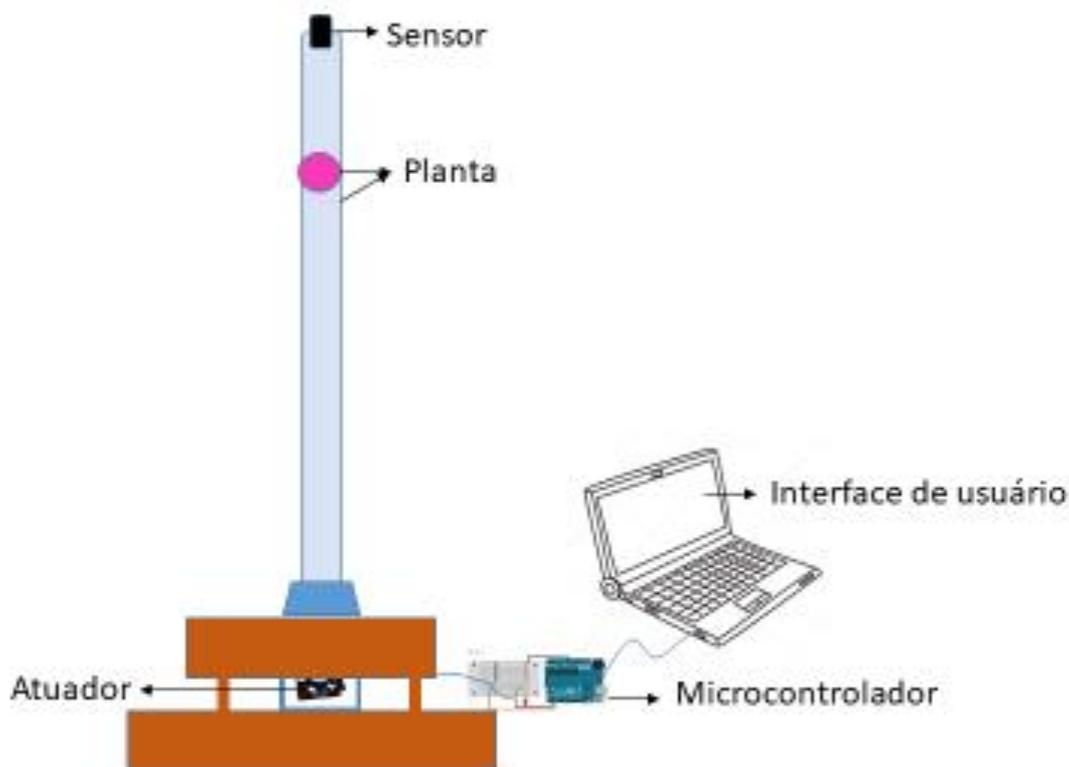
Figura 12 – Diagrama de blocos da ferramenta educacional para o ensino de controle



Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser inferido ou visto, o diagrama de blocos da Figura 12 corresponde com um sistema de controle de malha fechada, o que implica que haverá uma realimentação no sistema de controle. Para melhor compreensão serão descritos e esquematizados os processos que está retratado na Figura 13.

Figura 13 – Representação esquemática do projeto proposto



Fonte: Autoria própria.

a) Tubo transparente: A escolha de um cilindro para a flutuação do elemento foi uma das primeiras dificuldades encontrada no projeto. Primeiramente, foi executado um cilindro através da folha de acetato, conhecido como lâmina de transparência, porém não foi uma solução aplausível, visto que o objetivo é um tubo relativamente grande e que tivesse a convicção de ter o diâmetro correto em toda sua extensão. Com isso, foi sugerida a ideia de um tubo de vidro, mas houve a desvantagem de não ser um material robusto para uma ferramenta educacional. Dessa forma, foi idealizada a proposta de trabalhar com um tubo de PVC, onde foram confeccionados pequenos buracos no tubo e adicionados nesses furos papel *contact* transparente para que houvesse a visualização do

flutuador, no entanto foi verificada a hipótese de não obter uma estabilização do fluxo.

Por fim, foi adquirido um tubo transparente de acrílico que teve a concepção mais apropriada para a ocasião. As dimensões do tubo de acrílico são: 50 *mm* de diâmetro, 2 *mm* de espessura e 1000 *mm* de comprimento, o que permitiu a circulação do êmbolo ao longo do seu comprimento e permitiu também o armazenamento do sensor ultrassônico. A Figura 14 exibe o tubo utilizado que em combinação com o flutuador representa a planta no diagrama de blocos.

Figura 14 – Tubo de acrílico usado na implementação do sistema proposto.



Fonte: Autoria própria.

b) Flutuador: Os primeiros testes foram feitos com uma bolinha de *ping-pong*. A partir destes teve-se o reconhecimento de que essa esfera afeta a capacidade de funcionamento da planta, pois tem um diâmetro padrão que não foi adequado para o tubo. Com isso, foi feito o experimento de uma esfera de isopor, visto que são leves e apresentam diversos tamanhos, contudo não retratou um controle funcional, apresentando diversas perturbações, ou seja, um comportamento indesejado. Deste modo, o uso de um flutuador cilíndrico de polietileno demonstrou ter mais atrito com o ar, que em termos de controle de processos é um fator estabilizante, sendo esta uma vantagem que foi aproveitada. O flutuador cilíndrico de polietileno é um tipo de plástico atóxico, leve, flexível e impermeável. Porém, após alguns testes foram visualizados que por ser um material de polietileno acabava dando muito atrito as partes internas do tubo, portanto, o material selecionado foi um êmbolo impresso em 3D. O seu diâmetro corresponde a 46.5 mm , e tem uma massa de 3.493 g , conforme pode ser visto na Figura 15.

Lembrando que tanto o tubo transparente e o flutuador são objetos físicos a serem controlados, portanto é interessante poder mostrar visualmente toda a operação de controle, e os elementos usados cumprem com esta especificação.

Figura 15 – Flutuador cilíndrico impresso em 3D usado na implementação do sistema



Fonte: Autoria própria.

c) Sensor Ultrassônico HC-SR04: O sensor ultrassônico foi adotado ao projeto por ter uma precisão excelente de posicionamento. O funcionamento deste sensor tem como função enviar um sinal de som ultrassônico no interior do tubo o qual retorna quando encontra um objeto e, então, a velocidade desse som depois de reconhecido permite calcular a distância que teve que retornar, isto é, a distância onde localizou o objeto. A saída desse sensor entra a um conversor A/D interno do Arduino e então há a comparação com o valor de referência.

O sensor adotado foi o Sensor Ultrassônico HC-SR04, que possibilita um alcance de 2 *cm* até 400 *cm*, com uma resolução de 0.3 *cm*. Este sensor apresenta 4 terminais, a saber: *Vcc* que corresponde a alimentação de 5 *V*, 2 pinos Trig e Echo, e o GND que representa o terra. A Figura 16 exemplifica o sensor e na Tabela 2 são descritas as suas características operacionais.

Figura 16 – Sensor Ultrassônico HC-SR04 usado na implementação do sistema proposto



Fonte: MICROCONTROLLERELECTRONICS (2014).

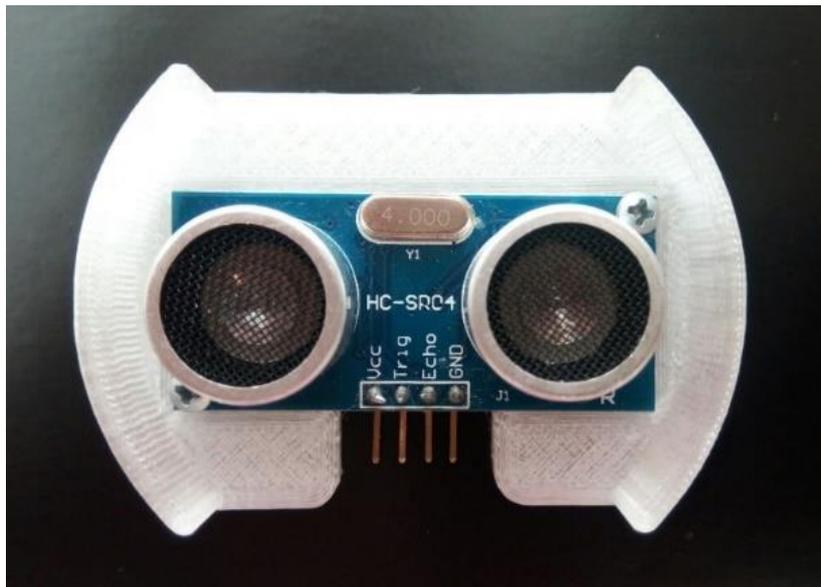
Tabela 2 – Características Operacionais do módulo HC-SR04

Sensor Ultrassônico – Módulo HC-SR04			
Tensão de Operação	DC 5 V	Alcance Máximo	4 m
Corrente de Operação	15 mA	Alcance Mínimo	2 cm
Frequência de Operação	40 Hz	Ângulo de Medição	15°
Dimensão	4 × 20 × 15 mm		

Fonte: Autoria própria.

Para acoplar o sensor à base foi impresso um suporte de material PLA na impressora 3D, o qual é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Base em PLA para o acoplamento do sensor à base do tubo usado na implementação do sistema proposto



Fonte: A autoria própria.

d) Ventilador: O atuador é o responsável pela injeção de fluxo de ar na base do tubo, o qual vai injetar energia à planta através do valor recebido. Sabendo disso, foi empregada a opção de usar ventoinhas de computador, pela capacidade de adaptação do circuito elétrico, pois elas são projetadas para atuar como reguladores de velocidade e dispõem de fios concatenados que aplicam sinais elétricos diretamente no motor.

A princípio foi empregado um ventilador magnético de formato quadrado de $120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 38\text{ mm}$, porém foi necessário construir um funil para centralizá-lo, em consequência de não obter fluxo de ar devido ao vão no centro. À vista disso, foi adquirida uma ventoinha caracol de modelo DF5015SH, com uma tensão contínua de 24 V e uma corrente de 0.17 A ; e nela estão presentes furos para facilitar a adaptação a outras partes do sistema. Tal ventoinha está ilustrada na Figura 18.

Em testes práticos foi compreensível a presença de uma peça que não abafasse o fluxo de ar produzido pelo ventilador, ou seja, quando o flutuador fica próximo da ventoinha há uma perda de carga, por essa razão foram confeccionadas duas peças em 3D, uma para o suporte e outra para estrutura, os quais podem ser visualizadas nas Figuras 19 e 20, respectivamente.

Figura 18 – Ventilador caracol usado na implementação do sistema proposto



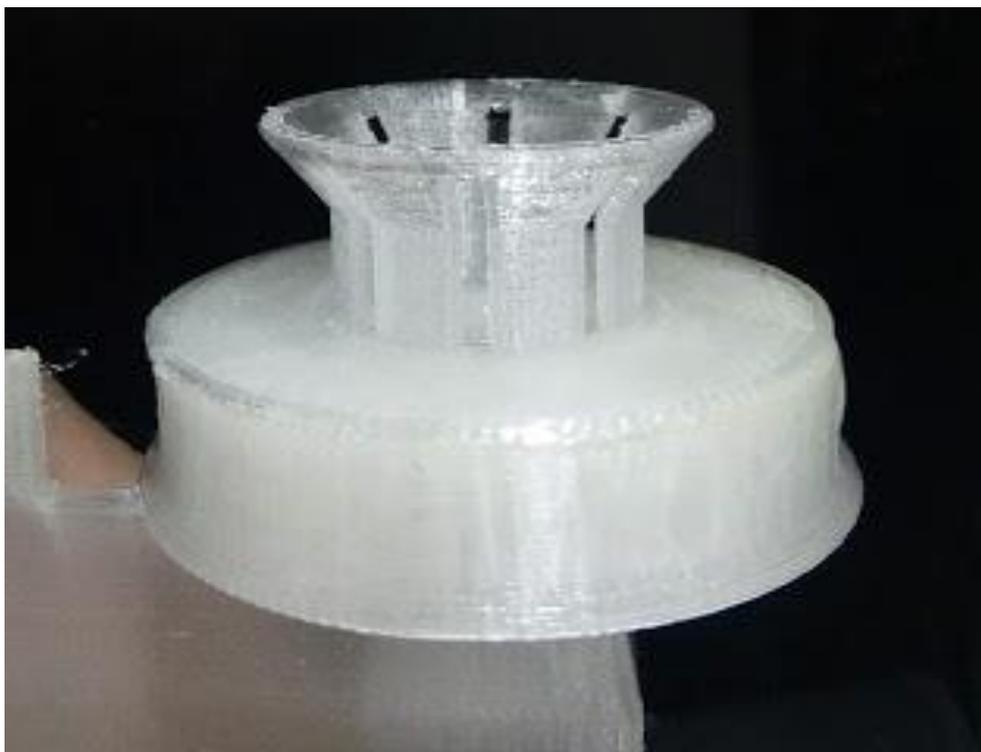
Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – Suporte para a ventoinha em 3D usado na implementação do sistema



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Estrutura de funil em 3D usado na implementação do sistema proposto



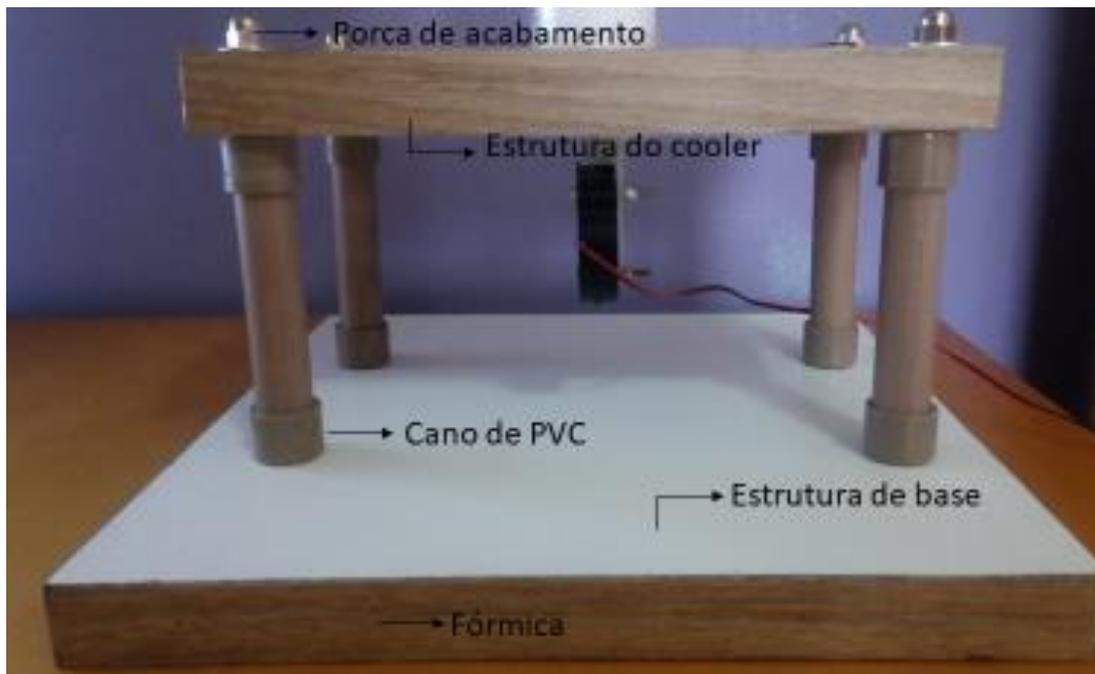
Fonte: Autoria própria.

