



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NATHAN PINHEIRO ROCHA

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA DIDÁTICA BASEADA EM CUBESAT

Recife
2024

NATHAN PINHEIRO ROCHA

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA DIDÁTICA BASEADA EM CUBESAT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto

Coorientador: MSc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior

Recife
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Rocha, Nathan Pinheiro.

Desenvolvimento de uma planta didática baseada em cubesat / Nathan
Pinheiro Rocha. - Recife, 2024.

78 p : il., tab.

Orientador(a): Rafael Cavalcanti Neto

Coorientador(a): Valdemar Moreira Cavalcante Junior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Planta Didática. 2. CubeSat. 3. Sistemas de Controle. 4. Metodologia de
Ensino. I. Neto, Rafael Cavalcanti . (Orientação). II. Cavalcante Junior,
Valdemar Moreira. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

NATHAN PINHEIRO ROCHA

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLANTA DIDÁTICA BASEADA EM CUBESAT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 30/07/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rafael Cavalcanti Neto (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

MSc. Valdemar Moreira Cavalcante Junior (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

MSc. Renato Andrade Freitas (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Eduardo José Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Fernando Rocha e Barthyra Albuquerque, que possuem contribuições a este trabalho muito maiores do que técnicas, mas contribuições imensuráveis através do amor, suporte, presença e tudo o mais que fizeram em minha vida. Eles abriram mão de muita coisa para que eu pudesse me mudar a outra cidade e cursar o que eu sempre quis, eles continuam a colocar a mim e minha irmã como prioridades em suas vidas. Agradecer, também, a minha irmã Esther Rocha, que é a única pessoa que compartilhou comigo quase todos os momentos de vida, sejam eles bons ou ruins, que assim como meus pais, me ajudou a construir esse trabalho e concluir esse curso de maneiras imensuráveis.

Agradecer a toda minha família, meus avós, os de sangue e os que mesmo não sendo de sangue me amaram tanto que nunca faltou nada da parte deles a mim. Aos meus tios, que são tantos que nomear cada um e seu impacto para que eu concluísse esse curso iria ser maior que o próprio trabalho. Meus primos, que a cada dia estamos mais próximos e compartilhando as loucuras da família. Agradecer especialmente a meu tio Nivaldo Pinheiro e seus filhos, mesmo não tendo tido contato com eles antes, abriram as portas de sua casa para mim em Recife no primeiro período, sem esse apoio eu não teria nem começado o curso, muito obrigado.

Aos meus amigos do MH, que desde o fundamental 1 ou 2 nos conhecemos, já são mais de 10 anos de amizade. Marx Vinícius, Arthur Farias, Matheus Santos, Carlos Leal, Gabriel Araújo, Pedro Victor, Luiz Henrique, Gabriel Cronembergue, Lucas Nunes, Douglas Araújo, Vinicius Santiago e Adelmo Junior. Todos eles fizeram parte fundamental nessa caminhada, sempre me chamando para sair com eles em Caruaru e tirando minha cabeça da ansiedade. A minha amiga Juliana Leite, que mesmo nos vendo no máximo 3 vezes no ano, sempre teve as conversas muito importantes para mim quando nos víamos.

Agradecer a Vinicius Santiago e Lucas Gabriel, pelos anos morando junto no apartamento 304, foram muito divertidos os momentos compartilhados. Especialmente a Vinicius, que já era um dos meus melhores amigos e se tornou um irmão, obrigado por todas as conversas, as pizzas, os açaís, os treinos juntos e todos os momentos que tivemos.

Agradecer aos meus orientadores. Professor Rafael foi uma das melhores pessoas com quem me deparei na UFPE, o conheci na disciplina de Laboratório de Engenharia de Controle, onde cursei com um amigo somente pelo interesse no tema e graças a isso várias portas se abriram. Fui monitor da disciplina, comecei iniciação científica com o professor, assisti disciplina da pós-graduação ministrada por ele, me orientou sendo fundamental no êxito desse TCC e criamos uma amizade para além da instituição. Rafael foi e é um verdadeiro mentor, me orientou por todo o resto da graduação e agora começo o mestrado sobre sua orientação, tenho certeza que essa parceria irá render ótimos resultados.

Além dele, tem Valdemar. Conheci ele no início do seu mestrado quando fazíamos parte da equipe Capibarib-E Racing (eu ainda na graduação), de cara nos demos bem e construímos uma amizade que dura até hoje. Valdemar me apresentou o GEPAE, a pesquisa, o ensino e muitas coisas que eu não imaginava o tamanho de oportunidades que poderia me trazer. Todas as noites no servidor do Madeirinha jogando ARAM se tornaram dias trabalhando em conjunto no GEPAE.

Um agradecimento especial ao Grupo de Eletrônica de Potência (GEPAE) por todo apoio, quando eu não acreditava mais que conseguiria seguir os prazos desse trabalho, todos eles me fizeram acreditar e sem o apoio deles dificilmente conseguiria ter o finalizado. São eles, Tiago Alves, Clarissa Gusmão, Felipe José, Ericles Maurício, Eduardo Augusto, Samuel Dias, Lucas Gabriel, Eduardo Barbosa, Camila Bandeira, Nestor Medina, Gustavo Azevedo, Pedro Henrique, Igor Veloso, Beatriz Almeida, Iago Daniel e Diego Hamilton. Dentre eles, houve um que me aceitou como estagiário na corporação que faz parte e graças a isso fui capaz de concluir o curso e ingressar imediatamente no mestrado, Renato Freitas, um obrigado é pouco.

Agradecer também a equipe de Formula SAE Capibarib-E Racing, onde passei 3 anos da minha graduação e foi a porta de entrada para conhecer o mundo prático da engenharia. Fiz grandes amizades, desenvolvi habilidades técnicas e pessoais e o mais importante de tudo: fiz parte de uma equipe. Todos os anos foram de muito aprendizado e batalhas, mas que ao olhar para traz me sinto grato do tempo vivido.

Agradecer a banca por todo o processo avaliativo, de sugestões, correções e pelo tempo dedicado a leitura do projeto. Fiz questão de seguir com suas orientações e enriquecer meu texto. Agradecer a todos os professores, técnicos e servidores do departamento de engenharia elétrica pelos serviços prestados.

RESUMO

Devido à evasão dos cursos de engenharia, motivada pelas escolhas de metodologias de ensino onde os alunos não são protagonistas e de disciplinas puramente teóricas, têm-se desenvolvido novas metodologias para reverter a diminuição no número de graduandos em engenharia. Uma solução para esse problema é na utilização de metodologias ativas de aprendizagem, onde o aluno toma as rédeas de sua educação e possui disciplinas nas quais deve propor soluções a problemas, resolver projetos ou realizar questionários antes das aulas. Especificamente no ensino de sistemas de controle, o ensino frequentemente se restringe a disciplinas puramente teóricas, onde projetam-se controladores, desenvolvem-se sistemas em malha fechada, mas somente em âmbito matemático ou ambiente de simulação. Com intuito de levar metodologias ativas ao ensino de sistemas de controle, este trabalho se baseia na metodologia de *project based learning* (PjBL), que consiste em ofertar aos alunos um projeto que eles devem desenvolver, atendendo requisitos de execução, confiabilidade e tempo. No contexto de sistemas de controle, pode-se utilizar plantas didáticas, que são sistemas controláveis projetados para uso em sala de aula, onde estudantes aplicam as teorias de sistemas de controle em processos físicos. Portanto, este trabalho é sobre o desenvolvimento de uma planta didática baseada em tecnologia CubeSat, um nanossatélite. Os alunos são responsáveis por desenvolver o projeto de um controlador de apontamento para o satélite, seguindo as características da metodologia PjBL. Assim, desenvolveu-se uma estrutura de suporte que permite a livre rotação em um eixo de um CubeSat, composto por: uma estrutura física do satélite modelado em *software* 3D e confeccionado por impressora 3D; uma placa eletrônica que contém sensor, atuador e microcontrolador; um *firmware* que realiza operação de malha aberta, malha fechada e uma interface homem-máquina (IHM) que se comunica via *bluetooth* através de um aplicativo para celulares. Após a montagem de todo o sistema, obteve-se o correto funcionamento da planta didática, sendo possível realizar a sua operação em malha aberta, determinando um valor de giro e obtendo a posição angular do satélite, e a operação em malha fechada, onde determina-se um ângulo de apontamento e o satélite aponta nessa direção continuamente. Além disso, foi possível determinar a modelagem matemática da planta, comprovando que é possível determinar diferentes controladores para esta planta, atendendo a diferentes requisitos.

Palavras-chaves: Planta Didática; Sistemas de Controle; CubeSat; Metodologia de Ensino.

ABSTRACT

Due to the drop in engineering enrollments, caused by teaching methodologies where students are not the main protagonists and courses are purely theoretical, new approaches have been developed to reverse the decline in engineering graduates. One solution to this problem is the adoption of active learning methodologies, where students take charge of their education and engage in disciplines where they propose solutions to problems, work on projects, or complete quizzes before classes. Specifically in the field of control systems education, teaching often remains confined to purely theoretical subjects involving controller design and closed-loop systems, typically in mathematical or simulation environments. In order to integrate active methodologies into control systems education, this study adopts the Project Based Learning (PjBL) methodology. PjBL involves assigning students a project they must develop, meeting criteria such as execution, reliability, and time constraints. To facilitate this, didactic plants are used as controllable systems designed for classroom use, where students apply control system theories to physical processes. Thus, this project focuses on developing a didactic plant based on CubeSat technology, a nanosatellite, where students are tasked with developing a pointing controller for the satellite, following the characteristics of PjBL. Consequently, a supporting structure allowing free rotation along one axis of a CubeSat was developed, a physical satellite structure was modeled using 3D software and fabricated via 3D printing. An electronic board containing sensors, actuators, and a microcontroller was designed, along with firmware enabling open-loop and closed-loop operations, and a human-machine interface (HMI) communicating via Bluetooth. After assembling the entire system, successful operation of the didactic plant was achieved. This included open-loop operation, determining a rotation value and obtaining the satellite's angular position, as well as closed-loop operation, where a pointing angle is set and the satellite continuously aligns in that direction. Furthermore, mathematical modeling of the plant was performed, demonstrating the ability to determine different controllers to meet various requirements.

Keywords: Didactic Plant; Control System; CubeSat; Active Methodologies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de controle de velocidade de uma máquina a vapor por James Watt.	16
Figura 2 – Pesquisa no <i>Google Scholar</i> com o termo “ <i>didactic platform</i> ”, realizada no dia 29/01/2024.	19
Figura 3 – Pesquisa no <i>Google Scholar</i> com o termo “ <i>education platform</i> ”, realizada no dia 08/02/2024.	20
Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta.	23
Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.	23
Figura 6 – Representação no plano complexo de polos e zeros.	24
Figura 7 – Resposta transitória de um sistema.	26
Figura 8 – Exemplo de uma função de transferência em malha fechada estável.	27
Figura 9 – Exemplo de uma função de transferência em malha fechada instável.	27
Figura 10 – Análise gráfica da conversão de um sinal analógico para um sinal discretizado.	29
Figura 11 – Impacto da frequência de amostragem de um sinal: (a) Problema de <i>sampling</i> com amostragem em baixa frequência, (b) amostragem com frequência igual a de Nyquist e (c) amostragem com frequência muito maior que a de Nyquist.	30
Figura 12 – Diagrama de blocos de sistema de controle em malha fechada com controlador digital.	31
Figura 13 – Representação gráfica do CubeSat UVA.	35
Figura 14 – Representação de um CubeSat com ADCS do tipo ativo.	36
Figura 15 – Modelos de rodas de reação usadas em CubeSat comerciais.	36
Figura 16 – Estrutura de suporte baseada no trabalho feito em Viana (2023).	39
Figura 17 – Nova estrutura para planta didática.	39
Figura 18 – Barra roscada com 8 <i>mm</i> de diâmetro, responsável pela conexão entre a estrutura de suporte e o CubeSat.	40
Figura 19 – Rolamento de 8 <i>mm</i> , que conecta a tampa do CubeSat com a estrutura de suporte.	40
Figura 20 – Placa de desenvolvimento ESP32-DevKitM-1, escolhida como módulo de computação.	42
Figura 21 – Baterias 18650 de Li-Ion e <i>holder</i>	43
Figura 22 – Sensor escolhido, MPU6050, embarcado em uma PCI de desenvolvimento.	44
Figura 23 – Componentes de um motor <i>coreless</i>	44
Figura 24 – Motor <i>coreless</i> do tipo 1020.	45
Figura 25 – Ponte H L298N, atuador do motor em placa de desenvolvimento.	45

Figura 26 – Esquemático completo da placa de circuito impresso.	46
Figura 27 – Representação das <i>footprints</i> , trilhas de conexão e posicionamento dos componentes na PCI.	47
Figura 28 – Vista superior da placa modelada em 3D.	47
Figura 29 – Vista inferior da placa modelada em 3D.	48
Figura 30 – Diagrama simplificado do circuito interno do L298N.	49
Figura 31 – Captura de tela do aplicativo <i>Serial Bluetooth Terminal</i> , que faz a interface entre o microcontrolador e o usuário para os estados <i>INIT</i> e <i>MENU</i>	50
Figura 32 – Interface em operação de malha aberta, no estado <i>OPENLOOP</i> do sistema.	51
Figura 33 – Interface em operação para medição das células de bateria, no estado <i>BATT</i> do sistema.	52
Figura 34 – Interface realizando a recalibração do sensor, no estado <i>ACCEL</i> do sistema.	52
Figura 35 – CubeSat fabricado em impressora 3D, do mesmo modelo e dimensões do proposto em Viana (2023).	53
Figura 36 – Modelagem das peças laterais do CubeSat proposto.	54
Figura 37 – Modelagem da tampa do CubeSat proposto.	54
Figura 38 – Modelagem da peça inferior do CubeSat proposto.	55
Figura 39 – Modelagem das barras transversais do CubeSat proposto.	55
Figura 40 – Modelagem do suporte do motor e da roda de reação proposto.	56
Figura 41 – Modelagem da tampa traseira proposto.	56
Figura 42 – CubeSat proposto com sua estrutura física completa.	57
Figura 43 – CubeSat proposto com sua estrutura física completa e placa de circuito impresso.	57
Figura 44 – Estrutura física do CubeSat montado com a PCI embarcada.	59
Figura 45 – Visão frontal da PCI projetada, com todos os componentes soldados.	61
Figura 46 – Visão traseira da PCI projetada, com todos os componentes soldados.	62
Figura 47 – CubeSat montado por completo, com PCI embarcada, roda de reação e estrutura de suporte.	63
Figura 48 – Resposta do satélite para um degrau de <i>duty cycle</i> com valor de 0,5.	64
Figura 49 – Resposta em degrau do modelo simplificado do satélite, com $J = 1$	65
Figura 50 – Comparação da resposta ao degrau aplicado no CubeSat operando em malha aberta, com a resposta ao degrau do modelo em caixa cinza.	66
Figura 51 – Aplicação de um degrau de 90° via IHM.	67
Figura 52 – Resposta da planta didática em malha fechada, a um degrau de 90° , com resposta amortecida.	68

Figura 53 – Resposta da planta didática em malha fechada, a um degrau de 90° , com controlador amortecido a distúrbios.	68
Figura 54 – Resposta da planta didática em malha fechada, a um degrau de 90° , com resposta subamortecida.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Impacto de cada termo do controlador PID independente em um sistema em malha fechada.	28
Tabela 2 – Comparação entre as placas de desenvolvimento ESP8266, Arduino UNO e ESP32.	43
Tabela 3 – Comparação entre os principais tipos de materiais para impressão 3D. .	57
Tabela 4 – Vídeos de demonstração dos testes de controla de apontamento e a distúrbio externo.	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PjBL	Aprendizagem Baseada em Projetos (<i>Project Based Learning</i>)
HAL	Camada de Abstração de Hardware (<i>Hardware Abstraction Layer</i>)
PETG	Polietileno Tereftalato Glicol (<i>Polyethylene terephthalate glycol</i>)
PLA	Ácido Polilático
ADC	Conversor Analógico Digital
DAC	Conversor Digital Analógico
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PVC	Policloreto de Vinila
PWM	Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width-Module</i>)
LED	Diodo Emissor de Luz
PCI	Placa de Circuito Impresso
RTOS	Sistema Operacional em Tempo Real (<i>Real Time Operating System</i>)
I2C	Barramento Serial Barramento Multimestre (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)
IHM	Interface Homem-Máquina
SMD	Dispositivo de Montagem Superficial (<i>Surface Mount Component</i>)
DCNs	Diretrizes Curriculares Nacionais
RPM	Rotação Por Minuto
ADCS	Sistema de Control de Atitude e Determinação (<i>Attitude and Determination Control System</i>)
DSP	Processador de Sinal Digital (<i>Digital Signal Processors</i>)
LEO	Órbita Terrestre Baixa (<i>Low Earth Orbit</i>)
PVC	Policloreto de Vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Tensão Elétrica
I	Corrente Elétrica
W	Potência Elétrica
mm	Milímetros
cm	Centímetros
m	Metros
Hz	Hertz
ms	Milissegundos
s	Segundos
g	Gramas
Kg	Quilogramas
K_p	Termo Proporcional
K_i	Termo Integral
K_d	Termo Derivativo
t_d	Tempo de atraso
t_r	Tempo de subida
t_p	Tempo de pico
M_p	Máximo Sobressinal
t_s	Tempo de Assentamento

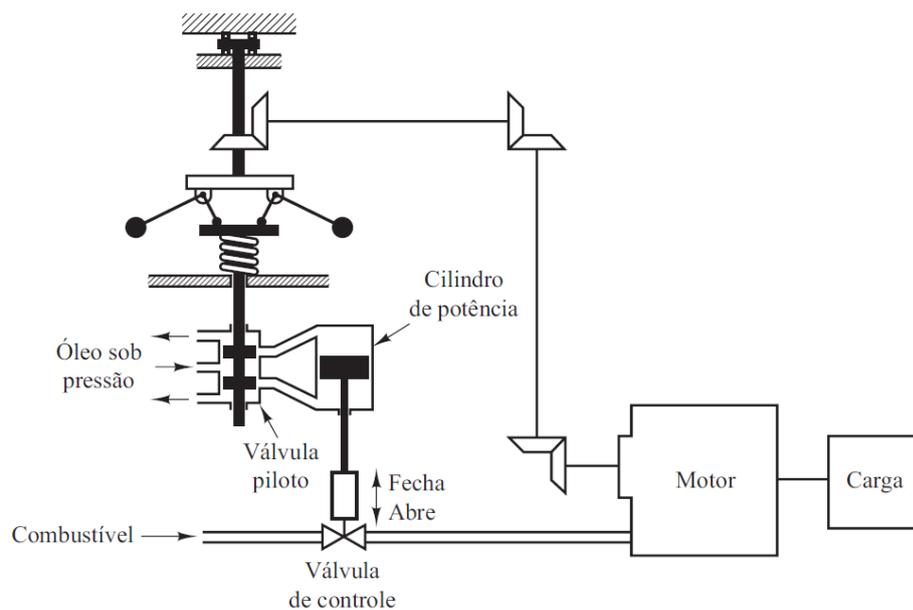
SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	20
1.2	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	SISTEMAS DE CONTROLE	22
2.1.1	Introdução a Controle	22
2.1.2	Modelagem de Sistemas	24
2.1.3	Projeto de um Controlador	25
2.1.4	Controle Digital	28
2.2	PLANTAS DIDÁTICAS	33
2.3	CUBESAT	34
3	DESENVOLVIMENTO DA PLANTA DIDÁTICA	38
3.1	PROJETO DA ESTRUTURA DE SUPORTE	38
3.2	PROJETO ELETRÔNICO	40
3.2.1	<i>Hardware</i>	41
3.2.2	<i>Firmware</i>	47
3.3	PROJETO DA ESTRUTURA FÍSICA	53
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	58
4	VALIDAÇÃO E USO DA PLANTA DIDÁTICA	59
4.1	VALIDAÇÃO E FUNCIONALIDADES DA ESTRUTURA FÍSICA	59
4.2	VALIDAÇÃO E FUNCIONALIDADES DO <i>HARDWARE</i>	60
4.3	OPERAÇÃO EM MALHA ABERTA	63
4.4	MODELAGEM DA PLANTA EM CAIXA CINZA	64
4.5	OPERAÇÃO EM MALHA FECHADA	66
4.6	APLICAÇÃO EM SALA DE AULA	69
4.7	CONCLUSÕES PARCIAIS	71
5	CONCLUSÕES	72
5.1	TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de controlar sistemas é antiga na história da engenharia. De fato, o primeiro controlador automático que se tem conhecimento foi construído por James Watt, era um regulador centrífugo para o controle de uma máquina a vapor no século XVIII (OGATA, 2011), conforme apresentado na Figura 1. Nos dias atuais, controladores automáticos são necessários nas mais diversas áreas, como na operação de conversores em microrredes, de máquinas elétricas, de sistemas robóticos, de veículos terrestres e espaciais (como CubeSats, drones e quadricópteros) e em muitas outras áreas do conhecimento. Logo, é de suma importância capacitar profissionais de diversas áreas das engenharias para atuarem com sistemas de controle, tanto no campo do controle clássico, quanto no campo do controle moderno.

Figura 1 – Sistema de controle de velocidade de uma máquina a vapor por James Watt.



Fonte: Adaptado de (OGATA, 2011).

De acordo com (FRANÇA et al., 2022), há uma grande evasão de estudantes nos cursos de engenharia, frequentemente motivada pela alta carga horária de disciplinas puramente teóricas. Além disso, (FURTADO et al., 2018) sugerem que as metodologias de ensino também contribuem para essa evasão. Diante disso, em 2019, por meio da revisão das Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) para os curso de graduação em engenharia (BRASIL, 2019), estabeleceu-se que tais cursos devem buscar metodologias de aprendizagem ativas, incluindo o desenvolvimento de trabalhos orientados em grupo e individuais. Especificamente na área de sistemas de controle, (FERNÁNDEZ-SAMACÁ; RAMÍREZ;

OROZCO-GUTIÉRREZ, 2012) definem que o ensino em controle deve ter em sua essência quatro objetivos:

1. Balanceamento entre teoria e prática;
2. Atender às necessidades da indústria;
3. Estimular o desenvolvimento de “habilidades transversais”; e
4. Utilizar novas tecnologias.

Uma metodologia ativa, quando comparada ao ensino tradicional que apenas faz uso de aulas expositivas, é mais eficaz (BARBOSA; MOURA, 2013). Através dessa metodologia, os alunos absorvem melhor o conteúdo apresentado pelo docente, aproveitam as aulas com maior satisfação e retêm informações por mais tempo (SILBERMAN, 1996). Dessa forma, é importante que o docente busque aplicar uma metodologia que atenda aos requisitos para o ensino da disciplina e incentive os alunos a serem protagonistas no processo de aprendizagem, tornando-se sujeitos ativos em sua própria formação.

