



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA CONTROLE DE UM
ROBÔ PÊNDULO INVERTIDO MÓVEL SOBRE DUAS RODAS**

Matheus Tomasetto

Lajeado/RS, novembro de 2023



Matheus Tomasetto

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA CONTROLE DE UM ROBÔ PÊNULO INVERTIDO MÓVEL SOBRE DUAS RODAS

Projeto de Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Me. Henrique Worm.

Lajeado/RS, novembro de 2023

Matheus Tomasetto

IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA PARA CONTROLE DE UM ROBÔ PÊNULO INVERTIDO MÓVEL SOBRE DUAS RODAS

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Prof. Me. Henrique Worm - orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Profa. Ma. Aline Thaís Käfer
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Me. Patric Janner Marques

Lajeado/RS, novembro de 2023

“Sonhar grande e sonhar pequeno dá o mesmo trabalho”

Jorge Paulo Lemann

RESUMO

O presente trabalho objetiva uma implementação que atinja o equilíbrio estático, na posição vertical, de um robô pêndulo invertido sobre duas rodas. Este modelo de robô vem sendo estudado por pesquisadores da área de controle devido a sua dinâmica não linear e natureza fundamentalmente instável. Muitas soluções utilizadas são feitas a partir do modelo linearizado do sistema. Para tal, este trabalho tem por objetivo propor um controlador que atue sobre este modelo para mantê-lo em equilíbrio durante o movimento, bem como sua implementação física. Além de ser amplamente reconhecido e difundido em contextos acadêmicos, o mesmo modelo encontra aplicação em diversos cenários práticos e avançados, podendo-se citar o controle de lançamento de foguetes, na locomoção de pernas de robôs humanoides e na estabilidade de guindastes de grande porte. Deste modo, este trabalho apresenta os resultados da implementação, com sucesso, de um robô equilibrista de eixo único, para fins acadêmicos, utilizando-se da plataforma Arduino, de sensores do tipo acelerômetro e giroscópio e de técnicas de controle PID.

Palavras chave: Pêndulo Invertido Sobre Duas Rodas. Robô. Sistema de Controle. Controle PID. Modelo não-linear.

ABSTRACT

The present work aims at an implementation that achieves static balance, in the vertical position, of an inverted pendulum robot on two wheels. This robot model has been studied by researchers in the field of control due to its nonlinear dynamics and fundamentally unstable nature. Many solutions used are made from the linearized model of the system. To this end, this work aims to propose a controller that acts on this model to keep it in balance during movement, as well as its physical implementation. In addition to being widely recognized and disseminated in academic contexts, the same model finds application in several practical and advanced scenarios, including rocket launch control, the locomotion of humanoid robot legs and the stability of large cranes. Thus, this work presents the results of the successful implementation of a single-axis balancing robot, for academic purposes, using the Arduino platform, accelerometer and gyroscope sensors and PID control techniques.

Keyword: Inverted Pendulum On Two Wheels. Robot. Control system. PID control. Non-linear model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de corpo livre de um pêndulo invertido	15
Figura 2 - Robô Bípede Atlas	21
Figura 3 - Componentes de um microcontrolador	22
Figura 4 - Placa do Arduino Nano	23
Figura 5 - Sistema de barramento I2C típico.....	26
Figura 6 - Sistema de barramento SPI típico.....	27
Figura 7 - Componentes do acelerômetro	29
Figura 8 - Orientação dos sensores	30
Figura 9 - Representação interna do giroscópio.....	31
Figura 10 - Encoder Incremental Óptico.....	32
Figura 11 - Componentes de um motor CC de ímã permanente.....	34
Figura 12 - Exemplos da relação Duty Cycle	35
Figura 13 - Comutações ponte H	37
Figura 14 - Exemplo de sistema de malha fechada com sensor para realimentação.....	41
Figura 15 - Forças atuantes sobre o pêndulo.....	42
Figura 16 - Forças atuantes sobre a roda	44
Figura 17 - Circuito elétrico do motor CC	46
Figura 18 - Sistema do espaço de estados	52

Figura 19 - Espaço de estados do filtro Kalman.....	52
Figura 20 - Estimação do ângulo por acelerômetro e giroscópio	54
Figura 21 - Controlador PID	55
Figura 22 - Ação Proporcional na saída	56
Figura 23 - Ação Integral na saída	56
Figura 24 - Ação Derivativa na saída	57
Figura 25 - Representação de um sistema de controle digital.....	58
Figura 26 - Vista isométrica do robô pêndulo invertido	61
Figura 27 – Especificação dos elementos do robô.....	62
Figura 28 - Montagem do robô	63
Figura 29 - Conjunto do motor e roda do robô	65
Figura 30 - Módulo Ponte H L298N.....	66
Figura 31 - MPU-9250 pinout	66
Figura 32 - Desenho do circuito gravado na placa	69
Figura 33 - Corrosão do cobre exposto na solução.....	69
Figura 34 - Perfuração e acabamento da placa	70
Figura 35 – Montagem do controle remoto.....	71
Figura 36 - Tela OLED	72
Figura 37 - nRF24L01+ pinout	73
Figura 38 - Fluxograma da programação do controle remoto	74
Figura 39 - Fluxograma do algoritmo de estabilização do robô.....	75
Figura 40 - Detalhamento da estrutura da planta	78
Figura 41 - Robô pêndulo invertido	79
Figura 42 - Controle remoto	80
Figura 43 – Detalhe do circuito do controle remoto.....	81
Figura 44 - Teste do robô sobre rampa.....	84

Figura 45 - Teste do robô em superfície irregular	85
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros físicos do modelo	77
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> - Conversor Analógico-Digital
CA	corrente alternada
CC	corrente contínua
CPU	<i>Central Processor Unit</i> – Unidade Central de Processamento
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i> – <i>Espalhamento Espectral Chirp</i>
dBi	ganho da antena em decibéis
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i> - Memória programável apagável somente de leitura
GHz	Gigahertz
H	Henry
h	Horas
I/O	<i>Input/Output</i> – Entrada/Saídas
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> - Ambiente de desenvolvimento integrado
I2C	Inter-Integrated Circuit - Circuito Inter-integrado
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
ISP	In-System Programming - Programação Diretamente no Circuito
kg	quilograma
KHz	quilohertz
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> - Display de Cristal Líquido

LiPo	Lítio, Polímero (Baterias)
m	metro
mA	milliampere
Mbps	megabit
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> - Painel de Fibra de Densidade Média
MHz	Mega hertz
m/s	metro por segundo
m/s ²	metro por segundo ao quadrado
n	nano
N	Newton
Nm	Newton-metro
Ω	ohm
OLED	Organic Light-Emitting Diodes - Diodo Emissor de Luz Orgânica
pF	PicoFarad
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i> - Modulação por largura de pulso
rad	radiano
rad/s	radiano por segundo
rpm	rotações por minuto
s	segundo
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> - interface periférica serial
RAM	<i>Random Access Memory</i> - Memória de acesso randômico
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i> - Computador com um conjunto reduzido de instruções
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver / Transmitter</i> - Transmissor/Receptor Assíncrono Universal
USB	<i>Universal Serial Bus</i> - Porta Serial Universal
USI	<i>Universal Serial Interface</i> - Interface Serial Universal
μ	micro
V	Volts (Tensão)
Vca	Tensão em corrente alternada
Vcc	Tensão em corrente contínua

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Tema	16
1.2 Delimitação do tema	17
1.3 Problema de pesquisa	17
1.4 Hipótese	17
1.5 Justificativa	18
1.6 Objetivo	18
1.7 Objetivos específicos	19
1.8 Estrutura	19
2 REVISÃO TEÓRICA	20
2.1 Pêndulo Invertido	20
2.2 Componentes do Robô	22
2.2.1 Plataforma Arduino	22
2.2.2 Protocolos de Comunicação Serial	24
2.2.2.1 Protocolo I2C	25
2.2.2.2 Protocolo SPI	26
2.2.3 Sensores	28
2.2.3.1 Acelerômetro	29
2.2.3.2 Giroscópio	30

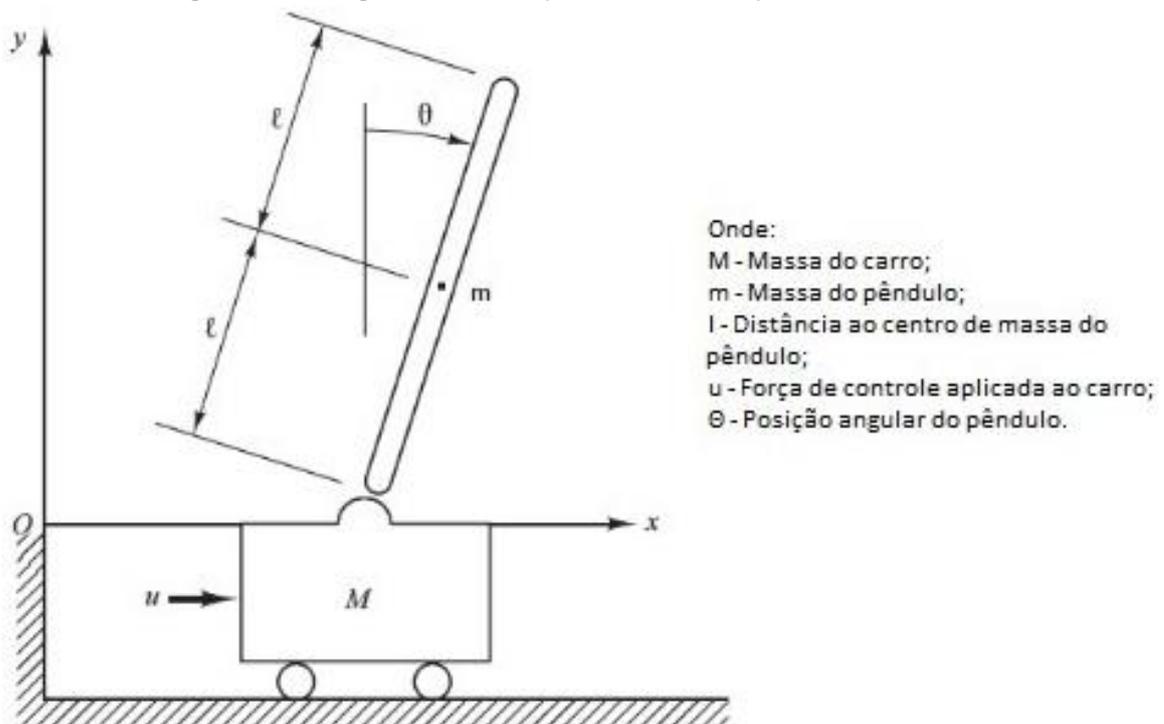
2.2.3.3 Encoder	32
2.2.4 Motor CC	33
2.2.4.1 PWM	34
2.2.5 Ponte H	36
2.2.6 Baterias	38
2.2.7 Transmissão de sinais via rádio	38
2.3 Teoria de Controle	40
2.4 Modelo do Pêndulo Invertido	41
2.4.1 Modelo da Estrutura do Pêndulo Invertido	42
2.4.2 Modelo da Roda	44
2.4.3 Modelo do Motor CC	45
2.5 Modelo em espaço de estados	48
2.6 Filtros	50
2.6.1 Filtro de Kalman	50
2.6.1.1 Estimação do processo	51
2.6.1.2 Interpretação do processo	52
2.6.2 Filtro Complementar	53
2.7 Controlador PID	54
2.7.1 Controlador PID Digital	57
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	60
3.1 Estrutura física	60
3.1.1 Componentes do Sistema	61
3.1.2 Atuadores	64
3.1.3 Ponte H	65
3.1.4 Sensores Giroscópio e Acelerômetro	66
3.1.5 Placas de Controle	67
3.1.6 Controle remoto	68

3.1.6.1 Tela OLED	71
3.1.6.2 Módulos de Radiofrequência	72
3.2 Programação	74
4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	77
4.1 Implementação do veículo e do controle remoto	77
4.2 Análise do algoritmo do sistema	81
4.3 Testes práticos	82
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA ESTRUTURA DO ROBÔ	96
APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO DA PLANTA	100
APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO E CIRCUITO DO CONTROLE REMOTO	101

1 INTRODUÇÃO

Um sistema pêndulo invertido é caracterizado pela sua não linearidade e instabilidade, sendo definido como uma estrutura em que o ponto de articulação se encontra abaixo do centro de gravidade. A literatura exemplifica este sistema como uma haste articulada sobre um carro, conforme Figura 1, a qual tende a cair a qualquer instante e para qualquer direção sob o efeito da gravidade, a menos que uma força horizontal adequada de controle seja aplicada sobre ela, mantendo-a na vertical (OGATA, 2010).

Figura 1 - Diagrama de corpo livre de um pêndulo invertido



Fonte: Do autor, adaptado de Ogata (2010).

De modo a garantir a eficácia do sistema, é desenvolvida a modelagem do pêndulo invertido em questão, mediante modelos matemáticos, a fim de criar um controlador capaz de corrigir a inclinação da planta. Ogata (2010) estabelece alguns componentes para um sistema de controle, como a variável controlada, sendo a grandeza ou condição medida; a variável manipulada, a qual é a grandeza ou condição variada pelo controlador e que afeta a variável controlada; a planta, conjunto de itens de uma máquina funcionando associadamente para desempenhar uma função; e a perturbação, caracterizada por um sinal que afeta adversamente a variável de saída da planta.

Dentre as aplicações do sistema, pode-se citar o *Segway*, um transportador pessoal robótico autoequilibrante, de duas rodas, modelo este que funciona a partir do equilíbrio do indivíduo que o utiliza. Outro exemplo prático é o de um robô soldador não tripulado, capaz de executar soldas em ambientes desfavoráveis e com restrições de espaço (KIM *et al.*, 2003). Além destes, a concepção para a estabilização do pêndulo invertido sobre duas rodas é utilizada no desenvolvimento de foguetes, tecnologias contra abalos sísmicos em edifícios, exoesqueletos e próteses para paraplégicos, pernas de robôs humanoides, robôs industriais para transporte de carga e execução de tarefas, dentre outros (FATTINI, 2000).