O controle da velocidade do ventilador é executado através do ajuste de uma tensão contínua, cuja amplitude se associa com a grandeza controlada de forma aproximadamente linear para a faixa de atuação escolhida.

e) Sustentação do Projeto: Para estabelecer o desenvolvimento da proposta foi realizado um suporte que garantisse a sustentação e a movimentação do projeto. Os materiais adotados para a estruturação foram duas placas de madeira na cor branca, uma denominada estrutura de base que mede 30 *cm* de altura e 30 *cm* de comprimento e a outra nomeada estrutura para o ventilador que mede 26 *cm* de altura e 14.5 *cm* de comprimento, observado que haveria a necessidade de uma altura entre o ventilador e a base.

Entre esses dois suportes foram instalados parafusos de barra, porcas e arruelas, e para não ficarem expostos foram revestidos com canos de PVC. Com o intuito de deixá-la melhor esteticamente, foram adicionadas fórmicas de madeira nas laterais, e no final do parafuso foram colocadas as porcas de acabamento. A Figura 21 exhibe as partes da construção da base.

Figura 21 – Sustentação do atuador e da planta finalizado usado na implementação do sistema proposto



Fonte: Autoria própria.

f) Microcontrolador: Para haver um controle sobre o sistema de levitação eólica foi implementado um controlador PID digital. Considerando que o sistema precisa possuir uma estabilidade, foi feito o controle através dos valores proporcional, integral e derivativo.

Tendo em vista que para implementar os dispositivos é preciso de um microcontrolador que tenha internamente rotinas, diferenciador, controlador, e que também se encarregue de compartilhar dados e sinais entre o sistema e a interface de *software*, foi empregada uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* flexível que utiliza o microcontrolador ATmega328P. O modelo oportuno foi o Arduino UNO R3 mostrado na Figura 22, cujas principais especificações são descritas na Tabela 3.

A escolha de apropriar o Arduino UNO R3 ao projeto foi devido à simplicidade da linguagem e à possibilidade de deixar o projeto prático e simples de ser replicado por outros alunos interessados em desenvolver adaptações futuras.

Figura 22 – Arduino UNO R3



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Especificações operacionais do Arduino UNO

Microcontrolador	ATmega328P
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7 – 12 V
Tensão de entrada (limites)	6 - 20 V
Pinos digitais	14 (6 com saída PWM)
Pinos analógicos	6
Memória Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock	16 MHz

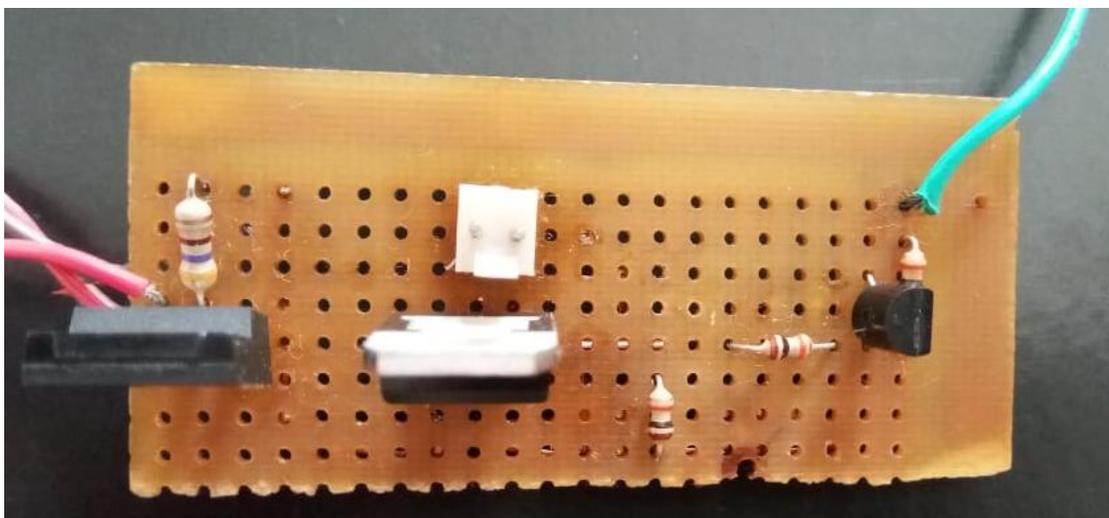
Fonte: Microchip Atmega328P Datasheet.

g) Etapa de Potência: Como o sinal proveniente do microcontrolador não é capaz de fornecer a corrente necessária para acionar o motor, então é essencial a designação de um circuito que, a partir de uma corrente pequena, forneça uma corrente maior. Assim, a finalidade da etapa de potência é assegurar que o sinal de controle (calculado pelo PID digital) consiga acionar o atuador de forma correta elevando a potência entregue ao mesmo.

Por consequência foi empregado o método PWM (*Pulse Width Modulation*) que resolve o problema de controle de velocidade dos motores e consiste em pulsar rapidamente um sinal digital, e uma das suas aplicações é simular uma tensão estática variável, desta forma, é possível controlar a tensão entregue ao ventilador.

A princípio foi realizado um circuito PWM operado por transistores, como pode ser visto na Figura 23, mas como a ideia é deixar o circuito exposto, então foi adaptado um módulo MOSFET IRF520N para ter uma estética mais funcional.

Figura 23 – Etapa de potência: primeiro protótipo usando um PWM implementado com transistores.

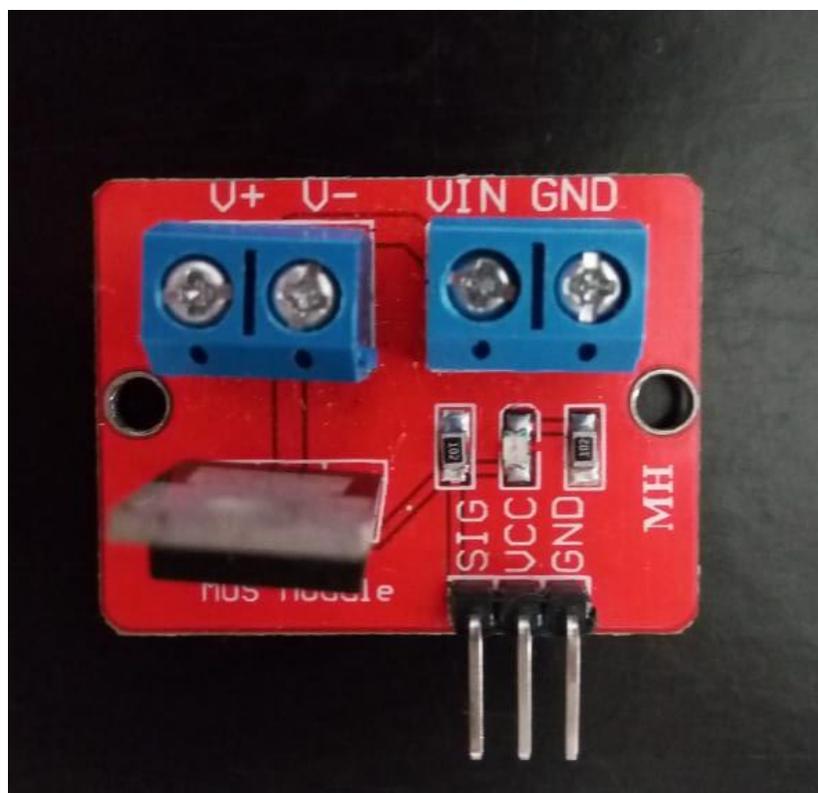


Fonte: Autoria própria.

O módulo MOSFEET IRF520N tem a função de controlar lâmpadas, *driver* de motores DC, solenóides e outros dispositivos. O módulo é projetado para trocar cargas DC pesadas a partir de um único pino digital do

microcontrolador. A Figura 24 exibe o módulo e na Tabela 4 as suas respectivas especificações.

Figura 24 – Etapa de potência: protótipo final usando o Módulo MOSFET IRF520N



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 – Especificações do módulo MOSFET IRF520N

Tensão de operação	3.3 V – 5 V
Tensão máxima de carga	24 V DC
Corrente máxima de carga	< 5 A
Peso	10 g
Dimensão	33 × 24 × 20mm

Fonte: Autoria própria.

h) Fonte de Alimentação: Para garantir que o sistema opere de forma apropriada, foi obtida uma fonte de alimentação DVE, modelo DAS-12PFA-09 FEU, que opera com uma entrada de 100 – 240 V e uma saída de 12 V/1 A (Figura 25).

Esta fonte alimenta o módulo MOSFET IRF520N, fornece uma corrente suficiente para o acionamento da ventoinha e alimenta o microcontrolador e os sensores através de um regulador de tensão, fornecendo uma tensão adequada para o funcionamento geral.

Figura 25 – Fonte de alimentação do sistema com detalhes



Fonte: Autoria própria.

i) Potenciômetro: O protótipo deste projeto conta com duas formas de controle: o controle automático, através do PID, e o controle manual, o qual permite que o estudante possa interagir de forma positiva com o sistema, podendo assim administrar o sistema, ou seja, cumprindo as funções de sensor, diferenciador, controlador e atuador.

O princípio do funcionamento do controle manual é o uso de um potenciômetro, então foi empregado um potenciômetro B1K, mostrado na Figura 26, que tem a função de regular a tensão do motor para aumentar a velocidade da ventoinha manualmente.

Figura 26 – Potenciômetro do controle manual



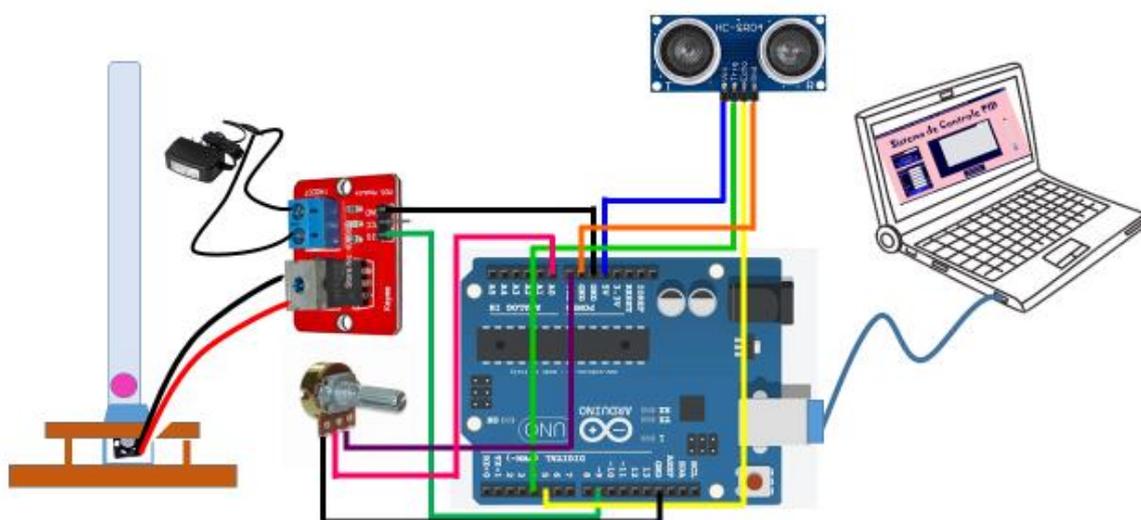
Fonte: Autoria própria.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DA PLANTA

Nesta seção serão apresentadas as estruturas das conexões elétricas e proteção das mesmas, como também a implementação no microcontrolador para obter a solidificação do sistema.

a) Conexões elétricas: A construção do sistema foi elaborada de acordo com suas especificações no *datasheet*. O diagrama esquemático do circuito eletrônico está representado na Figura 27, onde são mostradas todas as conexões necessárias. Para o melhor detalhamento das conexões, indica-se consultar o Manual de Instruções disponibilizado no Apêndice A.

Figura 27 – Conexões elétricas do sistema



Fonte: Autoria própria.

b) Caixa de Proteção de Circuitos Elétricos: Tendo em vista que os circuitos eletrônicos precisam ser protegidos, então foi necessário empregar uma caixa de madeira que pudesse acomodar os equipamentos com segurança e, ao mesmo tempo fornecer uma barreira de proteção entre o usuário e os circuitos elétricos. Com isso, foram obtidos pedaços de madeira maciça e MDF para confeccionar uma caixa.

Através dessa ideia inicial, foi adquirida a solução de empregar furos nas laterais da caixa para a ligação dos fios com os equipamentos protegidos, ou seja, foi feita o isolamento com a parte elétrica. Na lateral esquerda da caixa

foi feita uma abertura para a passagem de fios do sensor ultrassônico e da interconexão do ventilador com o módulo MOSFET. Já na parte de trás foi empregada a passagem do cabo de alimentação e na lateral esquerda foi adicionado um furo para o cabo de comunicação entre o Arduino e o computador. Observando que o projeto possui um controle manual, então foi exigido que houvesse um potenciômetro, para o qual foi executada uma abertura na frente o que apresentou robustez ao projeto.

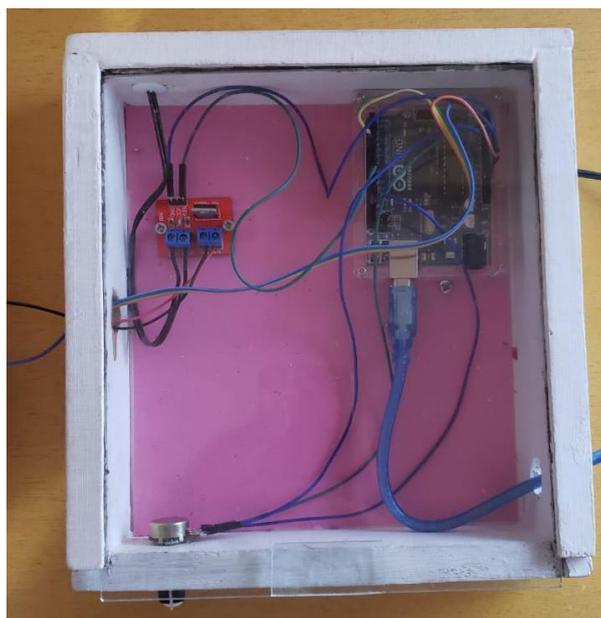
Depois da construção da caixa foi efetuada uma pintura na cor branca para dar um melhor acabamento.

No caso foi colocado acabamento no furo que dá passagem ao fio da fonte de alimentação, adicionado um papel de EVA para melhor acomodação dos dispositivos, também foi inserida uma capa para o potenciômetro e foram parafusadas as ferramentas que estão localizadas na parte interna da caixa.

Dado que se colocasse uma caixa fechada com MDF apresentaria uma desqualificação ao circuito, então foi feita uma tampa de vidro para que o estudante pudesse reconhecer as partes que executa o sistema. A Figura 28 exhibe o desfecho da caixa de proteção junto com os elementos de circuitos elétricos.