Dentre as metodologias ativas, destaca-se a Aprendizagem Baseada em Projetos (PjBL - *Project Based Learning*), que teve seu início atribuído ao ano de 1909 com John Dewey e seu princípio de “aprender fazendo” (FRANÇA et al., 2022). A utilização de PjBL em sistemas de controle é bastante ampla, como evidenciado em trabalhos científicos, tais como Fernández-Samacá, Ramírez e Orozco-Gutiérrez (2012), sendo considerado uma boa solução no ensino de controle, pois facilita o aprendizado dos tópicos, encoraja aprendizagem ativa e permite o desenvolvimento de habilidades técnicas e transversais (ou *soft skills*). Habilidades transversais são habilidades comportamentais como liderança, trabalho em equipe, falar em público, lidar com prazos e se planejar.

Devido às necessidades apontadas para a melhora no ensino de sistemas de controle na graduação de engenharia, neste trabalho optou-se por utilizar uma planta didática com conceitos de PjBL para fornecer uma metodologia ativa em que o aluno seja protagonista no seu próprio aprendizado, aplicada para sistemas de controle. A função da planta didática é ser uma versão reduzida e mais acessível de uma planta ou processo físico, mantendo sua complexidade de análise e funcionamento, a fim de possibilitar a realização de atividades de controle, modelagem e demais atividades como ferramentas de aprendizado sem a necessidade de se ter uma em tamanho real.

Plantas didáticas comerciais são encontradas na literatura e em salas de aula de universidades, como no trabalho de conclusão de curso sobre técnica de controle em malha fechada de uma *Smar-PD3* (SANTOS, 2016) e no trabalho escrito por Verly et al. (2019) sobre a modelagem linear e não-linear da planta. Contudo, elas possuem elevado custo financeiro e não cobrem toda a necessidade de aplicações que se pode ter. Na literatura, há plantas didáticas aplicadas para sistemas de controle dos mais diversos tipos, como

a *ball and beam* (TORRE et al., 2015), *ball and plate* (BAY; RASMUSSEN, 2016), aeropêndulo (NETO et al., 2023) e até plantas de controle baseadas em aplicações mais diretas, como drones (ELLER et al., 2019), quadricópteros (SAMUELSEN; GRAVEN, 2018) e motores de corrente contínua (CABRÉ et al., 2021). Todas essas plantas já possuem um grau de maturidade didática grande.

Em busca de inovação, o autor deste trabalho de conclusão de curso optou por projetar e implementar uma planta didática com aplicação direta em alguma tecnologia consolidada, mas que fosse distinta das plantas didáticas clássicas. Nesse contexto, o trabalho de Viana (2023) foi utilizado como inspiração para este trabalho. Em Viana (2023), o autor buscou desenvolver um nanossatélite do tipo CubeSat, com estrutura fabricada utilizando uma impressora 3D, onde foram aplicadas técnicas de identificação de sistemas e controle para atitude (que significa a orientação do satélite) em um único eixo. Viana (2023) desenvolveu uma planta de baixo custo e fácil manutenção que realiza o apontamento do CubeSat por meio de controle digital. No entanto, a planta apresentou diversas limitações em termos de características didáticas e construtivas.

CubeSat é o nome dado a nanossatélites em formato de cubo, que possuem dimensões de 10x10x11,35 cm e até 2 kg. Esse formato básico é nomeado de 1U (CDS, 2022). É possível integrar múltiplas unidades de CubeSat para formar satélites maiores, como 2U, 3U, 12U e assim em diante.

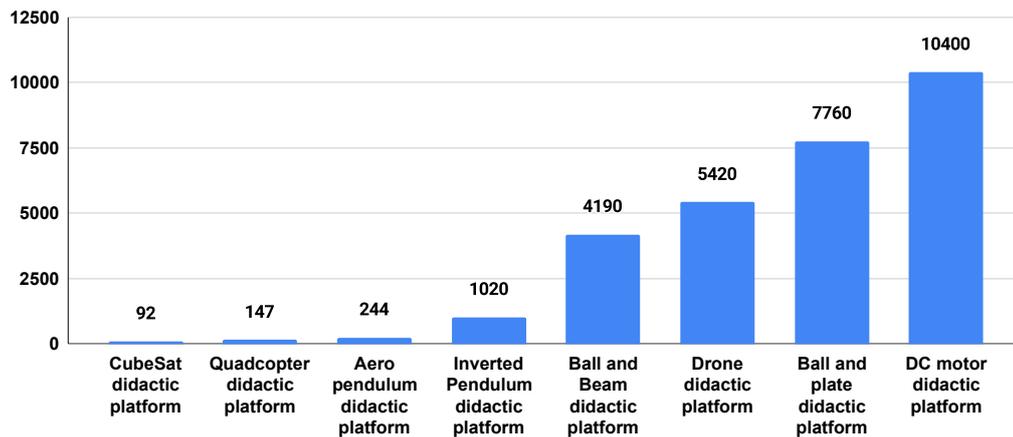
A necessidade dos estudantes de graduação em adquirir experiência prática na área aeroespacial impulsionou o surgimento de projetos dedicados ao desenvolvimento completo de satélites. Esses projetos priorizam a construção de satélites com menores custos, mais compactos e com melhor desempenho (HEIDT et al., 2000; PUIG-SUARI; TURNER; AHLGREN, 2001). Em 2018, foram lançados 855 satélites ao redor do mundo (VILLELA et al., 2019), comprova que essa tecnologia é relevante para a sociedade. Atualmente, CubeSats são lançados para diversas aplicações, como testes de tecnologias e missões científicas, representando uma tendência da miniaturização dos equipamentos espaciais (VILLELA et al., 2019), para a verificação de desmatamento na amazônia (MARIÑO et al., 2017) e constelações de CubeSats para monitoramento de regiões remotas no intuito de prevenir efeitos catastróficos de eventos naturais, como chuvas fortes que causam inundação (SANTILLI et al., 2018).

Dentre os sistemas de manobra de um CubeSat, o sistema de controle de atitude (ADCS - *Attitude and Determination Control System*) se destaca por ser capaz de controlar a orientação (ou apontamento) do satélite. Para sua implementação, o ADCS faz uso de sensores, atuadores e algoritmos de controle (LI et al., 2013), possibilitando que o satélite faça o apontamento de seus painéis fotovoltaicos na direção do sol ou mude sua orientação para obter uma melhor comunicação com as bases terrestres (AZEVEDO et al., 2022). Nesse cenário, sistemas de controle com três eixos são bastante comuns, os quais são normalmente baseados por um conjunto de rodas de reação, bobinas de torque

magnético, giroscópios e sensores de luz solar.

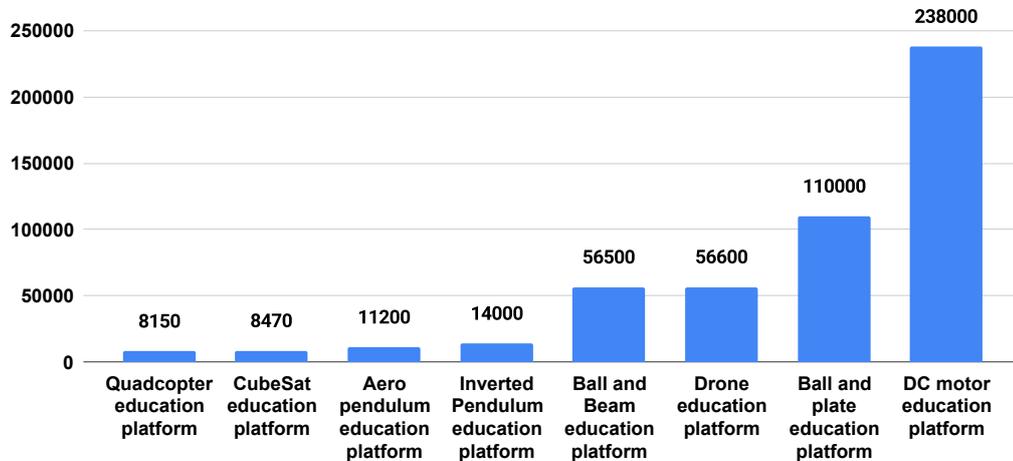
Para entender a relevância de CubeSat como planta de ensino, realizou-se uma busca na plataforma *Google Scholar*, comparando o número de publicações que fazem menção a diversas plantas didáticas encontradas na literatura. A Figura 2 ilustra essa comparação, a qual foi feita uma busca no dia 29/01/2024 considerando o termo “*didactic platform*” seguido do nome de plantas didáticas consolidadas. Posteriormente, no dia 08/02/2024, para abranger um maior número de trabalhos científicos, fez-se uma outra busca com outro termo “*education platform*” seguido com o nome das plantas didáticas, conforme ilustrado na Figura 3. Portanto, através de ambos os gráficos, pode-se perceber a pequena utilização da tecnologia CubeSat como plataforma didática para aplicação prática de conhecimentos vistos em cursos de graduação.

Figura 2 – Pesquisa no *Google Scholar* com o termo “*didactic platform*”, realizada no dia 29/01/2024.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 3 – Pesquisa no *Google Scholar* com o termo “*education platform*”, realizada no dia 08/02/2024.



Fonte: O Autor (2024).

1.1 OBJETIVOS

A partir da problemática levantada sobre o ensino de engenharia de controle e da busca por novas metodologias, este trabalho tem por finalidade o desenvolvimento de uma planta didática para controle de atitude em um único eixo de um CubeSat 1U, com base no uso de roda de reação. Para atender a esse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Projetar uma estrutura mecânica robusta (chassi) para o CubeSat que possa ser fabricada com o auxílio de uma impressora 3D;
- Montar uma estrutura de suporte para o CubeSat que isole o movimento do eixo que se deseja controlar e evite movimentos pendulares;
- Propor *hardware* e *firmware*, visando que o CubeSat tenha um funcionamento compatível com uma planta didática;
- Validar a planta didática; e
- Propor aplicações do CubeSat para o ensino de controle baseado na metodologia de Aprendizagem Baseada em Projeto.

1.2 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Este trabalho de conclusão de curso é organizado da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** Neste capítulo, são apresentados os conceitos básicos de sistemas de controle, projeto de controlador e controle digital, explicando termos, métodos e

funcionamento destes. Além disso, é feita uma fundamentação do que é planta didática, um resumo de algumas encontradas na literatura e por fim a aprofundação do funcionamento de CubeSat e do seu controle de atitude.

- **Capítulo 3:** Para este capítulo, é mostrado o passo a passo para o desenvolvimento da planta didática. Inicialmente, descreve-se a estrutura de suporte, responsável por garantir a livre rotação do satélite, deixando-o suspenso no ar. Posteriormente, detalha-se o desenvolvimento dos módulos eletrônicos, contemplando o projeto de uma placa de circuito impresso, a escolha de componentes como atuador, sensor e microcontrolador. Em seguida, é descrito o funcionamento do *firmware*, o qual incorpora o código que implementa a interface homem-máquina entre usuário e sistema, e realiza a operação do sistema em malha aberta ou fechada. Por fim, o projeto de modelagem 3D para a estrutura mecânica do CubeSat é apresentada.
- **Capítulo 4:** Neste capítulo, é apresentado o processo de validação dos componentes do CubeSat, eletrônicos e estruturais, e é apresentado as possíveis utilidades extras deles para aplicação em sala de aula. Além disso, são apresentados os possíveis problemas que se pode ter durante o funcionamento do satélite, e algumas formas de contorná-los. Por fim, faz-se a modelagem da planta utilizando uma estratégia caixa-cinza e é implementada uma malha simples de controle de apontamento.
- **Capítulo 5:** Neste capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas durante o trabalho, bem como o atendimento aos objetivos propostos e, por fim, as possibilidades de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo a contextualização e embasamento teórico sobre as tecnologias e definições utilizadas neste trabalho, para melhor introduzir o leitor ao conteúdo desenvolvido. Primeiramente, define-se o que são sistemas de controle e como identificá-los. Em seguida, é apresentada a descrição de uma planta didática, explicando sua funcionalidade e as mais encontradas na literatura. Prosseguindo com a explanação e uma breve história dos CubeSat e, por fim, uma introdução ao sistema de controle de atitude.

2.1 SISTEMAS DE CONTROLE

2.1.1 Introdução a Controle

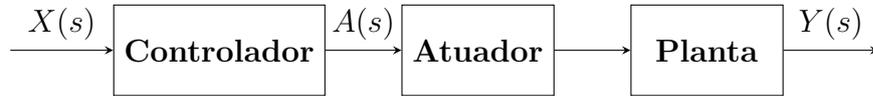
Segundo Nise e Matsura (2012), um sistema de controle é um conjunto de subsistemas e plantas (ou processos) unidos com o propósito de se obter uma saída e performance desejada de um processo, dada uma entrada especificada. Um exemplo disso é o de um ar condicionado, ao especificar uma temperatura de operação, a máquina deverá resfriar o ambiente suficientemente para manter a temperatura interna do ambiente o mais próxima possível da referência. Nesse caso, a entrada do sistema é a temperatura desejada e a saída a temperatura do ambiente, e ao alterar a velocidade da ventoinha, determina-se a velocidade (performance) com que se alcançará a saída esperada.

Um sistema de controle pode ser dividido em partes, as quais possuem denominações padronizadas definidas na literatura (OGATA, 2011). Os sinais internos de um sistema de controle também possuem denominações padronizadas, como é o caso da variável controlada, que é uma grandeza ou condição medida e que se deseja controlar (por exemplo, a temperatura). O controlador é o responsável por receber o sinal de referência e aplicar uma estratégia de controle, gerando um sinal que possa atuar a planta (normalmente chamado de ação de controle), aproximando a variável controlada do sinal de referência. Planta é o termo designado ao objeto ou processo físico que se deseja controlar (como o ar condicionado). Por fim, o atuador, que pode ser interno ou externo à planta, é o componente que recebe a ação de controle e o condiciona, gerando um sinal compatível com a potência e o funcionamento da planta.

Na Figura 4, tem-se um diagrama de blocos de um sistema em malha aberta. Esse tipo de solução é a mais simples possível, onde o controlador é projetado para que a saída seja igual à referência. Um problema nesse tipo de controlador é sua alta sensibilidade a mudanças de parâmetros e perturbações em todos os componentes da malha, fazendo com que pequenas alterações nos componentes do sistema gerem respostas de saída indesejadas, já que o controlador não é capaz de identificar essas mudanças. Contudo, caso se

obtenha precisamente as representações matemáticas da planta e não ocorra mudanças ou distúrbios significativos, essa é uma boa estratégia de implementação de controle e é mais fácil projetá-la em termos de estabilidade (OGATA, 2011).

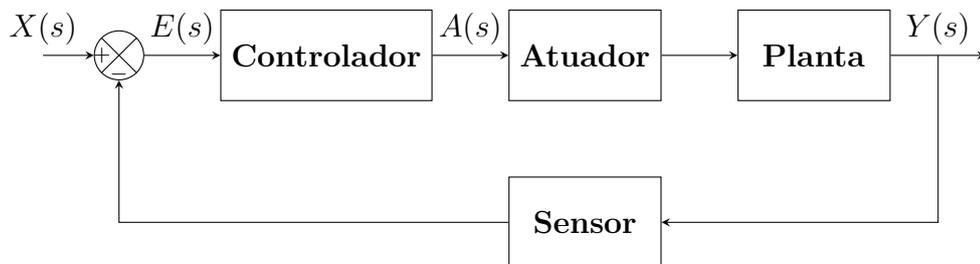
Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha aberta.



Fonte: O Autor (2024).

Para se obter um desempenho mais robusto, pode-se realimentar a variável controlada, o que é feito medindo o sinal de saída e comparando-o com o sinal de referência. Nesse tipo de caso, tem-se um sistema de controle em malha fechada, onde o controlador não atua diretamente pelo sinal de referência, mas pelo erro entre a referência e a saída. Essa estratégia de controle garante boas respostas a perturbações e mudanças de parâmetros dos componentes do sistema (OGATA, 2011), sendo então mais robusta do que a implementação em malha aberta, sua desvantagem é a necessidade de se utilizar um sensor. Na Figura 5, tem-se a representação do diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada. Nesse caso, há a adição de uma realimentação entre a saída com a entrada mediante o sensor, responsável por realizar a medição do sinal de saída, possibilitando a geração do sinal de erro para o controlador.

Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada.



Fonte: O Autor (2024).

Cada bloco na Figura 4 e na Figura 5 é representado por uma equação matemática (OGATA, 2011), que relaciona os sinais de entrada e saída com base nas características internas desses blocos. Esses modelos matemáticos são descritos por equações diferenciais que descrevem a dinâmica de cada componente ao longo do tempo e são obtidas pelas leis físicas que regem o sistema. Por exemplo, as leis de Kirchhoff descrevem sistemas elétricos, enquanto as leis de Newton descrevem sistemas mecânicos (OGATA, 2011).

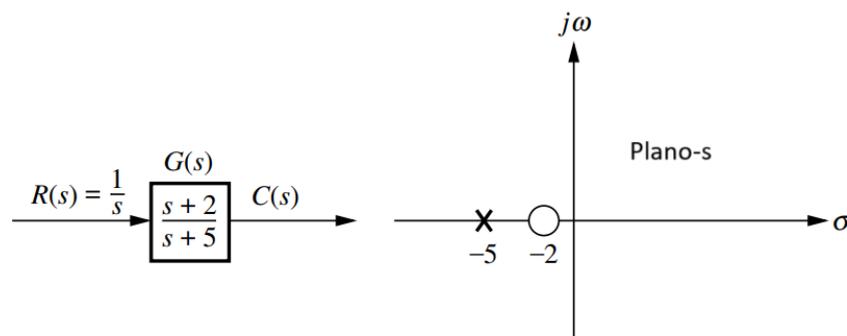
Contudo, caso se assuma que o sistema é invariante no tempo e de entrada e saída únicas, é possível descrever esse mesmo sistema no domínio da frequência, aplicando a transformada de Laplace nas equações diferenciais. No domínio da frequência, obtém-se a função transferência característica do bloco, dada por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}, \quad (2.1)$$

onde $Y(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de saída do bloco e $X(s)$ a transformada de Laplace do sinal de entrada do bloco.

Uma análise mais aprofundada da função de transferência se faz ao usar a terminologia de polos e zeros. Os polos são as raízes do polinômio característico do denominador que fazem a função de transferência ir para infinito (ou seja, que fazem o denominador ir para zero). Os zeros são as raízes do polinômio característico do numerador que faz com que a função de transferência seja zero (NISE; MATSSURA, 2012). Na Figura 6, há uma representação dos polos e zeros de uma função de transferência no plano complexo, sendo esta uma maneira bastante comum de representar graficamente os polos pelo símbolo “X” e zeros por um círculo.

Figura 6 – Representação no plano complexo de polos e zeros.



Fonte: Adaptado de (NISE; MATSSURA, 2012).

2.1.2 Modelagem de Sistemas

Construir modelos matemáticos adequados para sistemas de controle é uma das etapas mais importantes, segundo (OGATA, 2011). O método de modelar matematicamente a planta através de suas leis físicas é denominado de modelagem em caixa-branca (AGUIRRE, 2007), ou modelagem pela natureza do processo. Esse método é bastante oneroso, pois requer a obtenção de todas as equações que descrevem fisicamente o funcionamento da planta, sendo utilizado somente em casos bastante específicos.

Quando não se sabe a física por trás de determinado processo, ou até mesmo não se tem nenhuma informação do que ocorre internamente, recorre-se ao método de identificação de sistemas através da modelagem em caixa-preta (AGUIRRE, 2007). Nessa metodologia, aplica-se um sinal específico na entrada do sistema e mede-se a resposta gerada pela planta. Com ambos os dados armazenados, utiliza-se ferramentas computacionais para obter uma estimativa do modelo matemático que representa o processo (AGUIRRE, 2007).

Em alguns casos, é possível desenvolver os modelos matemáticos para a planta, porém não se tem todas as informações necessárias para descrevê-la completamente como caixa-branca, como o caso de não se conhecer exatamente os valores de alguns parâmetros. Nessas situações, utiliza-se da modelagem em caixa-cinza (AGUIRRE, 2007), na qual os parâmetros matemáticos faltantes do modelo são encontrados através do processo de identificação de sistemas, utilizando ensaios experimentais ou métodos numéricos.

2.1.3 Projeto de um Controlador

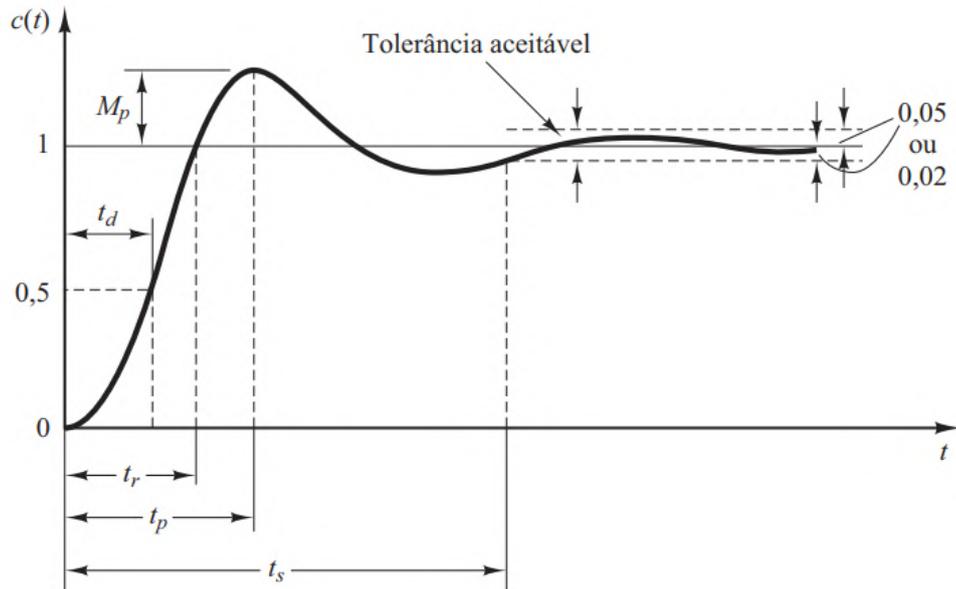
A função do controlador é garantir que os requisitos de projeto sejam atendidos, ou seja, assegurar que a saída seja igual à referência e que a planta tenha uma resposta com um desempenho definido (NISE; MATSSURA, 2012). Para o projeto do controlador, faz-se necessário modelar todos os elementos presentes no sistema: planta, atuador, sensor, circuito de condicionamento de sinais e quaisquer outros componentes presentes no sistema. Além disso, deve-se ter uma lista de requisitos que o controlador deve impor à planta para garantir que ela forneça o sinal de saída com um desempenho adequado. Isso significa que não basta apenas que a saída seja igual à resposta desejada pela entrada, mas que o caminho percorrido pela resposta da planta esteja dentro de limites aceitáveis para não danificar a própria planta ou qualquer outro elemento do sistema.