Desta forma, a tendência do mercado aponta para o crescente emprego de tecnologias baseadas em sistemas do tipo pêndulo invertido, que atendam às necessidades individuais, comerciais e industriais a um custo reduzido (VALADÃO, 2017). Considerando a importância de veículos autobalanceados de duas rodas para pesquisas e aplicações práticas, o presente trabalho objetivou a construção de um robô equilibrista de eixo único em pequena escala, construído em MDF e aço carbono, utilizando-se da plataforma Arduino, de sensores do tipo acelerômetro e giroscópio e de técnicas de controle PID.

1.1 Tema

Aplicação de um controlador linear na estabilização de um pêndulo invertido móvel.

1.2 Delimitação do tema

Construção e implementação de robô do tipo pêndulo invertido, englobando modelagem do sistema em espaço de estados, controle PID, implementação digital em *hardware* microprocessado e controle remoto. Para tal, foram utilizados componentes como motores, sensores do tipo acelerômetro e giroscópio, estes dispostos no corpo do robô, amplificadores operacionais e transistores em placas de circuito impresso.

Além disso, o deslocamento horizontal do veículo é controlado por meio de um controle remoto, com transmissão de dados via rádio. Este recebe as informações dos sensores do robô, enquanto transmite comandos para o deslocamento horizontal e define valores para os parâmetros do PID.

1.3 Problema de pesquisa

Como estabilizar um robô pêndulo invertido e comandar seus movimentos remotamente?

1.4 Hipótese

O presente trabalho parte da hipótese de que utilizando-se de um controlador do tipo PID para o controle de posição e balanceamento do pêndulo invertido móvel, o robô permanecerá em equilíbrio durante sua movimentação. Também, irá apresentar um controle para perturbações externas, evitando quedas em caso de impactos e colisões.

1.5 Justificativa

Atualmente, em diversos dos ambientes industriais, a área disponível para locomoção é limitada, fazendo com que novas técnicas sejam adotadas. Diante disso, conforme Valadão (2022), a implementação de robôs pêndulo invertido se mostra como uma ótima alternativa, por ocuparem menor espaço quando comparados a outros modelos, visto que se locomovem verticalmente, ao passo que carregam cargas ou executam tarefas no ambiente laboral.

Enquanto robôs convencionais de três ou quatro rodas apresentam confiabilidade e estabilidade comprovadas na execução de suas funções, os robôs autobalanceados em duas rodas se destacam em aspectos como a capacidade de manobrar em espaços pequenos, alta estabilidade em rampas e contra perturbações temporárias. Além disso, o uso extensivo do sistema de pêndulo invertido em pesquisas de controle é atribuído à sua característica não-linear (SCHILLING, 2017).

Diante disto, este trabalho se justifica pela necessidade de aprofundar os estudos quanto ao controle de robôs do tipo pêndulo invertido, para que no futuro possam ser implementados, com confiabilidade, em ambientes industriais, principalmente os que comprometam a saúde de um colaborador ou que restrinjam o seu acesso, devido às condições adversas. Assim, a importância do emprego de robôs pêndulo invertido evidencia-se como uma solução apropriada, visto que estes podem solucionar os problemas elencados (SCHILLING, 2017).

1.6 Objetivo

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver e implementar um sistema para controle de um robô pêndulo invertido de pequena escala, construído em MDF, para fins educacionais, capaz de manter-se equilibrado sobre um eixo e duas rodas e movimentar-se conforme comandos realizados à distância.

1.7 Objetivos específicos

A partir da definição do objetivo geral, é possível elencar objetivos específicos que serão desenvolvidos no decorrer do presente trabalho:

- a. definir o modelo do sistema e seu controle;
- b. projetar e construir um robô pêndulo invertido móvel;
- c. escolher o *hardware* para a implementação do veículo;
- d. elaborar o controle por PID para estabilizar o ângulo e posicionamento do robô;
- e. desenvolver a programação dos microcontroladores para o controle do sistema;
- f. montar o dispositivo para comandar à distância o robô, em uma placa de circuito impresso;
- g. realizar a comunicação, via sinais de rádio, entre robô e dispositivo para comandar seu deslocamento.

1.8 Estrutura

O presente trabalho é constituído pelas seguintes etapas:

- a. capítulo 1 – introdução, objetivos e justificativas do trabalho;
- b. capítulo 2 – embasamento teórico, a partir de obras literárias da área da engenharia e conteúdos relevantes ao tema;
- c. capítulo 3 – metodologia utilizada no trabalho;
- d. capítulo 4 – resultados obtidos e análises;
- e. capítulo 5 – considerações finais.

2 REVISÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão teórica referente à aplicação e utilização de robôs do tipo pêndulo invertido sobre duas rodas, bem como o seu dimensionamento, para o pleno embasamento das tecnologias aplicadas na proposta.

2.1 Pêndulo Invertido

Dentre os desafios existentes, no que diz respeito à robótica móvel, elenca-se a adversidade quanto à locomoção em ambientes com a presença de degraus, desníveis e outros obstáculos, principalmente para robôs do tipo pêndulo invertido, uma vez que este sistema é considerado instável devido às suas características. A fim de corrigir esse aspecto, o controle do sistema deve ser bem elaborado, considerando as particularidades físicas da planta em sua totalidade (WARDANA, 2020).

Um dos primeiros estudos abordando o sistema pêndulo invertido foi realizado no início do século XX, onde Stephenson *et al.* (1908) teve em vista compreender a modelagem e o controle de um sistema simples. Analisando o problema, teorizou formas de estabilização e concluiu, empiricamente, que o pêndulo poderia ser estabilizado quando submetido a uma força na base da planta. Posteriormente, Stephenson concluiu o mesmo para os pêndulos invertidos duplos e triplos.

A partir dos resultados obtidos por Stephenson *et al.* (1908), Lowenstern *et al.* (1932) desenvolveram a equação de movimento dos pêndulos invertidos e outros pesquisadores conduziram experimentos de estabilização em condições iniciais distintas, sendo eles Bagddanoff *et al.* (1965), Blitzer *et al.* (1965), e Ness *et al.* (1967).

Mais tarde, as pesquisas abordaram técnicas de controle para sistemas não lineares, como é o caso do pêndulo duplo invertido sobre carro, conforme Sahba (1983) e Yamakawa (1989).

Os estudos nesta área persistem até os dias atuais. Wardana *et al.* (2020) desenvolveu um robô capaz de mover a base do pêndulo quando em contato das rodas com degraus, fazendo com que o centro de gravidade do pêndulo seja deslocado, porém permanecendo dentro de uma margem de equilíbrio. Outras soluções, como o robô bípede Atlas da Boston Dynamics (2023), é exibido na Figura 2. Este possui maior capacidade de locomoção, por conseguir replicar movimentos humanoides, diversificados e ágeis, alcançando uma velocidade de até 2,5 m/s, enquanto os algoritmos planejam os movimentos envolvendo todo o corpo e ambiente.

Figura 2 - Robô Bípede Atlas



Fonte: Boston Dynamics (2023).

Diante disso, o presente trabalho abordará a construção, modelagem e controle de um robô pêndulo invertido simples, utilizando técnicas de controle clássicas e adaptando-as para a planta em questão, buscando um controle condizente com o projeto proposto.

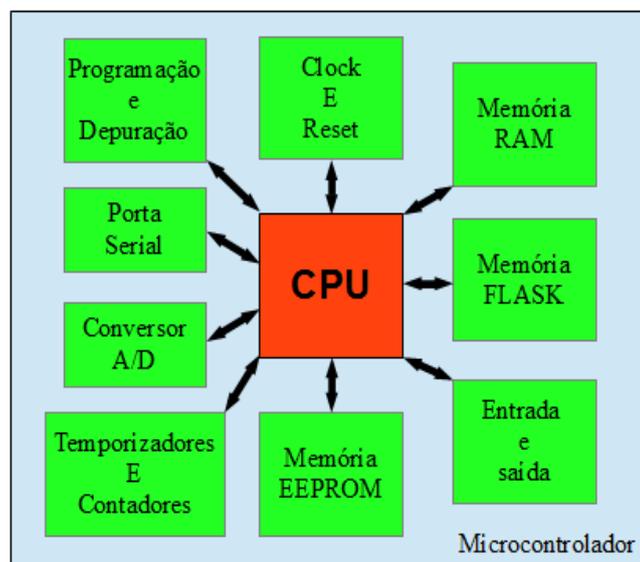
2.2 Componentes do Robô

A estrutura do pêndulo invertido é usualmente representada e modelada como uma haste rígida, presa por uma junta sem atrito a um carro rígido, que se move livremente em qualquer direção (SUNDIN; THORSTENSSON, 2012). Os principais elementos que constituem esse sistema são os microcontroladores, sensores do tipo acelerômetro e giroscópio, motores, ponte H, baterias, componentes de telecomunicação e o chassi propriamente dito.

2.2.1 Plataforma Arduino

Os microcontroladores são circuitos integrados com todos os componentes que necessitam para que funcionem com a dependência única de uma fonte de alimentação externa. Na estrutura do microcontrolador está incluída uma CPU, memória de dados do programa EEPROM ou memória *Flash*, um sistema de *clock*, portas de entrada e saídas digitais, além de diversos periféricos como conversores Analógicos/Digitais, módulo de temporização, dentre outros (KERSCHBAUMER, 2018). Na Figura 3 verifica-se uma das possíveis estruturas de um microcontrolador.

Figura 3 - Componentes de um microcontrolador



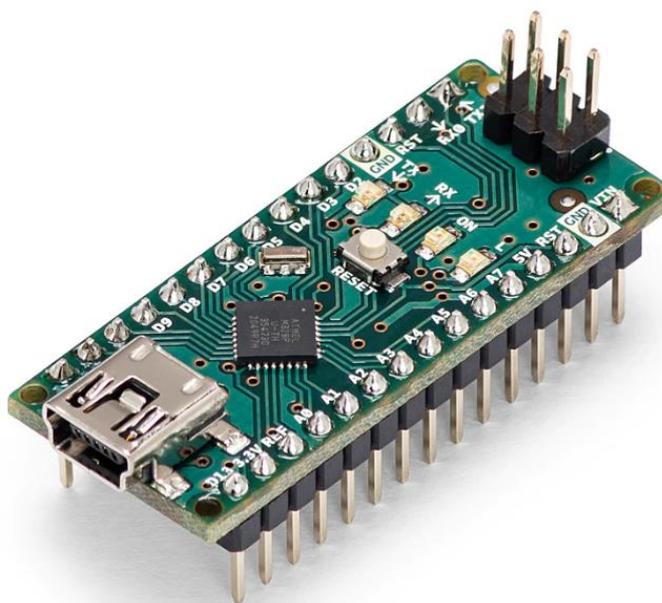
Fonte: Kerschbaumer (2018).

Os microcontroladores são sistemas computacionais completos, sendo possível compará-los a computadores, porém em um único e diminuto chip (CRISP, 2004). O autor destaca ainda a versatilidade dos microcontroladores, visto que seu comportamento deriva principalmente do *software* que nele é armazenado. Desta forma, é possível realizar inúmeras aplicações a partir de um único microcontrolador.

Em conformidade com Monk (2014), Arduino é uma pequena placa de microcontrolador, a qual o usuário consegue ligar a um computador via conexão USB. Além disso, as placas Arduino dispõem de terminais que permitem a conexão de dispositivos externos, como telas LCD, sensores, motores, diodos, relés, alto-falantes, microfones, dentre outros.

A conexão USB disponível, também, pode ser utilizada para energizar este microcontrolador e suas saídas. Outras possibilidades de alimentação são a partir de baterias ou mesmo de fontes ligadas a um ponto fixo de energia. Um Arduino pode vir a se comunicar com um computador e até ser controlado pelo mesmo, ou então pode operar de forma autônoma. A Figura 4 demonstra como é a placa do Arduino Nano.

Figura 4 - Placa do Arduino Nano



Fonte: Arduino (2023).

Basicamente, é possível decompor a plataforma Arduino em dois segmentos: o *hardware*, que é placa prototipada com seus componentes eletrônicos; e a IDE, *software* executado em um computador, onde o usuário realiza a programação do código que será executado pelo *hardware*. A partir de uma comunicação serial é

possível realizar o *upload* do *software*, construído na IDE, para a placa de prototipagem Arduino (OLIVEIRA, 2019).

Além do seu tamanho diminuto, o Arduino Nano apresenta um ótimo desempenho para projetos compactos. Baseado no microcontrolador ATmega328, este microcontrolador apresenta especificações bem similares com as do Arduino UNO R3. Com pinagem ampla, contendo 22 pinos de I/Os, dos quais 6 podem ser utilizados como PWM e 8 como entradas analógicas, o Arduino Nano tem a vantagem de utilizar diversas comunicações seriais como UART, SPI e I2C (ARDUINO, 2023).

2.2.2 Protocolos de Comunicação Serial

O processo de troca de dados entre circuitos integrados, placas e periféricos pode ser realizado por camada física, ou seja, por um meio de transferência de dados. Uma alternativa para a comunicação é a implementação de barramentos paralelos a todas as interfaces, porém, essa solução nem sempre consegue equilibrar custo, conveniência e desempenho exigidos para a aplicação. Desse modo, dentre as estratégias de comunicação existentes para a transferência de dados entre circuitos integrados em uma mesma placa, destaca-se a serial, onde a camada física é capaz de transportar um bit de cada vez em sequência, utilizando um barramento ou um canal de comunicação (DAWOUD; DAWOUD, 2020).

Ainda, conforme Dawoud e Dawoud (2020), a comunicação serial tem como base o uso de linhas de dados simples, contando, geralmente, com uma linha de dados e com linhas de energia e de controle. Cada protocolo apresenta diferentes características e desempenhos, sendo projetados para atender requisitos específicos da aplicação, transmitindo grandes quantidades de dados entre os dispositivos conectados.

As principais características do protocolo serial são o método, a transmissão de dados e a taxa de comunicação. O método pode ser dividido em síncrono, onde o transmissor e o receptor utilizam a mesma fase, frequência e *clock* para comunicação; assíncrono, onde o *clock* entre transmissor e receptor pode variar; e isócrono, onde o *clock* é incluído ao dado. Elencando as vantagens da comunicação serial, tem-se o design simplificado, a diminuição dos gastos de funcionamento do sistema e a

ocupação de um volume menor em placas de circuito impresso. Em contrapartida, como desvantagem, as taxas de transferência de dados são inerentemente mais baixas do que um sistema de barramento paralelo (HANABUSA, 2007).