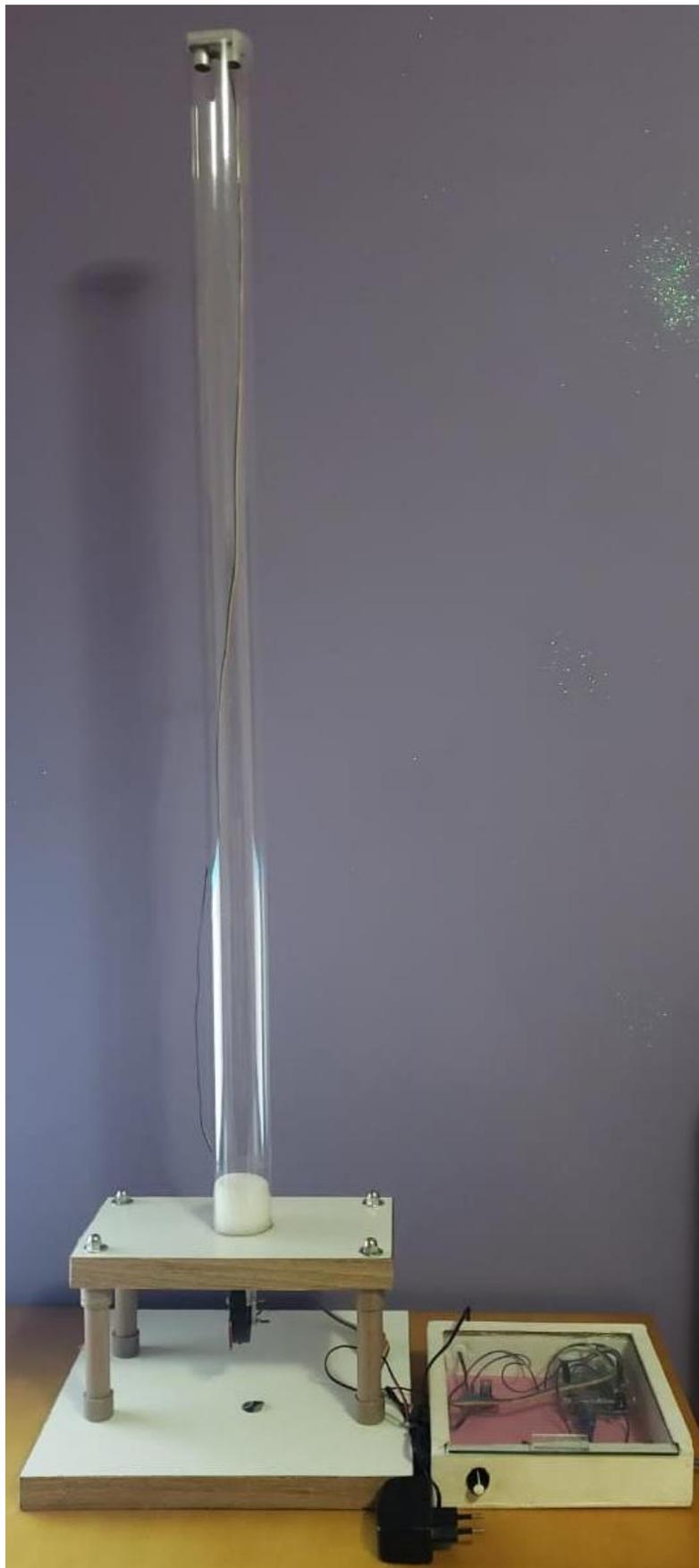
Por fim, na Figura 29 é apresentado o sistema de controle completo do protótipo final.

Figura 28 – Caixa de proteção de circuitos elétricos com acabamento



Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – Sistema de controle completo finalizado



Fonte: Autoria própria.

c) Implementação no Arduino UNO: O algoritmo implementado no projeto realiza todos os procedimentos de cálculos para controlar o processo através do controle manual e do controle PID. Esse algoritmo está implementado no programa que é denominado como IDE do Arduino.

A programação está estruturada com apenas duas funções de controle, as quais fazem uma interconexão via serial com a interface do usuário.

Sabendo que o arquivo principal do sistema contempla duas funções básicas do Arduino, no caso são o *setup()* e o *loop()*. Toda vez que o microcontrolador é ativado, as instruções do *setup()* são executadas e, em seguida, o programa fica em um laço infinito executando as instruções do *loop()*.

No método do *setup()* foram desenvolvidos os ajustes iniciais referentes à comunicação serial e pinos de entrada e saída, e depois de verificar todos os ajustes o programa aguarda um sinal enviado por meio de comunicação.

No método *loop()* foi efetuado um programa que aguarda o recebimento de um comando, por meio de comunicação serial, que ao ler os dados os codifica e determina qual comando de controle deve ser executado. Uma vez determinado o módulo, o foco do programa é deslocado para a função que se deseja desenvolver. Depois de recebidos os parâmetros, o programa executa o controle selecionado até que não haja uma interrupção. O código completo confeccionado no microcontrolador pode ser identificado no Apêndice C.

5.3 INTERFACE DE USUÁRIO

Para assessorar o funcionamento da planta, foi programada uma interface de usuário, baseada no programa de Camargo (2018), que conecta o microcontrolador com o computador, o qual envia e recebe dados para o sistema, e os apresenta para o usuário na tela do monitor.

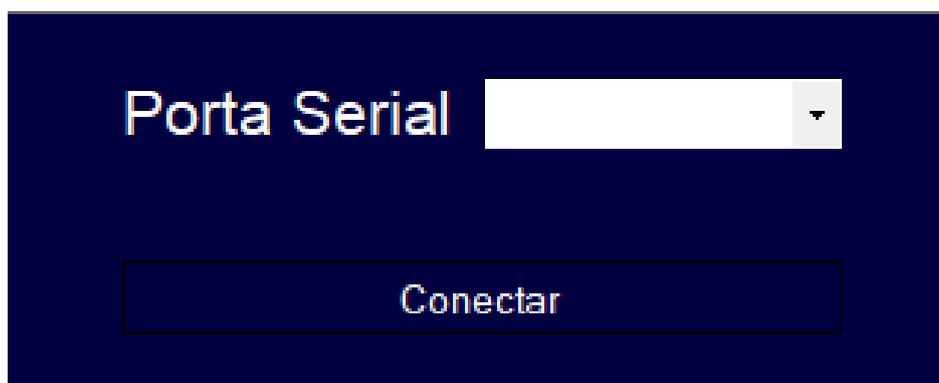
A interface inicial do programa está ilustrada na Figura 30. Nela, pode-se observar que o programa disponibiliza 3 procedimentos, os quais seguem um padrão de execução, porém possibilitando selecionar o modo em que o usuário deseja trabalhar, visto que são independentes, ou seja, poderão ser acionadas as ações passo a passo ou através do seu objetivo específico.

Figura 30 – Interface inicial do programa



Fonte: Autoria própria baseada no trabalho de Camargo (2018).

Ao clicar na imagem representativa do procedimento acessa-se à ação desejada. Na seção do controle manual e controle PID o programa é executado após estabelecer uma comunicação com a IDE do Arduino. Por meio de uma comunicação serial (Figura 31), a interface se encarregará de enviar comandos que acessam o *hardware* e desenvolvem o procedimento estabelecido. Desta forma, entende-se que é necessário estabelecer uma nova conexão na atividade de controle.

Figura 31 – Comunicação Serial para acessar os módulos do *software*

Fonte: Autoria própria

Dado que a comunicação foi estabelecida, o comando de comunicação muda e indica que está conectado mediante uma nova tela do

módulo de controle desejado, permanecendo nesse estado enquanto esse módulo estiver ativo.

A interface de usuário no projeto foi comandada pelo programa Microsoft Visual Studio 2013, utilizando a linguagem C#. É importante ressaltar que o programa Visual Studio foi desenvolvido para criação de *softwares*, onde é composto por formulários que determinam os módulos, e por sua vez, esses módulos equivalem a um *design* gráfico e ao código do programa.

A seguir serão descritas cada uma das telas que foram desenvolvidas para a interface do programa:

- ❖ **Tela do Módulo de Apresentação:** No módulo de apresentação há um breve discurso sobre os objetivos do sistema e uma representação através de uma animação em *gif* indicando qual sistema irá ser abordado. A Figura 32 exhibe a interface do módulo de Apresentação.

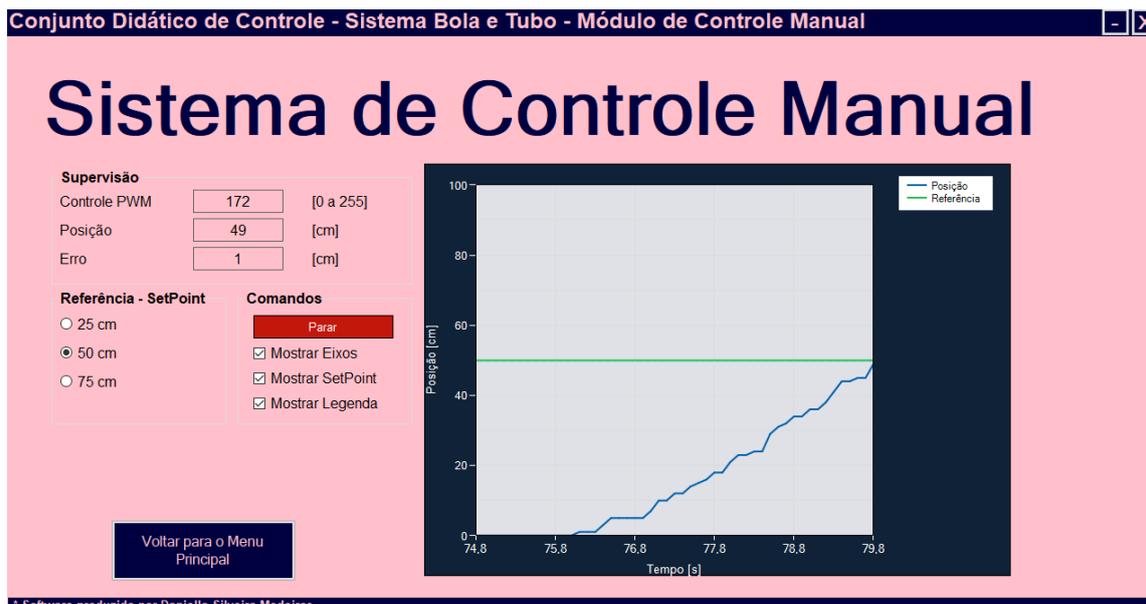
Figura 32 – Interface do módulo de Apresentação



Fonte: Autoria própria.

- ❖ **Tela do Módulo de Manual:** Já no módulo de Controle Manual, mostrado na Figura 33, é exibido um programa que permita que o usuário possa controlar manualmente o sistema. Para isso, é utilizado o potenciômetro que se encontra na caixa de circuitos.

Figura 33 – Interface do módulo de Sistema de Controle Manual



Fonte: Autoria própria.

Para ter uma boa operação do sistema de controle, a seguir serão descritas partes que compõem essa tela.

O quadro de comando de Supervisão permite que o usuário informe a posição na qual deseja que o objeto se posicione dentro do tubo. A posição refere-se à localização do objeto no tubo. O erro mostra em centímetros o quanto falta para chegar na posição informada na referência e o botão enviar é responsável por mandar a informação solicitada para o microcontrolador, para que possa permitir que a operação do sistema inicie.

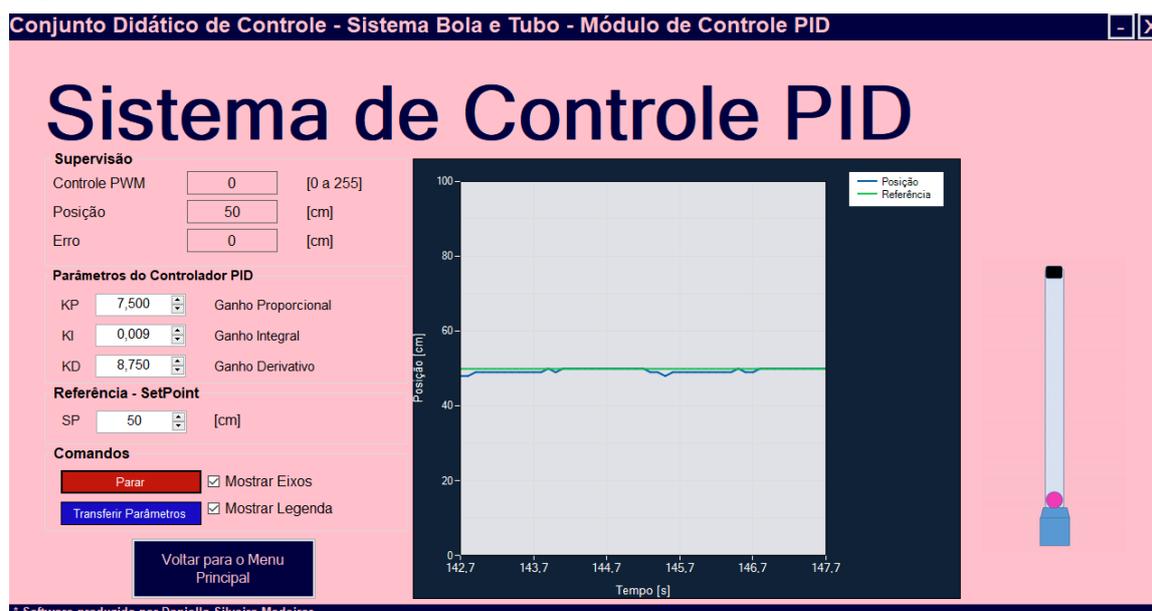
Por fim, o gráfico plota a referência e o posicionamento do objeto no tubo no decorrer da ação.

❖ **Tela do Módulo de Controle Automático com PID:** O módulo de sistema de controle PID permite que o usuário possa visualizar os dados e modificar parâmetros como: referência, parâmetros desejados de controle e parâmetros do PID digital. Para isso o usuário terá que informar no quadro os valores dos ganhos K_p , K_i , K_d e a referência desejada, após a configuração é possível fornecer a posição do objeto sobre o tubo acrílico e o sinal de erro. O módulo está ilustrado na Figura 34.

Após enviar as informações é executado um processo para simular a resposta do sistema em tempo real. Com isso, o comportamento e a função do

sistema na parte didática ajudariam na construção do conhecimento do aluno e no trabalho do educador, pois a interface de usuário interage com o usuário de forma amigável, dando o livre-arbítrio de escolher os tipos de controle, bem como os parâmetros que o sistema deve seguir e permitindo visualizar o seu comportamento em tempo real.

Figura 34 – Interface do módulo de Sistema de Controle PID



Fonte: Autoria própria.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados a modelagem do sistema, o projeto do controlador pelos Métodos de Sintonia. Além disso, será apresentado o estudo experimental que foi realizado para comprovar o desenvolvimento do sistema.

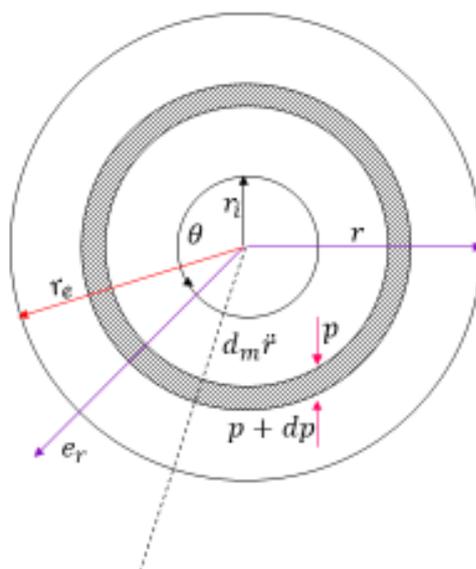
6.1 MODELAGEM DESENVOLVIDA PARA O SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA

Segundo Dorf e Bishop (2009) para obter e controlar sistemas mais complexos são concebidos modelos matemáticos quantitativos de sistemas físicos para projetar e analisar sistemas de controle. A dinâmica de um sistema, seja ele biológico, físico, químico, econômico ou qualquer outro, é baseado em equações diferenciais, sendo que elas são adquiridas através da aplicação das leis físicas que regem os respectivos elementos (OGATA, 2010).

A seguir serão descritas a modelagem realizada para o sistema, a qual foi desenvolvida pelo coorientador Prof. Dr. Gerson Felippini.