Segundo Nise e Matssura (2012) os três requisitos básicos no projeto de um sistema de controle são: resposta transitória, estabilidade e erro em regime permanente. A resposta transitória é justamente a trajetória inicial que a saída do sistema deve seguir, podendo ocorrer sobressinal ou não, e inclui o tempo que a saída leva para se adequar ao sinal de entrada e outros possíveis parâmetros. Na Figura 7, tem-se a representação da resposta transitória de um sistema qualquer. Nessa Figura, pode-se identificar os parâmetros descritos por (OGATA, 2011), que são:

- **Tempo de atraso** (t_d): o tempo necessário para a saída atingir metade de seu valor final pela primeira vez.
- **Tempo de subida** (t_r): o tempo para a saída ultrapassar de 10% a 90% do valor final.
- **Tempo de pico** (t_p): o tempo necessário para atingir o primeiro pico de sobressinal.
- **Máximo sobressinal** (M_p): o maior valor de pico da curva de saída.
- **Tempo de acomodação** (t_s): o tempo para a saída alcançar valores dentro de uma faixa de 2% ou 5% em torno do valor final.

A estabilidade é a especificação mais importante (NISE; MATSSURA, 2012). Se o sistema não é estável, não importam os parâmetros da resposta transitória e o erro em regime

Figura 7 – Resposta transitória de um sistema.



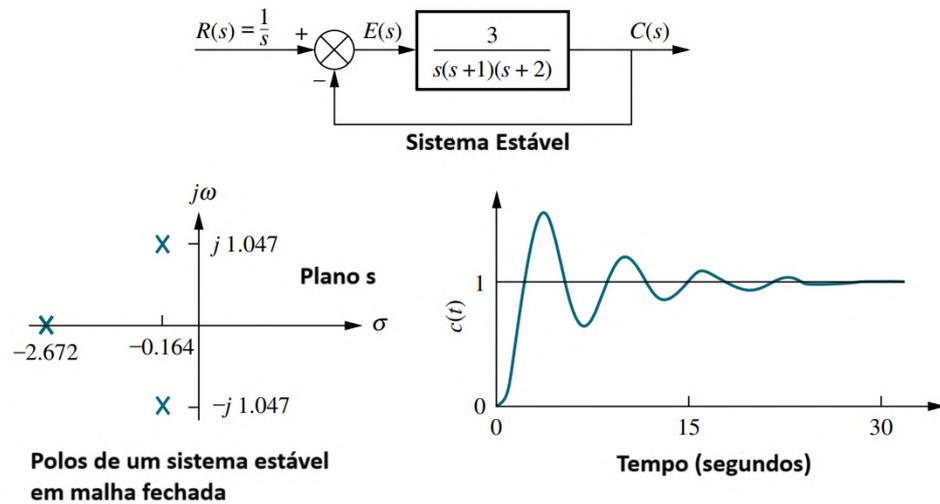
Fonte: (OGATA, 2011).

permanente projetados, pois ele não conseguirá representá-los. Assim, define-se um sistema estável se, dada uma entrada limitada, ele produz uma saída também limitada. Em contraste, um sistema é instável se, dada uma entrada limitada, sua saída se torna ilimitada (NISE; MATSSURA, 2012). Essa é uma das várias definições de estabilidade; outra definição mais simples é que um sistema é estável se a saída sempre retorna ao mesmo valor quando submetido ao mesmo sinal de entrada. Por outro lado, um sistema é instável se a saída diverge sem limites em resposta a qualquer sinal de entrada, e é marginalmente estável se a saída for composta por oscilações contínuas (OGATA, 2011).

Matematicamente, uma outra representação de estabilidade se dá pela posição dos polos da função de transferência em malha fechada. Sistemas estáveis possuem polos apenas no semiplano esquerdo do plano complexo (ou seja, com parte real negativa). Para sistemas instáveis, deve-se ter pelo menos um polo no semiplano direito do plano complexo (ou seja, com parte real positiva). Sistemas marginalmente estáveis possuem pelo menos um par de polos conjugados no eixo imaginário. A Figura 8 apresenta um exemplo de um sistema estável, enquanto a Figura 9 ilustra um exemplo de um sistema instável.

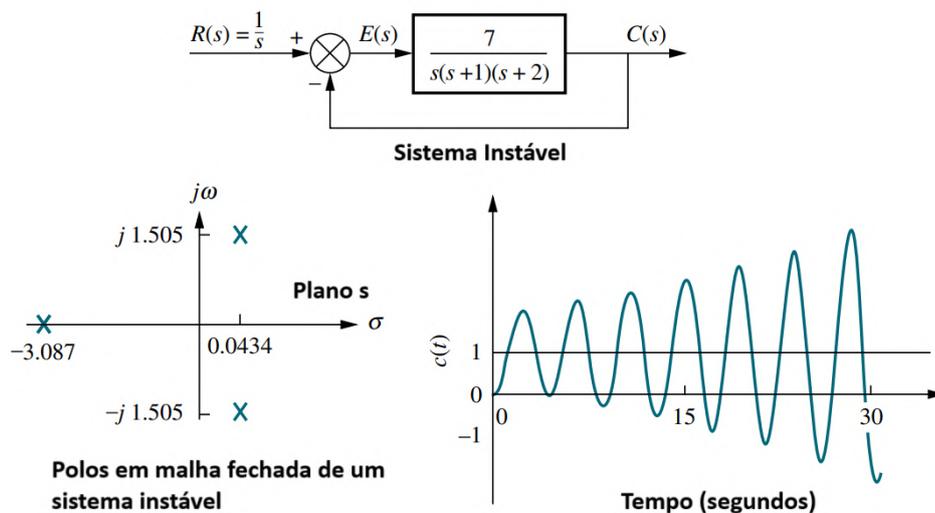
O terceiro e último requisito básico no projeto de um controlador (NISE; MATSSURA, 2012) refere-se ao erro em regime permanente, que é a diferença de entrada e saída quando o tempo tende ao infinito. Geralmente, uma entrada de teste é especificada para definir o erro em regime permanente. Ou seja, o sistema terá erro nulo para uma entrada do tipo degrau, tipo rampa ou do tipo parábola, que são os sinais testes mais comuns. No entanto, o fato do erro ser nulo para um tipo de entrada não garante que será nulo para os outros tipos (OGATA, 2011). Portanto, é importante escolher um tipo de entrada de

Figura 8 – Exemplo de uma função de transferência em malha fechada estável.



Fonte: Adaptado de (NISE; MATSSURA, 2012).

Figura 9 – Exemplo de uma função de transferência em malha fechada instável.



Fonte: Adaptado de (NISE; MATSSURA, 2012).

teste que seja representativo da realidade.

Entre os controladores mais utilizados, o controlador PID e suas variantes com modificações no número de polos e zeros, são encontrados em mais da metade dos controladores industriais em uso (OGATA, 2011). Isso reflete na quantidade de material disponível como referência ao se trabalhar com ele. Um ponto principal deste modelo de controlador é sua capacidade de proporcionar ótimas respostas para plantas cujo modelo matemático não é conhecido para as quais métodos analíticos não podem ser utilizados (OGATA, 2011).

Além disso, o “P” no nome do controlador refere-se ao termo proporcional. Por si só, o controle proporcional não consegue eliminar totalmente o erro em regime permanente, mas gera uma ação de controle proporcional ao erro mediante um ganho K_p fixado. O

“ I ” refere-se ao termo integrador, ele reduz o erro em regime permanente (ANG; CHONG; LI, 2005) através de um compensador de baixa frequência, representado por um termo integrativo “ $\frac{1}{s}$ ”. O “ D ” é o termo derivativo, que melhora a resposta transitória por meio de um compensador de alta frequência, representado por um termo derivador (ANG; CHONG; LI, 2005). Na Tabela 1, pode-se observar o impacto de cada um dos termos individualmente em um sistema de controle para um controle em malha fechada.

Tabela 1 – Impacto de cada termo do controlador PID independente em um sistema em malha fechada.

Malha Fechada	t_r	M_p	t_s	Erro em regime	Estabilidade
Aumento de K_p	Diminui	Aumenta	Pequeno aumento	Diminui	Piora
Aumento de K_i	Pequena diminuição	Aumenta	Aumenta	Elimina	Piora
Aumento de K_d	Pequena diminuição	Diminui	Diminui	Não tem efeito	Melhora

Fonte: Adaptado de (ANG; CHONG; LI, 2005).

O controlador PID no domínio da frequência é representado na Equação (2.2) e no domínio do tempo na Equação (2.3),

$$G(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (2.2)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.3)$$

onde K_p é o termo proporcional, K_i o termo integrativo e K_d o termo derivativo. É muito comum utilizar-se de controles derivados do PID (ANG; CHONG; LI, 2005), como é o caso de um PI, que somente contém o termo proporcional e integrativo, $K_d = 0$.

Percebe-se que o K_i está multiplicando um termo que integra o erro do sistema em relação ao tempo. Uma situação que pode acontecer é o termo integrativo aumentar tanto com o tempo que ultrapasse o limite de operação do atuador. Nesse caso, o atuador irá saturar e não fornecerá em sua saída o valor proporcional à ação de controle, já que esta ultrapassou o máximo valor de operação do atuador, e qualquer alteração na ação de controle não irá impactar o atuador (BOHN; ATHERTON, 1995). Para evitar esta situação, utiliza-se de uma ação *anti-windup*, a qual pode ser implementada de quatro formas distintas, segundo Bohn e Atherton (1995), onde sua função é de reduzir o efeito da saturação.

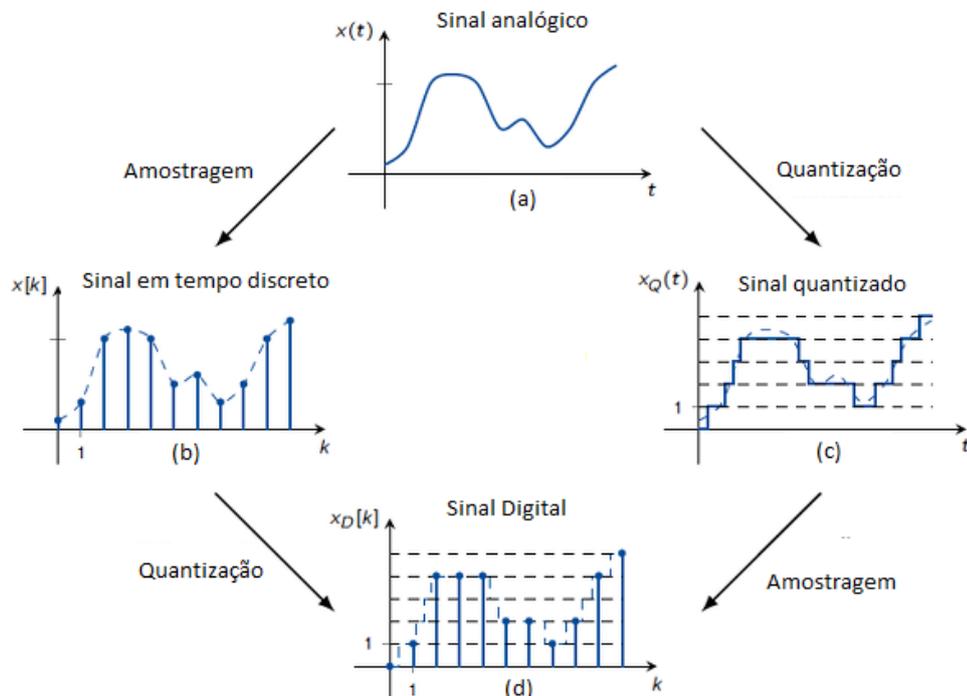
2.1.4 Controle Digital

Com o avanço dos semicondutores e dos microcomputadores, surgiu a possibilidade de implementar controladores por meio de plataformas digitais, geralmente utilizando microcontroladores ou *digital signal processors* (DSP) (BUSO; MATTAVELLI, 2015). No entanto, os sinais da natureza são de ordem analógica e variam continuamente ao longo do tempo. Um computador, por sua vez, opera necessariamente com um *clock*, que é

um temporizador que define os instantes de execução das suas tarefas, e trabalha em condições binárias, representando e interpretando sinais como “zeros” ou “uns”. Para realizar a compatibilidade entre um dispositivo analógico e um digital, é necessário passar seus sinais por um conversor analógico-digital (ADC) (BUSO; MATTAVELLI, 2015), cuja função é discretizar o sinal para que o computador consiga usá-lo. Na Figura 10(a), é mostrado um sinal analógico qualquer que é convertido em sinal digital por dois processos: amostragem seguida de quantização; e quantização para amostragem.

A discretização de um sinal é feito em duas etapas (BUSO; MATTAVELLI, 2015). Primeiro, deve-se realizar uma amostragem (*sampling*) desse sinal, o que significa computá-lo periodicamente em instantes de tempo fixo (chamado de instantes discretos), onde, a cada período, é feita uma medição (OGATA, 1995). Existem outras maneiras de amostrar um sinal (OGATA, 1995), como uma amostragem de taxa múltipla, que é mais usada quando se tem mais de uma malha, e a interna deve ser mais rápida que a externa. Na Figura 10(b), é apresentado o sinal em tempo contínuo introduzido na Figura 10(a) após passar por um processo de amostragem a tempo fixo. Nesse ponto, é possível observar que um sinal em tempo discreto é um conjunto de valores medidos do sinal analógico ao longo do tempo.

Figura 10 – Análise gráfica da conversão de um sinal analógico para um sinal discretizado.



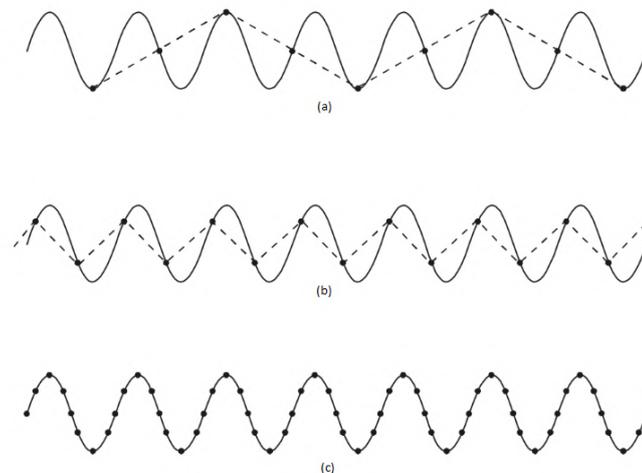
Fonte: Adaptado de (EITC, 2024).

Para reconverter o sinal de tempo discreto para tempo contínuo, utiliza-se de uma interpolação matemática, que é um método de se aproximar valores de um conjunto discreto por meio de uma equação algébrica. É preciso se atentar que, se o instante discreto que se realiza a medição for muito longo em relação ao sinal analógico, o sinal

em tempo discreto não representará bem o comportamento deste em relação ao tempo contínuo. Essa situação é conhecida como efeito de *aliasing* (BUSO; MATTAVELLI, 2015). Esse efeito pode gerar problemas e ruídos em todo o processo de discretização. Segundo o teorema de Nyquist-Shannon, para evitar o efeito *aliasing*, a frequência do amostrador deve ser no mínimo o dobro da frequência do sinal que se deseja representar, sendo esse limite conhecido como frequência de Nyquist (BUSO; MATTAVELLI, 2015). Para garantir o cumprimento dessa limitação, normalmente é utilizado um filtro *anti-aliasing* (BUSO; MATTAVELLI, 2015), que pode ser facilmente implementado através de um filtro passa baixa de primeira ordem implementado na realimentação do sistema de controle (PARK; MACKAY, 2003).

Na Figura 11(a) é apresentado um sinal senoidal qualquer que passou por uma amostragem em baixa frequência, gerando o sinal pontilhado que nada se parece com original. Na Figura 11(b) é apresentado o mesmo sinal periódico, agora com uma frequência de amostragem igual a frequência de Nyquist. Por fim, na Figura 11(c) é apresentado o mesmo sinal sendo amostrado com uma frequência muito maior que a de Nyquist.

Figura 11 – Impacto da frequência de amostragem de um sinal: (a) Problema de *sampling* com amostragem em baixa frequência, (b) amostragem com frequência igual a de Nyquist e (c) amostragem com frequência muito maior que a de Nyquist.



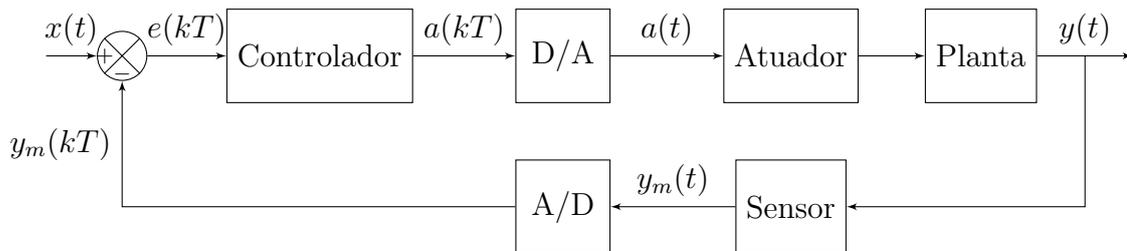
Fonte: Adaptado de (PARK; MACKAY, 2003).

A outra etapa da discretização de um sinal é passar por um processo de quantização, que consiste em representar a variável por um conjunto de valores distintos (OGATA, 1995). Esse processo pode ser visualizado como se o sinal fosse um conjunto de degraus com valores de amplitude diferentes. Em outras palavras, transforma-se um sinal em tempo contínuo ou em tempo discreto em um número finito de estados discretos (OGATA, 1995). Cada um destes estados discretos é representado por um código numérico, geralmente utilizando-se do sistema binário para representar um valor amostrado, em um processo chamado *encoding*, que associa um valor para cada estado discreto. Contudo, o número de

estados discretos depende do número de bits presente no ADC. Com isso, todo processo de quantização gera um erro associado à medição, já que amostragens que ficam entre dois estados discretos são arredondadas para o estado discreto mais próximo. Na Figura 10(c), o sinal originalmente apresentado na Figura 10(a) passou por um processo de quantização, onde cada linha tracejada refere-se a um estado discreto que posteriormente é associado a números binários pelo processo de *encoding*.

A Figura 12 apresenta o diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada com controle digital, em que utiliza-se de um conversor digital-analógico (DAC) para gerar a ação de controle do sistema. Muitas vezes o microcontrolador ou DSP não possuem ADC com valores de leitura compatíveis com as aplicações, seja pela saída do sensor ou até amplitude da tensão analógica. Nesses casos, faz-se necessário condicionar o sinal medido usando um circuito de condicionamento de sinais (PARK; MACKAY, 2003).

Figura 12 – Diagrama de blocos de sistema de controle em malha fechada com controlador digital.



Fonte: O Autor (2024).

Segundo Park e Mackay (2003), o circuito de condicionamento de sinais deve realizar diversas funções, como filtragem para evitar ruídos que impactam na leitura do sinal, amplificação para que o sinal alcance toda a resolução do ADC, linearização caso ele seja não-linear (geralmente feita por *software*), isolamento elétrico para evitar que transitórios de alta tensão cheguem à placa de controle e excitação no caso de alimentar possíveis sensores ou transdutores em uso. Nem sempre é necessário executar todas essas tarefas, considerando custo, simplicidade e tempo de projeto, ficando a cargo do projetista definir quais são necessárias (PARK; MACKAY, 2003).

Tem-se então a etapa de projeto do controlador digital. Como é bastante comum, as plantas que se deseja controlar são modeladas no domínio do tempo e, em seguida, a transformada de Laplace é utilizada para obter sua representação em função de transferência. O equivalente da transformada de Laplace para sistemas de controle em tempo-discreto é a transformada z (OGATA, 1995). A função de ambas é transformar equações diferenciais lineares em equações algébricas, uma na variável s (que considera tempo contínuo) e outra na variável z (que considera tempo discreto). Um sinal discreto é um conjunto de amostras de um sinal contínuo e é representado por $x(kT)$ (OGATA, 1995), onde cada amostra é dada por $x(0)$, $x(T)$, $x(2T)$, ..., e T é o período de amostragem. Outra maneira de se representar um sinal em tempo discreto é por uma sequência numérica $x[k]$, onde k é

a ordem que o número aparece na sequência. A Equação (2.4) representa a transformada z de uma função de tempo $x(t)$ onde amostrou-a por $x(kT)$, assumindo-se que $x(t) = 0$ para todo $t < 0$, sendo essa a definição de lado único (OGATA, 1995).

$$X(z) = \mathcal{Z}[x(t)] = \mathcal{Z}[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad (2.4)$$

Assim como existe a inversa da transformada de Laplace, também há a inversa da transformada z , relacionada a sistemas de controle de tempo discreto. A transformada z inversa de $X(z)$ é a sequência numérica $x[k]$, pelo operador \mathcal{Z}^{-1} (OGATA, 1995). Essa transformada gera uma única sequência numérica (conjunto de valores discretos) $x[k]$, mas não um único $x(t)$. Isso significa que somente tem-se os valores de $x(t)$ nos instantes discretos de tempo $t = 0, T, 2T, \dots$, e nada se tem sobre todos os outros valores que estão fora dos instantes de amostragem. Conseqüentemente, várias funções contínuas no tempo $x(t)$ podem ter a mesma função com valores discretos $x(kT)$.

Em certos casos, a transformada de $X(z)$ será uma razão de polinômios em função da variável z . Para obter uma resposta adequada, converte-se a razão em função de termos z^{-1} . Isso é feito ao se multiplicar a função de transferência discreta (em termos de z) pela razão entre z^{-j} e ele mesmo, onde j é o maior expoente da equação racional em termos de z . Dessa forma, trabalha-se com $X(z^{-1})$ ao invés de $X(z)$, onde o operador z^{-1} tem o nome de operador atraso no tempo (OGATA, 1995). A vantagem desta troca é que a transformada inversa z com o operador atraso representa os valores da função nos instantes passados do sistema. Isso significa que, ao se implementar um controlador digital, basta armazenar os valores antigos das variáveis e utilizá-los na equação que calcula a ação de controle.