2.2.2.1 Protocolo I2C

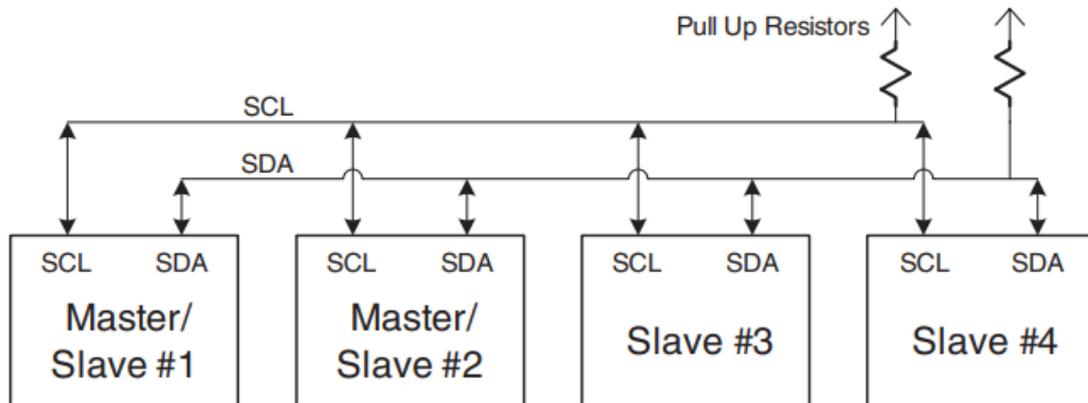
Segundo Myers (2003), o protocolo de comunicação I2C, abreviação de *Inter-Integrated Circuit*, foi inicialmente projetado pela Philips Semiconductor, na década de 1980, para interconectar circuitos integrados em placas de circuito. Originalmente projetado para aplicações em aparelhos de TV e componentes de vídeo, o barramento I2C evoluiu para se tornar um padrão amplamente adotado, com suporte da maioria dos principais fabricantes de semicondutores da atualidade.

O protocolo I2C é baseado em um sistema do tipo mestre-escravo (*master-slave*), onde os dispositivos denominados de mestre iniciam a comunicação solicitando dados aos escravos, que fornecem os dados solicitados. Para tal, emprega dois sinais: SCL, que gerencia dados de *clock* para entrada ou saída de dispositivos escravos; e SDA, que gerencia funções de endereço e dados. Pelo fato deste barramento conter apenas uma linha de dados, não é possível realizar a comunicação *full-duplex*, ao contrário do protocolo SPI, onde é possível realizar simultaneamente o envio e a recepção de dados (MENDONÇA. 2023).

Conforme Hanabusa (2007), o barramento I2C não possui sinais de seleção de dispositivo. Ao invés disso, cada componente I2C é identificado por meio da transmissão de um byte de seleção de dispositivo. Assim, todos os dispositivos I2C requerem pré programação com um endereço de barramento exclusivo. O protocolo pode acomodar até 127 dispositivos endereçáveis, com capacitância de barramento limitada a menos de 400 pF para evitar conflitos de endereço.

O sistema I2C, ilustrado na Figura 5, apresenta dois dispositivos mestre/escravo e dois dispositivos escravos.

Figura 5 - Sistema de barramento I2C típico



Fonte: Hanabusa (2007).

Myers (2003) descreve o barramento I2C como um protocolo simples, onde o mestre transmite o endereço do escravo e um bit de leitura ou escrita para indicar a direção da transferência. Desse modo, o mestre inicia a transferência de dados elevando a linha do *clock* SCL. Os dados são transferidos na borda ascendente do sinal de *clock*, com a linha de dados permanecendo inalterada enquanto o SCL estiver alto, exceto em casos específicos. O protocolo significa o "início" de uma transferência, direcionando a linha SDA para nível baixo quando o SCL estiver alto. Por outro lado, o mestre acionando o SDA alto, enquanto o SCL está alto, indica a "parada" ou o fim de uma transferência.

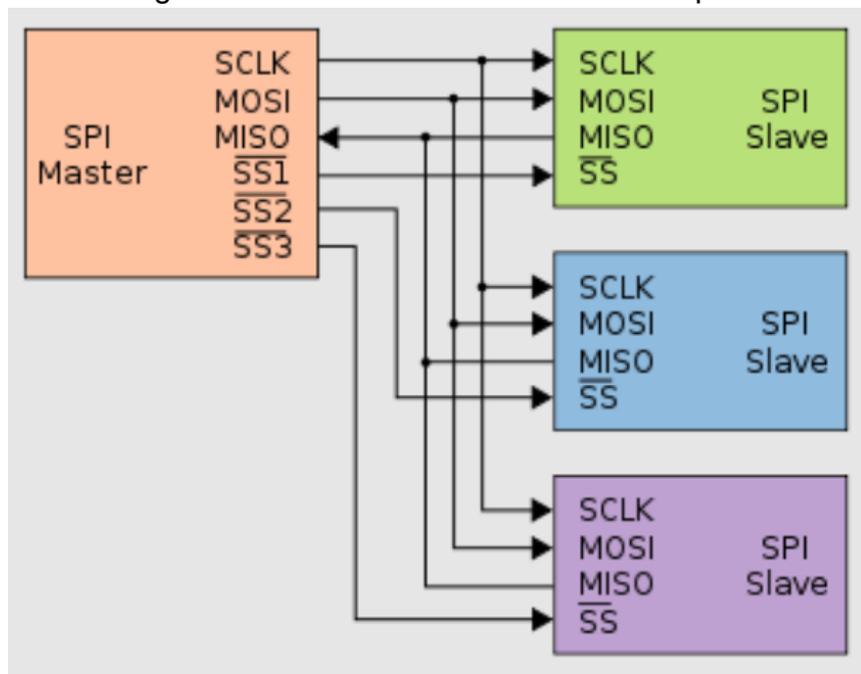
2.2.2.2 Protocolo SPI

Serial Peripheral Interface (SPI), ou Interface Periférica Serial, é um protocolo simples e de baixo custo desenvolvido pela Motorola, com o objetivo de facilitar a comunicação entre microcontroladores e *chips* periféricos. Devido a sua simples implementação e pelo fato de essencialmente funcionar como um registrador de deslocamento para entrada e saída de dados, esse tipo de protocolo é amplamente utilizado em vários segmentos da indústria, servindo como um protocolo de comunicação para muitos fabricantes de circuitos integrados. Alguns exemplos de aplicação em que seu uso é verificado, são em interfaces com memórias, conversores analógico-digital, relógios de tempo real, displays de LCD e mesmo com outros processadores (MYERS, 2003).

Conforme Hanabusa (2007), igualmente ao barramento I2C, o protocolo SPI também funciona a partir de uma estratégia mestre-escravo (*master-slave*), de forma que em um único barramento, um microcontrolador toma o papel de mestre, o qual supervisiona vários dispositivos escravos. Possui uma configuração de *hardware* simples, empregando registros de deslocamento para movimentação eficiente de dados.

A partir de uma conexão de 4 fios, esta interface serial utiliza dois sinais de dados principais: MOSI (*Master Data Output*), para transmitir a saída do escravo para o mestre, e MISO (*Master Data Input*), para transmitir dados da saída do mestre para a entrada do escravo. O processo ainda envolve um *clock* (SCLK) gerado pelo mestre, para deslocar os dados na mesma frequência entre os dispositivos, e um sinal *Slave Select* (SS), para designar o escravo específico sob o controle do mestre (MYERS, 2003). Esse barramento e suas conexões são exemplificados na Figura 6.

Figura 6 - Sistema de barramento SPI típico



Fonte: Mendonça (2023).

Mendonça (2023) destaca que o escravo que estiver ativo no barramento, recebendo sinal de seleção, reconhecerá que os dados recebidos no pino MOSI são destinados a si ou então que podem ser enviados dados pela linha MISO. Dessa forma, evita-se qualquer conflito ao nível das linhas MISO, visto que só uma se encontra ativa, enquanto as demais se encontram em “alta impedância”.

Para Myers (2003), a abordagem seletiva torna o SPI mais hábil no tratamento de fluxos de dados do que o I2C. Comparativamente, o SPI tende a superar o I2C em termos de velocidade. O barramento SPI suporta várias velocidades de transferência limitadas pelo *clock* do sistema. Alcançando normalmente vários megabits por segundo, a eficiência do SPI se destaca ainda mais pelo fato de não utilizar endereçamento de dispositivos. Em vez disso, esse protocolo depende de um sinal para seleção de escravo para permitir o acesso ao dispositivo.

2.2.3 Sensores

De acordo com Filho *apud* Coelho (2012), para que um robô obtenha informações sobre si mesmo e o ambiente em que se encontra, com a finalidade de realizar o que lhe foi destinado, faz-se necessário o uso de sensores. Estes sensores podem ser classificados de acordo com sua funcionalidade. Sensores internos ou proprioceptivos fornecem dados sobre as variáveis da própria planta. Sensores externos ou exteroceptivos, no que lhe concerne, coletam informações sobre o ambiente ao redor da planta.

Nesse sentido, sensores inerciais feitos de elementos microelétricos e micromecânicos, conhecidos pela sigla MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), tornam-se elementos chaves na constituição de produtos de consumo móveis, como brinquedos, consoles de jogos, smartphones e tablets, oferecendo uma nova maneira de interação entre usuários e seus dispositivos. Combinando pequenas estruturas na escala micrométrica, estes sensores utilizam de processamento de micromáquinas para incorporar componentes eletrônicos, sensores e elementos mecânicos em um substrato de silício comum (DADAFSHAR, 2014).

Segundo Muset e Emerich (2012), sensores MEMS são compostos por dois componentes, sendo o elemento sensível, que detecta a força aplicada sobre ele, e a aplicação específica para circuito integrado (ASIC), que amplifica e transforma o sinal mecânico do elemento sensível em sinal elétrico. Com isso, são capazes de medir aceleração, rotação, inclinação, vibração e velocidade angular.

As principais vantagens destes sensores, ainda de acordo com Muset e Emerich (2012), são as pequenas dimensões das cápsulas e seu peso reduzido, seu

baixo consumo de energia e pequeno tempo de partida, o baixo custo e alto desempenho, além de uma quantidade reduzida de componentes adicionais.

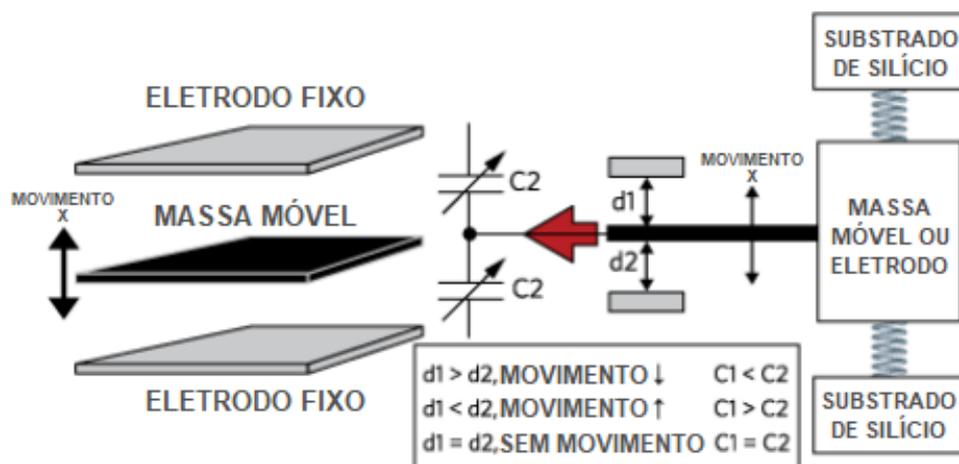
2.2.3.1 Acelerômetro

Sensores inerciais MEMS do tipo acelerômetro tem como finalidade medir a aceleração da planta, especificada em $mV/m/s^2$, além de detectar e medir vibrações. Uma vez que a medição da aceleração em todo o corpo do objeto é mais complexa, torna-se mais prática a medição da força que atua em uma pequena parcela do mesmo, chamada massa sísmica, que consiste no elemento primário do sensor (MUSET; EMERICH, 2012).

A aceleração translacional do corpo pode ser descrita pela segunda lei do movimento de Newton, onde uma força F (N), agindo sobre um corpo de massa m (g), faz com que o objeto acelere. Esta é diretamente proporcional à força e inversamente proporcional à massa. Com isso, o sensor mede a aceleração indiretamente através de uma força aplicada a um dos eixos do acelerômetro (DADAFSHAR, 2014).

A Figura 7 exemplifica os componentes internos de um sensor de aceleração associados com uma massa de teste em movimento.

Figura 7 - Componentes do acelerômetro



Fonte: Do autor, adaptado de Dadafshar (2014).

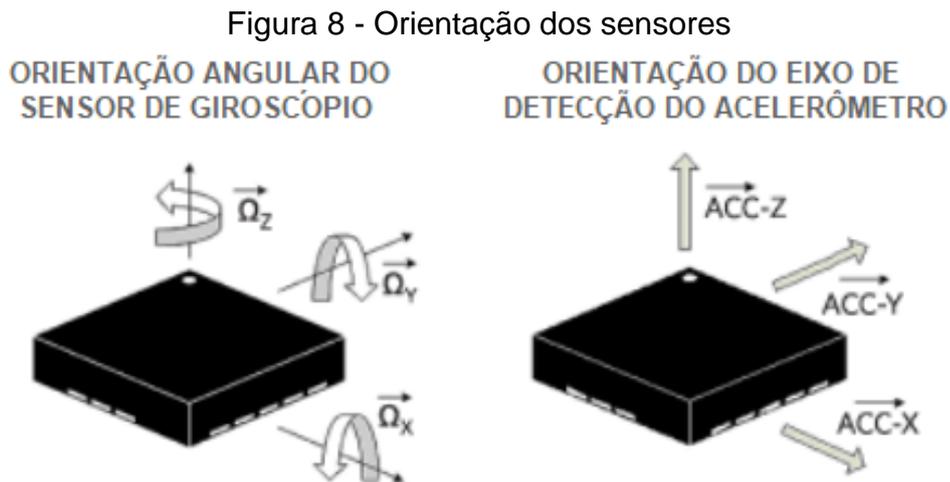
Dadafshar (2014) aborda que acelerômetros capacitivos são responsáveis por detectar mudanças na capacitância, resultantes do movimento das microestruturas,

em resposta da força de aceleração aplicada. Tem como particularidades a alta precisão, estabilidade, baixa dissipação de energia e simples construção da estrutura. No entanto, não é propenso à variação de temperatura.