Para encontrar a resposta do sistema foram mensuradas as partes mecânicas do ventilador, conforme mostrado na Figura 35. Considerando-se que cada anel está estático e em equilíbrio, tem-se que:

Figura 35 – Modelo do ventilador utilizado como atuador do sistema



Fonte: Autoria própria.

$$\sum F_{ext} - m\vec{a} = 0 \quad (33)$$

$$\sum F_r - ma_r = 0 \quad (34)$$

$$\sum F_r - m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = 0 \quad (35)$$

$$F_p - F_{p+dp} - m\ddot{r} + dmr\dot{\theta}^2 = 0 \quad (36)$$

Aplicando equações diferenciais, é obtido:

$$p = \frac{\rho_{ar}\dot{\theta}^2 r^3 + c_1}{3r}, \quad (37)$$

onde c_1 é localizado aplicando-se as condições de contorno na entrada do ventilador: $r = r_i$ e $p = P_{atm}$, então:

$$P_{atm} = \frac{\rho_{ar}\dot{\theta}^2 r_i^3 + c_1}{3r_i}, \quad (38)$$

$$P_{rotor} = \frac{\rho_{ar}\dot{\theta}^2 r^3 + c_1}{3r_i}, \quad (39)$$

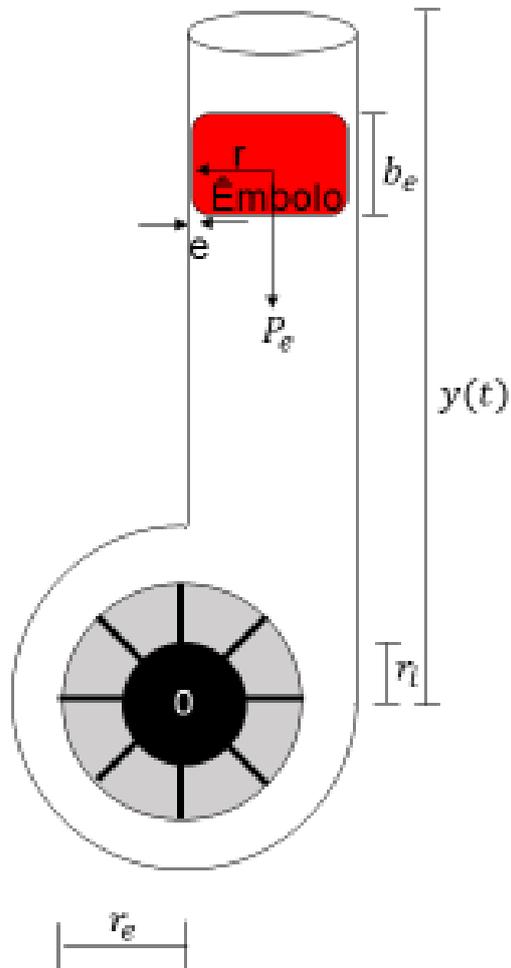
Colocando c_1 em evidência, tem-se:

$$c_1 = 3P_{atm}r_i - \rho_{ar}\dot{\theta}^2 r_i^3, \quad (40)$$

onde r_i representa o raio interno do motor, ρ_{ar} massa específica do ar, P_{atm} a pressão atmosférica e $\dot{\theta}$ a rotação do motor. Portanto, a partir da Figura 36 obtém-se a pressão do rotor obtida pela Equação 39 que pode ser igualada com a pressão do rotor obtida pelo lado do êmbolo, e dada pela Equação 41. Observa-se que foi empregada a hipóteses de $\frac{dV_y}{dx} = cte$ entre o êmbolo e o tubo,

$e = cte$, ou seja, não varia e a vazão de ar é, $e \approx 0$. Também, considerou-se o peso do êmbolo, atrito viscoso, coluna de ar, pressões nas faces do êmbolo e força inercial do êmbolo.

Figura 36 – Modelo com as unidades adotadas



Fonte: Autoria própria.

$$P_{rotor} = P_{atm} + \frac{P_e}{A_e} + \rho_{ar} g y + \frac{m_e \ddot{y}}{A_e} + \frac{2b_e}{r} \frac{V_e}{e} \mu_{ar}, \quad (41)$$

Igualando-se as pressões obtém-se:

$$\dot{\theta}^2 \rho_{ar} (r_e^3 - r_i^3) = 3P_{atm} (r_e - r_i) + 3r_e \frac{P_e}{A_e} + \rho_{ar} g 3r_e y + \frac{3r_e m_e}{A_e} \ddot{y} + \frac{6r_e b_e \mu_{ar}}{re} \dot{y}, \quad (42)$$

Onde:

$\dot{\theta}$: rotação do motor em $\frac{rad}{s}$

r_e : raio externo do rotor em m

P_e : peso do êmbolo em N

A_e : área do embolo em m^2

g : aceleração gravitacional em $\frac{m}{s^2}$

m_e : massa do êmbolo em kg

b_e : largura do embolo em m

e : folga entre o tubo e o êmbolo em m

μ_{ar} : viscosidade absoluta do ar em $\frac{Ns}{m}$.

Sabendo-se que e está dado por:

$$e = \frac{D_{tubo} - D_{\hat{e}mbolo}}{2}, \quad (43)$$

Resumindo, obtém-se:

$$C_1 \dot{\theta}^2 = C_2 \ddot{y} + C_3 \dot{y} + C_4 y + C_5, \quad (44)$$

em que:

$$C_1 = \rho_{ar} (r_e^3 - r_i^3), \quad (45)$$

$$C_2 = \frac{3r_e m_e}{A_e}, \quad (46)$$

$$C_3 = \frac{6r_e b_e \mu_{ar}}{r_e}, \quad (47)$$

$$C_4 = 3g \rho_{ar} r_e, \quad (48)$$

$$C_5 = 3P_{atm}(r_e - r_i) + 3r_e \frac{P_e}{A_e}. \quad (49)$$

Os valores dos parâmetros, que estão na Tabela 5, foram medidos com auxílio de uma balança de precisão, uma fita métrica, um paquímetro e um aplicativo de acelerômetro.

Tabela 5 – Parâmetros do sistema de levitação eólica

Constantes físicas do sistema	
Descrição	Valor
Dimensões do tubo	50 × 2 × 1000 mm
Aceleração da gravidade (g)	9.8065 m/s ²
Pressão atmosférica (P_{atm})	101.325 kPa
Massa específica do ar (ρ_{ar})	1.225 kg/m ³
Viscosidade absoluta do ar (μ_{ar})	10 ⁻⁶ Pa
Diâmetro do êmbolo (d_e)	46.5 mm
Massa do flutuador (m_e)	3.493 g
Raio externo do rotor (r_e)	16.75 mm
Raio interno do rotor (r_i)	13.75 mm
Área do êmbolo (A_e)	6.7929 × 10 ⁻³ m ²
Peso do êmbolo (P_e)	34.255 N
Largura do êmbolo (b_e)	0.04 m
Espessura da camada de ar (e)	1.75 × 10 ⁻⁴ m

Fonte: Autoria própria.

6.2 LINEARIZAÇÃO DA MODELAGEM PROPOSTA PARA O SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA

Para a validação do sistema de levitação eólica foram realizadas experiências de maneira a contribuir informações que permitem evidenciar a atuação do controle.

Nessa abordagem foi constatado que havia duas variáveis independentes, onde o sistema depende tanto da rotação do rotor quanto do posicionamento. Visto que, a equação diferencial ordinária (EDO) é não linear

porque nela está contida uma derivada ao quadrado, com isso, foi necessário executar a linearização da Equação (44).

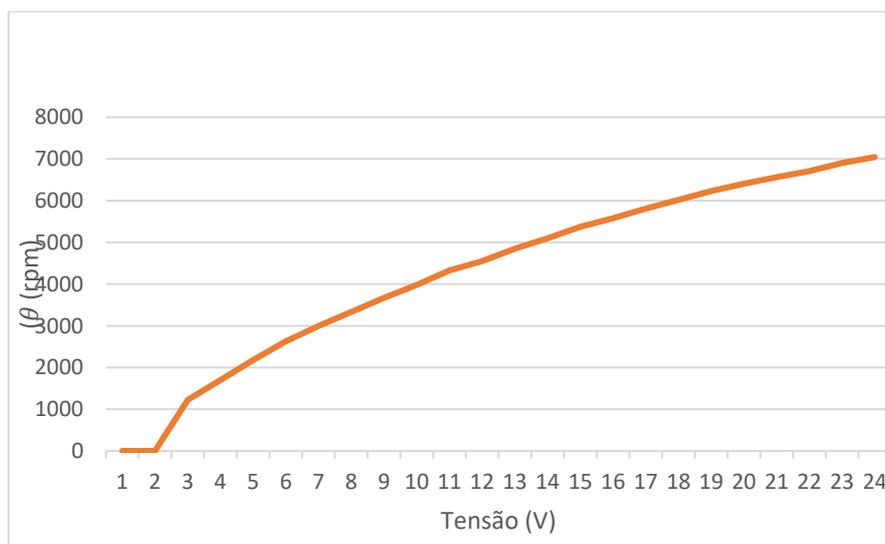
A seguir é descrita a linearização da equação diferencial ordinária, a qual foi ponderada pelo orientador Prof. Dr. Andrés Eduardo Coca Salazar, e executada pela autora.

Para encontrar a linearização da entrada θ é primordial atribuir um ponto de equilíbrio e logo em seguida aplicar o método de linearização por séries de Taylor. Com intuito de encontrar esse ponto de equilíbrio foi preciso fazer a relação rotação-altura, que por sua vez, está relacionada com a tensão.

Nessa circunstância, foi realizado o ensaio através da mudança de tensão por um intervalo de $1 V$ e, avaliada através de um tacômetro, o número de rotações por minuto (*rpm*) do motor, o resultado da análise pode ser observado na Figura 37. Visto que o ventilador começa a operar a partir de $3 V$ e quando se aproxima de $7 V$ é constatado que o êmbolo chega ao ápice do tubo, então foram examinados apenas o intervalo de 3 a $7V$, que foi aplicado nessa região uma equação usando o método mínimos quadrados (Figura 38). Após derivar a equação foi encontrada a resposta linearizada (Figura 39). Portanto, o ponto de equilíbrio encontrado foi $446.91 rpm$ e $5 cm$, que é a posição central da região linear.

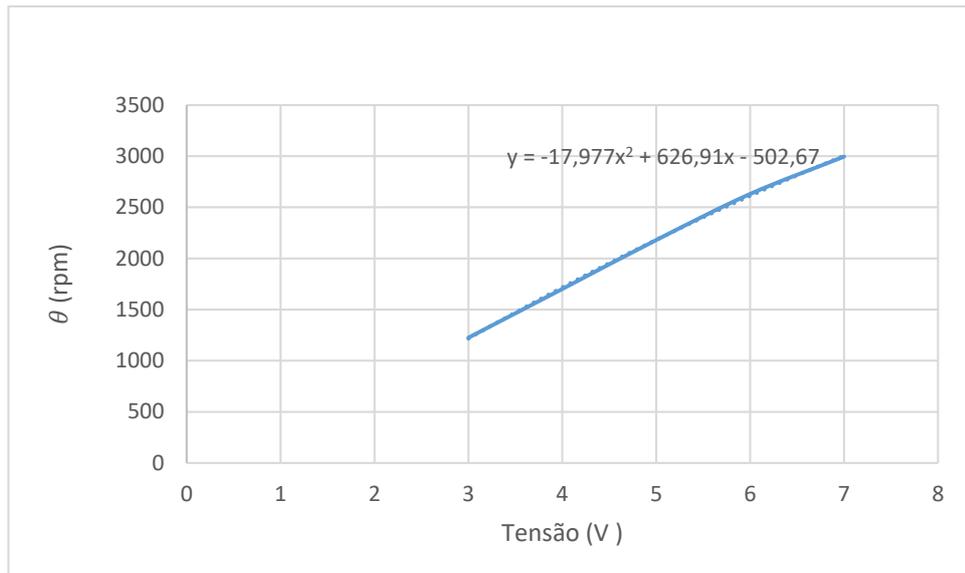
Para melhor detalhamento do equacionamento, indica-se consultar o Desenvolvimento de Equações no Apêndice B.

Figura 37 – Dados coletados da rotação do motor x tensão



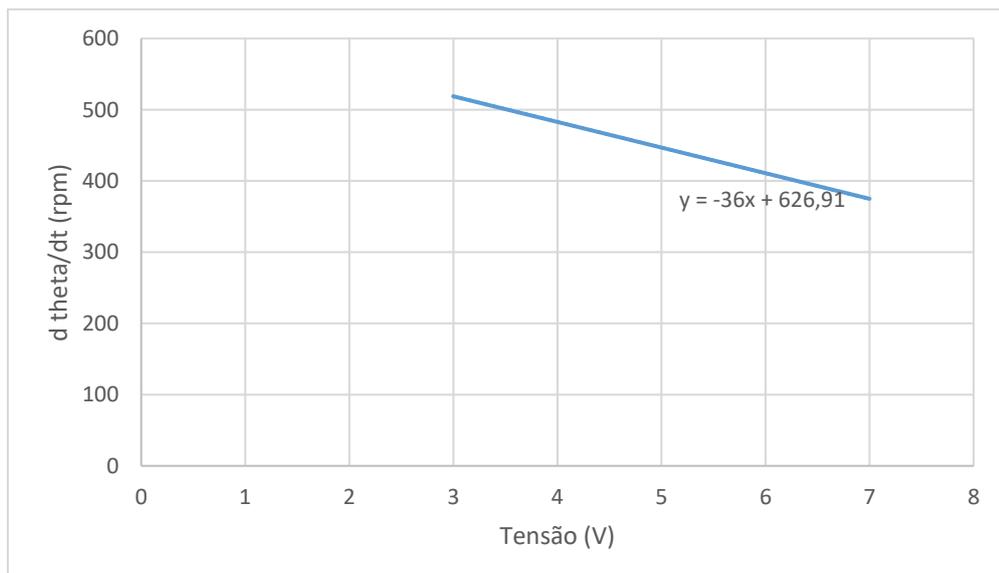
Fonte: Autoria própria.

Figura 38 – Dados coletados usando mínimos quadrados de 3 a 7 Volts



Fonte: Autoria própria.

Figura 39 – Resposta da equação de Linearização



Fonte: Autoria própria.