A equação do controlador nada mais é que a razão entre a função discreta da ação de controle $U(z)$ com a função discreta do erro entre a referência e saída $E(z)$. Todos os termos de $E(z)$ que multiplicam o operador atraso z^{-1} , ao se aplicar a inversa da transformada z correspondem ao valor do erro da iteração anterior. Da mesma forma, os termos de $E(z)$ que multiplicam z^{-2} , após a inversa da transformada z correspondem ao erro calculado duas iterações passadas. O mesmo se aplica caso algum termo $U(z)$ seja multiplicado pelo operador atraso. Portanto, a transformada z inversa do operador de atraso multiplicado por alguma função $X(z)$ é $x[n - k]$, onde k é a k -ésima iteração anterior e é dado por z^{-k} .

Neste trabalho, realiza-se o projeto do controlador no domínio da frequência e, através do método *zero order hold* e da ferramenta *MATLAB*, discretiza-se a função de transferência para uma amostragem pré-definida. Essa prática é detalhada na literatura, como visto em Barbosa et al. (2023), onde toda a análise da planta e das especificações do controlador é feita no domínio do tempo contínuo ou frequência, seja por meio de lugar geométrico das raízes ou outra forma de análise, e somente discretiza-se a função de transferência obtida para o controlador digital.

2.2 PLANTAS DIDÁTICAS

Segundo Aguiar (2005), o ato de ensinar baseia-se em dois métodos: a transmissão de saberes e a criação de caminhos para a aprendizagem. O primeiro método está intimamente ligado à aulas expositivas, onde a função do professor é de expor aos estudantes o conhecimento existente, tornando-se sujeitos passivos de uma troca de saberes limitados ao ato de escutar e copiar o que é passado (FRANÇA; KATO; OGASHAWARA, 2022). Já no segundo método, os estudantes são os sujeitos ativos, que podem tomar as rédeas de sua educação e colocar em prática conhecimentos que adquiriram em aulas expositivas ou buscar formas de aprendizados baseados nos conhecimentos necessários para se resolver problemas (FRANÇA; KATO; OGASHAWARA, 2022). A metodologia ativa está intimamente ligada ao segundo método proposto por Aguiar (2005), onde o professor atua como um orientador dos seus alunos para que consigam resolver determinados problemas.

Inicialmente, o método PjBL foi utilizado por cursos na área de saúde na *McMaster University*, sendo posteriormente adaptado para os cursos de engenharia (FERNÁNDEZ-SAMACÁ; RAMÍREZ; OROZCO-GUTIÉRREZ, 2012). O nome deste modelo é autoexplicativo, os alunos aplicam os conhecimentos adquiridos na disciplina ou em disciplinas anteriores em um projeto (BARBOSA; MOURA, 2013), Esse projeto pode ser construtivo, envolvendo a criação, inovação ou proposta de solução para um problema ou situação; investigativo, utilizando o método científico para investigar uma questão ou situação didática; ou didático, com o objetivo de explicar, ilustrar ou demonstrar princípios científicos de objetos ou sistemas.

Existem empresas que produzem plantas didáticas para processos industriais como a *Smar*, *Authomathika* e *Assimile Tecnologias*, geralmente com plantas de nível, temperatura e pressão. Seu público-alvo são universidades ou cursos técnicos que precisam levar conhecimentos aplicados na indústria para sala de aula. Contudo, essas plantas possuem elevado custo e não se aplicam a todas as possíveis técnicas e variações de sistemas de controle, não sendo viáveis.

Em pesquisa pela literatura científica, é possível encontrar projetos de plantas didáticas de baixo custo, como no trabalho de Cabré et al. (2021). No qual, desenvolveu-se uma plataforma didática para controle de velocidade e posição no plano Z com um motor de corrente contínua. A função dela no ensino era utilizar a teoria de controle discreto no projeto um controlador digital para o controle de velocidade e posição do motor. Além disso, inclui-se a modelagem da planta, o código embarcado para o microcontrolador, código da interface gráfica e a comparação dos resultados reais com os simulados.

Em Neto et al. (2023), foi apresentada a primeira planta didática do Laboratório de Engenharia de Controle, disciplina do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, uma planta baseada em aeropêndulo para implementação de controle analógico ou digital para seu controle de angulação. Nessa planta, os alunos devem modelá-la e projetar o controlador de angulação

Em Bahri e Besbes (2018), foi utilizado um *smartphone* do tipo Android como uma espécie de satélite, aproveitando seus sensores como giroscópio, gesto, proximidade, pressão, magnético e outros foi possível captar estes dados do celular. Desenvolveu-se um sistema supervisor para captar estes dados e mostrá-los em tempo real por um computador.

Uma plataforma de baixo custo baseada em braço robótico foi feita em Soriano et al. (2014), com o objetivo do ensino de robótica aos alunos. Entre os principais tópicos para aprendizado, tem-se controle de motor, eletrônica, cinemática de controle e programação.

Outra plataforma de baixo custo está em Irigoyen, Larzabal e Priego (2013), por meio do kit de desenvolvimento *NXT* produto da empresa LEGO e de placas de desenvolvimento *Arduino*. O projeto conseguiu criar dois métodos de ensino, um está relacionado ao projeto de um robô seguidor de linha feito por alunos divididos em grupo e o outro o projeto de um robô humanoide com a plataforma *Kinect*.

2.3 CUBESAT

A tecnologia de CubeSat é bastante aprofundada na literatura, com dimensões de 10 cm x 10 cm x 11,35 cm especificado pela norma (CDS, 2022) e com representação na Figura 13. Conforme definido em (VIANA, 2023), o satélite possui diferentes módulos: módulo de energia, computação, comunicação, controle, estrutural, controle térmico e carga útil. Cada um destes possui funções específicas e servem para a operação completa do satélite. Contudo, para a utilização como planta didática, focando no controle de apontamento em um eixo, os módulos necessários são o de energia, computação, comunicação, controle e estrutural.

Por conseguinte, o primeiro módulo de energia é o sistema responsável por fornecer a alimentação de energia necessária para o funcionamento correto do satélite. Geralmente, pode conter painéis fotovoltaicos, baterias e conversores de eletrônica de potência para seu funcionamento adequado. Conforme demonstrado por (YAQOOB et al., 2022), uma grande área de pesquisa concentra-se no compartilhamento de energia, estabilidade nas microrredes e topologias de conversores para diminuir as perdas que estão presentes nos satélites. Parte da energia é gerada por painéis fotovoltaicos que devem estar operando no ponto de máxima potência. Como mostra a Figura 13, há a presença de painéis fotovoltaicos nas faces do satélite, sendo a principal fonte geradora de energia, enquanto dentro dele, há a presença de baterias para aumentar a confiabilidade e a distribuição de energia.

O módulo de computação é o cérebro do sistema, geralmente composto de processador ou microcontroladores com diversos periféricos. Eles contêm os *softwares* e realizam as tarefas de processamento de sinais e envio de comandos para os outros módulos. O maior desafio no projeto deste módulo é em relação ao ambiente hostil do espaço, onde os dispositivos computacionais devem suportar radiação constante, altas temperaturas e perigos ambientais (PQSHEDY, 2023). Assim como, limitação de energia e das taxas de *bandwidth* dos *clocks* internos.

Figura 13 – Representação gráfica do CubeSat UVA.



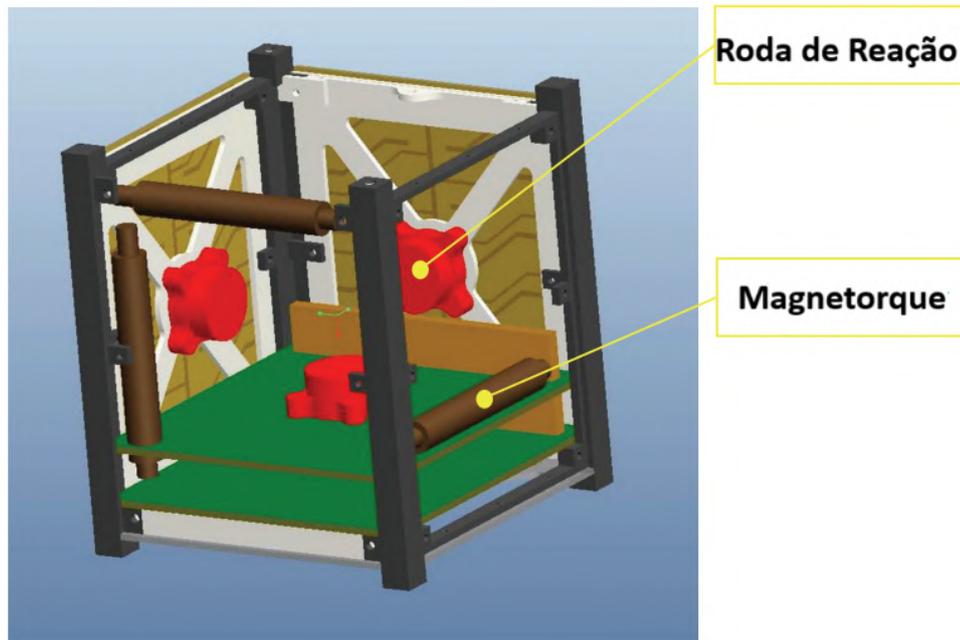
Fonte: (VIRGINIA, 2019).

De mesmo modo, os módulos de comunicação são os responsáveis para manter o contato entre o satélite e as estações de controle das missões. Geralmente, esses satélites de dimensões reduzidas, como o CubeSat, são lançados em *Low Earth Orbit* (LEO), em baixa altitude, o que garante baixas latências na comunicação (SAEED et al., 2020). Os protocolos de comunicação presentes nos satélites variam a depender do tipo da missão, este subsistema pode consumir até 50%, ou mais, de toda a energia disponível do satélite (WOELLERT et al., 2011), onde atualmente é possível realizar o envio de fotos com maior qualidade. Um desafio significativo é a alta taxa de mudança de posição em relação às estações terrestres (WOELLERT et al., 2011).

Ademais, o módulo de controle pode ser resumido ao ADCS. Ele depende de sensores para determinar sua orientação e atuadores que irão alterar ou manter a atitude do satélite, com isso o sistema pode ser definido como passivo ou ativo (WOELLERT et al., 2011). O ADCS passivo é aquele que se utiliza do meio ambiente para orientar naturalmente o satélite, isso é feito com um conjunto de ímãs permanentes que orienta o satélite no sentido dos polos magnéticos terrestres. Contudo, devido a necessidade de se ter componentes eletrônicos menores e mais robustos, usa-se do ADCS ativo, com rodas de reação, magnetorques, magnetômetro e motores cada vez mais miniaturizados. Na Figura 14, mostra-se um CubeSat com rodas de reação e magnetorques, um ADCS ativo.

Por meio disso, uma roda de reação é o conjunto de um *flywheel* de grande inércia com um motor de corrente contínua acoplado ao seu eixo. Quando as rodas estão sujeitas a variações de aceleração, elas produzem um torque em relação ao eixo de rotação do satélite pelo fundamento da terceira lei de Newton de que toda ação gera uma reação (CAMPOS;

Figura 14 – Representação de um CubeSat com ADCS do tipo ativo.



Fonte: Adaptado de (LI et al., 2013).

ROMANO; LIMA, 2018). Dessa maneira, quando a roda gira em um sentido, o satélite gira no sentido oposto, seguindo as leis de Newton. A Figura 15, apresenta diferentes modelos de rodas de reação disponibilizadas comercialmente.

Figura 15 – Modelos de rodas de reação usadas em CubeSat comerciais.



Fonte: (SATNOW, 2023).

Em complemento, os giroscópios são sensores que armazenam a velocidade angular e aceleração de maneira precisa (RASSÖLKIN et al., 2021). No entanto, eles não conseguem fornecer a atitude do satélite, especialmente se este estiver estacionário. Para determinar a orientação prática do CubeSat, integra-se a informação de velocidade angular do giro-

cópio, mas não é recomendável depender exclusivamente dele no espaço (RASSÖLKIN et al., 2021) (XIA et al., 2017). Para complementar a atitude do CubeSat, utiliza-se magnetômetro e sensores solares, o primeiro mede o campo magnético em três eixos diferentes e ao compará-lo com o campo magnético da terra pode-se determinar a atitude do satélite (XIA et al., 2017).

Por fim, o módulo estrutural do satélite deve seguir as normas previstas pela competição CDS (2022). As limitações estruturais representam uma vantagem no ponto de vista de inovação, permitindo realizar missões espaciais com menos recursos financeiros e de mão de obra do que em satélites maiores (WOELLERT et al., 2011). Porém, essas limitações também restringem as possibilidades de missões que precisam conter várias operações simultâneas, algo que pode ser contornado ao se usar mais de um CubeSat ou suas variações como U2, U3, U12 e e assim por diante.

Segundo Xia et al. (2017), a criação de pequenos satélites deslocou o centro de conhecimento em países como Estados Unidos da América, Rússia, Japão e países europeus estabelecidos, incentivando com que países com menor poderio tecnológico e econômico criassem centros de pesquisas aeroespaciais e lançassem seus próprios satélites. O CubeSat é uma opção consolidada entre várias outras que estão desenvolvendo tecnologia aeroespaciais em universidades ao redor do mundo, levando tecnologia de ponta a lugares remotos e estudantes durante a graduação.

3 DESENVOLVIMENTO DA PLANTA DIDÁTICA

Neste capítulo, é descrito o desenvolvimento de toda a estrutura mecânica e elétrica da planta didática. Inicialmente, explica-se o projeto da estrutura de suporte, que sustentará fisicamente o CubeSat para permitir seu livre movimento de rotação. Em seguida, é detalhado o projeto eletrônico, que consiste na placa de circuito impresso, escolha e dimensionamento de componentes como motor, sensor, atuador do motor e todos os demais módulos necessários para o funcionamento do satélite. Por fim, projeta-se a estrutura física do CubeSat, mediante modelagem 3D digital, com suas dimensões, escolha de material e método de impressão descritos na subseção relacionada.

3.1 PROJETO DA ESTRUTURA DE SUPORTE

A estrutura de suporte é responsável por sustentar o chassi, e todos os componentes dentro deste, do nanossatélite. Além disso, deve permitir o livre movimento do CubeSat em torno ao eixo *yaw*, ou seja, o seu giro em relação ao plano horizontal. Como requisitos, deve possuir dimensões, custo e viabilidade de manutenção melhores do que o referencial descrito em Viana (2023). Como trata-se de uma planta didática, o manuseio do equipamento será feito por estudantes de engenharia, e por isso deve-se ter uma estrutura robusta para resistir a um uso intenso sem danos. Assim como, deve possuir dimensões reduzidas para que seja capaz de ser posicionada sobre bancadas de laboratório sem ocupar muito espaço para não obstruir outros equipamentos.

Inicialmente, montou-se uma versão parecida da estrutura de suporte descrita em Viana (2023), conforme mostrado na Figura 16. Esta estrutura foi construída por canos de Policloreto de vinila (PVC), onde percebe-se o seu grande tamanho, inviabilidade de fácil transporte e posicionamento em bancadas de laboratório que já comportam muitos equipamentos.

Diante dessas limitações, optou-se por realizar uma alteração estrutural dos canos PVC, de maneira que fosse possível reduzir as dimensões da estrutura. Como resultado, foi desenvolvido o suporte visualizado na Figura 17, com dimensões: comprimento de 25 *cm*, largura de 30 *cm* e altura de 55 *cm*, utilizando canos de PVC com diâmetro de 3 *cm*. É possível notar a simplicidade significativa, redução de custos e redução de tamanho, garantindo o fácil manuseio do suporte. Para a conexão dos tubos, foram utilizados 8 tubos do tipo joelho e 2 tubos conexão T. Ainda em comparação, ambas as Figuras 16 e 17, o equipamento está em cima da bancada do Laboratório de Circuitos Elétricos, no Departamento de Engenharia Elétrica, local onde ocorre a disciplina de Laboratório de Engenharia de Controle, onde os alunos irão utilizar esta planta didática como projeto ao final do semestre.

Figura 16 – Estrutura de suporte baseada no trabalho feito em Viana (2023).



Fonte: O Autor (2024).

Figura 17 – Nova estrutura para planta didática.



Fonte: O Autor (2024).

Um problema identificado na versão de Viana (2023) foi na conexão entre o CubeSat com a estrutura de suporte. Na tampa do satélite, há um arco para a passagem de fios, os quais são amarrados a uma haste. Na tampa da haste foi soldado um elo giratório, e é exatamente nele onde os fios passam para conexão junto com arames que melhoram a sustentação da estrutura, visualizado no trabalho de Viana (2023). Contudo, esta metodologia é sujeita falhas, como descrito no próprio trabalho, devido ao efeito pendular no satélite e uma angulação não natural durante o giro.

Para contornar esse problema, foi adotado o barra roscada com 8 *mm* de diâmetro e 20

cm de comprimento, que está preso a estrutura de suporte por porcas, arruelas e arruelas de pressão, representado na Figura 18. A conexão da barra com o CubeSat é feito por meio de um rolamento de 8 mm, da marca SKF 608-2Z, que é fixado ao CubeSat em sua tampa por encaixe e porcas, também há uma representação na Figura 19. Este rolamento, possui como dimensões 7 mm de largura, 22 mm de diâmetro externo e os 8 mm de diâmetro interno.

Figura 18 – Barra roscada com 8 mm de diâmetro, responsável pela conexão entre a estrutura de suporte e o CubeSat.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 19 – Rolamento de 8 mm, que conecta a tampa do CubeSat com a estrutura de suporte.



Fonte: O Autor (2024).

3.2 PROJETO ELETRÔNICO

Conforme mencionado no capítulo 2, um sistema de controle é uma combinação de elementos como planta, controlador, atuador e sensor que devem gerar na saída do sistema um valor, dado os requisitos de projeto, compatível com um sinal de referência. Portanto,

a planta pode ser descrita como a combinação da estrutura física com a estrutura de suporte do satélite, sendo necessário escolher e projetar os demais componentes para se ter o controlador, sensor e atuador. Estes componentes são eletrônicos, de cunho físico como *hardware* ou em algoritmo implementado via *firmware* de um microcontrolador ou processador.

3.2.1 *Hardware*

Como descrito, um CubeSat possui módulos de energia, comunicação, controle e computação, sendo os módulos eletrônicos responsáveis pelo funcionamento do satélite. O módulo de energia está separado, em uma prateleira superior, em relação aos demais módulos onde realiza-se a conexão destes por fios (VIANA, 2023). O uso de fios e o distanciamento dos módulos eletrônicos pode causar problemas como desconexão indevida, mal encaixe ou defeitos na crimpagem dos conectores, aumento de impedância e consequente queda de tensão e outros problemas. Para evitar a necessidade de fios e prateleiras adicionais, optou-se por projetar uma placa de circuito impresso (PCI) única, contendo todos os dispositivos eletrônicos que compõem os módulos de funcionamento do satélite embarcados nela.

Para isso, realiza-se em primeira instância a escolha do módulo de computação, o cérebro do CubeSat. Comumente, ele é baseado em um microcontrolador ou microprocessador com periféricos embarcados. Entre os mais conhecidos e encontrados no mercado há os da família AVR, PIC e ARM. Embora utilizar um microcontrolador diretamente embarcado em uma PCI tenha suas vantagens, como ocupar menos espaço e ter um custo menor, isso também pode trazer problemas caso haja a necessidade de substituição do chip devido a mal funcionamento. Além das complicações na programação do *firmware*, que exigem a adição de componentes extras de comunicação para realizar a gravação na memória.

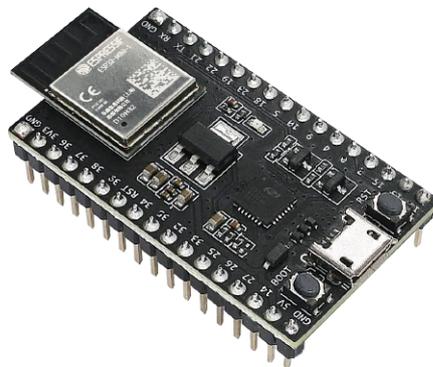
Ademais, como o projeto é uma planta didática para estudantes de graduação, eles precisarão continuamente realizar modificações na programação do microcontrolador e validar o funcionamento do próprio microcontrolador. Espera-se, também, que os estudantes não tenham pleno domínio de programação de sistemas embarcados e queiram realizar testes de programação não relacionados a PCI do CubeSat. Devido as situações levantadas, optou-se por utilizar de uma placa de desenvolvimento que possua um microcontrolador conhecido, e possa ser usado em conjunto com uma plataforma de *framework* que tenha uma *hardware abstraction layer* (HAL). A importância do HAL é na facilidade de se programar microcontroladores, sem se preocupar com mudanças em nível de *hardware* e utilizar somente funções para realizar tarefas trabalhosas como a modificação binária de registradores.

Por meio disso, as placas de desenvolvimento mais conhecidas ao redor do mundo são da família Arduino, como as placas Uno, Mega, Nano e Leonard. Elas garantem simplicidade e fácil uso, dominando o mercado de placas de desenvolvimento de baixo custo,

também podem ser usadas com o Arduino IDE, uma plataforma *framework* para desenvolver *firmware* de maneira fácil e com uma HAL altamente documentada pela literatura e *internet*. Embora utilizem microcontroladores das famílias ARM e AVR, geralmente são modelos antigos que podem não oferecer todos os periféricos e funcionalidades necessárias para projetos modernos.

Para obter um módulo de computação mais robusto, optou-se por utilizar dos microcontroladores da empresa *Espressif* e família *ESP32*, conforme pode ser visualizado na Figura 20 que exibe a representação da placa de desenvolvimento escolhida. Uma de suas principais vantagens é que a própria empresa fornece o microcontrolador em chip, módulo ou por meio de placa de desenvolvimento, diferente do que acontece com o Arduino que não fabricam microcontroladores, mas sim disponibilizam placas de desenvolvimento com microcontroladores de diferentes marcas. A Tabela 2 mostra as outras vantagens das placas de desenvolvimento com ESP32 em relação a placa Arduino UNO R3 e uma da própria *Espressif*, o ESP8266. Sendo escolhido, então, o ESP32-DevKitM-1 como módulo de computação do CubeSat.

Figura 20 – Placa de desenvolvimento ESP32-DevKitM-1, escolhida como módulo de computação.



Fonte: (ESPRESSIF, 2021).

Quanto ao módulo de comunicação, o microcontrolador ESP32 escolhido possui como periférico as redes *Wi-Fi* e *Bluetooth*, não sendo necessário comprar algum *hardware* extra. No intuito de facilidade e pelo o que foi feito em Viana (2023), utilizar-se-á da comunicação *Bluetooth*, também pela probabilidade de se usar os celulares que os alunos podem ter para a comunicação do satélite.