Os acelerômetros piezoelétricos, por sua vez, dependem da geração de carga elétrica, ocasionada pelo estresse mecânico. Estes são utilizados em aplicações que requerem resistência a altas temperaturas e aplicações industriais, devido a sua robustez e alta sensibilidade (DADAFSHAR, 2014).

2.2.3.2 Giroscópio

De acordo com Muset e Emerich (2012), enquanto que sensores acelerômetros medem a aceleração linear, conforme descrito em 2.2.3.1, sensores do tipo giroscópio medem o sentido e a velocidade de rotação de um objeto, esta dada na forma de tensão por velocidade angular, especificada em mV/graus/s. A Figura 8 demonstra a orientação da resposta de cada sensor.

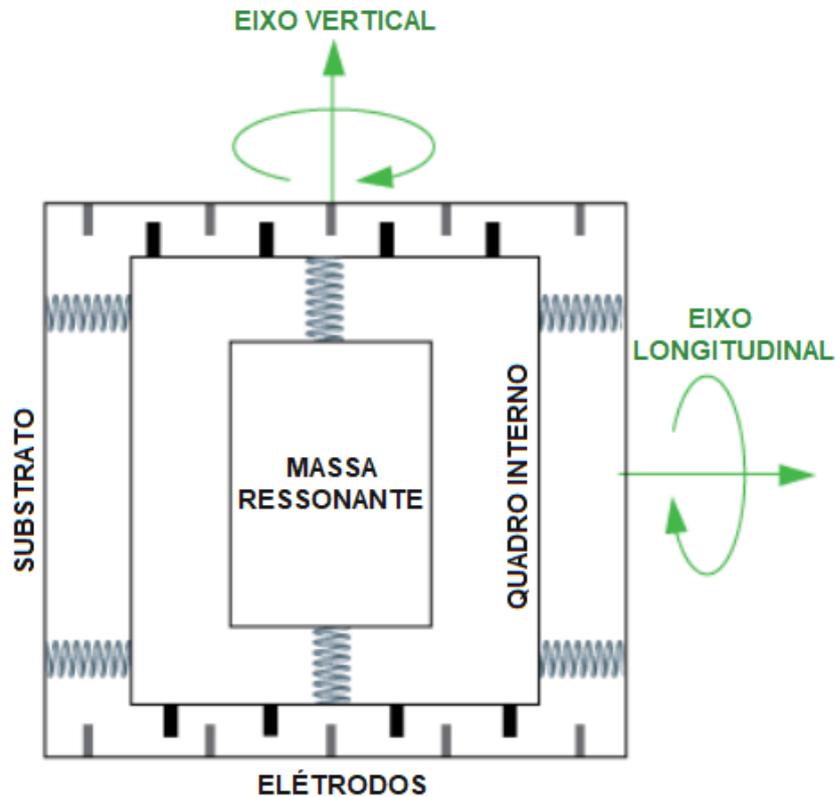


Fonte: Do autor, adaptado de Dadafshar (2014).

A estrutura interna desses sensores é composta por uma massa microusinada conectada a um invólucro externo, por meio de um conjunto de molas, conforme a Figura 9. Um segundo conjunto de molas ortogonais conecta o invólucro com a placa do circuito. Dessa forma, qualquer rotação induzirá à aceleração de Coriolis (força

centrífuga) na massa, forçando-a na direção do segundo conjunto de molas (MUSET; EMERICH, 2012).

Figura 9 - Representação interna do giroscópio



Fonte: Do autor, adaptado de Dadafshar (2014).

Ainda, consoante a Muset e Emerich (2012), ao passo que a massa é afastada do eixo de rotação, ela será empurrada perpendicularmente em uma direção. Da mesma forma, conforme a massa é empurrada de volta para o eixo de rotação, ela será forçada na direção oposta, devido à força centrífuga que atua sobre ela. As características dos giroscópios permitem que estes sejam aplicados na estabilização de imagem para câmeras, detecção de movimento em controles de jogos, sistemas de navegação, etc.

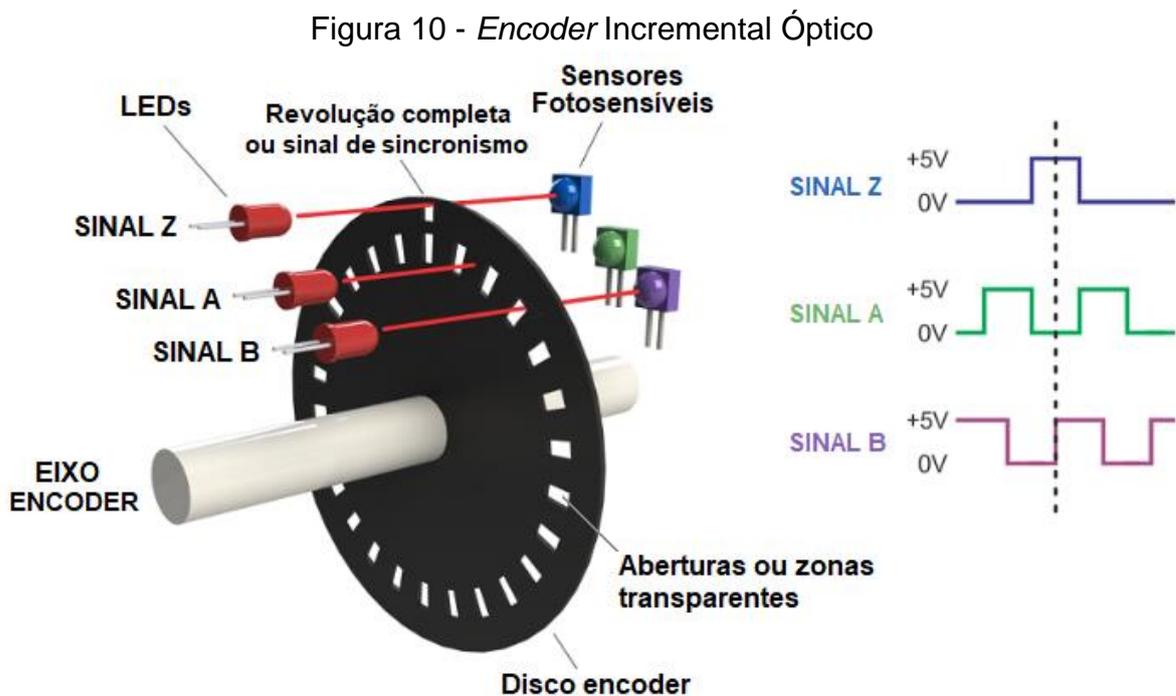
Dentre as vantagens da utilização conjunta de sensores do tipo acelerômetro e giroscópio, está a possibilidade da coleta de dados mais precisos do ângulo de inclinação de um objeto. Por outro lado, esse arranjo tem a desvantagem de ser vulnerável a vibrações ou ruídos. As aplicações desses sensores incluem detecção de movimento em modelos de veículos voadores, projeto e implementação do Real

Segway (skate monociclo), robô humanóide, quadricóptero e implementação no controle de equilíbrio (ALFIAN; MA'ARIF; SUNARDI, 2021).

2.2.3.3 Encoder

Motores elétricos, frequentemente, usam *encoders* incrementais (codificadores incrementais) como sensores de posição. Estes dispositivos fornecem pulsos elétricos, com frequências proporcionais à velocidade do eixo e resolução do próprio dispositivo, isto é, número de pulsos por revolução, enquanto o eixo do motor estiver girando (INCZE *et al.*, 2010).

Conforme Incze *et al.* (2010), diferentemente de um *encoder* absoluto, o *encoder* incremental não indica a posição absoluta, mas apenas mudanças de posição. A Figura 10 demonstra o princípio de funcionamento de um *encoder* incremental óptico, bem como um diagrama de seus sinais de saída.



Fonte: Do autor, adaptado de Almeida (2018).

Como exemplificado na Figura 10, um *encoder* é composto por um disco com zonas transparentes (aberturas) fixado no rotor do motor, fontes de luz (LEDs) e sensores fotossensíveis. A quantidade de aberturas no disco é determinada pela

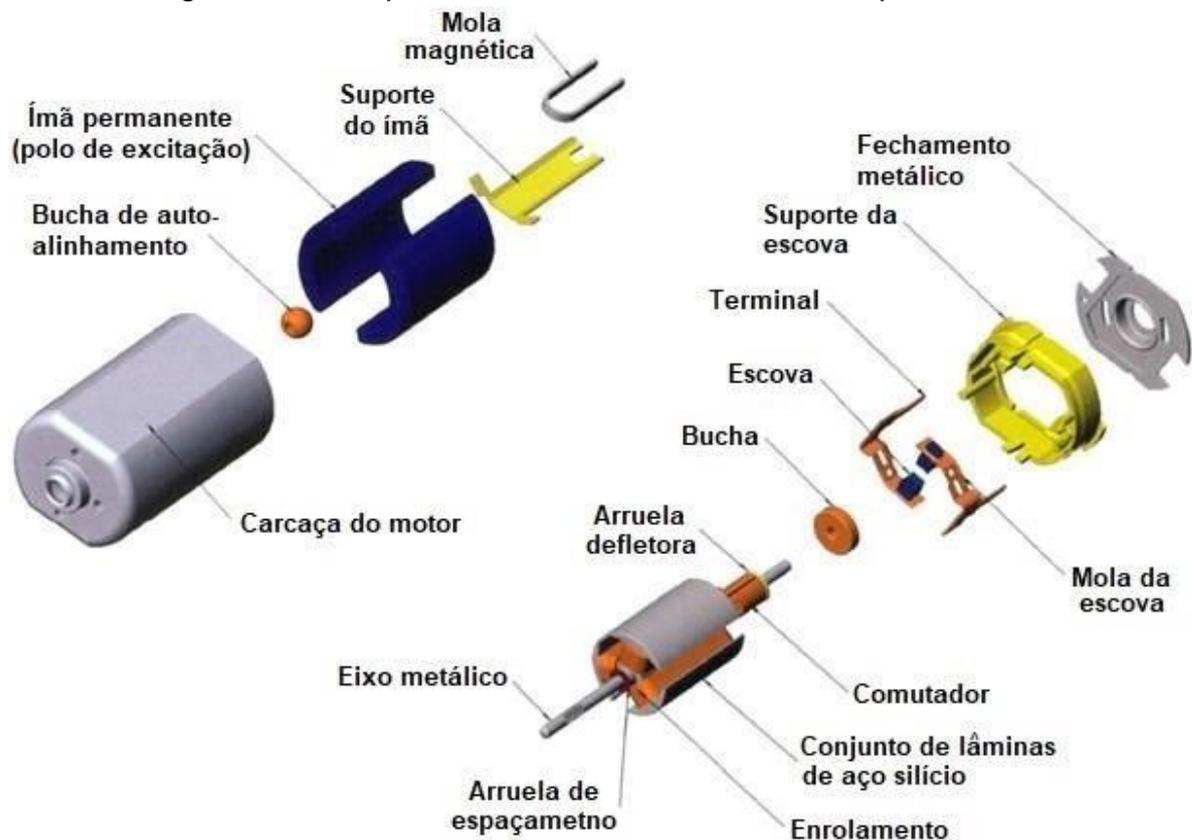
resolução do dispositivo. Os LEDs emitem feixes de luz através destas aberturas, que são detectados pelos sensores fotossensíveis e processados por circuitos eletrônicos, gerando um sinal de saída em forma de onda quadrada, de acordo com a resolução do *encoder* (INCZE *et al.*, 2010).

Incze *et al.* (2010) informa que cada saída do *encoder*, representadas por A e B na Figura 10, gera um pulso (sinal) quando seu respectivo feixe de luz atravessa uma abertura no disco. Devido ao fato de os feixes de luz serem deslocados entre si, os pulsos das saídas também serão deslocados, possibilitando a determinação do sentido de rotação do disco. Em alguns modelos de codificadores, existe uma terceira saída, usualmente denominada saída Z, a qual está associada a um terceiro feixe e fornece um pulso único no decorrer de uma rotação ou revolução completa, podendo esta ser considerada como posição de referência.

2.2.4 Motor CC

Diversos motores empregados em robôs pêndulo invertido são do tipo CC (corrente contínua), com um ímã permanente que forma o estator, enquanto o rotor é constituído de diversos enrolamentos de cobre, como modelado na seção 2.4.3. Maimon (2004) expõe que quando uma tensão é aplicada no enrolamento, um campo magnético é gerado e, em conjunto com o campo do próprio ímã, é formado um torque no rotor. A fim de se manter um torque constante, é necessário comutar continuamente os enrolamentos do motor. Isso é realizado através do comutador e de um conjunto de escovas presas na carcaça do motor. A Figura 11 ilustra os elementos que constituem este motor.

Figura 11 - Componentes de um motor CC de ímã permanente



Fonte: Do autor, adaptado de Johnson Electric (2023).

Ao variar a tensão nos terminais do motor, é possível variar sua velocidade. Um método poderoso para controlar circuitos analógicos, como o circuito em questão, é o PWM, do inglês *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso).