Com base nesses pontos, o C_2 da Equação (44) foi colocado em evidência, como mostrado na Equação (50), e aplicada a Série de Taylor de acordo com a Equação (51).

$$\ddot{y} + \frac{C_3}{C_2} \dot{y} + \frac{C_4}{C_2} y + \frac{C_5}{C_2} = \frac{C_1}{C_2} \dot{\theta}^2 \quad (50)$$

$$K = \left. \frac{df(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\bar{\theta}} \rightarrow f(\theta) = \bar{\theta} + K(\theta - \bar{\theta}) \quad (51)$$

Substituindo a parte de θ da Equação (50) na Equação (51), resulta-se:

$$f(\theta) = 446.91\theta - 25. \quad (52)$$

Esta equação pode agora ser substituída na Equação 44, obtendo-se a equação diferencial linearizada:

$$\ddot{y} + \frac{C_3}{C_2} \dot{y} + \frac{C_4}{C_2} y + \frac{C_5}{C_2} = \frac{C_1}{C_2} 446.91\theta - 25. \quad (53)$$

Aplicando a transformada de Laplace:

$$s^3 Y(s) + \frac{C_3}{C_2} s^2 Y(s) + \frac{C_4}{C_2} s Y(s) + \frac{C_5}{C_2} Y(s) = \frac{C_1}{C_2} 446.91 s^2 \theta(s) - 25 \theta(s). \quad (54)$$

a partir da qual a função de transferência final é :

$$\frac{Y(s)}{\theta(s)} = G_p(s) = \frac{9.97 \times 10^{-5} s^2 + 2.5 \times 10^{-3}}{s^3 + 19.12 \times 10^{-3} s^2 + 23.36 s + 35.3 \times 10^3}. \quad (55)$$

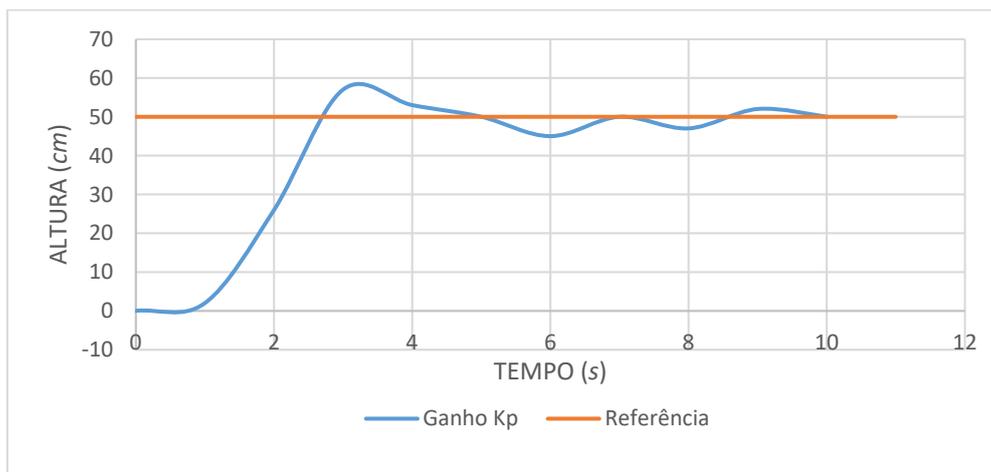
Transformando a função de transferência para a sua versão discreta mediante a transformada Z com um retentor de ordem zero (ZOH), a fim de obter uma função com dados amostrados implementada em intervalos de tempo denominado período de amostragem de $T_s = 10^{-6} s$, encontra-se:

$$G(z) = \frac{9.97 \times 10^{-11} z^2 - 1.99 \times 10^{-10} z + 9.97 \times 10^{-11}}{z^3 - 3z^2 + 3z - 1} \approx 0. \quad (56)$$

6.3 IDENTIFICAÇÃO DE PLANTA

A identificação de sistemas foi executada através do método de Mollemkamp, onde foi aplicado no sistema de malha fechada uma referência de 50 cm. Na Figura 40 é mostrada a resposta do sistema para a entrada degrau.

Figura 40 – Resposta do sistema para entrada degrau usada no método de identificação de Mollenkamp.



Fonte: Autoria própria.

Com base no gráfico foram extraídos os valores de t_1, t_2, t_3 a partir de 15%, 45% e 75% do valor de posicionamento final, seguidamente introduziu-se o método de Mollemkamp, cujos valores são mostrados na Tabela 6:

Tabela 6 – Resultados do método de Mollemkamp

Variável	Resultado
x	0.25
ζ	1.889
$f_2(\zeta)$	4.3134
ω_n	1.0785
$f_3(\zeta)$	2.402
θ	-0.227
$\tau_{1,2}$	3.23; 0.2655
K	75

Fonte: Autoria própria.

Para melhor detalhamento do equacionamento, indica-se consultar o Desenvolvimento de Equações no Apêndice B.

Fundamentado essa etapa, foi obtida a função de transferência identificada para a planta, mostrada a seguir:

$$G_p(s) = \frac{75e^{-0.227s}}{(0.86s^2 + 3.5s + 1)} \quad (57)$$

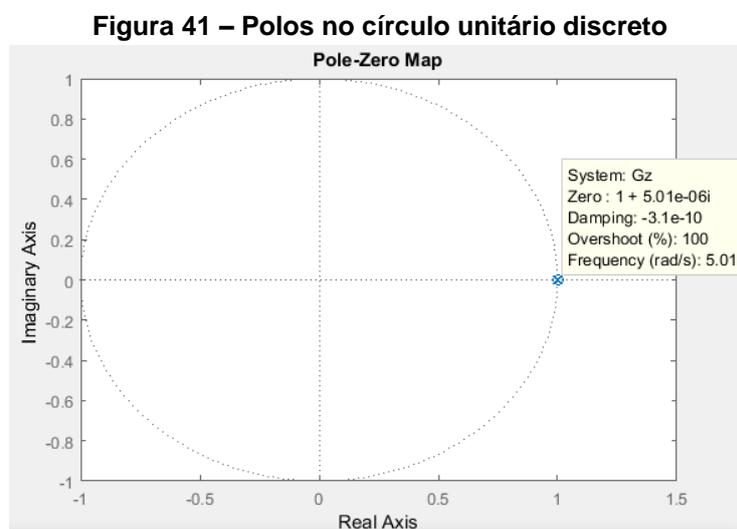
Pelo fato dessa função de transferência ser contínua, deve-se transformar para sua versão discreta mediante a Transformada Z modificada, considerando o ZOH e um $T = 0.01s$, é obtido:

$$G(z) = \frac{71.02z^2 + 0.58z}{z^3 - 0.04z^2} \quad (58)$$

6.4 ANÁLISES DA MODELAGEM

A seguir serão apresentados os resultados da análise da resposta do sistema de controle.

Inicialmente, foram traçados os polos e o zeros do sistema no círculo unitário discreto no plano Z, por intermédio do programa *Matlab*, a Figura 41 exhibe à ação executada. Neste exercício foram identificados os seguintes polos da FT: $p_{1,2,3} = 1$.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados coletados, é possível analisar que o sistema é criticamente estável por ter todas as raízes no círculo unitário, e, portanto, qualquer teste de estabilidade (Jury ou Tustin mais R-H) é desnecessário, confirmando a necessidade de estabilizar o sistema mediante um controlador.

6.5 SINTONIA DO CONTROLADOR PID

A seguir será empregado o Método experimental mediante a sintonia do controlador PID pelo método de Ziegler-Nichols.

A princípio, para poder aplicar o método de Z-N, foi colocado K_i e K_d igual a zero, logo após foi incrementando o ganho K , lentamente, até que o sistema oscilasse no limiar da estabilidade. Após disso, foi registrado $k = K_u$ (ganho crítico) e o período de oscilação crítico, T_u . Por fim, foram determinados os K_p , K_i , K_d de acordo com a mostrada na Tabela 1. O resultado via simulação encontrado foi $K_p = 75$, $K_i = 0.0099$, $K_d = 6625$ para uma referência de 50 cm que está representado na Figura 42.

Figura 42 – Resposta do Sistema aplicando Zigler-Nichols



Fonte: Autoria própria.

Portanto, como pode-se observar o sistema está a um passo de ser oscilatório a um sistema subamortecido, conformando-se assim que a estabilidade foi superada.

6.6 ESTUDO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE LEVITAÇÃO EÓLICA

Para efetuar a validação do desenvolvimento do sistema, foram feitos os seguintes testes no projeto:

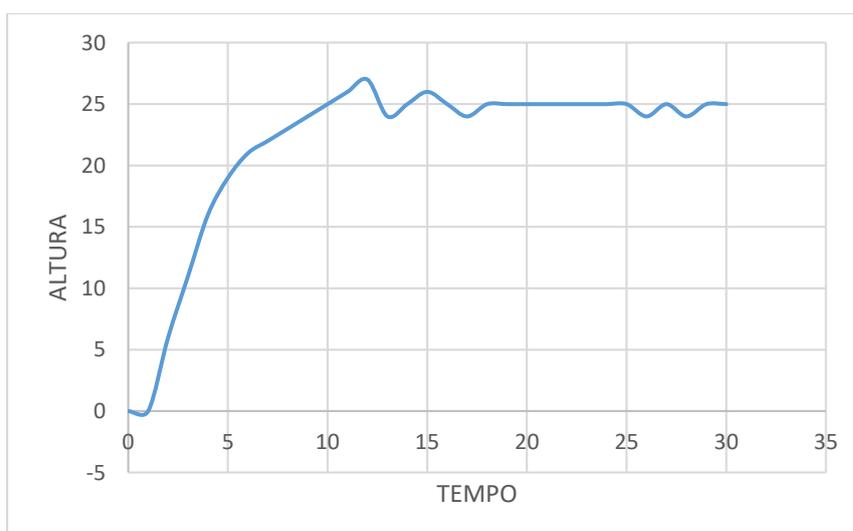
1. Testes técnicos:

Tendo em vista que o sistema está funcionando de forma adequada, então:

- a) primeiramente foi modificado desde a interface de *software* o valor da altura do êmbolo, em seguida foram feitas reformulações, onde foram variados os parâmetros do sistema, de modo a visualizar o erro para comprovar o bom funcionamento técnico do equipamento. A seguir serão mostradas respostas do sistema no tempo para diferentes referências, sendo elas: 25 cm, 50cm e 75cm, mostrada na Figuras 43 a, b e c, respectivamente.

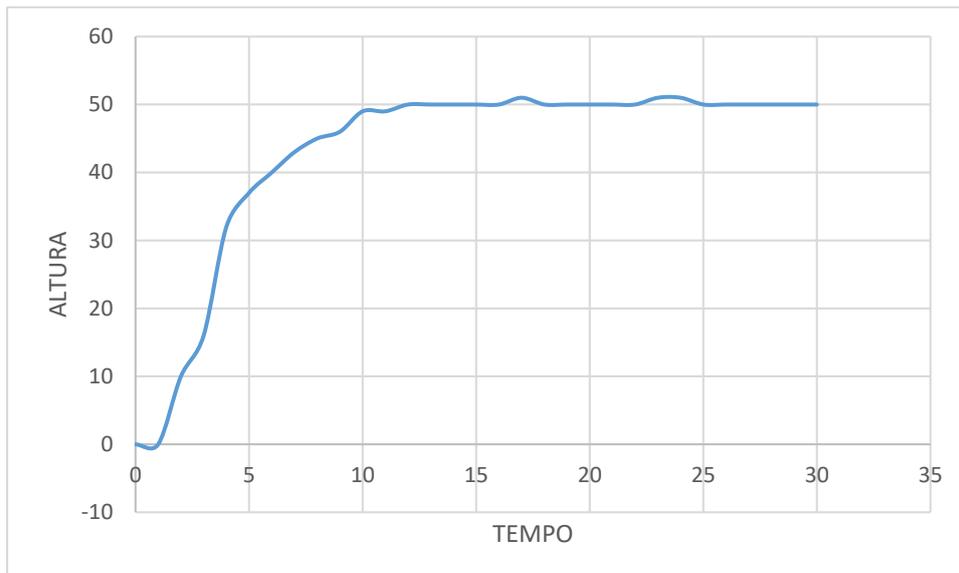
Figura 43 – Respostas no tempo dos sistemas para diferentes referências

a) Referência de 25 cm



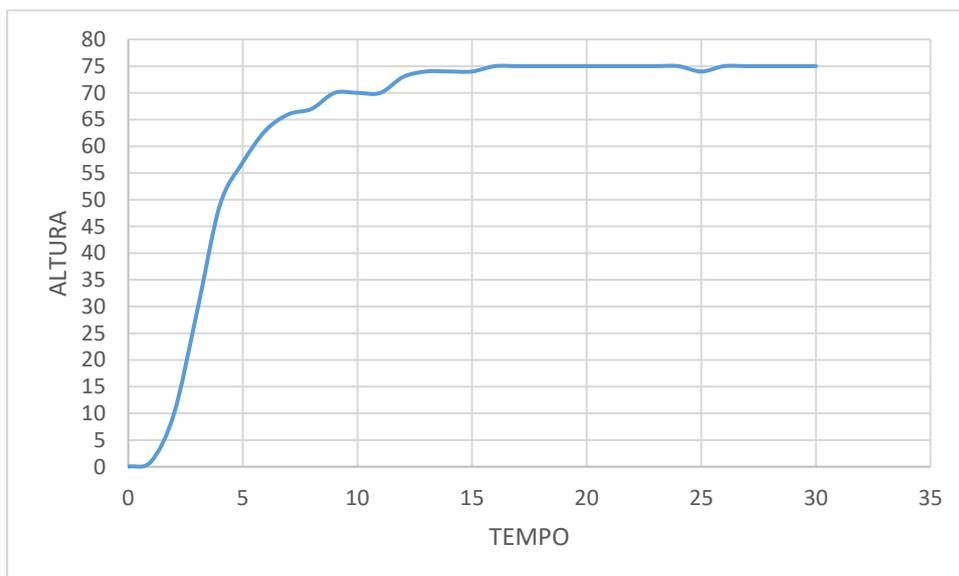
Fonte: Autoria própria.

b) Referência de 50 cm



Fonte: Autoria própria.

c) Referência de 75 cm



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 7 foi efetuado a resposta transitória do sistema através da coleta de dados das Figuras 43.

De acordo com as respostas no tempo, foram levantadas que o sistema está com o comportamento parecido em todos os testes que foram amostrados, obtendo o M_p praticamente nulo. Sem contar que consegue a estabilidade em pouco tempo de execução, no caso exposto acima entre 20 a 25 segundos.

Tabela 7 - Resposta transitória do sistema referente aos dados coletados

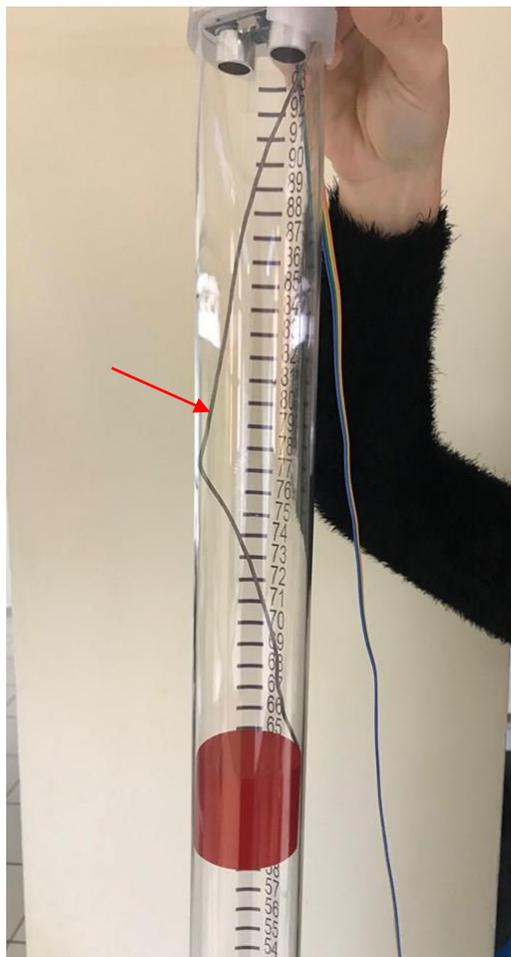
Referência	M_p	T_s	T_p	T_r
25	26	18	11	7
50	0	12	0	8
75	0	12	0	8

Fonte: Autoria própria.