Adicionalmente, a alimentação de energia do sistema é feita por duas células de bateria de lítio-íon cilíndricas com dimensões 18650. Elas possuem 2500 *mAh* de capacidade, 3,7 V de tensão nominal e são conectadas em série por um *holder* de baterias que é embarcado na própria PCI. Na Figura 21, há as baterias e o *holder* que as conecta. Com isso, o módulo de energia possui 7,4 V de tensão nominal e uma corrente de descarga nominal de 5 A.

Tabela 2 – Comparação entre as placas de desenvolvimento ESP8266, Arduino UNO e ESP32.

PLACA	ESP8266	ESP32	Arduino UNO
Corrente	197 mA	220 mA	40 mA
Núcleo	1	2	1
Arquitetura	32 bits	32 bits	8 bits
Clock	80 - 160 MHz	160 - 240 MHz	16 MHz
Bluetooth	Não	Clássico e BLE	Não
WiFi	Sim	Sim	Não
RAM	160 KB	520 KB	2 KB
FLASH	16 Mb	16 Mb	32 KB
GPIO	13	34	14
DAC	0	2	0
ADC	1	18	6

Fonte: Adaptado de (TORELLA, 2020).

Figura 21 – Baterias 18650 de Li-Ion e *holder*.



Fonte: O Autor (2024).

Por fim, tem-se o módulo de controle, ele é composto por um sensor, que mede a relação angular do CubeSat e envia a informação para o módulo de computação, um atuador do motor e um motor. O MPU6050, conforme mostrado na Figura 22, é o sensor escolhido devido seu baixo custo e bibliotecas que realizam toda a abstração de comunicação e cálculo da relação de ângulos. Ele possui acelerômetro e giroscópio para 3 eixos, tendo então 6 graus de liberdade (INVENSENSE, 2013). Com isso, basta realizar as medições da variação angular pelo tempo e integrá-las matematicamente no microcontrolador para calcular o ângulo atual. Outra vantagem é que seu chip é facilmente encontrado em placas embarcadas, não sendo necessário soldá-lo diretamente na PCI, facilitando trocas ou testes foras do CubeSat.

O motor deve possuir alta rotação por minuto (RPM), para se ter uma alta velocidade angular, mas ao mesmo tempo deve possuir dimensões pequenas para conseguir se ter uma roda de reação compacta. Com isso, escolhe-se de motor do tipo *coreless*, que é

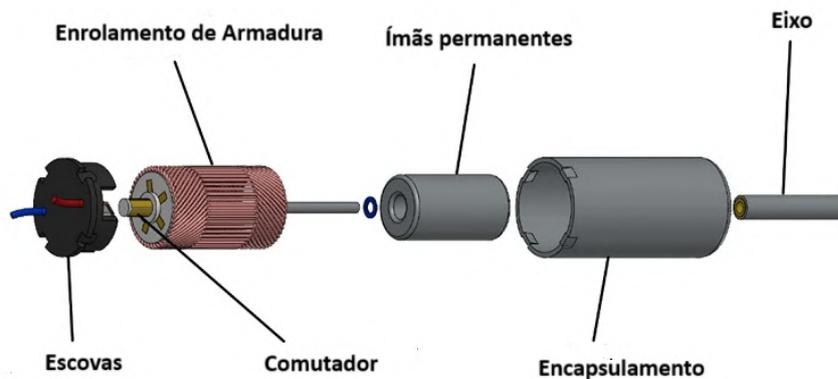
Figura 22 – Sensor escolhido, MPU6050, embarcado em uma PCI de desenvolvimento.



Fonte: (ELETROLANDIA, 2024).

um tipo de motor de corrente contínua onde os enrolamentos do rotor são conectados em formato de um cilindro oco, não possuindo ferro laminado, e o estator por ímãs permanentes, como presente na Figura 23. Esta escolha é por causa dos altos RPMs que esses motores conseguem alcançar e por seu volume extremamente reduzido, sendo utilizados em quadricópteros e drones. Logo, escolheu-se o motor *coreless* com padrão de dimensão 1020, que possui tensão nominal de 7,4 V, tensão máxima de 4,2 V e máxima corrente de 3 A (ST, 2023), representado na Figura 24.

Figura 23 – Componentes de um motor *coreless*.



Fonte: Adaptado de (AUTOMATIONS, 2020).

Devido a alta corrente drenada pelo motor, a necessidade de controlar sua velocidade e o sentido de rotação, precisa-se utilizar de um conversor *full-bridge*, também chamado de ponte H, que irá converter a energia do barramento proveniente das baterias na energia adequada de funcionamento do motor. Desta maneira, escolhe-se o conversor L298N, que possui duas pontes H em seu chip. Sua máxima tensão de alimentação é de 50 V e consegue drenar 2 A de corrente contínua e pulsos de corrente com até 3 A, sendo suficiente para a operação do motor. Contudo, somente será usado uma ponte H que será controlada mediante a ESP32 por 1 canal gerador de *pulse width-module* (PWM) e 2 canais digitais

Figura 24 – Motor *coreless* do tipo 1020.

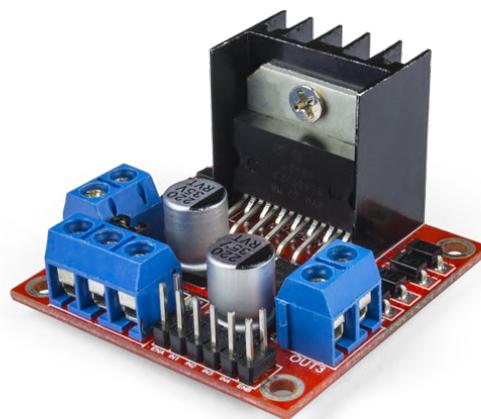


Fonte: O Autor (2024).

para determinar o sentido de giro do motor.

A escolha da ponte H se deu principalmente pela facilidade de modularização dela, ou seja, ao invés de embarcar seu chip diretamente na placa, é possível encontrar facilmente no mercado uma placa de desenvolvimento com dissipador que utilize o L298N. Dessa maneira, caso ocorra alguma danificação no atuador, é possível realizar sua troca de maneira fácil, onde basta retirar a solda de conexão e refazê-la para uma nova placa. A versão em placa de desenvolvimento do L298N é vista na Figura 25.

Figura 25 – Ponte H L298N, atuador do motor em placa de desenvolvimento.



Fonte: (ROBOCORE, 2024).

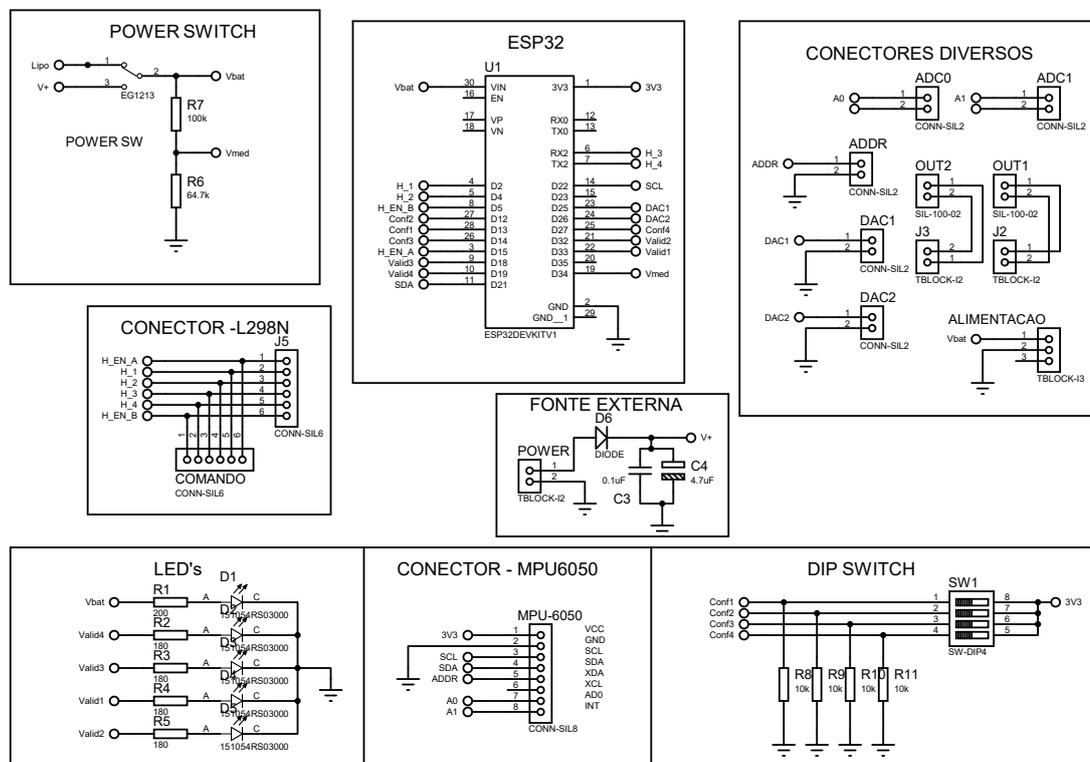
Logo, com todos os componentes para o sistema de controle definidos é necessário projetar a PCI. Para se obter validações de funcionamento do CubeSat, são adicionados diodos emissores de luz (LED) que irão acender mediante determinadas condições pre-

estabelecidas, no total de 5. Também, adiciona-se um *dip switch* que é um circuito impresso com quatro chaves manuais, e uma *power switch*, que irá realizar a conexão elétrica das baterias com todos os demais circuitos presentes na placa. Uma possível sinalização do LED é para indicar se o *power switch* está ativo, ou seja, se há energização da bateria para a placa e as chaves do *dip switch* podem ser usadas para alterar valores de variáveis internas do *firmware* do microcontrolador.

Há também a possibilidade dessa PCI servir para outros propósitos além do controle de CubeSat, visto que a disciplina de Laboratório de Engenharia de Controle tende a obter diferentes outras plantas futuramente. Visando essa possibilidade, adiciona-se certas funcionalidades ao microcontrolador, como conectores extras para conversão digital analógica, conversão analógica digital e a possibilidade de alimentação dos circuitos da placa por fonte de tensão externa.

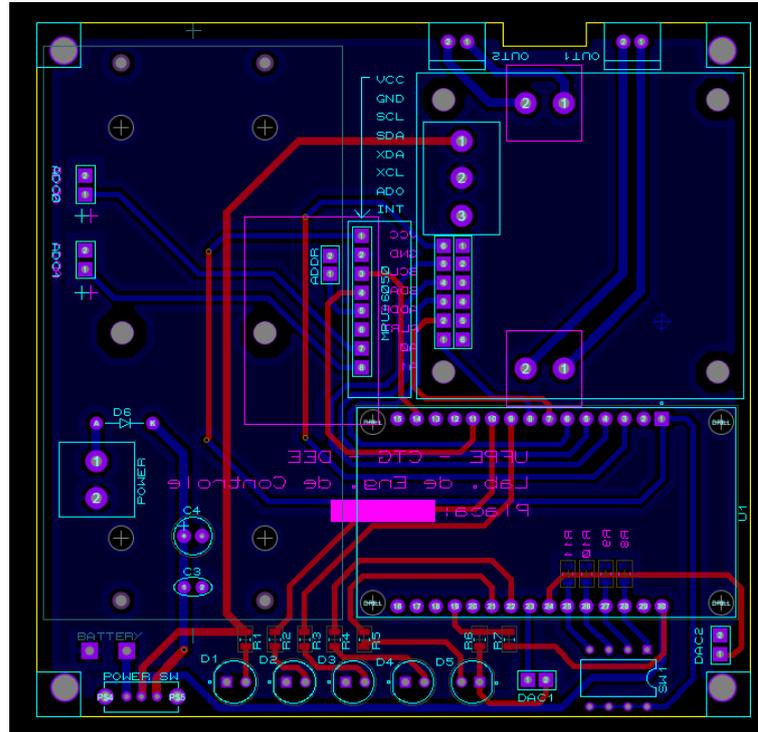
Por fim, mediante *software Proteus ISIS* faz-se o desenho do esquemático de ligações de todos os componentes do sistema, representado na Figura 26. Assim como, na Figura 27 mostra-se a representação em *footprint* e posicionamento de todos os componentes da PCI. Finalmente, na Figura 28 e 29 o modelo 3D da placa vista superior e inferior, respectivamente.

Figura 26 – Esquemático completo da placa de circuito impresso.



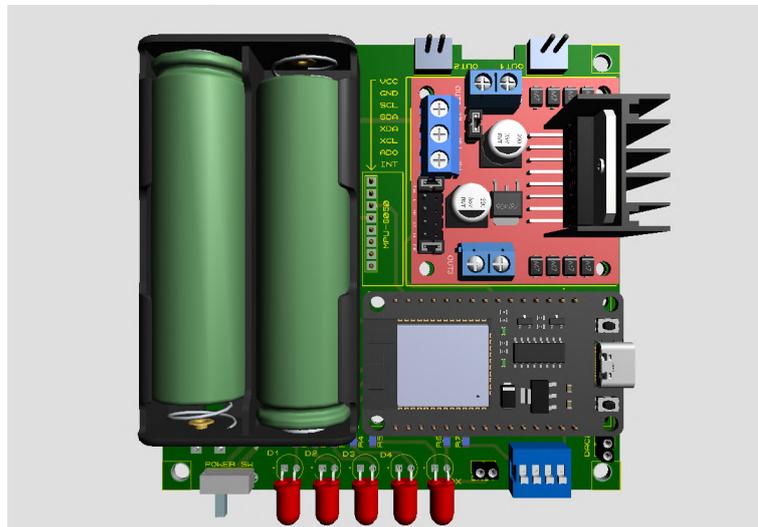
Fonte: O Autor (2024).

Figura 27 – Representação das *footprints*, trilhas de conexão e posicionamento dos componentes na PCI.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 28 – Vista superior da placa modelada em 3D.

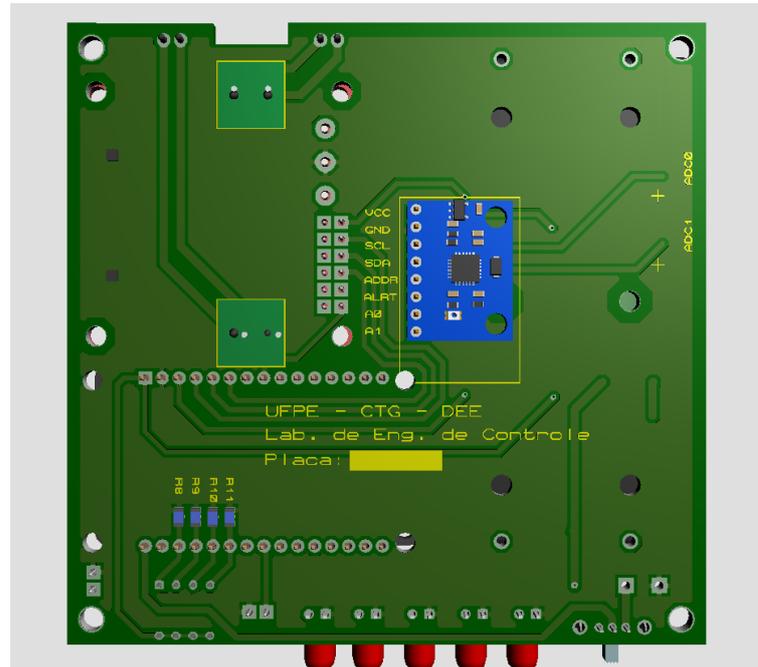


Fonte: O Autor (2024).

3.2.2 Firmware

Para o desenvolvimento do *firmware* do microcontrolador, é preciso definir qual plataforma de *framework* será utilizada. Embora a *Espressif* possua uma própria plataforma de desenvolvimento para suas placas, a *ESP-IDF*, e exista soluções mais refinadas como a utilização de *real time operating systems* (RTOS), em busca de uma solução simples

Figura 29 – Vista inferior da placa modelada em 3D.



Fonte: O Autor (2024).

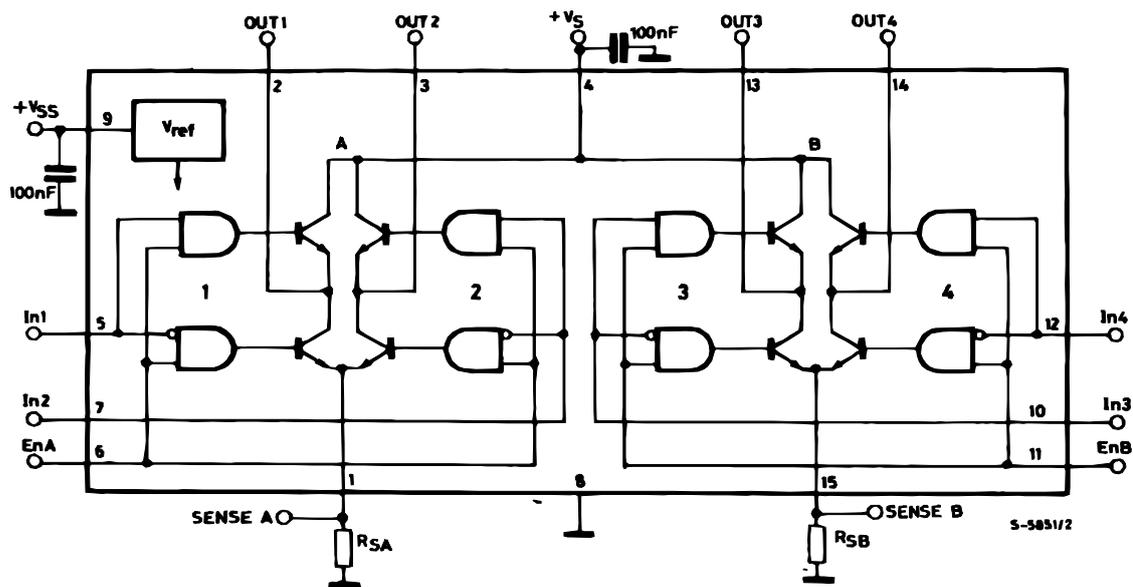
escolheu-se o *framework* Arduino (ESPRESSIF, 2016). Sua principal vantagem é a vasta utilização nos mais diversos projetos, possuindo uma gama de referências e aplicações que podem auxiliar os alunos no entendimento do código, mesmo sendo seu primeiro contato com programação de embarcados. O código em Arduino possui uma HAL que permite modularização suficiente a ponto de, caso necessário futuramente, realizar a troca do microcontrolador para um mais robusto, ou mais barato, e será preciso alterar poucas linhas de código para a nova adaptação. Além de que, possui funções e declarações de fácil entendimento, permitindo aprender a programar na plataforma de maneira rápida e intuitiva.

Ademais, o MPU6050 realiza comunicação via *Inter-Integrated Circuit* (I2C) e envia os valores das medições por registradores. Para evitar complexidade, escolheu-se utilizar da mesma biblioteca vista em Viana (2023), a “MPU6050_light” (RTEFIC, 2021), que faz uma camada de abstração entre a comunicação do acelerômetro e giroscópio com o microcontrolador e um filtro de Kalman para obter valores mais precisos. A biblioteca também permite definir parâmetros de *offset* e realizar a calibração do sensor quando necessário, permitindo maior versatilidade no uso dele.

Na Figura 30, tem-se a representação em diagrama do circuito interno do atuador do motor, o L298N. Somente se deseja realizar o controle de um motor, logo apenas um *full-bridge* é necessário, que será o da esquerda da Figura em referência. Percebe-se que há três pinos de entrada que controlam as chaves do conversor, *IN1*, *IN2* e *EnA*, que os sinais de entrada neles passam por portas lógicas do tipo *AND* e em alguns casos os sinais são conjugados antes de entrarem na porta lógica. Simplificando a análise desse circuito,

a função dos pinos $IN1$ e $IN2$ é de determinarem o sentido de giro do motor, sempre que eles possuírem o mesmo valor de entrada não haverá corrente fluindo para o motor. Logo, quando $IN1 = 1$ e $IN2 = 0$, o motor irá girar para um lado, e quando $IN1 = 0$ e $IN2 = 1$, ele gira no sentido contrário. Por fim, o pino EnA complementa as entradas das portas lógicas AND , e deve receber um sinal PWM que mediante o ciclo de trabalho escolhido, irá controlar a tensão no motor CC e consequentemente sua velocidade.

Figura 30 – Diagrama simplificado do circuito interno do L298N.



Fonte: (ST, 2023).

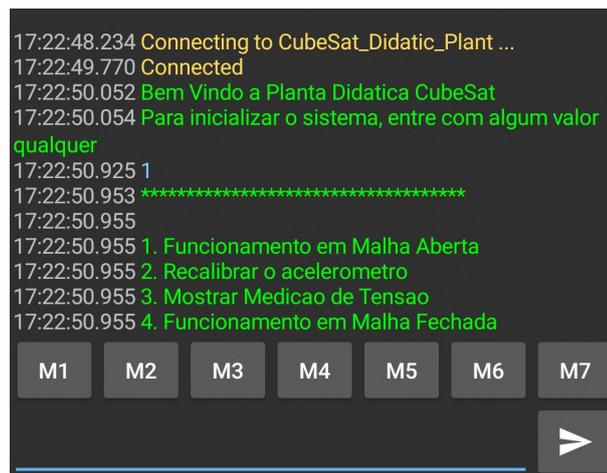
A comunicação *Bluetooth* da ESP32 com os usuários é feita mediante a biblioteca (ESPRESSIF, 2018), que também possui uma camada de abstração completa, sendo necessário a utilização de funções para sua ativação e configuração, operando como IHM. Contudo, esta biblioteca opera com *bluetooth* do tipo SSP, uma configuração não aceita para dispositivos IOS logo, somente celulares do tipo *Android* ou similares são aptos a se comunicar com o módulo de comunicação. Para a utilização via *smartphone*, é necessário instalar o aplicativo *Serial Bluetooth Terminal*, que opera como um terminal serial que recebe e envia dados via *bluetooth* para o módulo de comunicação. Para facilitar o uso de todo o sistema, uma interface textual é produzida no *firmware* do microcontrolador, de maneira que seja possível alterar e visualizar parâmetros via o celular.

Isto posto, o *framework* da *Arduino IDE* não é capaz de realizar RTOS e para se ter uma boa funcionalidade do sistema, escolheu-se utilizar metodologia de máquina de estados. Neste caso, cria-se uma estrutura de dados do tipo *enum* que contém os seguintes estados: *INIT*, *MENU*, *OPENLOOP*, *ACCEL*, *BATT* e *CLOSEDLOOP*. As variáveis do tipo *enum* somente podem receber os valores que estão listados em sua definição, e

eles também são interpretados como números inteiros começando do zero e seguindo a sequência.