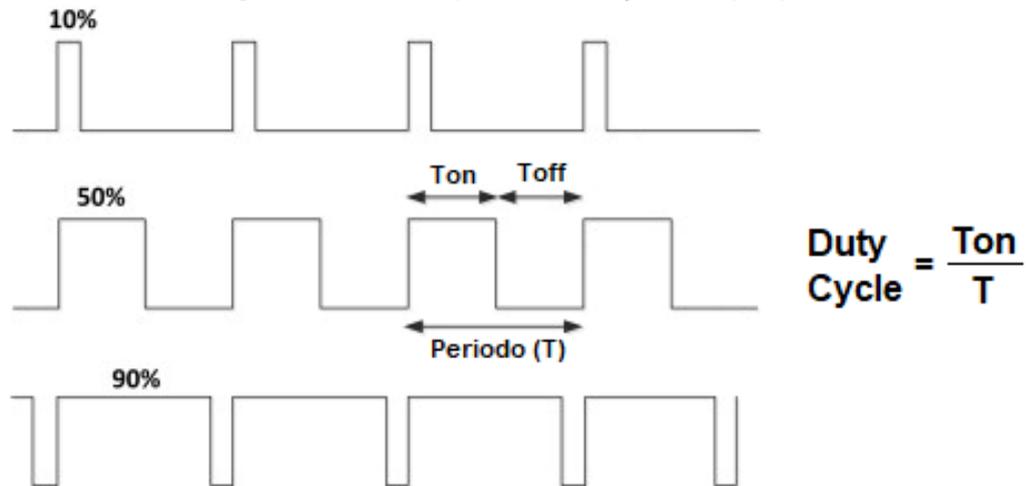
2.2.4.1 PWM

A técnica PWM é basicamente um sinal digital de onda quadrada, a qual pode ser modulada conforme desejado, possibilitando que um microcontrolador venha a ser responsável por coordenar a potência entregue a uma carga (IBRAHIM, 2014).

Sendo assim, ao ligar e desligar um motor diversas vezes em um curto intervalo de tempo com uma frequência fixa, através de chaves ou componentes como transistores, o motor gira em uma velocidade proporcional. Essa proporção, demonstrada na Figura 12, segue a relação chamada de *Duty Cycle* (D), razão entre

o tempo ligado (T_{on}) e o período (T) que, ao ser multiplicada pela tensão de entrada do sistema, resulta na tensão média aplicada ao motor (IBRAHIM, 2014).

Figura 12 - Exemplos da relação Duty Cycle



Fonte: Do autor, adaptado de Ibrahim (2014).

Dessa forma, ao utilizar o PWM, aplicando uma tensão proporcional no terminal de armadura (enrolamento do rotor) tira-se vantagem da baixa queda de tensão na resistência de armadura, de modo que, em regime permanente, qualquer alteração na tensão aplicada à armadura do motor será refletida por uma variação significativa em sua velocidade. Considerando constante a corrente de campo em derivação, uma mudança na tensão de velocidade resulta em uma alteração proporcional na velocidade do motor, permitindo assim o controle direto da velocidade por meio da tensão no terminal da armadura (UMANS, 2014).

Por outro lado, Bim (2018) salienta que, caso o período do sistema de chaveamento for muito menor do que a constante de tempo do circuito alimentado a onda da corrente resultante, apresentará elevadas oscilações, ou seja, um alto *ripple*. Essa oscilação na corrente do circuito acarretará em perdas por efeito Joule, uma vez que o valor elevado para o *ripple* resulta em um aumento da corrente RMS (*Root Mean Square* - Raiz Quadrada Média) e, conseqüentemente, causará o aquecimento do motor.

Consoante a isso, considerando a lei de indução eletromagnética de Faraday, quando materiais ferromagnéticos são expostos a um campo magnético alternante, são geradas correntes circulantes chamadas de correntes parasitas. Esse fenômeno, responsável por perdas proporcionalmente ao quadrado da velocidade e corrente do

motor, torna-se significativo, pois, além do aquecimento excessivo, os motores apresentam eficiência reduzida e, conseqüentemente, perda de potência. Nesse sentido, faz-se necessário observar atentamente o *ripple* da corrente do sistema controlado e mantê-lo o mais baixo possível (BOUAT, 2021).

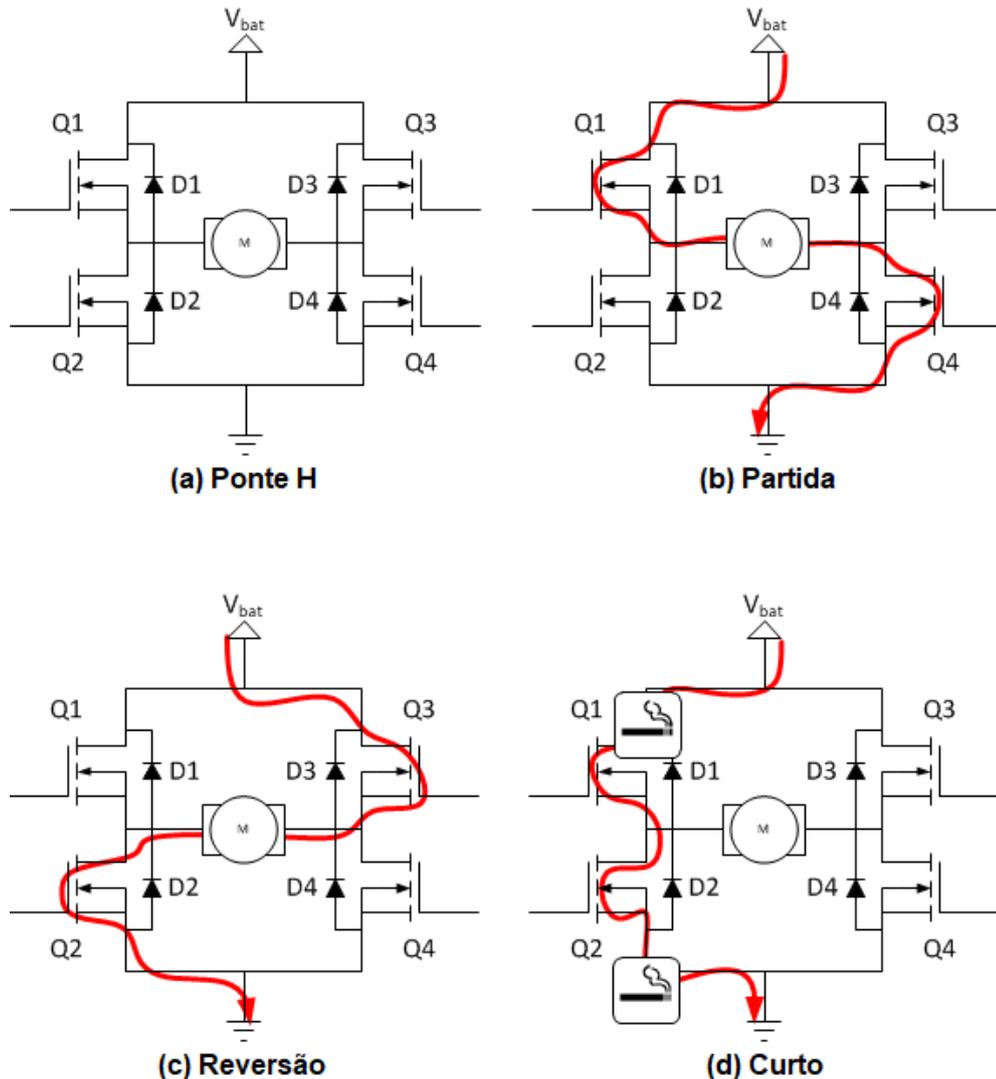
Maimon (2004) salienta a necessidade de inverter os terminais do motor ou então gerar uma tensão negativa entre estes, caso seja necessário alterar o sentido do motor. Para tal, pode-se facilmente implementar um sistema, onde um relé inverteria os terminais do motor, enquanto um regulador de tensão fornece a energia para o acionamento do mesmo. Porém, devido às perdas no circuito, essa abordagem apresenta uma baixa eficiência. Outra opção seria a utilização de uma ponte H que, por ser a escolhida para o presente trabalho, será tratada com maiores detalhes no subcapítulo a seguir.

2.2.5 Ponte H

Uma opção para inverter o sentido de rotação do motor CC se dá através da utilização de uma ponte H. A ponte H possui este nome pela forma que as quatro chaves e a carga estão ordenadas no circuito. O diferencial dessa solução é o fato de que não se faz necessário criar tensões negativas e nem desconectar os terminais para que eles sejam trocados (MODULARCIRCUITS, 2011).

A Figura 13 representa a ponte H e suas possíveis comutações, ou seja, as possíveis combinações de abertura e fechamento das chaves Q1 a Q4. Estes elementos de comutação são, geralmente, transistores bipolares ou FET, porém, em aplicações de alta tensão, podem ser utilizados IGBTs. Os diodos de captura D1 a D4, na sua maioria, são do tipo Schottky (MAIMON, 2004). Pode-se verificar na Figura 13, ainda, que a alimentação da ponte H acontece no terminal superior, enquanto seu terminal inferior é aterrado.

Figura 13 - Comutações ponte H



Fonte: Do autor, adaptado de Modularcircuits (2011).

Segundo Modularcircuits (2011), para o acionamento da carga, os elementos de comutação são ligados e desligados de forma independente, conforme o sentido de giro do motor, embora existam restrições.

Elucidando a Figura 13, pode-se chegar às seguintes conclusões: ao acionar as chaves Q1 e Q4, conforme 13 (b), o motor é ligado de forma direta. Acionando as chaves Q2 e Q3, como mostrado em 13 (c), o sentido de giro do motor é invertido. Por fim, há uma restrição quanto ao caso de as chaves serem comutadas em série, como exemplificado em 13 (d), onde Q1 e Q2 formam um curto e, conseqüentemente, ocasionam a queima do componente (MODULARCIRCUITS, 2011).

2.2.6 Baterias

Dentre as formas de energizar um equipamento eletrônico, destacam-se as baterias. Estas dividem-se em dois segmentos: baterias primárias e secundárias. Distintas das demais, as baterias primárias são essencialmente não recarregáveis, como listado por Bocchi (2020). São exemplos: pilhas/baterias Leclanché e alcalinas, compostas por zinco/dióxido de manganês, baterias de lítio/dióxido de manganês, etc.

As baterias recarregáveis, por sua vez, formam o conjunto de baterias secundárias, que podem ser reutilizadas centenas e até milhares de vezes, a depender de sua função (BOCCHI, 2020). Como exemplos, o autor lista as baterias cádmio/óxido de níquel, que compõem as pilhas recarregáveis, chumbo/óxido de chumbo, também chamadas de chumbo/ácido, que são as baterias de automóveis, baterias de íons lítio, que são as baterias de celulares, dentre outras.

As baterias comumente mais encontradas no mercado são as do tipo cádmio/óxido de níquel e as de íons lítio. Apesar de sua composição contar com metais pesados, materiais altamente tóxicos, estas são de grande utilidade no dia a dia, por permitirem o uso de infinitos aparelhos (BOCCHI, 2020).

2.2.7 Transmissão de sinais via rádio

O rádio é um recurso utilizado para a comunicação baseado na transmissão-recepção de informações, as quais são propagadas pelo meio. Para que a comunicação ocorra entre dois ou mais pontos, são imprescindíveis três elementos essenciais: o transmissor, que converte os sinais analógicos ou digitais em ondas eletromagnéticas, o meio de transmissão, representado pelos canais, e o receptor (MEDEIROS, 2018).

De acordo com Medeiros (2018), são três os tipos de modos de transmissão:

- a. *simplex*: modo onde a comunicação ocorre unidirecional;
- b. *semi-duplex*: este é caracterizado pela transmissão bidirecional, todavia executada de forma alternada, ou seja, cada sentido transmite somente enquanto o sentido oposto não está transmitindo;

- c. *duplex*: a comunicação se sucede bidirecional e simultaneamente no meio de transmissão;

Realizada a transmissão, as ondas eletromagnéticas chegam ao receptor, onde são decodificadas e transformadas em ondas sonoras, sinais digitais ou analógicos. Pelo fato de as ondas de rádio estarem sujeitas a atenuação no decorrer da transmissão, em algumas aplicações é necessária a implementação de estações de rádio repetidoras (MEDEIROS, 2018).

Segundo a Seal Technologies (2003), para a transmissão via rádio ser possível, se faz necessário modular, amplificar e, posteriormente, enviar o sinal por meio de uma antena. A modulação do sinal desempenha um papel importante ao possibilitar a eficiente propagação na frequência designada para o serviço.

A capacidade de transmissão entre os dispositivos de comunicação está diretamente relacionada à frequência de operação, que é organizada em faixas ou bandas de frequência, conforme salientado pela Seal Technologies (2003). A largura de banda alocada aumenta proporcionalmente ao volume de informações a ser transmitido. Da mesma forma, a cobertura necessária em uma determinada área influencia a escolha de diferentes sistemas, resultando em variações na largura de banda conforme as frequências de operação, sendo:

- Sistemas de baixa frequência: 30 a 500 KHz;
- Sistemas de média frequência: 850 a 950 MHz;
- Sistemas de alta frequência: 2,4 a 2,5 GHz.

Assim, sistemas de baixa frequência se aplicam para cobrir pequenas áreas de cobertura, ou seja, curtas distâncias de leitura, e envolvem um baixo custo. Ao passo que distâncias maiores são necessárias, aumenta-se também a frequência do sistema e, conseqüentemente, a velocidade de leitura e o custo (SEAL TECHNOLOGIES, 2003).

O ambiente também tem influência sobre a transmissão dos sinais via rádio. Obstáculos como edificações, perfil do terreno e vegetação no caminho da transmissão, dificultam a propagação das ondas e podem distorcer os resultados (MAGALHÃES, 2020).

Com o aumento da demanda por comunicação sem fio, tornou-se necessário estabelecer padrões para a alocação de frequências. Este processo é regulamentado

em âmbito global pelo ITU (*Internacional Telecommunication Union*) e, em âmbito nacional, definido e fiscalizado pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), como traz Seal Technologies (2003). Ainda, de acordo com o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Frequências no Brasil, publicado pela ANATEL (2020), para radioamadores e radiolocalização, móvel (exceto móvel aeronáutico) e fixo, a faixa de frequência é de 915 MHz.