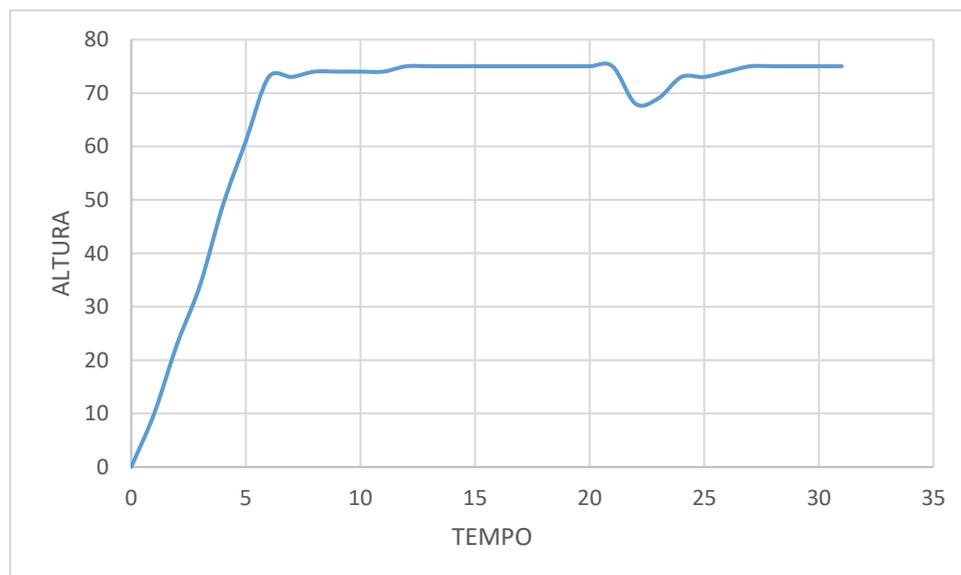
- b) também foi testado o comportamento ante perturbações através de um fio, e sua resposta ao sistema pode ser visualizada na Figura 44.

Figura 44 – Resposta do sistema ante perturbações

a) execução manual da perturbação mediante um fio



Fonte: Autoria própria

b) Resposta no tempo

Fonte: Autoria própria.

A partir do gráfico de ante perturbações pode ser visualizado que o sistema sofre a perturbação, porém logo após o sistema já consegue corrigir o erro e volta a responder como o esperado.

2. Testes funcionais:

Visando contrastar o baixo custo, e comprovar a usabilidade e a adaptabilidade do protótipo, foram realizados os seguintes testes:

- a) primeiramente foi efetuado o levantamento do quanto foi gasto para confeccionar esta ferramenta educacional (Tabela 8), e logo em seguida foi feita a comparação do preço com as ferramentas comerciais para verificar se o propósito de baixo custo foi alcançado. O site do Submarino foi encontrado o preço dos Kits Datapool de controle custando em média R\$1250,00 cada, o que prova que o sistema alcançou o objetivo de baixo custo.
- b) foi executada uma enquete com voluntários para verificar se o protótipo é um sistema de fácil manuseio, e os dados dessa enquete foram aplicadas com 10 voluntários, o qual foram pessoas desconhecidas, pois o alvo da pesquisa era apenas a opinião sobre o sistema e não os dados pessoais. A média de resposta mostrou que 90% dos participantes concluíram como um instrumento

satisfatório e 10% não soube opinar. A Tabela 9 e 10 mostra o resultado da enquete.

Tabela 8 – Tabela de preço do sistema de levitação eólica

MATERIAIS	VALORES
Arduino	R\$ 50,00 (Cinquenta Reais)
Componentes Eletrônicos	R\$ 28,00 (Vinte e Oito Reais)
Cooler	R\$ 45,00 (Quarenta e Cinco Reais)
Fonte de Alimentação	R\$ 30,00 (Trinta Reais)
Módulo Mosfet – IRN 520	R\$ 15,00 (Quinze Reais)
Sensor Ultrassônico	R\$ 12,00 (Onze Reais)
Suporte do Projeto	R\$ 45,00 (Quarenta e Cinco Reais)
Tubo	R\$ 150,00 (Cento e Cinquenta Reais)
TOTAL	R\$ 375,00 (Trezentos e Quarenta e Cinco Reais)

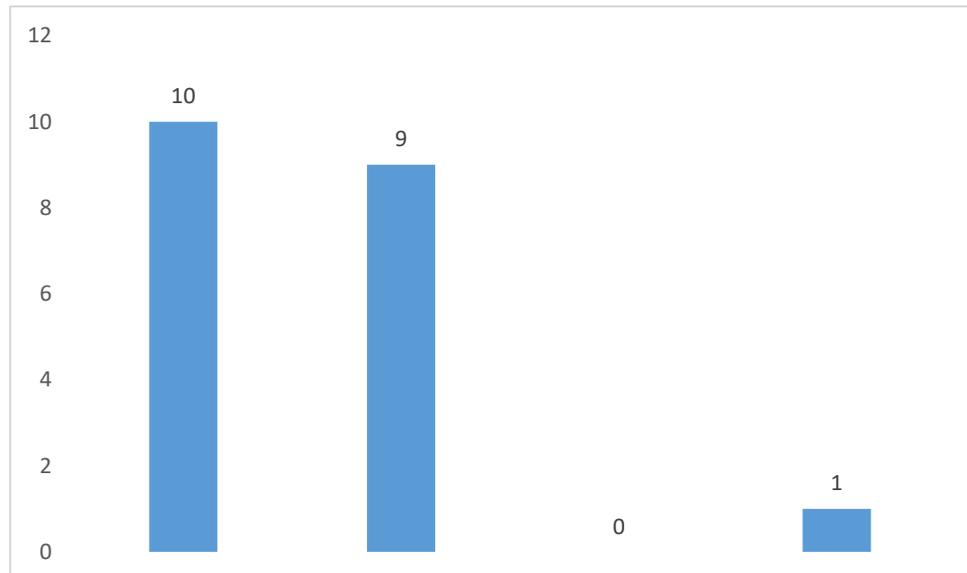
Fonte: Autoria própria

Tabela 9 – Enquete de voluntários para verificar se é um sistema de fácil manuseio

NÚMEROS DE PARTICIPANTES	SIM	NÃO	SEM CONHECIMENTO
1	x	-	-
2	x	-	-
3	x	-	-
4	x	-	-
5	x	-	-
6	x	-	-
7	x	-	-
8	-	-	x
9	x	-	-
10	x	-	-
Total	9	0	1

Fonte: Autoria própria.

- c) foi deixado o código comentado e organizado para facilitar a compreensão de futuros projetistas, e também foi elaborado um manual instruções, mostrado no Apêndice A, que ajudará e facilitará as possíveis novas adaptações e modificações dos futuros desenvolvedores, ou até mesmo, usado em futuros TCC que desejem dar prosseguimento com o projeto de desenvolvimento de ferramentas didáticas para controle.

Tabela 10 – Resultado da enquete

Fonte: Autoria própria.

7 CONCLUSÕES

O intuito principal do projeto foi desenvolver e implementar uma ferramenta educacional para que possa ser útil na instrumentação dos laboratórios de Engenharia de Computação e de Engenharia Eletrônica UTFPR-Toledo, como também proporcionar ao aluno a visualização e compreensão prática dos conhecimentos adquiridos durante as aulas teóricas através da apresentação das respostas de um sistema efetivo aos instrumentos de controle, foi alcançado satisfatoriamente.

Posto que foram obtidos desfechos satisfatórios em relação ao proposto, que objetivava o controle do sistema em uma posição pré-estipulada, buscando sempre o aperfeiçoamento do sistema e seus parâmetros de respostas em relação aos procedimentos aplicados.

A partir dos testes realizados, foi certificado que com a realização da sintonia do projeto de controladores PID através da aplicação do método de Zigler-Nichols houve a melhoria na estabilidade e nas características da resposta temporal do sistema.

O desenvolvimento do *software* de interface ajudou a auxiliar o usuário nos conceitos relacionados ao controle do sistema de levitação, pois possibilitou o desempenho apreciável em cada um dos controles mencionados na interface inicial e forneceu a possibilidade para o projetista manipular o controle de PID do sistema.

Os investimentos científicos para desenvolver o projeto atenderam como uma ferramenta didática de controle para a universidade com algumas funcionalidades comparáveis às ferramentas comerciais e convencionais, porém modificável, com baixo custo em suas implementações e com alta facilidade de manuseio por parte dos usuários.

Fica como sugestão para trabalhos futuros a estimulação da criatividade e a habilidade de desenvolver com diferentes turbulências ocasionais, como a possibilidade de atribuir múltiplos tipos de pressões e temperaturas dentro e fora do tubo para verificar como se comporta a planta diante dessas modificações.

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.
- ARDUINO, 2013. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 25 maio 2018.
- ARTIGUE, M. Didactical engineering as a framework for the conception of teaching products. In: BIEHLER, R.; SCHOLZ, R.; STRASSER, R.; WINKLEMANN, B. (Ed.). **Didactics of mathematics as a scientific discipline**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. p. 27-39.
- ARTIGUE, M.; PERRIN, M. Didactic engineering, research and development tool: some theoretical problems linked to this duality. **For the Learning of Mathematics**, v. 11, n. 1, p.13-18, 1991.
- BOBAL, V.; BÖHM, J.; FESSL, J.; MACHACEK, J. **Digital Self-tuning Controllers**. London. Springer, 2005.
- BROUSSEAU, G. **Theory of didactical situations in mathematics**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. v.19 (Mathematics Education Library).
- BUCKNER, J.; **Aerodynamic Levitation of a Beach Ball**. EEE transactions on education, 2009.
- CARMO, et al. **Construção de protótipo didático: Uma abordagem diferenciada no processo de ensino/ aprendizagem de engenharia**. Disponível em: < <http://www.deec.ufpa.br/~peteletrica/artigos/>> Acesso em: 06 abr. 2018.
- CARNEIRO, V. **Engenharia Didática: um referencial para a ação investigativa e a formação de professores de matemática**. *Zetetiké*, Campinas v. 13, n. 23, 2005, p. 87-119.
- CHEN, C., **Analog and Digital Control System Design: transfer-function, State-Space, and Algebraic Methods**. Oxford University Press, 1993. p. 551-566.
- COELHO, A.; COELHO, L. **IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS LINEARES**. UFSC, 2004. p. 65-81.
- DA SILVA, G. **Desempenho de sistemas de controle**. [S.l.], 2000.
- DAL MOLIN, A.; ZORZAN, F.; DARONCH, J. **Desenvolvimento de uma bancada didática de hidráulica**. Fórum Latino-americano de engenharia, Foz do Iguaçu, 13 nov. 2013.

DATAPOOL, 2013. Disponível em: <<http://eletronica.datapool.com.br/>>. Acesso em: 06 abr. 2018.

DISTEFANO, J.; STUBBERUD, R.; WILLIANS, J. **Sistemas de retroação e controle**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975.

DORF, C.; BISHOP, H. **Sistemas de controle modernos**. 11.ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009. 724 p. ISBN 9788521617143.

DORF, C.; BISHOP, H. **Sistemas de controle modernos**. 8.ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 1998.

FERNANDES, E. David Ausubel e a Aprendizagem Significativa. **Revista Nova Escola**, São Paulo, v. 248, abr. 2011.

FERREIRA, N. As pesquisas denominadas "estado da arte". **Educ. Soc.**, Campinas, v. 23, n. 79, p. 257-272, 2002.

GAUTHIER, C. et al. **Por uma teoria da pedagogia**. Editora Unijuí, 1998. p. 132-145.

HEMERLY, E. **Controle por computador de sistemas dinâmicos**. [sl.] : Edgard Blucher, 2000.

HOFFMANN, J. **Avaliação mediadora: uma relação dialógica na construção do Conhecimento**, 1994. Disponível em: <<http://www.crmariocovas.sp.gov.br>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

KUO, C.; GOLNARAGHI, F. **Discrete-Data Control Systems**. 8.ed. Danvers, MA: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

LI, Y; ANG, K.; CHONG, G. PID Control System Analysis and Design. **IEEE Control Systems**, v. 26, n.1, p. 32-41, 2006.

MATLAB PRODUCT DESCRIPTION – **Matlab & Simulink**. Disponível em: MathWorks Inc. 10 de outubro de 2017. Consultado em 10 de outubro de 2017. Acesso em: 28 de maio

NISE, N. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002. p. 129-144.

OGATA, K., **Modern Control Engineering**. 4ª. ed. Prentice Hall, 2002.

PEKELMAN, H.; MELLO Jr. A.; **A importância dos laboratórios no ensino de Engenharia Mecânica**. Disponível em: <http://www.abenge.org.br/CobengeAnteriores/2004/artigos/01_219.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2018.

PHILLIPS, L.; CHAKRABORTYY, A.; NAGLE, T. **Digital control system analysis and design**. [s.l.] : Pearson, 2015.

PORVIR. N., **Um advogado da educação**, 2013. Disponível em: <<http://bit.ly/1cCQ9H3>>. Acesso em: 01 abr. 2018.

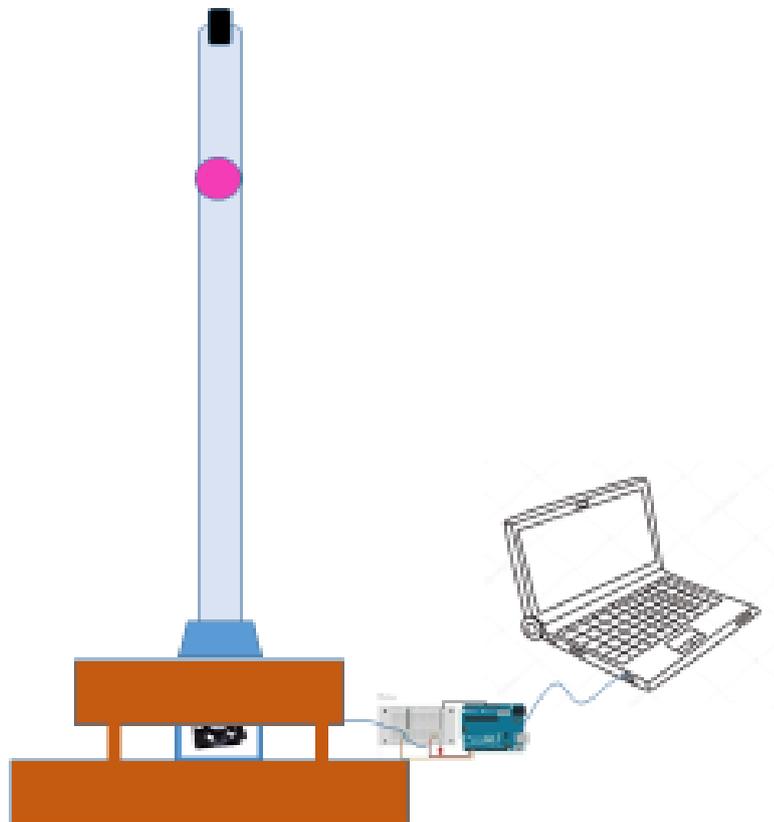
SILVA, O.; SILVA, C.; SILVEIRA, A.; BAYMA, R.; BARREIROS, Jal. **Construção de Protótipo Didático**: uma abordagem diferenciada no processo de ensino/aprendizagem de engenharia. In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006, CBA, 2006. p. 220-224.

SUBMARINO, 2013. Disponível em: <<http://submarino.com.br/>>. Acesso em: 20 junho de 2019.

TEWARI, A., **Modern Control Design**: With MATLAB and SIMULINK. Wiley: John Wiley & Sons, 2002.

APÊNDICE A – MANUAL DE INSTRUÇÕES

MANUAL DE INSTRUÇÕES



ÍNDICE

1. Introdução.....	02
2. Componentes do Kit.....	03
3. Conexões do sistema.....	04
4. Comunicação da porta serial.....	05
5. Modo de operação controle manual.....	06
6. Modo de operação controle PID automático.....	08

INTRODUÇÃO

Este manual foi elaborado para ajudar na utilização correta da ferramenta educacional para o ensino da teoria de controle digital baseada na levitação eólica. Este equipamento foi desenvolvido pela aluna Daniella Silveira Medeiros, sob orientação do Prof. Dr. Andrés Eduardo Coca Salazar, como projeto de conclusão de curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *câmpus* Toledo.

O objetivo deste equipamento é o desenvolvimento de uma ferramenta educacional para o ensino de controle, acessível, modificável e de baixo custo.