A inicialização da IHM via *bluetooth* ocorre no estado *INIT*, sendo possível sair dele apenas ao se enviar qualquer tipo de mensagem via *bluetooth* para a ESP32. Após o envio da mensagem, entra-se no estado *MENU*, que retorna uma lista dos outros estados para o usuário escolher qual prosseguir. Caso o usuário tente entrar algum estado não listado o sistema irá notificar o erro e retornar ao *MENU*. Dentro do estado *MENU*, é possível operar o satélite em malha aberta, mostrar a tensão da bateria, recalibrar o acelerômetro, ou inicializar o satélite com o controlador projetado em linha de código no *firmware*, que são os respectivos estados *OPENLOOP*, *BATT*, *ACCEL* e *CLOSEDLOOP*. É possível visualizar o funcionamento do estado *INIT* e *MENU*, na Figura 31, onde mostra uma captura de tela do *software* de interface.

Figura 31 – Captura de tela do aplicativo *Serial Bluetooth Terminal*, que faz a interface entre o microcontrolador e o usuário para os estados *INIT* e *MENU*.



Fonte: O Autor (2024).

Continuamente, ao entrar no estado *OPENLOOP*, se tem a operação do sistema em malha aberta. Nesse caso, o usuário irá definir um ciclo de trabalho para a operação do motor e um período de amostragem, que é o tempo em que receberá os dados do sensor, como mostra a Figura 32. Esse estado tem fundamental importância para a modelagem do sistema, seja ele em caixa cinza ou em caixa preta, onde é possível definir valores de entrada e receber a medição dos valores de saída. Sendo então, capaz de determinar a curva de resposta do motor em malha aberta para diferentes valores de *duty cycle*, assim como, determinar a zona de operação onde a velocidade de rotação do motor não é capaz de vencer a inércia do sistema.

O estado *BATT*, serve somente para retornar ao usuário a tensão das baterias da PCI. Ele é de fundamental importância, visto que é vital a não ultrapassagem dos limites máximo e mínimo das células, evitando danos químicos e estruturais a ela. Ocorre, também, uma rotina de verificação interna ao sistema, onde caso a tensão das baterias seja menor

Figura 32 – Interface em operação de malha aberta, no estado *OPENLOOP* do sistema.

```

17:33:27.471 3. Mostrar Medicao de Tensao
17:33:27.471 4. Funcionamento em Malha Fechada
17:33:29.115 1
17:33:29.143 *****
17:33:29.145
17:33:29.145 DENTRO DA OPERACAO EM MALHA ABERTA
17:33:29.145 Lembre-se de ativar o Log do app caso queira salvar os dados
17:33:29.145 Voce pode continuamente alterar os valores de Duty Cycle durante a operacao
17:33:29.145 Entre com um valor de Duty Cycle:
17:33:31.668 0,4
17:33:31.697 Valor de DutyCycle setado: 0.40
17:33:31.698 Entre com o valor do periodo de amostragem em milisegundos
17:33:37.458 700
17:33:37.910 Valor do periodo de amostragem de 700 milisegundos
17:33:37.912 Angulo Z:0.01
17:33:38.605 Angulo Z:13.39
17:33:39.323 Angulo Z:49.00
17:33:40.009 Angulo Z:92.76
17:33:40.715 Angulo Z:136.62
17:33:41.413 Angulo Z:183.33
17:33:42.137 Angulo Z:246.13
17:33:42.859 Angulo Z:340.31
17:33:43.528 Angulo Z:98.43
17:33:44.271 Angulo Z:218.50
17:33:44.921 Angulo Z:1.11
17:33:45.266 -0.4
17:33:45.333 Valor de DutyCycle setado: -0.40
17:33:45.647 Angulo Z:154.95
17:33:46.316 Angulo Z:256.69
17:33:47.019 Angulo Z:320.31
17:33:47.728 Angulo Z:349.49
17:33:48.441 Angulo Z:342.43
17:33:49.104 Angulo Z:311.78
17:33:49.892 Angulo Z:267.05
  
```

M1 M2 M3 M4 M5 M6 M7

-0.4

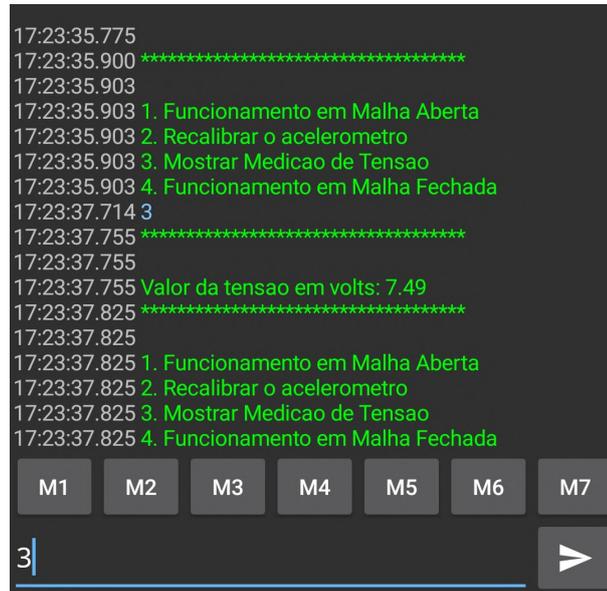
Fonte: O Autor (2024).

que mínima tensão em série delas, três LED irão piscar continuamente e será enviado uma mensagem de alerta via *bluetooth* para a troca. Sua operação pode ser visualizada na Figura 33, onde em um momento somente retorna-se a tensão na bateria e em seguida simula-se a situação de ultrapassagem na mínima tensão de operação das baterias.

O *ACCEL* é o estado de recalibração do acelerômetro, nele o usuário deve garantir que o satélite está estável e sem tipo de giro presente. Assim, envia um sinal de continuidade ao microcontrolador, que irá recalibrar o sensor ao fazer com que a posição atual do satélite seja a nova referência do sistema, garantindo que a medição do ângulo é zero, como se pode ver na Figura 34.

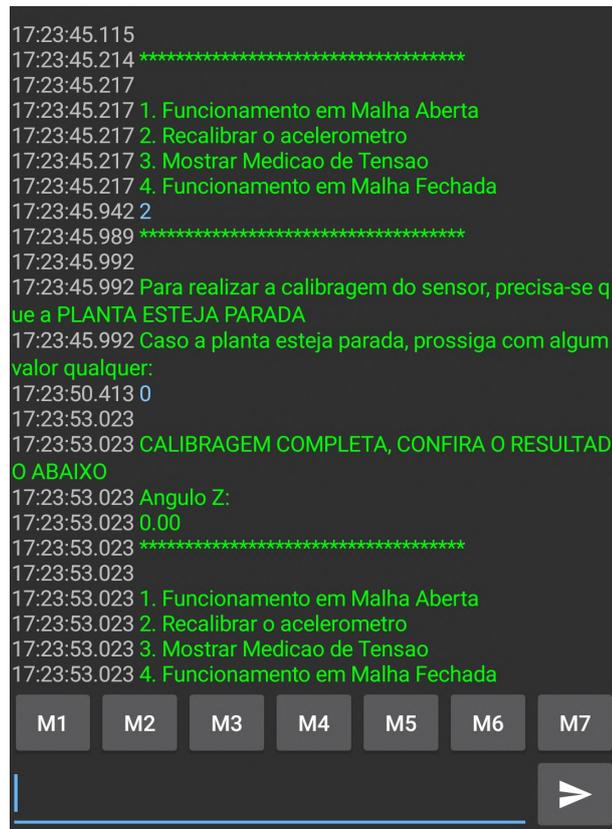
Em suma, o último estado da máquina de estados é a operação em malha fechada da planta. Primeiramente, o usuário escreve em linhas de código a discretização do contro-

Figura 33 – Interface em operação para medição das células de bateria, no estado *BATT* do sistema.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 34 – Interface realizando a recalibração do sensor, no estado *ACCEL* do sistema.



Fonte: O Autor (2024).

lador e todas as funções necessárias para o fechamento da malha, como o cálculo de erro atual, erro passado, ação de controle e demais requisitos matemáticos e operacionais. Com

o código feito, deve-se compilar a ESP32, pelo *framework* e método que melhor desejar, e obter a resposta do sistema.

3.3 PROJETO DA ESTRUTURA FÍSICA

Para a estrutura física do CubeSat, utiliza-se da norma CDS (2022) que determina as dimensões de 10 x 10 x 11,35 cm para seu comprimento, largura e altura que está de acordo com o desenvolvido em Viana (2023). Com isso, inicialmente, foi realizada a impressão por impressora 3D do CubeSat visto em Viana (2023), já que foi possível obter os mesmos arquivos de modelagem 3D feitos anteriormente, visto na Figura 35. Contudo, após impresso, percebeu-se fragilidade estrutural que com o passar do tempo pequenas partes de fixação dos parafusos ficaram bastante frágeis ao ponto de se romperem. Além disso, outros problemas estruturais foram identificados, como a utilização de material composto por ácido polilático (PLA) com somente 30% de preenchimento, deixando o protótipo de satélite instável e a utilização de fitas adesivas dupla face para a sustentação das prateleiras, responsáveis pelas sustentação dos módulos.

Figura 35 – CubeSat fabricado em impressora 3D, do mesmo modelo e dimensões do proposto em Viana (2023).

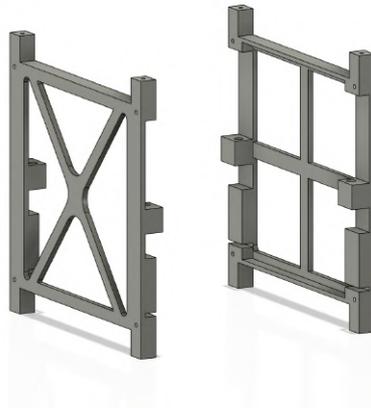


Fonte: O Autor (2024).

No intuito de propor melhorias, decidiu-se criar uma nova modelagem 3D para o CubeSat, respeitando as especificações previstas pela competição CDS (2022), ela é feita com *software* de modelagem 3D *Fusion360*. Primeiramente, houve a junção de todo o circuito eletrônico em uma única PCI, processo descrito na seção anterior, ocasionando a não necessidade de uma prateleira superior para conter o módulo de alimentação, nem de fixação. A PCI ficará fixada em suportes nas laterais internas do chassi, onde através de parafusos e porcas será fixada a estrutura. Com isso, aumenta-se a rigidez lateral e melhora-se a performance do satélite no sentido de giro, pois ficará mais compacto e

resistente a perturbações ou má angulação. Além disso, foi adicionado um formato em X em uma das laterais para aumentar a fixação e a resistência lateral, e na outra um sinal de + para aumentar as características de fixação, mas permitir a conexão com a placa que estará fixada. A modelagem 3D dessas peças laterais está presente na Figura 36.

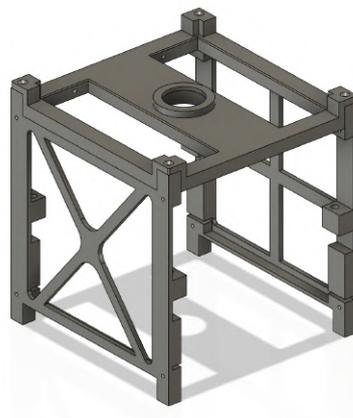
Figura 36 – Modelagem das peças laterais do CubeSat proposto.



Fonte: O Autor (2024).

Para garantir robustez, a tampa do satélite deve ter espessura suficiente para aguentar os esforços da barra roscada conectada a ela. Assim como, a adição de um encaixe para o rolamento de 8 *mm*, responsável pela conexão do CubeSat com a estrutura de suporte, via barra. A fixação do rolamento à tampa é assegurada por encaixe e uma estrutura superior que firma o rolamento a tampa do satélite. A conexão entre a tampa e as estruturas laterais é feita por parafusos M2 em suas extremidades, conforme visto na 37.

Figura 37 – Modelagem da tampa do CubeSat proposto.

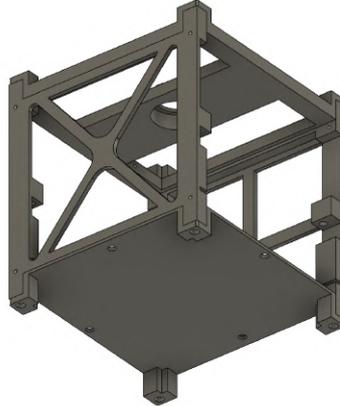


Fonte: O Autor (2024).

A parte inferior do CubeSat não estará conectada a nada, portanto, uma tampa simples, mas robusta, é modelada. Sua fixação com as peças laterais também ocorrem por parafusos nas extremidades, do tipo M2. A peça inferior pode ser visualizada na Figura 38. Ela também possui buracos para parafusos de cima para baixo, isto serve para fixar

melhor a superfície de conexão da roda de reação, diminuindo possível folga e desencaixe dela.

Figura 38 – Modelagem da peça inferior do CubeSat proposto.



Fonte: O Autor (2024).

Além disso, modelou-se quatro barras transversais que realizam o contato as peças laterais aumentando sua fixação e resistência a forças transversais. Elas são conectadas as peças laterais por parafusos M2 e podem ser vistas na Figura 39.

Figura 39 – Modelagem das barras transversais do CubeSat proposto.

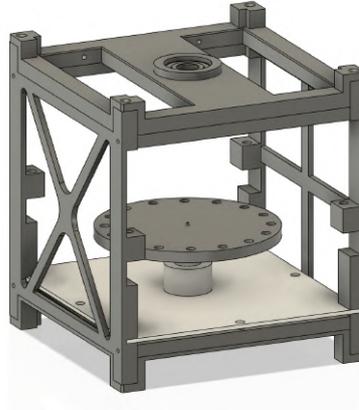


Fonte: O Autor (2024).

Para realizar o movimento rotacional do satélite, necessita da combinação de um motor *coreless* com uma roda de reação geradora do momento angular. Para isso, modela-se uma superfície com encaixe de dimensões do motor e uma roda de reação com dimensões o suficiente para ser acoplada ao eixo do motor. Na Figura 40, mostra-se a adição do suporte do motor com a roda de reação acoplada ao seu eixo. A fixação do suporte do motor é feita mediante os encaixes laterais mais baixos e de parafusos M3.5 que passam pela tampa inferior até o suporte, com a fixação feito por porcas. A roda de reação é feita com buracos igualmente espaçados, eles servem para a passagem de parafusos do tipo

M3.5 que modificam a distribuição de massa da roda e conseqüentemente seu momento de inércia.

Figura 40 – Modelagem do suporte do motor e da roda de reação proposto.



Fonte: O Autor (2024).

Por fim, realiza-se a modelagem de uma tampa traseira, para auxiliar na fixação do suporte do motor e para mostrar informações, visto na Figura 41.

Figura 41 – Modelagem da tampa traseira proposto.



Fonte: O Autor (2024).

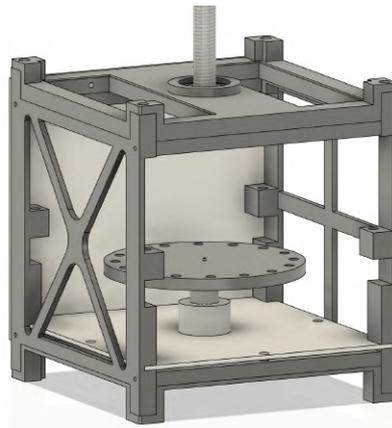
Todas as peças descritas serão impressas por impressora 3D. Para aumentar a confiabilidade e robustez do satélite, utiliza-se material de *Polyethylene terephthalate glycol* (PTEG) com preenchimento de 100% que, no geral, possui características mais vantajosas do que o material de PLA, mesmo com menor dureza, como mostra a Tabela 3. Finalmente, a estrutura física completa está presente na figura 42, e ela completa com a placa de circuito impresso, na figura 43.

Tabela 3 – Comparação entre os principais tipos de materiais para impressão 3D.

DESEMPENHO	MAIOR	MÉDIO	MENOR
Flexibilidade	PETG	ABS	PLA
Resistência Química	PETG	PLA	ABS
Facilidade Pós Processamento	ABS	PETG	PLA
Densidade	PETG	PLA	ABS
Resistência ao Impacto	PETG	ABS	PLA
Contração - Wrap	ABS	PETG	PLA
Dureza - Rigidez	PLA	ABS	PETG
Precisão em Detalhes	PLA	PETG	ABS
Resistência a Atritos	PLA	PETG	ABS
Resistência a exposição ao Calor	ABS	PETG	PLA

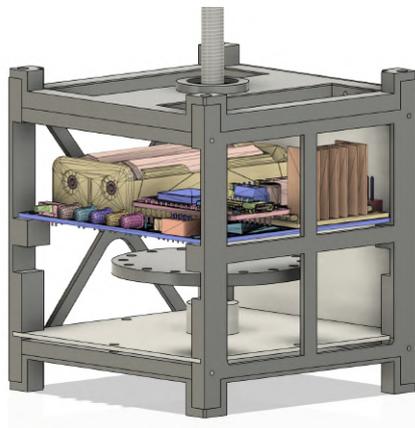
Fonte: Adaptado de 3DCopas (2024).

Figura 42 – CubeSat proposto com sua estrutura física completa.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 43 – CubeSat proposto com sua estrutura física completa e placa de circuito impresso.



Fonte: O Autor (2024).

3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, mostra-se o desenvolvimento da nova estrutura de suporte proposta, garantindo maior estabilidade ao sistema e o novo encaixe por rolamento e barra roscada elimina os efeitos ondulatórios dados em Viana (2023). Assim como, o projeto eletrônico em *hardware*, que fez a unificação de todos os módulos do CubeSat em uma única placa de circuito impresso, com melhorias nos dispositivos e em *firmware* que projetou-se uma IHM puramente textual para que se consiga operar em malha aberta, malha fechada e calibração do sensor, limitando aos usuários da planta somente o fechamento da malha de controle. Por fim, teve-se a nova modelagem 3D do satélite, que garantiu maior robustez e confiabilidade a operação deste.

4 VALIDAÇÃO E USO DA PLANTA DIDÁTICA

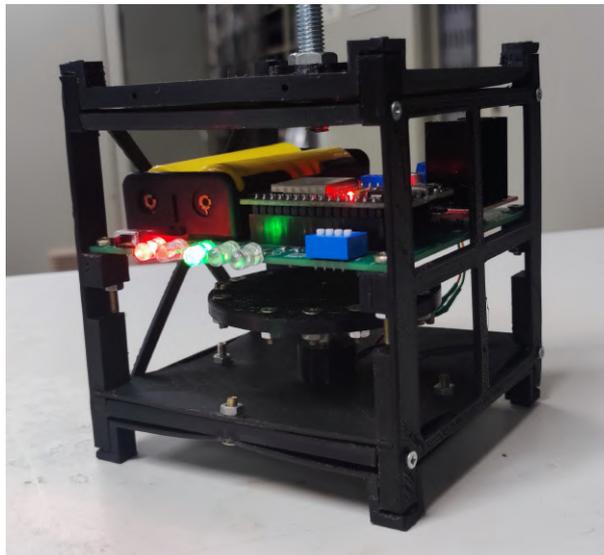
Neste capítulo, descreve-se a validação da planta para utilização como planta didática na aplicação no ensino prático da teoria de sistemas de controle. Primeiramente, faz-se a conexão por solda dos elementos eletrônicos na placa de circuito impresso projetada e fabricada. Em seguida, a impressão de todas as peças da modelagem 3D do satélite, parafusando onde necessário e conectando todas as peças entre si.

Posteriormente, deve-se comprovar a capacidade do satélite de realizar rotação, através da conservação de momento angular de sua roda de reação, sendo possível perceber as diferentes taxas de variação do ângulo para diferentes ciclos de trabalho aplicados ao seu motor. Nesse teste, valida-se também o funcionamento da IHM e do *firmware* embarcado na ESP32. Além disso, realiza-se a modelagem da planta didática por meio de uma abordagem de caixa-cinza e implementa-se um controlador digital discretizado para comprovar a possibilidade do controle de apontamento. Por fim, destacam-se as possíveis aplicações da planta didática para o ensino prático de sistemas de controle.

4.1 VALIDAÇÃO E FUNCIONALIDADES DA ESTRUTURA FÍSICA

Na Figura 44, mostra-se a estrutura física do CubeSat montada e fixada, juntamente com sua roda de reação e a PCI do módulo eletrônico. É perceptível a maior robustez e confiabilidade do satélite do que o proposto em Viana (2023). A tampa do satélite possui maior espessura e ao se aplicar esforços laterais ou longitudinais, a deformação do satélite não é irreversível e há maior dureza da estrutura.

Figura 44 – Estrutura física do CubeSat montado com a PCI embarcada.



Fonte: O Autor (2024).

Ao se realizar testes da planta didática completa, percebeu-se que para baixos valores de velocidade da roda de reação, o momento angular gerado por ela não era alto o suficiente para vencer a inércia do satélite. Uma das possíveis causas da alta inércia, é o atrito estático entre o anel externo do rolamento com a tampa do CubeSat. Foram testados dois rolamentos diferentes: o primeiro, retirado de um *fidget spinner* (um brinquedo, possuía uma zona desgastada, que dificultava ao satélite vencer o atrito gerado pelo rolamento na zona de desgaste e limitava sua velocidade de saída. O segundo, e utilizado no projeto final, foi um da marca SKF do tipo 608-2Z, que mostrou uma melhora nítida na rotação do satélite tanto no transitório quanto no regime permanente.

Entretanto, há outros motivos que podem gerar a incapacidade de vencer a inércia estática, como o desalinhamento dos pés da estrutura de suporte. Isso ocorre, pois a maior concentração de massa do satélite está presente na placa de circuito impresso, e devido à limitação de espaço, as baterias estão mais alocadas na extremidade da PCI, ocasionando uma distribuição de massa não uniforme pela estrutura, desalinhando centro de gravidade e centro de massa. Isso faz com que o satélite tenha um comportamento de sempre ficar em repouso na direção de onde está localizado a bateria, gerando um efeito pendular e um movimento elíptico durante rotação.

Outro motivo para não vencer a inércia do CubeSat, está baseado na folga entre as porcas de fixação da barra roscada com a estrutura de suporte e entre as porcas da barra roscada com o rolamento. No primeiro caso, também se gera um efeito pendular e movimento elíptico do satélite durante rotação, devido ao fato dele ficar inclinado em relação a um eixo normal que vem da base da estrutura de suporte. No segundo caso, pode ocorrer má conexão entre o rolamento e a tampa do satélite, gerando um efeito pendular diretamente na estrutura física do satélite, e não somente no livre giro da barra roscada. Para resolver este problema, utiliza-se arruela de pressão, que reduz o impacto da vibração na conexão entre porcas e estruturas.