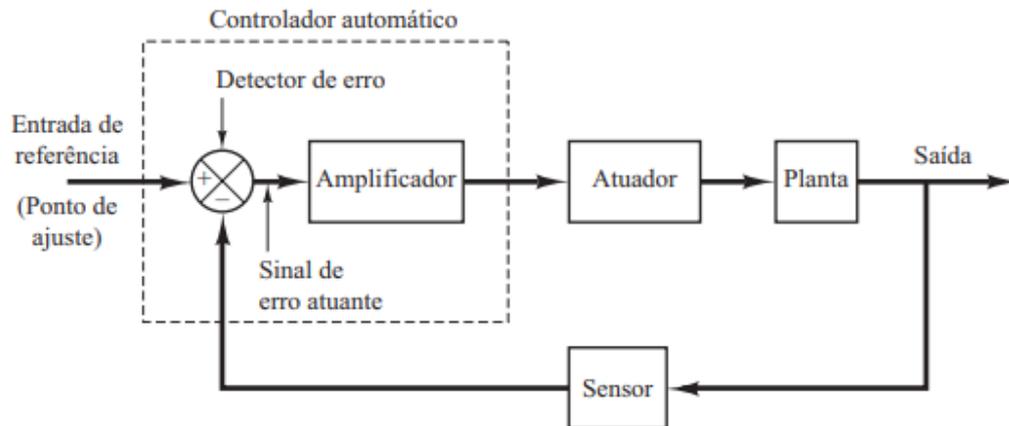
2.3 Teoria de Controle

Um sistema de controle é constituído por vários elementos. Dentre eles, pode-se citar como principais (VALENTI, 2004):

- planta, o dispositivo ou o processo que se deseja controlar;
- sensor, dispositivo que permite a leitura da variável que se deseja controlar, bem como a realimentação;
- *setpoint*, valor de referência, considerado o valor que se deseja que a planta assuma;
- sinal de erro, diferença entre o valor medido na planta e o *setpoint*;
- distúrbios, os quais são entradas indesejáveis para a planta;
- controlador, elemento mais significativo de um sistema de controle, cuja função é conectar os elementos físicos da planta com os valores de referência, ou seja, ele atua na planta a fim de que esta responda da maneira desejada.

Controladores automáticos comparam o valor resultante da planta com um valor desejado, denominado entrada de referência, determinando assim o desvio do resultado esperado e, a partir disso, produzem um sinal de controle, o qual irá corrigir a diferença existente a um valor mínimo aceitável. Esta operação de correção executada pelo controlador automático, produzindo o sinal de controle, é denominada de ação de controle. A ação que deverá ser tomada é dada por meio da a leitura do sensor (OGATA, 2010). A Figura 14 ilustra um sistema em malha fechada com sensor para realimentação.

Figura 14 - Exemplo de sistema de malha fechada com sensor para realimentação



Fonte: Ogata (2010).

2.4 Modelo do Pêndulo Invertido

Para a elaboração do controle do pêndulo invertido faz-se necessário desenvolver o modelo matemático do robô, descrevendo seu sistema dinâmico. Este modelo é de suma importância, conforme aponta Schiling (2017), pois considera que a partir dele são encontradas as funções de transferência de sistemas, possibilitando o projeto do controlador, a fim de adaptar o comportamento do sistema de acordo com suas necessidades.

Segundo Ogata (2010), um sistema complexo pode possuir muitas entradas e saídas, as quais podem ser inter-relacionadas de forma igualmente complexa. Deste modo, é de suma importância reduzir a complexidade das expressões matemáticas. Enquanto a teoria de controle convencional tem como base a função de transferência, ou seja, relação entrada-saída, a teoria de controle moderno visa simplificar as equações para o uso de notação vetorial-matricial. A abordagem com embasamento no espaço de estados favorece a análise do sistema, visto que o aumento do número de variáveis de estado, de entradas e de saídas, não aumenta a complexidade das equações (OGATA, 2010).

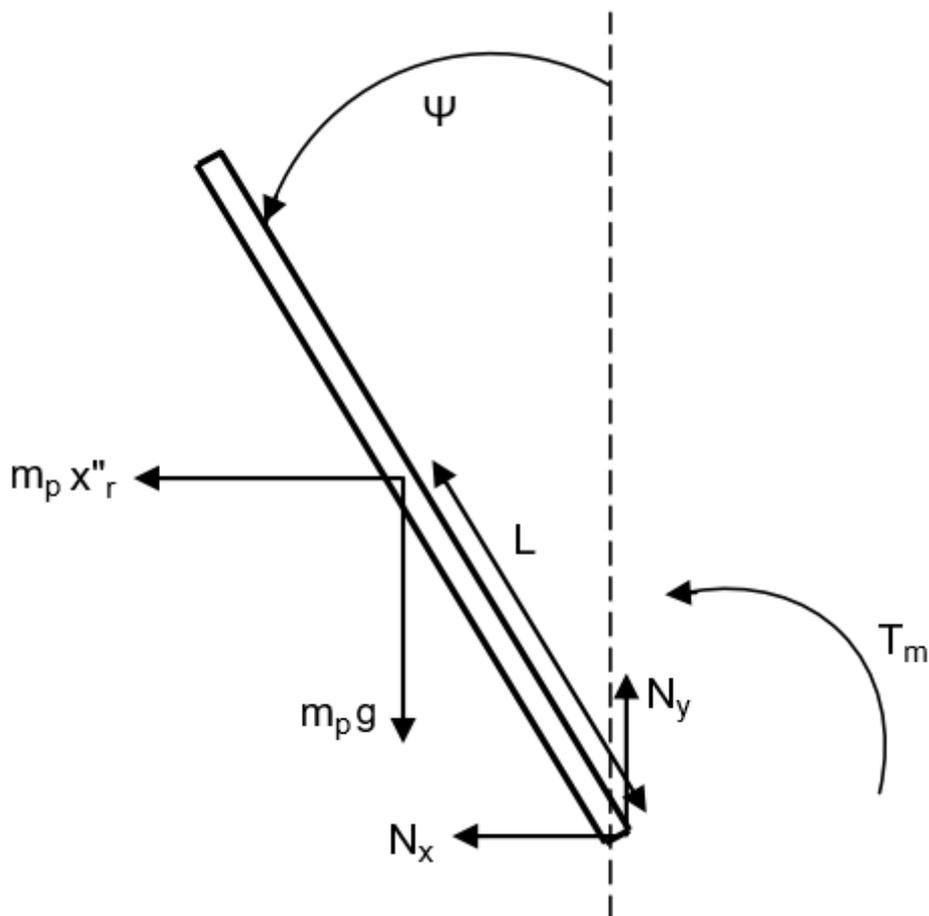
Portanto, o robô pêndulo invertido sobre duas rodas é calculado de modo a definir seu modelo em espaço de estados onde, posteriormente, é convertido em função de transferência, relacionando entrada e saída. Para simplificar o desenvolvimento da modelagem, serão apresentados, nos subcapítulos a seguir, o

modelo do corpo do pêndulo, da roda e do motor, baseados em Sundin e Thorstensson (2012).

2.4.1 Modelo da Estrutura do Pêndulo Invertido

Conforme comentado em 2.2, o corpo do robô é analisado como uma haste rígida presa a um carro móvel. Atuam sobre o pêndulo algumas forças, representadas na Figura 15.

Figura 15 - Forças atuantes sobre o pêndulo



Fonte: Do autor, adaptado de Sundin e Thorstensson (2012).

Onde:

m_p massa do pêndulo (kg);
 x''_r aceleração no eixo x (m/s^2);

T_m	torque dos motores (Nm);
N_x	força entre o pêndulo e a roda na direção x (N);
N_y	força entre o pêndulo e a roda na direção y (N);
Ψ	ângulo do pêndulo (rad);
g	aceleração da gravidade (m/s ²);
L	distância do centro da roda ao centro do pêndulo (m).

De acordo com Sundin e Thorstensson (2012), a fim de determinar as equações de estado, é aplicada a Equação 1, do momento anti-horário em torno do centro de gravidade do pêndulo. As Equações 2 e 3 determinam as forças atuando nos eixos x e y, respectivamente.

$$T_m + m_p g L \sin \psi + m_p x''_r L \cos \psi = J_p \psi'' \quad (1)$$

$$-N_x - m_p x''_r = m_p x''_p \quad (2)$$

$$N_y - m_p g = m_p y''_p \quad (3)$$

Para determinar a aceleração x''_p e y''_p , é necessário, primeiramente, definir as distâncias x_p e y_p para o pêndulo, conforme Equações 4 e 5.

$$x_p = -L \sin \psi \quad (4)$$

$$y_p = L \cos \psi \quad (5)$$

A partir de suas derivadas, é possível obter as velocidades x'_p e y'_p , nas Equações 6 e 7.

$$x'_p = -L \psi' \cos \psi \quad (6)$$

$$y'_p = -L \psi' \sin \psi \quad (7)$$

Por fim, através da segunda derivada, Equações 8 e 9, encontram-se as acelerações x''_p e y''_p , as quais serão utilizadas na modelagem do sistema.

$$x''_p = -L \psi'' \cos \psi + L \psi'^2 \sin \psi \quad (8)$$

$$y''_p = -L \psi'' \sin \psi - L \psi'^2 \cos \psi \quad (9)$$

De modo a estabelecer a inércia do pêndulo, o corpo do robô é visto como uma haste de massa uniforme, podendo ser calculada através da mecânica clássica, conforme Equação 10. Assim:

$$J_p = \frac{1}{12} m_p l^2 + \frac{1}{3} m_p h^2 \quad (10)$$

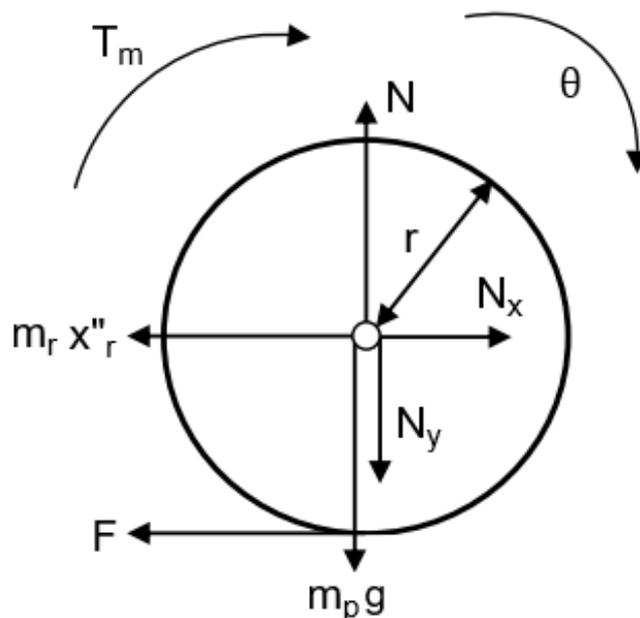
Em que:

J_p	inércia do pêndulo (kgm^2);
l	largura do pêndulo (m);
h	altura do pêndulo (m).

2.4.2 Modelo da Roda

Ainda consoante a Sundin e Thorstensson (2012), as forças atuantes sobre a roda do carro são representadas na Figura 16.

Figura 16 - Forças atuantes sobre a roda



Fonte: Do autor, adaptado de Sundin e Thorstensson (2012).

Sendo:

m_r	massa da roda (kg);
-------	---------------------

θ	ângulo da roda (rad);
r	raio da roda (m);
N	força normal da superfície para com as rodas (N);
F	fricção entre a superfície e as rodas (N).

O momento horário em torno do centro de massa da roda é obtido através da Equação 11. As forças que atuam nos eixos x e y, por sua vez, estão modeladas nas Equações 12 e 13, respectivamente.

$$T_m + F_r = J_r \theta'' \quad (11)$$

$$N_x - m_r x''_r - F = 0 \quad (12)$$

$$N - N_y - m_r g = m_r y''_r \quad (13)$$

A aceleração x''_r é substituída do sistema de coordenadas cartesianas pelo sistema de coordenadas cilíndricas (Equação 14) e a aceleração y''_r é igual a zero (Equação 15).

$$x''_r = \theta'' r \quad (14)$$

$$y''_r = 0 \quad (15)$$

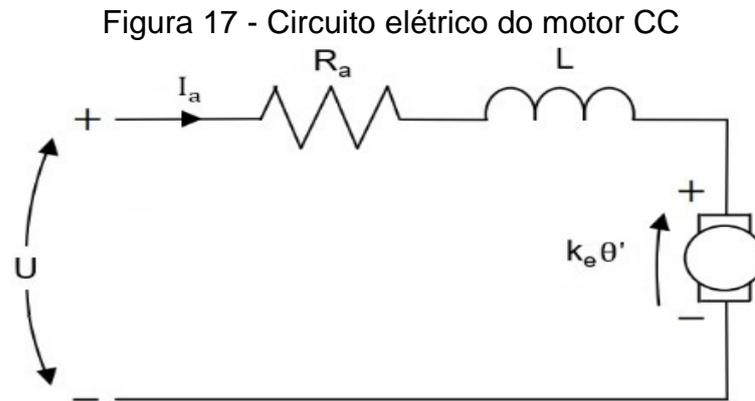
A inércia da roda também pode ser calculada a partir dos conceitos de mecânica clássica, porém utilizando a fórmula do círculo, tal como a Equação 16.

$$J_r = \frac{m_r r^2}{2} \quad (16)$$

2.4.3 Modelo do Motor CC

Para manter o pêndulo em equilíbrio é necessária a aplicação de uma força na base do carro. Motores de corrente contínua são os responsáveis por desempenhar esta função. Para tal, é fundamental desenvolver um modelo matemático capaz de correlacionar a tensão aplicada sobre o motor, o sinal de controle e o torque entregue ao eixo. Aplicando as leis de Kirchoff para o circuito elétrico, conforme especificado

por Sundin e Thorstensson (2012), na Figura 17, obtém-se a Equação do motor (Equação 17).



Fonte: Do autor, adaptado de Sundin e Thorstensson (2012).

$$U = R_a I_a + k_e \theta' + L \frac{di}{dt} \quad (17)$$

Onde:

- U tensão nominal do motor CC (V);
- R_a resistência terminal nominal (Ω);
- I_a corrente de armadura (A);
- k_e constante da força contra eletromotriz do motor (Vs/rad);
- θ' velocidade angular da roda (rad/s);
- L indutância do motor (H).

Considerando que a constante de tempo elétrica é desprezível, por ser muito menor do que a mecânica, pode-se assim negligenciar a indutância do motor, conforme Equação 18.

$$U = R_a I_a + k_e \theta' \quad (18)$$

Segundo Sundin e Thorstensson (2012), o torque do eixo precisa superar a inércia do motor, bem como o amortecimento viscoso e o atrito. No entanto, estes são difíceis de estimar e, por serem muito pequenos, são considerados irrelevantes. Assim, o torque do eixo pode ser descrito pela Equação 19.

$$T_m = n k_t I_a \quad (19)$$

Os valores das constantes de torque do motor k_t e de força contra eletromotriz k_e , podem ser obtidos a partir do *datasheet* do fabricante, para o caso de motores maiores. Quando estes dados não estão disponíveis, os valores de k_t podem ser estimados a partir dos valores nominais de motor e simplificações, através da Equação 20, e os valores de k_e através da Equação 21.

$$k_t = \frac{T_m}{I_a} \quad (20)$$

$$V_e = \omega k_e \quad (21)$$

Em que:

T_m	torque nominal (Nm);
I_a	corrente de armadura nominal (A);
V_e	tensão da força contra eletromotriz (V);
ω	velocidade angular (rad/s).