O conjunto consiste em um sensor ultrassônico que determina a altura da esfera, e mediante um PID digital, programado em um microcontrolador, é definida a intensidade adequada para o atuador corrigir o erro entre as alturas desejada e medida. O microcontrolador está conectado a uma interface de *software* que permite visualizar e modificar alguns sinais e parâmetros de forma guiada.

COMPONENTES DA FERRAMENTA DIDÁTICA

A ferramenta didática está composta por:

- ✓ Arduino UNO R3
- ✓ Caixa de proteção de circuitos elétricos
- ✓ Cabo de comunicação com o computador
- ✓ Estrutura de sustentação do projeto
- ✓ Fonte de alimentação de 127 V
- ✓ Fios de conexões
- ✓ Flutuador impresso em 3D
- ✓ Módulo MOSFET
- ✓ Potenciômetro
- ✓ Sensor Ultrassônico
- ✓ Suporte
- ✓ Tubo de acrílico
- ✓ Ventoinha de caracol

Figura A1 – Elementos da ferramenta educacional

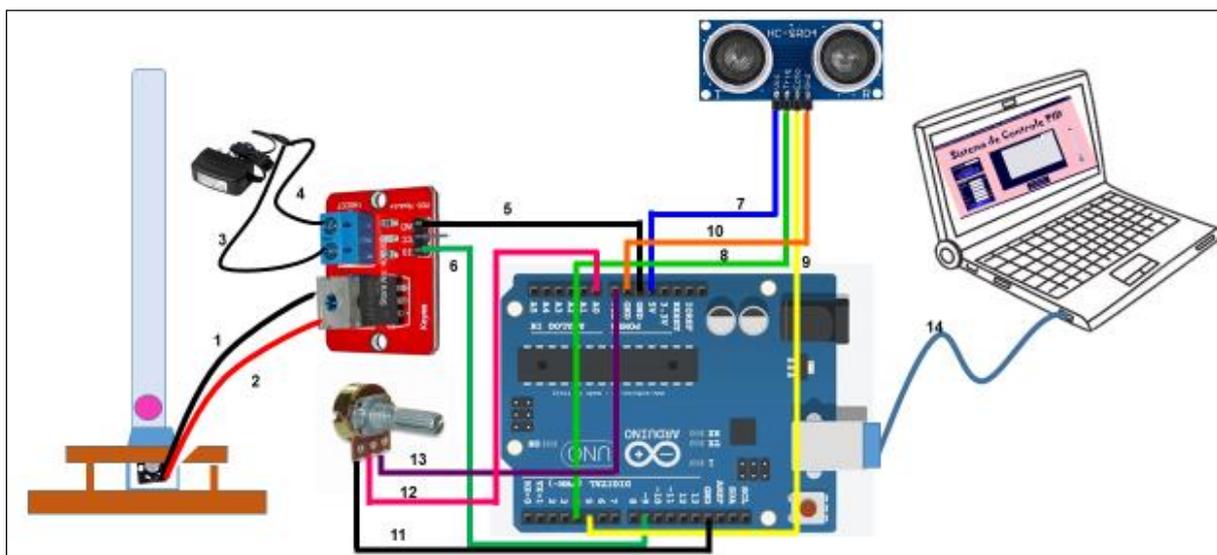


Fonte: Autoria própria.

CONEXÕES DO SISTEMA

A seguir está ilustrada a conexão do sistema na Figura A2, e logo após a legenda da ligação de cada componente na Tabela A1 :

Figura A2 – Conexões da ferramenta educacional



Fonte: Autoria própria.

Tabela A1 – Ligações da ferramenta educacional

Nº DE LIGAÇÃO	Ponto A	Ponto B
1	Fio vermelho da ventoinha	V+ do Módulo
2	Fio preto da ventoinha	V- do Módulo
3	Fio positivo da fonte	VIN do Módulo
4	Fio positivo da fonte	GND do Módulo
5	GND do Módulo	Pino GND do Arduino
6	SIG do Módulo	Pino 9 do Arduino(PWM)
7	Vcc do Sensor	Pino 5V do Arduino
8	Trig do Sensor	Pino 4 do Arduino
9	Echo do Sensor	Pino 5 do Arduino
10	GND do Sensor	Pino GND do Arduino
11	Pino 1 do Potenciômetro	Pino GND do Arduino
12	Pino 2 do Potenciômetro	Pino A0 do Arduino
13	Pino 3 do Potenciômetro	Pino Vin do Arduino
14	Cabo no Arduino	Cabo USB no PC

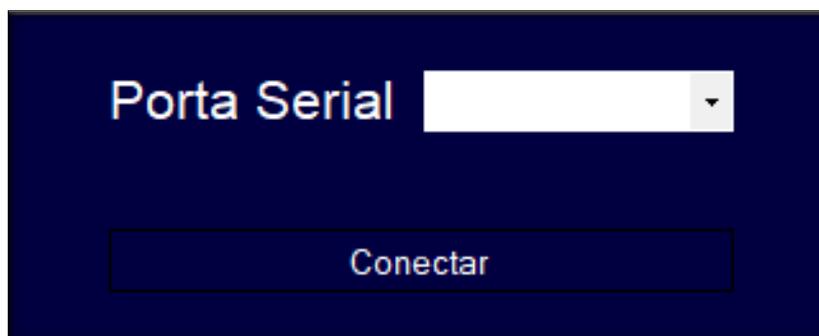
Fonte: Autoria própria.

COMUNICAÇÃO DA PORTA SERIAL

Para executar a telas de controle é necessário estabelecer uma comunicação com o sistema. Desta forma é essencial conectar o cabo USB que está acoplado a caixa de circuitos elétricos ao computador e a fonte de alimentação a tomada.

Após de ter efetuado essas ligações corretamente, o usuário está habilitado para executar o *software* e navegar em suas funções. Nas funções de controle há o quadro de comunicação serial que deve ser conectado. A partir de uma conexão bem-sucedida o programa irá transferir o usuário para as telas do controle desejado. Caso não seja feita a comunicação verifique cabos, configurações das portas COM e conexões do sistema.

Figura A3 – Porta serial para conectar ao módulo desejado



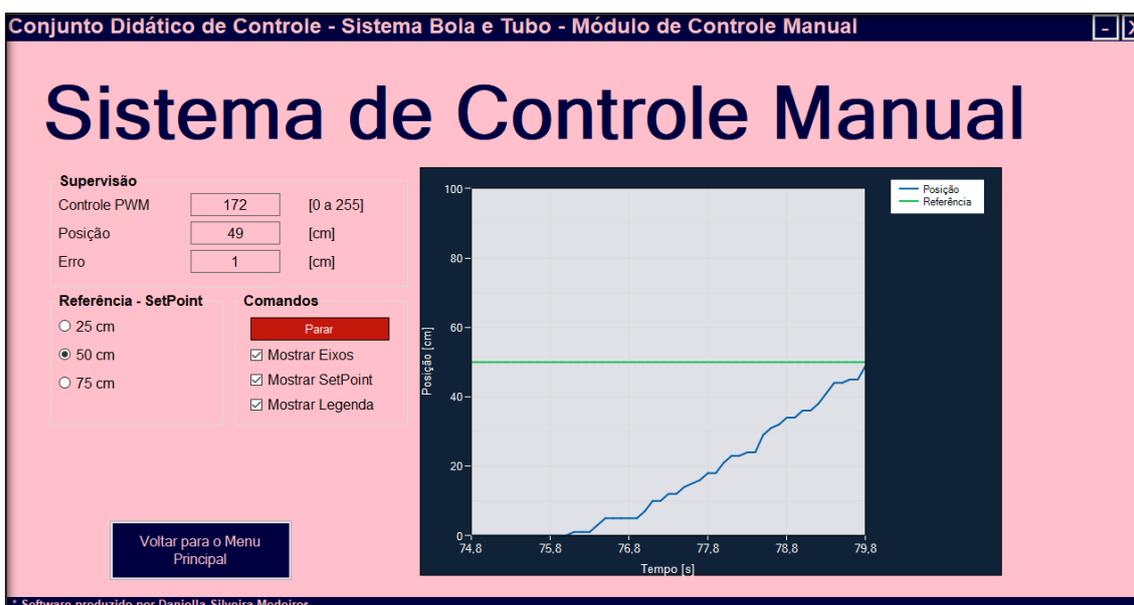
Fonte: Aatoria própria.

MODO DE OPERAÇÃO CONTROLE MANUAL

O controle de operação manual põe o usuário na função de um controlador. O cliente do programa irá fornecer informações através do potenciômetro que fornece sinais ao Arduino UNO, por conseguinte, irá enviar sinais à planta.

O usuário será encarregado por gerar os sinais a serem aplicados na planta de forma que o êmbolo se posicione na posição pré-estipulada. A interface irá relatar em tempo real as informações.

Figura A4 – Tela do Sistema de Controle Manual



Fonte: Autoria própria.

O quadro de Supervisão é constituído por :

- Controle PWM: apresenta o valor do PWM que o controlador está acionando ao motor.
- Posição: apresenta em tempo real onde está posição do êmbolo dentro do tubo.

- Erro: apresenta a diferença entre o valor de referência solicitado pelo usuário e a posição atual do êmbolo.

O quadro de Referência é o intermediário pelo qual o cliente do programa irá comunicar a posição que deseja que o êmbolo fique. No quadro foram colocados caixa de opções no qual foram selecionados valores pré-definidos.

O quadro de comandos contém um botão que é responsável por iniciar e parar o sistema de controle. Neste mesmo quadro há também uma caixa de seleção que permite que o usuário possa escolher ocultar ou mostrar os eixos, legendas e referência no gráfico o lado.

O gráfico plota em tempo real os dados do sistema. O eixo horizontal representa o tempo em segundos e o eixo vertical representa a posição em centímetros.

O botão Voltar para o Menu Principal volta para a tela principal de execução de apresentação e controles.

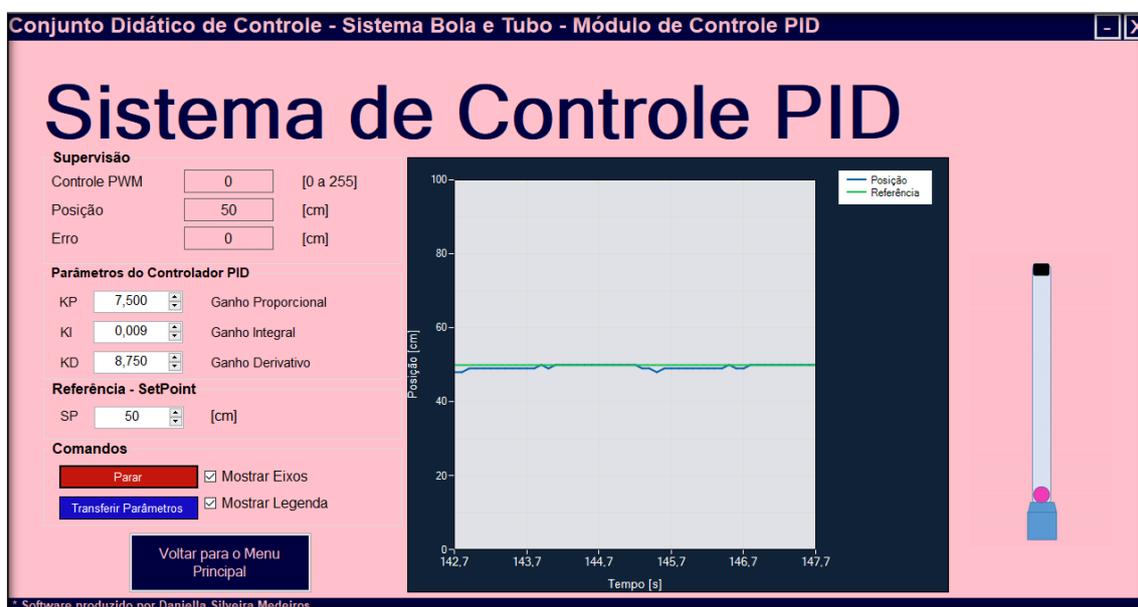
O modo de operação do controle manual tem o objetivo de mostrar a importância de um controle digital.

MODO DE OPERAÇÃO CONTROLE PID

O controle de operação PID exibe e mostra o funcionamento de um controle digital PID, onde propõe o usuário a passar empiricamente os parâmetros de sintonia do controlador.

A seguir serão descritos os quadros de comando do módulo de controle PID, mostrados na Figura A5.

Figura A5 – Tela do Sistema de Controle PID



Fonte: Autoria própria

O quadro de Supervisão é constituído por :

- Controle PWM: apresenta o valor do PWM que o controlador está acionando ao motor.
- Posição: apresenta em tempo real onde está posição do êmbolo dentro do tubo.
- Erro: apresenta a diferença entre o valor de referência solicitado pelo usuário e a posição atual do êmbolo.

O quadro de Parâmetros do Controlador PID permite que o usuário informe os ganhos:

- K_p – Ganho Proporcional
- K_i – ganho Integral
- K_d – Ganho Derivativo

O quadro de Referência é o intermediário pelo qual o cliente do programa irá comunicar a posição que deseja que o êmbolo fique. No quadro foram colocados caixa de opções no qual foram selecionados valores pré-definidos.

O quadro de comandos contém um botão que é responsável por iniciar e parar o sistema de controle e outro botão que transfere os parâmetros preenchidos no quadro dos Parâmetros do Controlador PID. Neste mesmo quadro há também uma caixa de seleção que permite que o usuário possa escolher ocultar ou mostrar os eixos, legendas e referência no gráfico o lado.

O gráfico plota em tempo real os dados do sistema. O eixo horizontal representa o tempo em segundos e o eixo vertical representa a posição em centímetros.

O botão Voltar para o Menu Principal volta para a tela principal de execução de apresentação e controles.

APÊNDICE B – DESENVOLVIMENTO DE EQUAÇÕES

Neste apêndice será desenvolvido de forma mais detalhada o desenvolvimento das equações.

B.1- Desenvolvimento da linearização da EDO por séries de Taylor

A seguir será demonstrada o equacionamento do desenvolvimento da linearização da EDO pela série de Taylor.