Mediante a modelagem da roda de reação, ela possui buracos igualmente espaçados para que se coloquem parafuso do tipo M3.5. A utilidade disso é modificar a distribuição de massa da roda, conseqüentemente alterando seu momento de inércia. Através disso, pode-se obter diferentes modelos da planta para diferentes disposições e quantidades desses parafusos, onde, em sala de aula, cada semestre podem-se ter mudanças nas alocações desses parafusos ou cada grupo de alunos pode receber o projeto com rodas diferentes.

4.2 VALIDAÇÃO E FUNCIONALIDADES DO *HARDWARE*

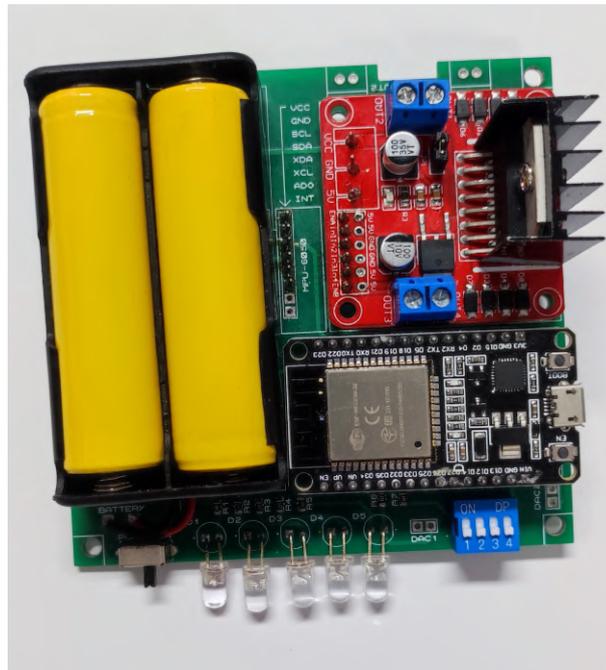
Inicialmente, faz-se a soldagem de todos os componentes eletrônicos na placa de circuito impresso, onde foi necessário adaptar as placas de desenvolvimento do L298N (ponte H) e do MPU6050 (acelerômetro) para que elas pudessem ser encaixadas via pinagem na placa principal. Isso foi feito através da remoção e troca de seus pinos conectores por *pin headers* do tipo macho. Após isso, efetua-se a solda dessas placas na PCI do CubeSat,

e segue-se com a solda dos resistores do tipo *surface mount component* (SMD), do *dip switch*, da *power switch* e dos LEDs.

Por fim, a conexão do *holder* da bateria na placa é feita mediante a solda de dois condutores que são conectados nos terminais do *holder* em *pads* da placa. Da mesma forma, a conexão da ESP32 com a PCI é feita através de conectores *header* fêmeas, que são soldados na localização do microcontrolador, sendo necessário, então, apenas encaixá-lo nos conectores para realizar sua conexão elétrica.

Na Figura 45, mostra-se a visão frontal da placa com todos os componentes soldados. Da mesma maneira, na Figura 46, é possível visualizar a visão traseira da placa, com o sensor conectado nela. É importante ressaltar que, pela modificação nos pinos do MPU6050 e do L298N, ambos estão soldados diretamente na PCI, diferentemente da ESP32. Logo, caso ocorram problemas com alguma das duas placas, é necessário retirar a solda e então ressoldar novas placas na PCI. Diferentemente, se ocorrer algum defeito na ESP32, que é conectada na placa por encaixe mediante os *headers* fêmeas, basta desconectar e substituir.

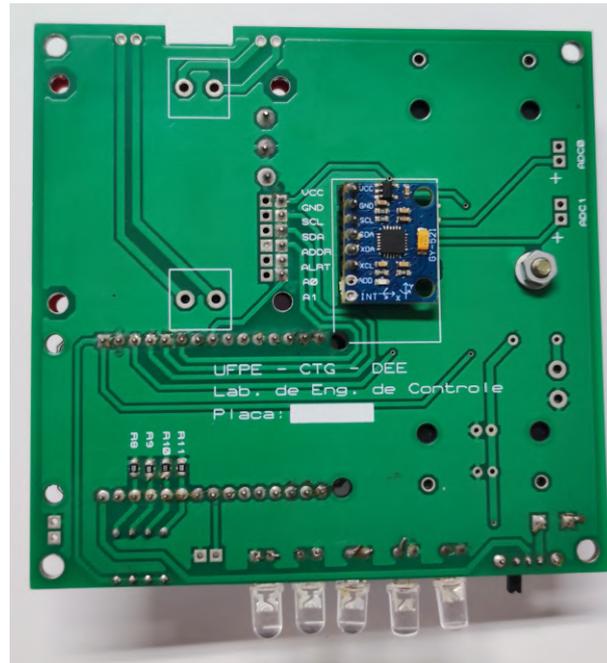
Figura 45 – Visão frontal da PCI projetada, com todos os componentes soldados.



Fonte: O Autor (2024).

Dentre os quatro LEDs da placa, o primeiro deles (contagem da esquerda para a direita em referência a Figura 45) é um LED vermelho, cuja função é informar que a placa está energizada. Ele estará ligado se o *power switch* estiver ligado ou se a ESP32 estiver conectada via USB a alguma fonte, e, como, por exemplo, um computador. O segundo LED, é de cor azul, e ele informa se a ESP32 possui conexão *bluetooth* ativa com algum dispositivo. Os demais LEDs, têm cor verde e possuem operações diversas, uma dessas é: se a tensão nas baterias estiver menor que o limite mínimo programado, os

Figura 46 – Visão traseira da PCI projetada, com todos os componentes soldados.



Fonte: O Autor (2024).

três LEDs irão piscar continuamente informando que é necessário realizar a troca delas. Eles também podem ser programados via *firmware*, permitindo que os estudantes possam testar o código e obter respostas sem precisar de comunicação *bluetooth*.

Similarmente, o *dip switch*, o dispositivo azul no canto inferior direito da Figura 45, pode ser usado para realizar testes no programa, ativar funções ou laços de repetições. Um possível uso na aplicação em sala de aula, é que cada botão do *dip switch* adicione um ganho diferente na malha de controle, fazendo com que o sistema, em malha aberta ou malha fechada, possua valores ligeiramente diferentes quando a modelagem da planta é feita. Dessa maneira, cada grupo de alunos irá realizar a modelagem e o projeto do controlador para plantas com ganhos em regime permanente diferentes.

Portanto, com todos os equipamentos eletrônicos conectados, coloca-se a PCI na estrutura física do CubeSat, fixando a conexão por meio de parafusos M3.5 com porcas por baixo, como descrito na capítulo 3 e mostrado na Figura 47. A PCI foi projetada para garantir versatilidade no seu uso, podendo ser reaproveitada para diferentes plantas didáticas, apenas removendo ou adicionando conexões, como o uso de fonte externa ao invés de baterias, conectores para conversão digital-analógica pela ESP32 e a possibilidade de controle de dois motores com o L298N.

Figura 47 – CubeSat montado por completo, com PCI embarcada, roda de reação e estrutura de suporte.



Fonte: O Autor (2024).

4.3 OPERAÇÃO EM MALHA ABERTA

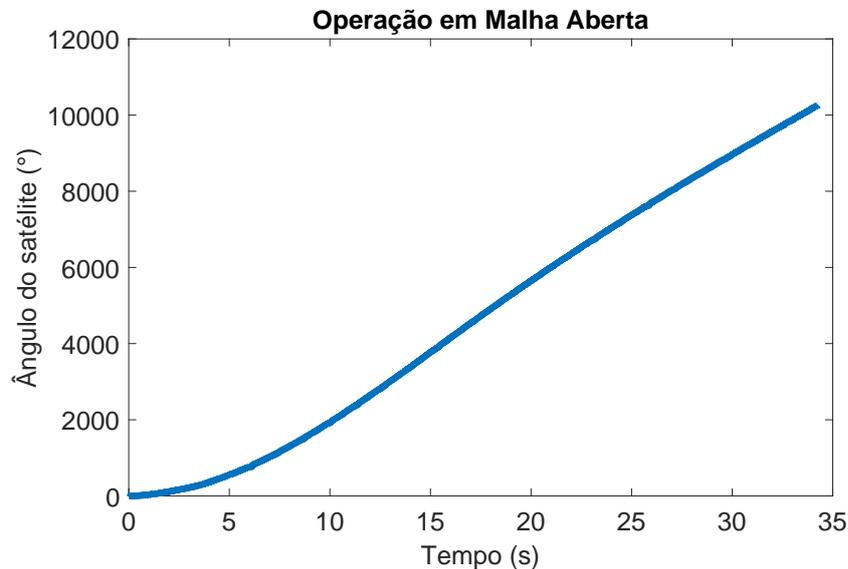
Como visto no capítulo 3, para operar em malha aberta, o usuário deve enviar um valor de ciclo de trabalho e um valor para o período em que receberá a medição do ângulo do satélite. Durante os testes realizados, notou-se que para valores maiores que 0,5, ocorriam fortes vibrações na estrutura física do satélite, devido ao mal alinhamento dos suportes inferiores da estrutura física. Ocasionalmente na desconexão da roda de reação com o eixo do motor, além de, problemas como zona morta e trepidação da estrutura de suporte.

Para evitar esses problemas, foi adicionado um elemento saturador no *firmware* do microcontrolador. Onde o usuário somente pode enviar valores de *duty cycle* entre -0,5 e 0,5, mantendo a integridade da planta e conseguindo uma rotação suave, essa restrição também foi adicionada na operação em malha fechada. É importante ressaltar que, os valores negativos do ciclo de trabalho são para mudar o sentido de giro do satélite. Para

operar com maiores valores de *duty cycle*, é necessário melhorar a fixação entre o eixo do motor com a roda de reação, o que pode ser feito diminuindo a área de encaixe ou a utilização de acopladores mecânicos que garantam a conexão entre eles.

Por fim, na Figura 48, tem-se a resposta da planta em malha aberta para um degrau de *duty cycle* com valor de 0,5. Como é possível analisar, inicialmente o comportamento da planta é similar a uma parábola, representando a aceleração inicial para vencer a inércia do sistema e a roda de reação acelerar para sua velocidade de regime permanente. Após cerca de 8 a 10 segundos, percebe-se que o sistema possui uma região aproximadamente linear o que significa que o satélite venceu o atrito estático e agora gira com velocidade constante. O motivo para o ângulo crescer indefinidamente, e não parar em 360° , é que para a análise de malha aberta, não limitou-se a medição do ângulo em uma volta completa.

Figura 48 – Resposta do satélite para um degrau de *duty cycle* com valor de 0,5.



Fonte: O Autor (2024).

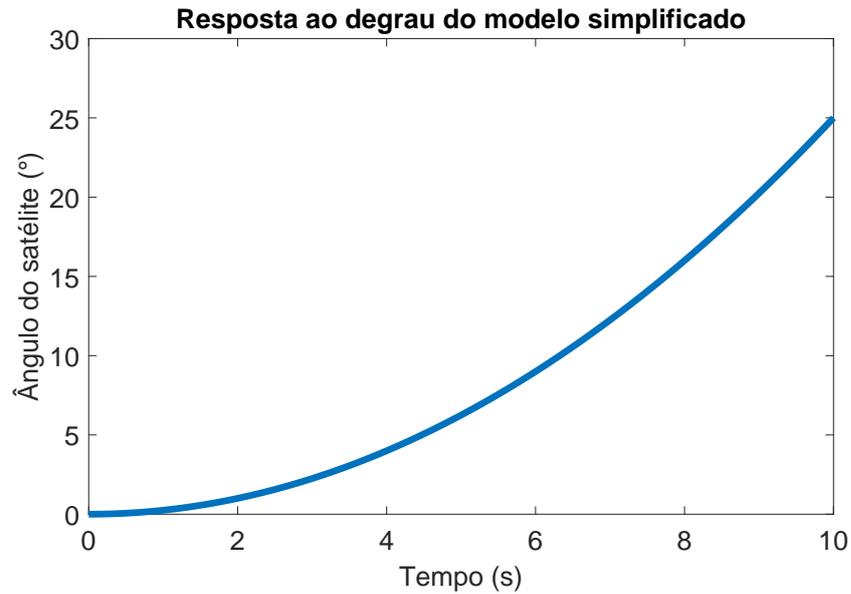
4.4 MODELAGEM DA PLANTA EM CAIXA CINZA

Conforme a Figura 48, tem-se a relação entre entrada e saída da planta didática. Com isso, pode-se realizar a modelagem em caixa cinza ou caixa branca. Segundo Viana (2023) e Mesquita (2017), o modelo simplificado da dinâmica de um eixo de satélite é:

$$G(S) = \frac{1}{J s^2}. \quad (4.1)$$

No qual a Equação 4.1 mostra-se que é uma função de transferência de segunda ordem. Isso é bastante similar a resposta em malha aberta encontrada na Figura 48, onde inicialmente o satélite possui uma variação angular parecida com uma parábola. Na Figura 49, mostra-se a resposta em degrau para a função de transferência simplificada do satélite com $J = 1$.

Figura 49 – Resposta em degrau do modelo simplificado do satélite, com $J = 1$.



Fonte: O Autor (2024).

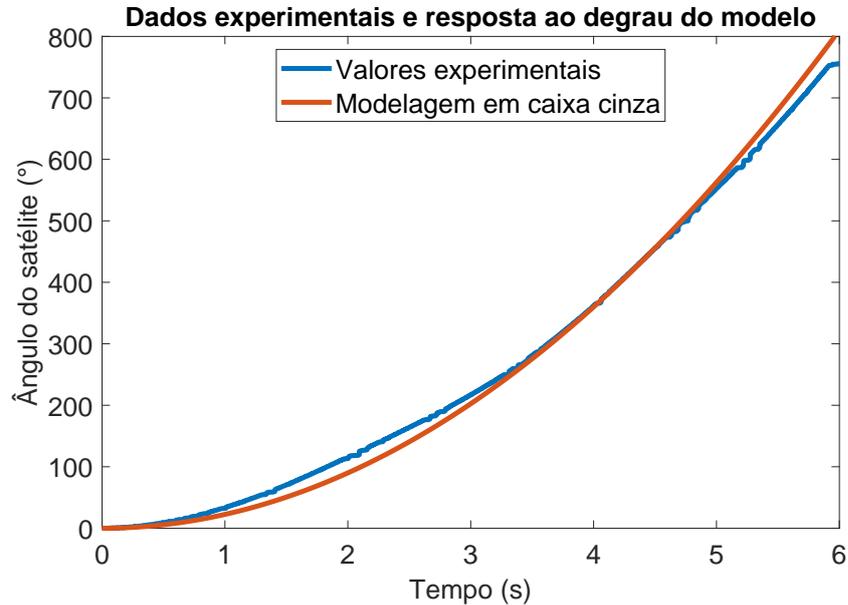
Mediante o que foi exposto, o CubeSat completa uma volta em seu eixo a cada 360° , onde pela Figura 48, isso ocorre durante os 4 segundos iniciais, significando que a dinâmica da planta didática pode ser aproximada por uma parábola. Pela similaridade da resposta da simplificação do modelo e a resposta em malha aberta da planta física, vê-se viável a modelagem em caixa cinza. Com isso, deve-se obter o valor do parâmetro J que representa o momento de inércia do satélite, por um eixo de referência (VIANA, 2023).

Finalmente, obtém-se o parâmetro J traçando curvas de segunda ordem com diferentes valores de ganho, que são comparadas e aquela que melhor representar o conjunto de pontos da Figura 48, atribui-se o valor do inverso de seu ganho a J . Portanto, após análise, concluiu-se que a modelagem em caixa cinza do CubeSat é dada por:

$$G(S) = \frac{45}{s^2}. \quad (4.2)$$

Na Figura 50, tem-se a comparação dos dados experimentais em malha aberta na cor vermelha e, em azul, a resposta ao degrau do modelo em caixa cinza, permitindo assim estimar o parâmetro J .

Figura 50 – Comparação da resposta ao degrau aplicado no CubeSat operando em malha aberta, com a resposta ao degrau do modelo em caixa cinza.



Fonte: O Autor (2024).

4.5 OPERAÇÃO EM MALHA FECHADA

Para evitar que esta monografia seja usada de referência para alunos da disciplina de Laboratório de Engenharia de Controle, o autor não irá explicar o passo a passo utilizado no processo do projeto do controlador. Sendo esta, a principal atividade que os estudantes poderão ter na disciplina, somente serão apresentados os resultados obtidos no fechamento da malha e uma breve explicação da implementação em controle digital.

Conforme mencionado no início do capítulo, para baixas velocidades o momento angular gerado pela roda de reação não vence a inércia do satélite. Com isso, é importante determinar o menor valor de *duty cycle* que faça com que o satélite gire livremente, encontrado em 0,2. Assim, definiu-se via *firmware* que no fechamento da malha de controle o menor valor de *duty cycle* para a geração do PWM seria de 0,2, e o maior valor de 0,5. De mesmo modo definiu-se que, para a rotação no sentido contrário, o maior ciclo de trabalho é de -0,2 e o menor de -0,5. Logo, a ação de controle gerada sempre conseguirá fazer o motor se mover e nunca ultrapassará os limites máximos de operação que possam danificar a planta.

Além disso, no *firmware* do microcontrolador, adicionou-se uma rotina, onde se o valor do *duty cycle* for positivo, deve-se ativar as portas do *full bridge* para que o motor gire no sentido positivo. De mesma maneira, quando o ciclo de trabalho é negativo, deve-se alterar o sentido de giro do motor. Com isso, a planta consegue responder bem a sobressinais e retornar a referência caso ultrapasse desta.

Por fim, adicionou-se uma etapa na leitura do sensor onde ele realiza a leitura entre 0 e 360°, diferentemente do descrito na seção de malha aberta. O motivo, é que se o ângulo

fosse somado continuamente, sem retornar a referência ao completar uma volta, caso ocorressem fortes distúrbios onde o satélite executa-se a rotação completa indefinidas vezes, ele somente iria voltar a referência após desfazer todas as voltas completas em relação ao seu eixo. Sendo está uma ação indesejada, pois aumentaria o tempo para retornar a referência em seguida de grandes distúrbios.

Com isso, implementou-se o controlador digital projetado no algoritmo de controle da planta e obteve-se uma resposta. Na Figura 51, tem-se a aplicação de um degrau de 90° com o satélite inicialmente em repouso, no ângulo zero. Percebe-se que ele possui um erro em regime permanente aproximadamente de $0,5^\circ$ e um tempo de assentamento de cinco segundos, onde o período de amostragem dos dados foi de um segundo.

Figura 51 – Aplicação de um degrau de 90° via IHM.

```

17:24:21.135
17:24:21.205 *****
17:24:21.208
17:24:21.208 1. Funcionamento em Malha Aberta
17:24:21.208 2. Recalibrar o acelerometro
17:24:21.208 3. Mostrar Medicao de Tensao
17:24:21.208 4. Funcionamento em Malha Fechada
17:24:22.470 4
17:24:22.575 *****
17:24:22.578
17:24:22.578 Controle de Apontamento do CubeSat
17:24:22.578 Para sair do controle, digite stop
17:24:22.578 Entre o angulo de referencia:
17:24:25.189 90
17:24:25.228 Angulo Z:357.86
17:24:26.219 Angulo Z:18.01
17:24:27.314 Angulo Z:77.08
17:24:28.232 Angulo Z:88.49
17:24:29.242 Angulo Z:75.73
17:24:30.265 Angulo Z:90.37
17:24:31.229 Angulo Z:88.92
17:24:32.266 Angulo Z:89.00
17:24:33.309 Angulo Z:89.09
17:24:34.220 Angulo Z:89.23
17:24:35.279 Angulo Z:88.18
17:24:36.282 Angulo Z:89.58
17:24:37.301 Angulo Z:89.56
17:24:38.251 Angulo Z:89.92
17:24:39.261 Angulo Z:88.94
17:24:40.222 Angulo Z:88.93
17:24:41.249 Angulo Z:89.01
17:24:42.247 Angulo Z:89.21
17:24:43.223 Angulo Z:89.07
17:24:44.266 Angulo Z:89.47
17:24:45.259 Angulo Z:89.71
17:24:46.262 Angulo Z:89.51
17:24:47.254 Angulo Z:89.11
17:24:48.320 Angulo Z:88.77
17:24:49.228 Angulo Z:89.02

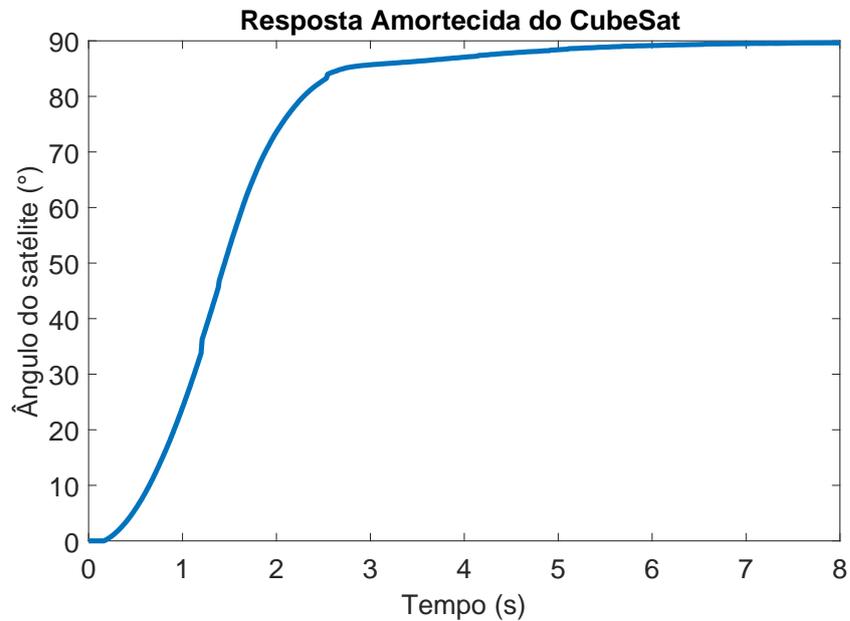
```

Fonte: O Autor (2024).