No entanto, a velocidade do motor é fornecida pelo *datasheet* em rpm, fazendo com que a Equação 21 seja reescrita e substituída pela Equação 22.

$$V_e = \frac{2\pi N}{60} k_e \quad (22)$$

Aplicando novamente a lei de Kirchoff no circuito, pode-se encontrar a tensão de armadura, de acordo com a Equação 23, sendo V_n a tensão nominal.

$$V_e = V_n - I_a R_a \quad (23)$$

Com isso, é possível finalmente determinar a constante k_e , a partir da Equação 24, utilizando os parâmetros do *datasheet*.

$$k_e = \frac{(V_n - I_{an} R_a) 60}{2\pi N} \quad (24)$$

Como os motores serão controlados por PWM, ou seja, serão controlados por tensão, a corrente deve ser retirada da equação do torque, resultando na Equação 25.

$$I_a = \frac{U - k_e \theta'}{R_a} \quad (25)$$

Por fim, a equação do torque para cada um dos motores é expressa pela Equação 26.

$$T_m = \frac{nk_t U}{R_a} - \frac{nk_t k_e \theta'}{R_a} \quad (26)$$

2.5 Modelo em espaço de estados

Como abordado anteriormente, Ogata (2010) menciona que o modelo em espaço de estados visa simplificar o equacionamento através do uso de notação vetorial-matricial, favorecendo a análise do sistema como um todo. O equacionamento a seguir, tem como embasamento o projeto de Sundin e Thorstensson (2012).

A partir do rearranjo das equações apresentadas anteriormente, é possível obter as equações não lineares das acelerações angulares do pêndulo ψ'' (Equação 27) e da roda θ'' (Equação 28).

$$\begin{aligned} \psi'' = & (J_r(gLR_a m_p \sin\psi + 2nk_t(U - k_e \theta')) + r(LrR_a m_p \sin\psi(m_p(g-L\psi'^2 \cos\psi) \\ & + gm_r) + 2nk_t(U - k_e \theta')(m_p(L\cos\psi + r) + rm_r)))/(R_a(J_p(J_r \\ & + r^2(m_p + m_r)) - L^2 r^2 m_p^2 \cos^2\psi)) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\theta'' = \frac{Lr m_p \cos\psi(gLR_a m_p \sin\psi + 2nk_t(U - k_e \theta')) + J_p 2nk_t(U - k_e \theta') - J_p Lr R_a m_p \psi'^2 \sin\psi}{(R_a(J_p(J_r + r^2(m_p + m_r)) - L^2 r^2 m_p^2 \cos^2\psi))} \quad (28)$$

Com isso, pode-se definir as variáveis de estado conforme a matriz presente na Equação 29. Esta fornece o modelo de espaço de estado linearizado, conforme Equações 30 e 31.

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \psi \\ \theta' \\ \psi' \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$x' = Ax + Bu \quad (30)$$

$$y = Cx + Du \quad (31)$$

Onde:

- x' derivada das variáveis de estado (definidas na matriz);
- A matriz de estado;
- B matriz de entrada;
- C matriz de saída;
- D matriz de transição;
- u entrada do sistema;
- y saída do sistema.

A linearização, segundo Ding (2012), é de suma importância para resolver as equações de movimento de um pêndulo invertido, pois permite equilibrar o corpo do robô na vertical, considerando uma breve variação de movimento em relação ao eixo vertical, admitindo-se que o ângulo e velocidade angular do pêndulo, assim como a velocidade angular da roda, sejam iguais a zero. A partir disso, Sundin e Thorstensson (2012) apresentam as matrizes de estados, em formato padronizado, pela Equação 32.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{gL^2m_p^2}{-L^2r^2m_p^2+J_p(J_r+r^2(m_p+m_r))} & \frac{-2nJ_p k_e k_t - 2Lnrk_e k_t m_p}{(-L^2r^2m_p^2+J_p(J_r+r^2(m_p+m_r)))R_a} & 0 \\ 0 & \frac{gLJ_r m_p R_a + Lr^2 m_p (gm_p + gm_r) R_a}{(-L^2r^2m_p^2+J_p(J_r+r^2(m_p+m_r)))R_a} & \frac{-2nJ_r k_e k_t - 2nrk_e k_t ((L+r)m_p + rm_r)}{(-L^2r^2m_p^2+J_p(J_r+r^2(m_p+m_r)))R_a} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2nJ_p k_t + 2Lnrk_t m_p}{(-L^2r^2m_p^2+J_p(J_r+r^2(m_p+m_r)))R_a} \\ \frac{2nJ_r k_t + 2nrk_t ((L+r)m_p + rm_r)}{(-L^2r^2m_p^2+J_p(J_r+r^2(m_p+m_r)))R_a} \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2.6 Filtros

Conforme destacado por Franklin, Powell e Naeini (2014), sistemas de controle digital com variáveis de entrada provenientes de sensores, principalmente os analógicos, normalmente necessitam de um filtro para reduzir o ruído e aumentar a qualidade do sinal gerado. Sendo assim, para obter-se uma estimativa adequada do ângulo do robô, os sensores giroscópio e acelerômetro, abordados em 2.2.2, que convertem uma variável física em um sinal elétrico, demandam de um filtro de entrada adequado para posterior manipulação pelo controlador.

2.6.1 Filtro de Kalman

Segundo Ogata (2010), os conceitos de controlabilidade e observabilidade, os quais são muito importantes no projeto de sistemas de controle no espaço de estados, foram introduzidos por Kalman. No ano de 1960, Kalman (1960) publicou um artigo descrevendo uma solução para o problema de filtragem ótima aplicada a sistemas lineares no espaço de estados. O denominado filtro de Kalman, criado originalmente para a navegação espacial, mostrou-se útil em diversas aplicações, principalmente no que diz respeito à estimativa dos estados de um sistema, que podem ser somente observados indiretamente (WELCH; BISHOP, 2001).

O filtro de Kalman é um método de estimativa estocástica, ou seja, que não apresenta uma solução única, mas sim uma distribuição de soluções associadas a uma probabilidade. Este combina modelos determinísticos e estocásticos com o intuito de obter ótimas estimativas das variáveis de estado de sistemas lineares (CORREIA, 1995). Em outras palavras, conforme Welch e Bishop (2001), é um conjunto de equações matemáticas capazes de fornecer uma solução computacional eficiente do método dos mínimos quadrados. Este conjunto é de grande valia na prática, pois de todos os possíveis filtros, é o que minimiza a variância do erro de estimativa, sendo considerado um método de estimativa precisa.

2.6.1.1 Estimação do processo

Para resolver a estimação de um conjunto de parâmetros que variam no tempo, o filtro de Kalman estima o estado de $x[n]$ a partir das medidas $y[n]$ de um sistema de tempo, por meio de um sistema linear de equações estocásticas, denominadas equações de transição de estado. As Equações 33 e 34 expressam, respectivamente, a equação de estado e a equação de saída (CHEEVER, 2023).

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (33)$$

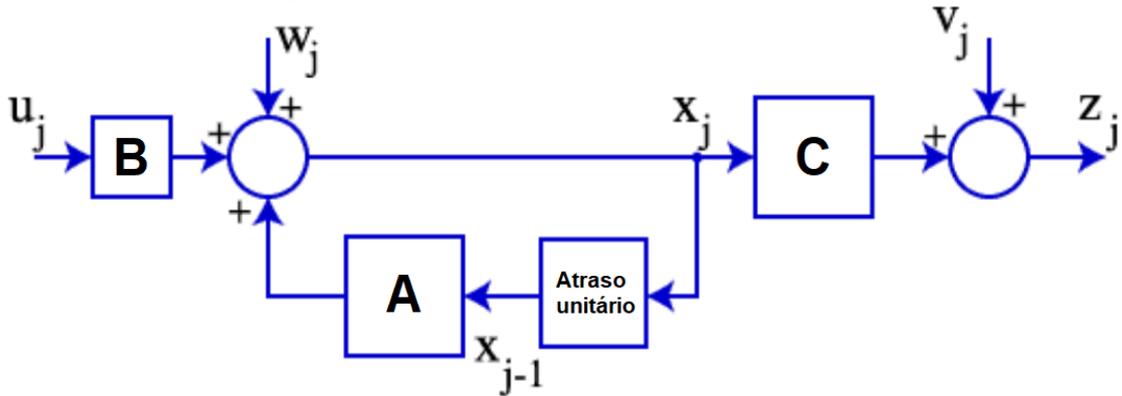
$$y_k = Cx_k + z_k \quad (34)$$

Em que:

- A matriz de transição de estado (relaciona um estado com o próximo);
- B matriz de transição das entradas de controle;
- C matriz de transição de saída;
- x_k vetor de estados do sistema;
- u_k vetor de entradas determinísticas;
- w_k vetor de variáveis aleatórias (ruído do processo), como os ruídos branco gaussiano considerados nesse modelo;
- y_k vetor de variáveis que perturbam a saída do sistema, também conhecido como ruído de saída, ou ruído de medição;
- z_k vetor de saída ou vetor de medida;
- k índice do tempo.

O modelo descrito é representado pelo diagrama de blocos exibido na figura 18.

Figura 18 - Sistema do espaço de estados

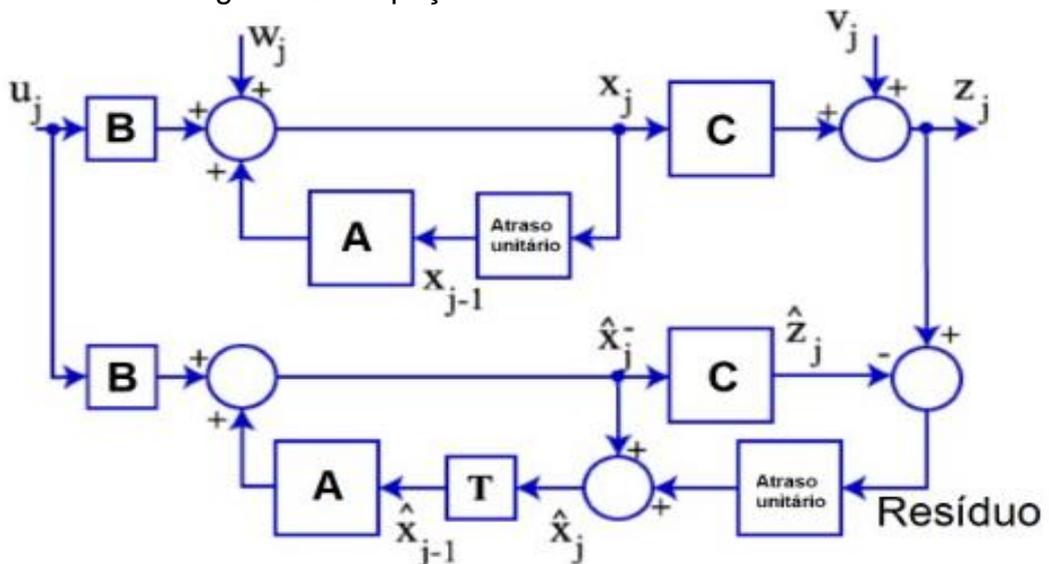


Fonte: Fagundes (2015).

2.6.1.2 Interpretação do processo

As etapas do filtro de Kalman são exibidas na Figura 19, na forma de diagrama de blocos.

Figura 19 - Espaço de estados do filtro Kalman



Fonte: Do autor, baseado em Cheever (2023).

Ainda segundo Cheever (2023), a diferença entre a saída estimada do sistema, $C\hat{x}_k^-$, e a real medida, z_k , é denominada de resíduo (Equação 35). Este valor é importante na determinação de confiabilidade da estimativa realizada.

$$\text{Resíduo} = y_k - C\hat{x}_k^- \tag{35}$$

A Equação 36 representa o ganho Kalman, ou ganho K, onde é possível verificar que quanto menor for a covariância do ruído de saída R_k , o ganho K aproxima-se ao valor de C_k^- . Analisando a equação, percebe-se que, enquanto R é proporcional ao ruído de saída Z_k , também é inversamente proporcional ao ganho K.

$$K_k = C_k^{-1} \quad (36)$$

2.6.2 Filtro Complementar

Outra forma de se obter informações confiáveis sobre o ângulo de inclinação do pêndulo é por meio do filtro complementar. Embora não tenha referência ao filtro de Kalman, ambos os métodos apresentam resultados semelhantes. O projeto do filtro complementar não considera as estatísticas de ruído que corrompem os sinais. O seu filtro é dado somente por uma simples análise do domínio de frequência (SUNDIN; THORSTENSSON, 2012).