Temos uma equação diferencial abaixo, e nela será colocada C_2 em evidência, e logo após substituir as constantes.

$$C_2\ddot{y} + C_3\dot{y} + C_4y + C_5 = C_1\dot{\theta}^2,$$

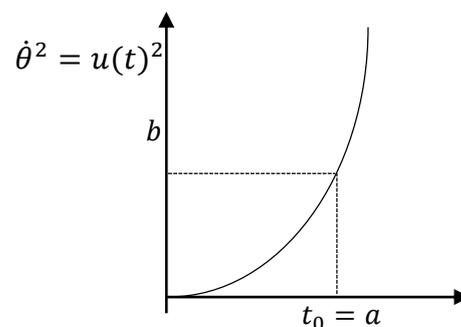
$$\frac{1}{C_2}[C_2\ddot{y} + C_3\dot{y} + C_4y + C_5] = [C_1]\frac{1}{C_2}\dot{\theta}^2,$$

$$\ddot{y} + \frac{C_3}{C_2}\dot{y} + \frac{C_4}{C_2}y + \frac{C_5}{C_2} = \frac{C_1}{C_2}\dot{\theta}^2,$$

$$a_2 = \frac{C_3}{C_2}; \quad a_1 = \frac{C_4}{C_2}; \quad a_0 = \frac{C_5}{C_2}; \quad b_2 = \frac{C_1}{C_2};$$

$$\ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1y + a_0 = b_2\dot{\theta}^2.$$

Para obter a linearização do termo não linear dependente de t , foi feita



a linearização da série de Taylor, abaixo está o passo a passo dessa etapa.

$$u(t) = \dot{\theta}(t) \rightarrow [\dot{\theta}(t)]^2 = u(t)^2 \therefore u^2,$$

$$\ddot{y} + a_2\dot{y} + a_1y + a_0 = b_2u^2$$

$$u(t) = u(t)|_{u(t)=a} = a + \left. \frac{d[u(t)^2]}{dt} \right|_{u(t)=a} (u(t) - t_0)$$

$$u(t) = b + 2u(t)|_{u(t)=a} (u(t) - t_0)$$

$$u(t) = b + 2a(u(t) - a)$$

$$u(t) = b + 2au(t) - 2a^2$$

Para o ponto de equilíbrio (446.91, 5) encontrada, tem-se:

$$u(t) = 446.91 + 2 \times 5u(t) - 50$$

$$u(t) = 446.91u(t) - 25$$

Substitui na EDO, encontramos a equação diferencial linearizada:

$$\ddot{y} + \frac{C_3}{C_2}\dot{y} + \frac{C_4}{C_2}y + \frac{C_5}{C_2} = \frac{C_1}{C_2}446,91u(t) - 25\frac{C_1}{C_2}$$

Aplicando a transformada de Laplace:

$$s^2Y(s) + \frac{C_3}{C_2}sY(s) + \frac{C_4}{C_2}sY(s) + \frac{C_5}{C_2}Y(s) = \frac{C_1}{C_2}446,91s^2\theta(s) - 25\theta(s)$$

A partir da qual a função de transferência final é:

$$\frac{Y(s)}{\theta(s)} = G_p(s) = \frac{9,97 \cdot 10^{-5}s^2 + 2,5 \cdot 10^{-3}}{s^3 + 19,12 \cdot 10^{-3}s^2 + 23,36s + 35,3 \cdot 10^3}$$

Transformando a função de transferência para a sua versão discreta mediante a transformada Z com um retentor de ordem zero (ZOH), a fim de obter uma função com dados amostrados implementada em intervalos de tempo denominado período de amostragem de $Ts = 10^{-6}$ s, encontra-se:

$$G(z) = \frac{9,955 \cdot 10^{-7}z^2 - 1,991 \cdot 10^{-6}z + 9,984 \cdot 10^{-7}}{z^3 + 2,98z^2 + 3,015z + 0,9998} \cong 0$$

B.2 – Equacionamento da identificação de sistemas pelo método Mollemkamp

A seguir será demonstrada o desenvolvimento da identificação de sistemas pelo Método de Mollemkamp.

Para determinar os parâmetros da FT é necessário necessários determinar os valores de três instantes de tempo t_1 , t_2 e t_3 da resposta ao degrau. Os quais são os instantes que o valor da saída é respectivamente 15%, 45% e 75% do valor final.

$$\begin{array}{llll} y_1 = 15\%y_f & \rightarrow & t_1 = t(y_1) & y_1 = 7.5 & \rightarrow & t_1 = 1 \\ y_2 = 45\%y_f & \rightarrow & t_2 = t(y_2) & y_2 = 22.5 & \rightarrow & t_2 = 2 \\ y_3 = 75\%y_f & \rightarrow & t_3 = t(y_3) & y_3 = 37.5 & \rightarrow & t_3 = 5 \end{array}$$

Para calcular os parâmetros da FT são aplicadas as seguintes equações:

$$x = \frac{t_2 - t_1}{t_3 - t_1},$$

$$x = \frac{2-1}{5-1} = 0.25,$$

$$\zeta = \frac{0.0805 - 5.547(0.475 - x)^2}{x - 0.356},$$

$$\zeta = \frac{0.0805 - 5.547(0.475 - 0.25)^2}{0.25 - 0.356} = 1.889.$$

$$f_2(\zeta) = \begin{cases} 2.6\zeta - 0.6 & \zeta \geq 1 \\ 0.708(2.811)^\zeta & \zeta < 1 \end{cases}.$$

$$f_2(\zeta) = 2.6\zeta - 0.6 = 4.3134.$$

$$\omega_n = \frac{f_2(\zeta)}{t_3 - t_1},$$

$$\omega_n = \frac{4.3134}{5-1} = 1.0785.$$

$$f_3(\zeta) = 0.922(1.66)^\zeta,$$

$$f_3(\zeta) = 0.922(1.66)^{1.89} = 2.402.$$

$$\theta = t_2 - \frac{f_3(\zeta)}{\omega_n},$$

$$\theta = 2 - \frac{2.402}{1.0785} = -0.227.$$

$$\tau_{1,2} = \frac{\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1}}{\omega_n}, \quad \zeta > 1$$

$$\tau_{1,2} = \frac{1.889 \pm \sqrt{(1.889)^2 - 1}}{1.0785}, \quad \zeta > 1$$

$$\tau_1 = 3.2374, \quad \tau_2 = 0.2655.$$

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U}, \quad K = 75.$$

$$G_p(s) = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{k\omega_n^2 e^{\theta s}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}, \quad \zeta < 1$$

$$G_p(s) = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{ke^{\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}, \quad \zeta \geq 1$$

$$G_p(s) = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{75e^{-0,227s}}{(3.2374s + 1)(0.2655s + 1)}, \quad \zeta \geq 1$$

$$G_p(s) = \frac{75e^{-0,227s}}{0,86s^2 + 3,5s + 1}.$$

APÊNDICE C – CÓDIGO IMPLEMENTADO NA PLATAFORMA ARDUINO UNO

```

//Carrega a biblioteca do sensor ultrassonico
//#include <Ultrasonic.h>

//Define os pinos para o trigger e echo
//#define pino_trigger 4 //Pino disparador
//#define pino_echo 5 //Pino eco

//Pino usado para disparar os pulsos do sensor
int PinTrigger = 4;
//Pino usado para ler a saída do sensor
int PinEcho = 5;
float TempoEcho = 0;
//Velocidade do som em metros por segundo
const float Velocidade_mpors = 340;
//Velocidade do som em metros por microsegundo
const float Velocidade_mporus = 0.000340;

//Inicializa o sensor nos pinos definidos acima
//Ultrasonic ultrasonic(pino_trigger, pino_echo);

/* INÍCIO - VARIÁVEIS, CONSTANTES E PROTÓTIPOS DO MÓDULO MANUAL */
//Protótipo do Procedimento do Módulo Manual
void manual_modulo();
/* FIM - VARIÁVEIS, CONSTANTES E PROTÓTIPOS DO MÓDULO MANUAL */

/* INÍCIO - VARIÁVEIS, CONSTANTES E PROTÓTIPOS DO MÓDULO PID
CONVENCIONAL */
void conv_modulo();
/* FIM - VARIÁVEIS, CONSTANTES E PROTÓTIPOS DO MÓDULO PID CONVENCIONAL
*/

/* INÍCIO - PROCEDIMENTO SETUP */
void setup() {
    //Configura pino de Trigger como saída e inicializa com nível baixo
    pinMode(PinTrigger, OUTPUT);
    digitalWrite(PinTrigger, LOW);
    //Configura o pino Echo como entrada
    pinMode(PinEcho, INPUT);
    //Configura a Velocidade da Comunicação Serial
    Serial.begin(9600);
}
/* FIM - PROCEDIMENTO SETUP */

/* INÍCIO - PROCEDIMENTO LOOP */
void loop() {
    //Variável de Seleção do Módulo
    int modulo_selecionado = -1;

    //Aguarda Recebimento do Módulo Selecionado
    while (Serial.available()==0){};

    //Faz a Leitura do Módulo
    modulo_selecionado = Serial.read();

    //Se Selecionado o Módulo Manual - 'W'
    if (modulo_selecionado == 87) {
        //'W' - Conexão Estabelecida Corretamente com Módulo Manual
        Serial.println("W");

        //Executar Módulo Manual
    }
}

```

```

    manual_modulo();
}
//Se Selecionado o Módulo Controlador Padrão - 'X'
else if (modulo_selecionado == 88) {
    //'X' - Conexão Estabelecida Corretamente com Módulo Controlador
    Padrão
    Serial.println("X");

    //Executar Módulo PID Convencional
    conv_modulo();
}
}
/* FIM - PROCEDIMENTO LOOP */

/* INÍCIO - PROCEDIMENTO MÓDULO MANUAL */
void manual_modulo() {
    int leitura_serial = -1;
    int leitura_pot = 0;
    int sinal_motor = 0;
    bool comando = false;
    float aux;
    int aux1;
    //float ultrasom = 95 - ultrasonic.read();

    while(true) {
        if (Serial.available() != 0) {
            leitura_serial = Serial.read();
            //'I' - Comando Iniciar
            if (leitura_serial == 73) {
                comando = true;
            }
            //'P' - Comando Parar
            else if (leitura_serial == 80) {
                comando = false;
            }
            //'S' - Comando Sair
            else if (leitura_serial == 36) {
                break;
            }
            //'L' - Comando Leituras
            else if (leitura_serial == 76) {
                //Caracter Indicativo de Leituras
                Serial.print('L');
                Serial.print(',');
                //Sinal Lido do Sensor de ultrasom
                Serial.print((int)aux1);
                Serial.print(',');
                //Sinal Lido do Potenciômetro
                Serial.print((int)leitura_pot);
                Serial.print(',');
                //Sinal Aplicado Ao motor
                Serial.println((int)sinal_motor);
            }
            leitura_serial = -1;
        }

        if (comando == true) {
            //Envia pulso para o disparar o sensor
            DisparaPulsoUltrassonico();
            //Mede o tempo de duração do sinal no pino de leitura(us)

```

```

    TempoEcho= pulseIn(PinEcho,HIGH);
    aux=91-(CalculaDistancia(TempoEcho)*100);
    aux1=aux;
    Serial.println("Distancia em centimetros");
    Serial.println(aux1);
//    delay(2000);

    leitura_pot = map(analogRead(0), 0, 1023, 0, 255);
    sinal_motor = leitura_pot;
    analogWrite(9, sinal_motor);
}
else {
    sinal_motor = 0;
    analogWrite(9, sinal_motor);
}
delay(1);
}
}

//Função para enviar o pulso de trigger
void DisparaPulsoUltrassonico()
{
    //Para fazer o sensor enviar um pulso ultrassônico, tem
    //que enviar para o pino trigger um sinal de nível alto
    //com pelo menos 10us de duração
    digitalWrite(PinTrigger, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(PinTrigger, LOW);
}

//Função para calcular a distancia em metros
float CalculaDistancia(float tempo_us)
{
    return((tempo_us*Velocidade_mporus)/2);
}

/* FIM - PROCEDIMENTO MÓDULO MANUAL */

/* INICIO - PROCEDIMENTO MÓDULO PID CONVENCIONAL */
void conv_modulo() {
    int    leitura_serial = -1;
    int    leitura_pot = 0;
    double sinal_motor = 0;
    bool   comando = false;
    char   str_set_point[4];
    char   str_P[7];
    char   str_I[7];
    char   str_D[7];
    float  distancia;
    int    aux;
//    long    microsec = ultrasonic.timing();
//    float   distancia = 95 - ultrasonic.convert(microsec,
Ultrasonic::CM);

    double kp = 75; //7.5
    double ki = 0.0099; //0.0099
    double kd = 6625; //8.75

    static unsigned long tempoAnterior = 0;
    static double erroAnt = 0;
    static double somaErro = 0;

```

```

unsigned long      tempoAtual = millis();
volatile double   dT = (double)(tempoAtual - tempoAnterior);
//Tempo de amostragem em milisegundos
int               ref = 50;
double            erro = ref - distancia;
double            erroDer = erro - erroAnt;

while(true) {
  if (Serial.available() != 0) {
    leitura_serial = Serial.read();
    //'I' - Comando Iniciar
    if (leitura_serial == 73) {
      comando = true;
    }
    //'P' - Comando Parar
    else if (leitura_serial == 80) {
      comando = false;
    }
    //'$' - Comando Sair
    else if (leitura_serial == 36) {
      break;
    }
    //'L' - Comando Leituras
    else if (leitura_serial == 76) {
      //Caracter Indicativo de Leituras
      Serial.print('L');
      Serial.print(',');
      //Sinal Lido do Sensor de ultrasom
      Serial.print((int)distancia);
      Serial.print(',');
      //Sinal Lido do Potenciômetro
      Serial.print((int)leitura_pot);
      Serial.print(',');
      //Sinal Aplicado Ao motor
      Serial.println((int)sinal_motor);
    }
    //'S' - Atribuição do SetPoint
    else if (leitura_serial == 83) {
      //Aguarda Recebimento dos Bytes do valor de SetPoint
      while (Serial.available() < 2) {}

      str_set_point[0] = Serial.read();
      str_set_point[1] = Serial.read();
      str_set_point[2] = '\n';

      double set_point_temp = ref;
      ref = atof(str_set_point);

      if (ref > 95 || ref < 0)
        ref = set_point_temp;

      //Serial.println(ref);
      //Serial.flush();
    }
    //'G' - Atribuição dos Ganhos Kp - Ki - Kd
    else if (leitura_serial == 71) {
      //Aguarda Recebimento dos Bytes dos Valores do Ganhos
      while (Serial.available() < 18) {}

      str_P[0] = Serial.read();
      str_P[1] = Serial.read();

```

```

    str_P[2] = Serial.read();
    str_P[3] = Serial.read();
    str_P[4] = Serial.read();
    str_P[5] = Serial.read();
    str_P[6] = '\n';

    str_I[0] = Serial.read();
    str_I[1] = Serial.read();
    str_I[2] = Serial.read();
    str_I[3] = Serial.read();
    str_I[4] = Serial.read();
    str_I[5] = Serial.read();
    str_I[6] = '\n';

    str_D[0] = Serial.read();
    str_D[1] = Serial.read();
    str_D[2] = Serial.read();
    str_D[3] = Serial.read();
    str_D[4] = Serial.read();
    str_D[5] = Serial.read();
    str_D[6] = '\n';

    kp = atof(str_P) > 00.000 && atof(str_P) <= 10.000 ?
atof(str_P) : kp;
    ki = atof(str_I) > 00.000 && atof(str_I) <= 10.000 ?
atof(str_I) : ki;
    kd = atof(str_D) > 00.000 && atof(str_D) <= 10.000 ?
atof(str_D) : kd;

    Serial.println(kp);
    Serial.println(ki);
    Serial.println(kd);

}
leitura_serial = -1;
}

if (comando == true) {
    tempoAtual = millis();
    dT = (double)(tempoAtual - tempoAnterior); //Tempo de amostragem
em milisegundos

    if (dT >= 0.01) { //cada 10ms(tempo de amostragem)
//          microsec = ultrasonic.timing();
//          distancia = 95 - ultrasonic.convert(microsec,
Ultrasonic::CM);

//Envia pulso para o disparar o sensor
DisparaPulsoUltrassonico();
//Mede o tempo de duração do sinal no pino de leitura(us)
TempoEcho= pulseIn(PinEcho,HIGH);
distancia=91-(CalculaDistancia(TempoEcho)*100);
aux=distancia;
Serial.println("Distancia em centimetros");
Serial.println(aux);

    erro = ref - distancia;
    erroDer = erro - erroAnt;
    somaErro += erro;
    sinal_motor = kp * erro + (somaErro*ki) + kd * erroDer;

```

```
    if (sinal_motor > 255) {
        sinal_motor = 255;
    }
    if (sinal_motor < 0) {
        sinal_motor = 0;
    }
    analogWrite(9, floor(sinal_motor));
    erroAnt = erro;
    tempoAnterior = tempoAtual;
    //delay(1);
}
}
else {
}
}
}
/* FIM - PROCEDIMENTO MÓDULO PID CONVENCIONAL */
```