De mesmo modo, na Figura 52, há o gráfico que reflete os dados medidos pelo sensor durante a operação do satélite, o controlador escolhido para esse teste foi um que garantisse amortecimento na resposta do CubeSat. Em seguida, aplicou-se o mesmo controlador ao

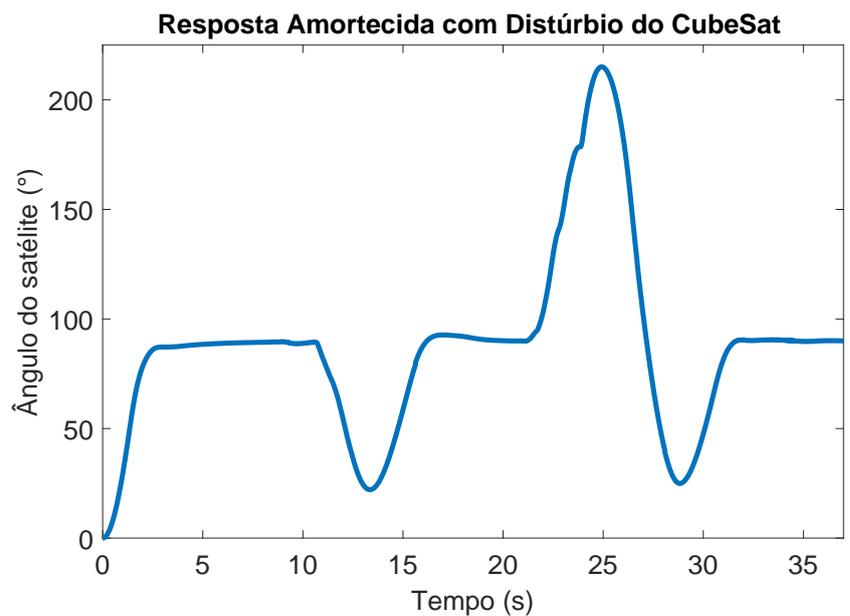
CubeSat e quando este atingia seu valor em regime permanente, fez-se perturbações no satélite, levando-o manualmente a outras angulações fora daquela determinada, a resposta as perturbações está presente na Figura 53.

Figura 52 – Resposta da planta didática em malha fechada, a um degrau de 90° , com resposta amortecida.



Fonte: O Autor (2024).

Figura 53 – Resposta da planta didática em malha fechada, a um degrau de 90° , com controlador amortecido a distúrbios.

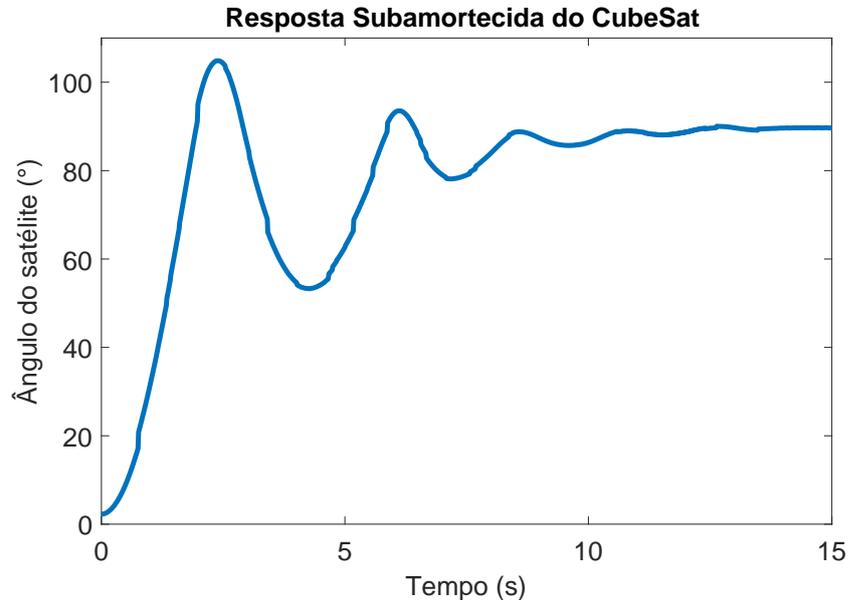


Fonte: O Autor (2024).

Seguidamente, projeta-se um controlador não amortecido, para mostrar o comportamento da planta a este tipo de resposta. A Figura 54, contém uma resposta subamortecida

ao satélite, como esperado ele leva mais tempo para chegar a seu valor em regime permanente, mas se o projeto do controlador fosse melhorado conseguiria obter melhores resultados.

Figura 54 – Resposta da planta didática em malha fechada, a um degrau de 90° , com resposta subamortecida.



Fonte: O Autor (2024).

Na Tabela 4, há *links* para os vídeos de testes em laboratório. O primeiro é um teste do controle de apontamento em malha fechada, e o segundo, a reação do satélite a perturbações externas.

Tabela 4 – Vídeos de demonstração dos testes de controla de apontamento e a distúrbio externo.

Teste	Link
Controle de Apontamento	Link
Comportamento a distúrbio externo	Link

4.6 APLICAÇÃO EM SALA DE AULA

Para uso em sala de aula, recomenda-se utilizar a metodologia PjBL. Os alunos podem ser divididos em duplas ou trios e devem projetar um controlador de apontamento através da teoria clássica de controle. Inicialmente, recomenda-se o uso de controlador PID, devido à facilidade de ajuste fino para encontrar seus ganhos.

Para projetar o controlador, os estudantes devem inicialmente obter a modelagem matemática da planta. Para isso, podem-se haver plantas levemente diferentes por grupos, cada grupo pode ter uma roda de reação diferente, ou a disposição dos parafusos da roda

de reação estarão diferentes. Outra possibilidade de se alterar a planta, é utilizar o *dip switch*, e para cada grupo um botão diferente estará escolhido, que adicionará um ganho extra na malha de controle.

Na obtenção do modelo da planta, os estudantes se comunicam com a planta via a IHM *bluetooth* desenvolvida neste trabalho, utilizando seus próprios celulares para se conectar à ESP32 pelo *software Serial Bluetooth Terminal*. Eles irão escolher um *duty cycle* de operação, que representa um degrau, e uma taxa de amostragem para receberem os dados da posição angular do satélite. Com os dados obtidos, estimarão uma modelagem para a planta didática, podendo ser de caixa cinza, caixa preta ou até caixa branca.

No projeto do controlador, os estudantes devem seguir requisitos de sobressinal e tempo de assentamento. Quanto menor o tempo de assentamento, mais desafiador se torna o controlador para atender o requisito de sobressinal, estando a cargo do professor o melhor balanceamento para que os estudantes consigam, com um PID simples, o controlador adequado. Para isso, podem utilizar de método como lugar das raízes, projeto de controlador por frequência com diagrama de Bode, Ziegler-Nichols ou outras metodologias.

O *firmware* disponibilizado no apêndice A, contém uma função chamada *ClosedLoop()*, nela é recomendável que os alunos escrevam o fechamento da malha de controle. Eles devem realizar o cálculo do erro atual, erro anterior e demais parâmetros matemáticos necessários, e implementar o controlador discretizado em linha de código com os ganhos já escolhidos. Recomenda-se que os alunos utilizem de interrupção via temporizador interno da ESP32 para atender a frequência de amostragem do controlador discretizado, embora também seja possível implementar sem interrupção.

Caso o professor deseje adicionar camadas de complexidades extras, ele pode não disponibilizar o *firmware* do apêndice A. Dessa maneira, ele pode pedir que pela leitura do esquemático e *datasheet* dos componentes escolhidos, os grupos desenvolvam um *firmware* próprio escolhendo bibliotecas de comunicação, de leitura do sensor e demais implementações extras. Embora viável, é importante aumentar o prazo de entrega para que os estudantes consigam atender todos os requisitos. Outra possibilidade, é exigir o desenvolvimento de um supervisor gráfico, que irá plotar em tempo real a posição angular do satélite, o que pode sair um pouco do escopo no ensino de sistemas de controle, mas é uma boa prática para cursos que já possuam disciplinas de projeto de supervisórios.

Essas não são as únicas possibilidades no uso dessa planta didática. O professor é livre para utilizá-la conforme achar mais adequado e inovar o que não foi descrito aqui, como adicionar ferramentas a ela. Um outro possível uso, mas requer trabalho extra, é na adição de um sensor de captação solar e uma célula fotovoltaica no local que fica a tampa traseira. Assim, os estudantes podem utilizar da lanterna de seus celulares em um ambiente escuro, onde o satélite deve apontar a face que contém a célula fotovoltaica em direção a fonte de luz, para ocorrer a máxima transferência de potência.

4.7 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, mostra-se a utilidade da planta didática como metodologia de ensino para sistemas de controle. A estrutura física e de *hardware* propõe alterações da planta didática para diferentes alunos e turmas, assim como garantem robustez e confiabilidade ao sistema. Assim como, a operação em malha aberta é fundamental para a extração de dados da planta e na modelagem desta. Por fim, apresentou-se a operação da planta em malha fechada, que mostrou a capacidade da planta de ser controlada e seguir uma referência.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, mostrou-se o desenvolvimento de uma planta didática baseada em tecnologia CubeSat. Para isso, desenvolveu-se uma estrutura de suporte para que o satélite conseguisse realizar sua rotação livremente, feito com canos PVC. Da mesma maneira, através de modelagem 3D, modelaram-se todas as peças e estruturas físicas necessárias para a criação do satélite, seguindo a norma CDS (2022). Por fim, desenvolveu-se um *firmware* para microcontrolador do tipo ESP32 que gerasse uma interface para os alunos realizarem o funcionamento da planta em malha aberta ou fechada, dependendo deles projetarem e escreverem no *firmware* o controlador e o fechamento da malha.

O trabalho é uma extensão da monografia vista em Viana (2023), onde modificaram-se os objetivos de que além de realizar o controle de apontamento do satélite, ele também fornecesse uma estrutura para ser usada no ensino de sistemas de controle. Foram necessárias, então, todas as mudanças eletrônicas e estruturais apontadas. Pelos resultados obtidos, comprova-se a capacidade de modelagem do sistema e realização de controle de apontamento deste.

Sendo assim, é possível afirmar que todos os objetivos foram atendidos. O novo CubeSat é mais robusto, a nova estrutura de suporte garante quase anulação de efeito pendular, mudanças em *hardware* e *firmware* bastante significativas e que facilitam o uso da planta didática como plataforma de ensino, a correta validação da planta e, por fim, são propostas aplicações e métodos de ensino dela em sala de aula.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A seguir, tem-se uma lista de propostas de melhorias e trabalhos futuros, para melhor atender os requisitos atendidos:

- Encontrar técnicas de melhor fixação do motor na roda de reação, conseguindo-se aumentar a faixa de valores de *duty cycle*, possibilitando o motor de atingir maiores rotações. Assim, obtendo uma planta mais rápida;
- Mudar o *framework* utilizado, durante o desenvolvimento do trabalho, houve limitações das possibilidades de uso pelo HAL da Arduino IDE. Uma delas foi a incapacidade de utilizar simultaneamente os dois núcleos de processamento do microcontrolador;
- Alterar a estrutura de suporte e estrutura mecânica, para conseguir realizar a rotação em duas direções. Dessa maneira, aumenta-se a complexidade do controlador, pois haverá dois eixos de livre giro do satélite;

- Desenvolver uma plataforma gráfica, não somente textual, que consiga gerar em tempo real um gráfico da posição angular do satélite, definir ganhos do controlador e o tipo do controlador.

REFERÊNCIAS

- 3DCOPAS. *Escolhendo o material ideal para seu projeto*. 2024. <<https://www.3dcopas.com.br/escolhendo-o-filamento-ideal-para-seu-projeto/>>. Accessed: 21-6-2024.
- AGUIAR, O. G. J. *Modulo II: o planejamento do Ensino*. [S.l.]: SEE/MG, 2005.
- AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas. Técnicas Lineares e não Lineares Aplicadas a Sistemas. Teoria e Aplicação*. [S.l.]: Editora UFMG, 2007. v. 3.
- ANG, K. H.; CHONG, G.; LI, Y. Pid control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, IEEE, v. 13, n. 4, p. 559–576, 2005.
- AUTOMATIONS, P. *Cored vs Coreless DC Motors Which Should You Choose*. 2020. <<https://www.progressiveautomations.com/blogs/products/cored-vs-coreless-dc-motors-which-should-you-choose>>. Accessed: 06-07-2024.
- AZEVEDO, J.; CERQUEIRA, C.; LOURES, L.; SHIBUYA, L. Processo sistêmico de verificação e validação do adcs do cubesat sport. In: *Journal of Control Science and Engineering*. [S.l.: s.n.], 2022.
- BAHRI, O. B.; BESBES, K. Didactic satellite based on android platform for space operation demonstration and development. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 61, n. 6, p. 1501–1511, 2018.
- BARBOSA, E. A. O.; MARTINS, M. L. da S.; LIMONGI, L. R.; NETO, R. C.; BARBOSA, E. J. A current-fed transformer-based high-gain dc–dc converter with inverse gain characteristic for renewable energy applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, 2023.
- BARBOSA, E. F.; MOURA, D. G. Metodologias ativas de aprendizagem na educação profissional e tecnológica. *Boletim Técnico Senac*, Senac, 2013.
- BAY, C. J.; RASMUSSEN, B. P. Exploring controls education: A re-configurable ball and plate platform kit. In: IEEE. *2016 American Control Conference (ACC)*. [S.l.], 2016. p. 6652–6657.
- BOHN, C.; ATHERTON, D. An analysis package comparing pid anti-windup strategies. *IEEE Control Systems Magazine*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 34–40, 1995.
- BRASIL, M. d. E. *Diretrizes curriculares nacionais do curso de graduação em Engenharia*. [S.l.]: MEC Brasília, 2019.
- BUSO, S.; MATTAVELLI, P. *Digital control in power electronics*. [S.l.]: Morgan & Claypool Publishers, 2015.
- CABRÉ, T. P.; VELA, A. S.; RIBES, M. T.; BLANC, J. M.; PABLO, J. R.; SANCHO, F. C. Didactic platform for dc motor speed and position control in z-plane. *ISA transactions*, Elsevier, v. 118, p. 116–132, 2021.

CAMPOS, I. R.; ROMANO, A. R.; LIMA, M. M. L. Sintonia de controladores por técnicas de otimização para controle do ângulo de apontamento de satélites do tipo cubesat. In: *ANAIS DO 10.º SEMINÁRIO MAUÁ DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*. [S.l.: s.n.], 2018.

CDS. *CubeSat Design Specification, Rev. 14.1*. [S.l.]: California Polytechnic State University, 2022.

EITC. *Analog and Digital Signals*. 2024. <<http://eitc.org/research-opportunities/new-media-and-new-digital-economy/computer-vision-immersive-technology-and-digital-content/image-processing-research-and-applications/analog-and-digital-signals>>. Acessado: 2024/04/10.

ELETROLANDIA. *MODULO GY521 MPU6050 ACELEROMETRO GIROSCOPIO*. 2024. <<https://www.eletrolandiaes.com.br/arduino-modulo-gy521-mpu6050-acelerometro-giroscopio>>. Accessed: 06-07-2024.

ELLER, L.; GUÉRIN, T.; HUANG, B.; WARREN, G.; YANG, S.; ROY, J.; TELLEX, S. Advanced autonomy on a low-cost educational drone platform. In: *IEEE. 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. [S.l.], 2019. p. 1032–1039.

ESPRESSIF. *ESP32 Arduino Core's Documentation*. 2016. <<https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/index.html>>. Accessed: 06-07-2024.

ESPRESSIF. *Bluetooth Serial*. 2018. <<https://github.com/espressif/arduino-esp32/tree/master/libraries/BluetoothSerial>>. Accessed: 06-07-2024.

ESPRESSIF. *User Guide DevKitM-1*. 2021. <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/user-guide-devkitm-1.html>>. Accessed: 06-07-2024.

FERNÁNDEZ-SAMACÁ, L.; RAMÍREZ, J. M.; OROZCO-GUTIÉRREZ, M. L. Project-based learning approach for control system courses. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 23, p. 94–107, 2012.

FRANÇA, C. A.; GALETI, H. V. A.; BARCELLOS, R.; WATANABE, F. Y.; KATO, E. R. R. Aprendizagem baseada em projetos (pjbl) através da competição de robôs. *Metodologias Ativas Aplicadas Nas Engenharias UFSCAR*, Comissão Permanente de Publicações Oficiais e Institucionais - CPOI, 2022.

FRANÇA, C. A.; KATO, E. R. R.; OGASHAWARA, O. Aplicação da aula expositiva dialogada para o projeto de um controlador fuzzy incremental. *Metodologias Ativas Aplicadas Nas Engenharias UFSCAR*, Comissão Permanente de Publicações Oficiais e Institucionais - CPOI, 2022.

FURTADO, A. E.; NASCIMENTO, D. F. L.; SILVA, J. W. de J. et al. Aprendizagem baseada em problemas (pbl) aplicada simultaneamente para estudantes de engenharia de 3º e 7º períodos como ferramenta motivacional. *Revista Práxis*, v. 10, n. 19, 2018.

HEIDT, H.; PUIG-SUARI, J.; MOORE, A.; NAKASUKA, S.; TWIGGS, R. Cubesat: A new generation of picosatellite for education and industry low-cost space experimentation. 2000.

- INVENSENSE. *Product Specification*. [S.l.], 2013. Rev. 3.4.
- IRIGOYEN, E.; LARZABAL, E.; PRIEGO, R. Low-cost platforms used in control education: An educational case study. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 46, n. 17, p. 256–261, 2013.
- LI, J.; POST, M.; WRIGHT, T.; LEE, R. Design of attitude control systems for cubesat-class nanosatellite. *Journal of Control Science and Engineering*, Wiley Online Library, v. 2013, n. 1, p. 657182, 2013.
- MARIÑO, G. G. C.; BÜRGER, E.; LOUREIRO, G.; BOGOSSIAN, O. Mission analysis for a remote sensing cubesat mission over the amazon rainforest. In: *2nd IAA Latin American CubeSat Workshop. Proceedings... IAA*. [S.l.: s.n.], 2017.
- MESQUITA, B. D. R. de. *Análise de estimação e controle de atitude em modo de operação nominal do CONASAT por Filtro SDRE e controle PID*. Dissertação (Mestrado) — INPE, 2017.
- NETO, R. C.; TRINDADE, F. L.; MARQUES, B. R.; AZEVEDO, G. M.; BARBOSA, E. J.; BARBOSA, E. A. An aeropendulum-based didactic platform for the learning of control engineering. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 34, n. 3, p. 566–577, 2023.
- NISE, N. S.; MATSSURA, J. P. *Engenharia de sistemas de controle*. [S.l.]: LTC, 2012. v. 6.
- OGATA, K. *Discrete-time control systems*. [S.l.]: Prentice-Hall, Inc., 1995.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: Pearson, 2011. v. 5.
- PARK, J.; MACKAY, S. *Practical data acquisition for instrumentation and control systems*. [S.l.]: Newnes, 2003.
- PQSHEDY. *Microcontrollers: The Secret to Space Travel and Other Pursuits*. 2023. <<https://medium.com/@pqshedy33/microcontrollers-the-secret-to-space-travel-and-other-pursuits-86ee75f743d8>>. Accessed: 06-07-2024.
- PUIG-SUARI, J.; TURNER, C.; AHLGREN, W. Development of the standard cubesat deployer and a cubesat class picosatellite. In: IEEE. *2001 IEEE aerospace conference proceedings (Cat. No. 01TH8542)*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 1–347.
- RASSÖLKIN, A.; VAIMANN, T.; ORG, P.; LEIBAK, A.; GORDON, R.; PRIIDEL, E. Adcs development for student cubesat satellites—taltech case study. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, v. 70, n. 3, 2021.
- ROBOCORE. *Modulo Driver Ponte H - L298N*. 2024. <<https://www.robocore.net/driver-motor/driver-motor-ponte-h-l298n>>. Accessed: 06-07-2024.
- RTEFIC. *MPU6050 Light*. 2021. <https://github.com/rfetick/MPU6050_light>. Accessed: 06-07-2024.
- SAEED, N.; ELZANATY, A.; ALMORAD, H.; DAHROUJ, H.; AL-NAFFOURI, T. Y.; ALOUINI, M.-S. Cubesat communications: Recent advances and future challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 22, n. 3, p. 1839–1862, 2020.

- SAMUELSEN, D. A.; GRAVEN, O. H. A holistic view on engineering education: How to educate control engineers. In: IEEE. *2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*. [S.l.], 2018. p. 736–740.
- SANTILLI, G.; VENDITTOZZI, C.; CAPPELLETTI, C.; BATTISTINI, S.; GESSINI, P. Cubesat constellations for disaster management in remote areas. *Acta Astronautica*, Elsevier, v. 145, p. 11–17, 2018.
- SANTOS, T. M. d. O. *Técnicas de realimentação aplicadas na planta didática SMAR PD3 Foundation Fieldbus*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto, 2016.
- SATNOW. *Top Satellite Reaction Wheels in 2023*. 2023. <<https://www.satnow.com/news/details/1455-top-satellite-reaction-wheels-in-2023>>. Accessed: 06-07-2024.
- SILBERMAN, M. *Active Learning: 101 Strategies To Teach Any Subject*. [S.l.]: ERIC, 1996.
- SORIANO, A.; MARIN, L.; VALLES, M.; VALERA, A.; ALBERTOS, P. Low cost platform for automatic control education based on open hardware. *IFAC Proceedings Volumes*, Elsevier, v. 47, n. 3, p. 9044–9050, 2014.
- ST. *Dual Full Bridge Driver*. [S.l.], 2023. Rev. 5.
- TORELLA, M. *Arduino ou Esp descubra a melhor opção*. 2020. <<https://lobodarobotica.com/blog/arduino-ou-esp-descubra-a-melhor-opcao/>>. Accessed: 06-07-2024.
- TORRE, L. D. L.; GUINALDO, M.; HERADIO, R.; DORMIDO, S. The ball and beam system: A case study of virtual and remote lab enhancement with moodle. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, IEEE, v. 11, n. 4, p. 934–945, 2015.
- VERLY, A.; CARMO, F. H. P. D.; PAULA, M. V. D.; RICCO, R. A. Identificação de modelos para uma planta de nível didática smar pd3-f. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, n. 1.
- VIANA, M. C. *Controle de atitude de cubesat com atuador de um eixo*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Pernambuco, 2023.
- VILLELA, T.; COSTA, C. A.; BRANDÃO, A. M.; BUENO, F. T.; LEONARDI, R. Towards the thousandth cubesat: A statistical overview. *International Journal of Aerospace Engineering*, Wiley Online Library, v. 2019, n. 1, p. 5063145, 2019.
- VIRGINIA, U. of. *UVA CubeSat*. 2019. <<https://news.virginia.edu/content/uva-cubesat-deployed-students-seek-contact-ground-station>>. Accessed: 06-07-2024.
- WOELLERT, K.; EHRENFREUND, P.; RICCO, A. J.; HERTZFELD, H. Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 47, n. 4, p. 663–684, 2011.
- XIA, X.; SUN, G.; ZHANG, K.; WU, S.; WANG, T.; XIA, L.; LIU, S. Nanosats/cubesats adcs survey. In: IEEE. *2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. [S.l.], 2017. p. 5151–5158.

YAQOOB, M.; LASHAB, A.; VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M.; ORCHARD, M. E.; BINTOUDI, A. D. A comprehensive review on small satellite microgrids. *IEEE transactions on power electronics*, IEEE, v. 37, n. 10, p. 12741–12762, 2022.