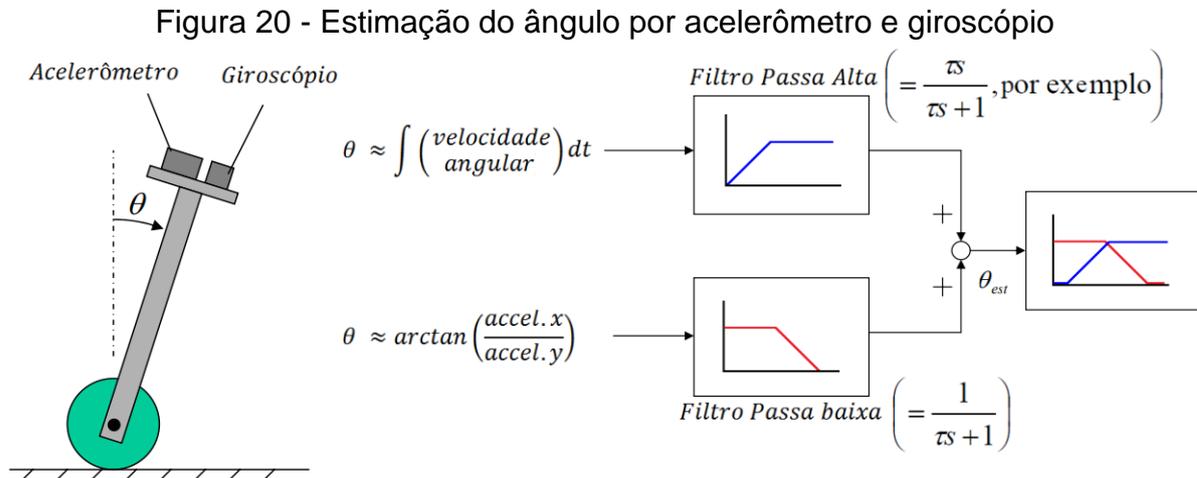
Conforme Park e How (2014), este método considera as características do acelerômetro e giroscópio, sensores envolvidos no processo e que, por serem sensores inerciais, medem taxas, ou seja, variações de velocidade e aceleração. Estas informações são válidas sobre um longo período de tempo e devem ser integradas para se obter o deslocamento. No entanto, pequenos erros estáticos ocasionam problemas de crescimento ilimitado na grandeza integrada.

Fagundes (2015) destaca que o problema dos acelerômetros é o ângulo calculado pela função arco tangente do valor da razão de seus sinais. Como estes sensores medem todas as acelerações agindo no pêndulo, não somente a aceleração pela gravidade é mensurada, mas também todas as pequenas forças agindo sobre ele, como a própria oscilação em torno da posição de equilíbrio, comprometendo a medida do ângulo. Com isso, o sinal do ângulo apresenta um ruído aditivo de alta frequência.

O giroscópio, no que lhe concerne, mede a velocidade angular, sendo o valor do ângulo calculado pela integração dos valores ao longo do tempo. O problema relacionado a isto está na medição desta técnica, que tende a flutuar e não retornar a zero quando retomar sua posição original. Isso se deve às imperfeições do sensor,

que ocasionam um erro de medida e, por ter suas amostras somadas, o erro é acumulativo e a medida do ângulo diverge com o tempo. Porém, como a medida no instante inicial é confiável, o ruído é considerado de baixa frequência (CHEEVER, 2023).

A estimação do ângulo de inclinação utilizando estes sensores é apresentada na Figura 20.



Fonte: Do autor, adaptado de Park e How (2014).

2.7 Controlador PID

Controladores do tipo Proporcional, Integral e Derivativo (PID), são amplamente utilizados na indústria pela sua fácil implementação, baixo custo e versatilidade, além de seu formato de atuação. Para reduzir erros e fornecer precisão e estabilidade no processo, os três termos PID devem ser ajustados adequadamente, de modo que a ação proporcional minimize o sinal de erro e este seja zerado pela ação integral, com velocidade antecipativa da ação derivativa (FRANKLIN; POWELL; NAEINI, 2014). A Equação 37 demonstra o controle PID.

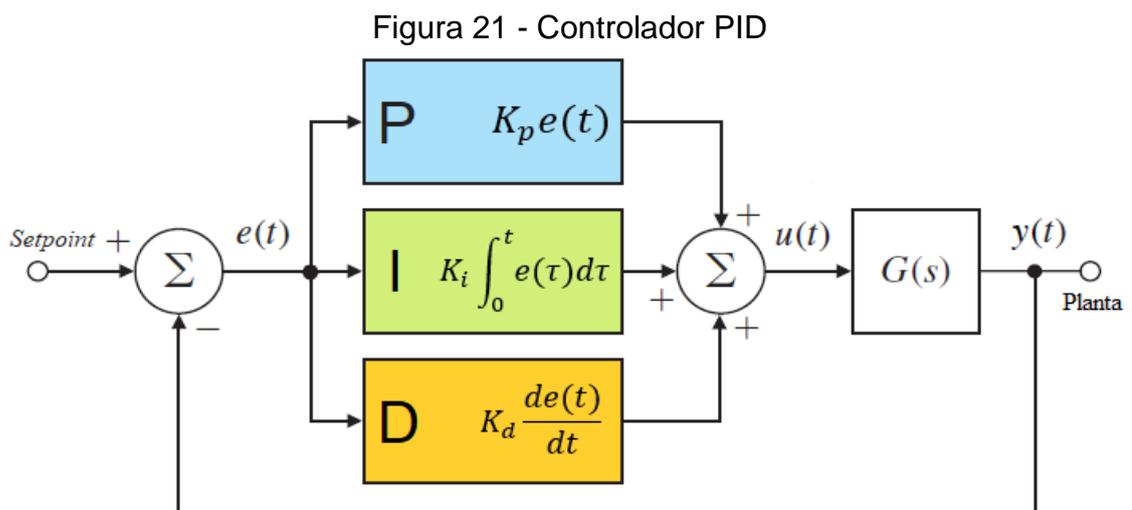
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (37)$$

Sendo:

$u(t)$ saída em relação ao tempo;

- $e(t)$ entrada menos o erro em relação ao tempo;
- K_p constante proporcional;
- K_i constante integral;
- K_d constante derivativa.

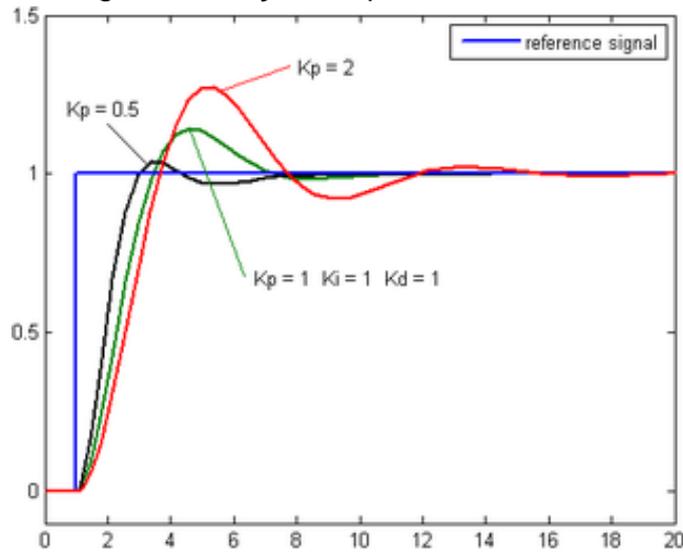
A Figura 21 exibe o sinal de controle do controlador PID, formado pela soma da saída dos três termos em paralelo, os quais podem ainda ser equacionados separadamente. Ambos os termos têm como entrada o sinal de erro, ou seja, o valor de referência menos o valor da realimentação dado pelo sensor (FAGUNDES, 2015).



Fonte: Do autor, adaptado de Franklin, Powell e Naeini (2014).

A função P resulta em um valor proporcional do erro obtido na realimentação e sua resposta deve ser ajustada por meio da constante de ganho K_p . Quanto mais elevado for o valor de K_p , maior será o ganho de erro e, conseqüentemente, mais instável o sistema. Em contrapartida, quanto menor K_p , menor o tempo de resposta. A Figura 22 exemplifica esta relação.

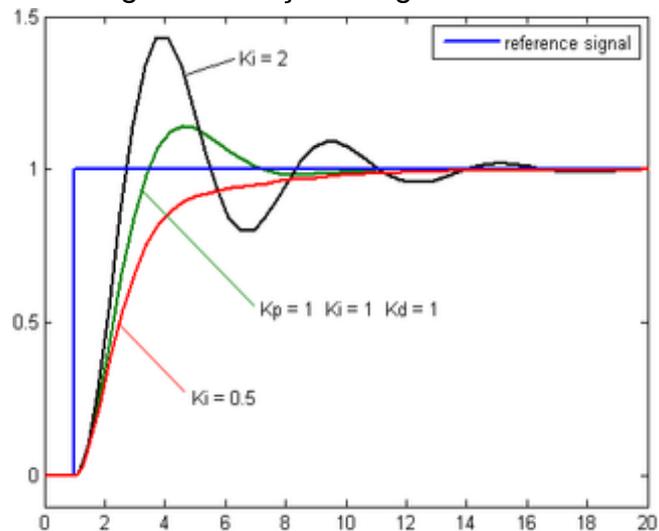
Figura 22 - Ação Proporcional na saída



Fonte: Laboratório de Garagem (2012).

A função I é dada pelo produto da soma de erros instantâneos e da constante K_i , acelerando o movimento do processo até o ponto esperado e eliminando o erro acometido na função P. Devido ao fato de esta função realizar o somatório de dados instantâneos, o resultado da correção pode ultrapassar o valor de referência, ocasionando um sobrepasso. A Figura 23 demonstra a atuação da função integral sobre o processo de controle.

Figura 23 - Ação Integral na saída

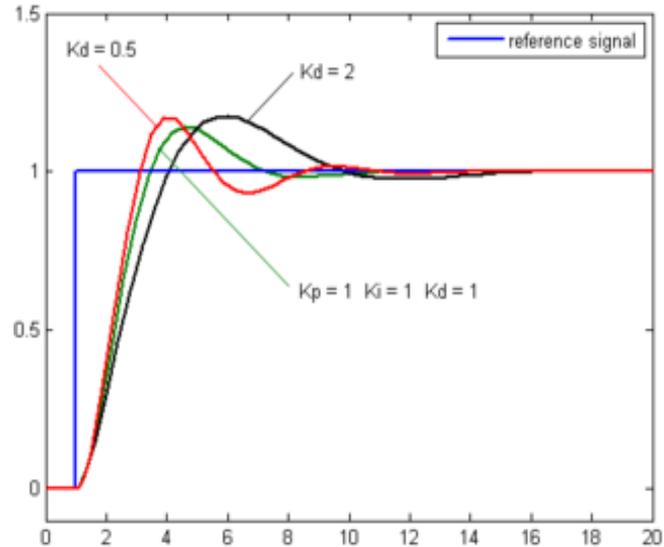


Fonte: Laboratório de Garagem (2012).

Por fim, a função D é responsável por retardar a taxa de variação de saída do controlador, diminuindo o sobrepasso da função I e melhorando a estabilidade do controlador. No entanto, caso o ruído e o ganho K_d possuam valores muito elevados,

o controlador irá apresentar instabilidades e um retardo na resposta. A Figura 24 apresenta o comportamento da função D.

Figura 24 - Ação Derivativa na saída

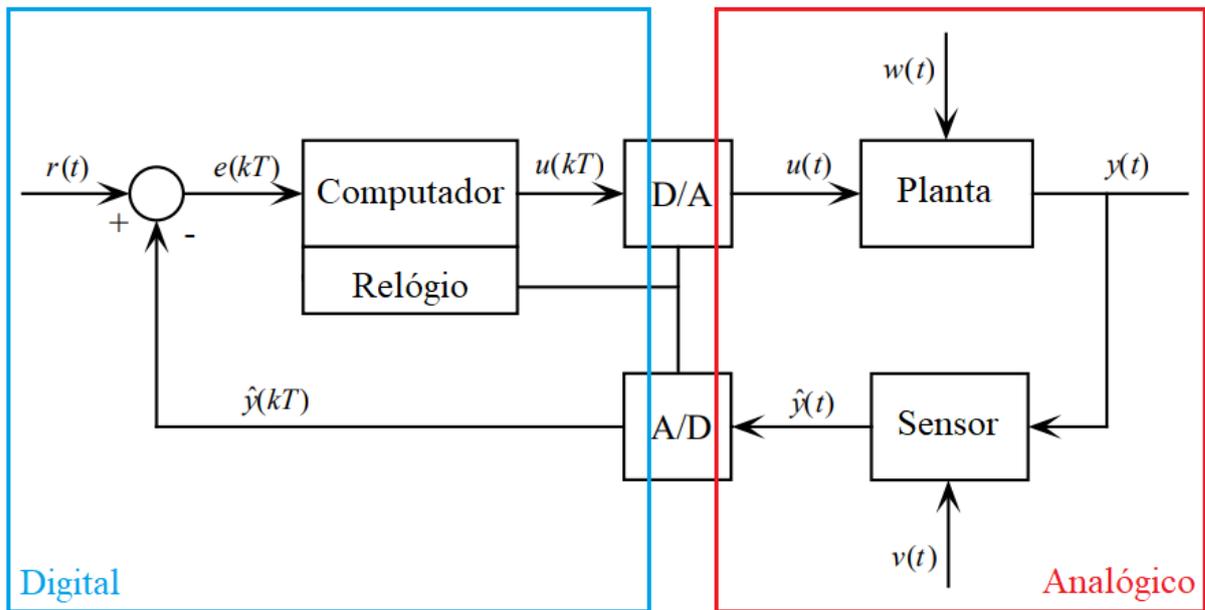


Fonte: Laboratório de Garagem (2012).

2.7.1 Controlador PID Digital

Consoante a Starr (2006), sistemas de controle digital empregam um computador como componente fundamental do controlador, o qual recebe uma medida de variável controlada e a entrada de referência, produzindo sua saída através de um algoritmo. Esta saída é convertida de digital para analógica, sendo amplificada para atuar sobre a planta. A Figura 25 representa o funcionamento deste sistema.

Figura 25 - Representação de um sistema de controle digital



Fonte: Do autor, adaptado de Starr (2006).

Onde:

- r entrada de referência ou *setpoint*;
- u força de controle (entrada do atuador);
- y variável controlada ou saída;
- \hat{y} medida da variável controlada;
- $e = r - \hat{y} =$ sinal de erro;
- w perturbação atuando na planta;
- v ruído de medição;
- A/D conversor analógico-digital;
- D/A conversor digital-analógico.

A fim de implementar o controlador PID de forma digital, a Equação 37 deve ser adaptada. Dentre os métodos de aproximação existentes para essa finalidade, utiliza-se a regra do trapézio, também conhecida como aproximação de Tustin ou bilinear. A Equação 38 traz esta adaptação, podendo ela ser utilizada em um microcontrolador (LAGES, 2011).

$$\begin{aligned} u[n] &= K_p e[n] + K_i \left(u[n-1] + \frac{T}{2} (e[n] + e[n-1]) \right) \\ &\quad + K_d \left(\frac{2u[n] - u[n-1]}{T} - e[n-1] \right) \end{aligned} \quad (38)$$

$n = kT, \forall k = 0, 1, 2 \dots$

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

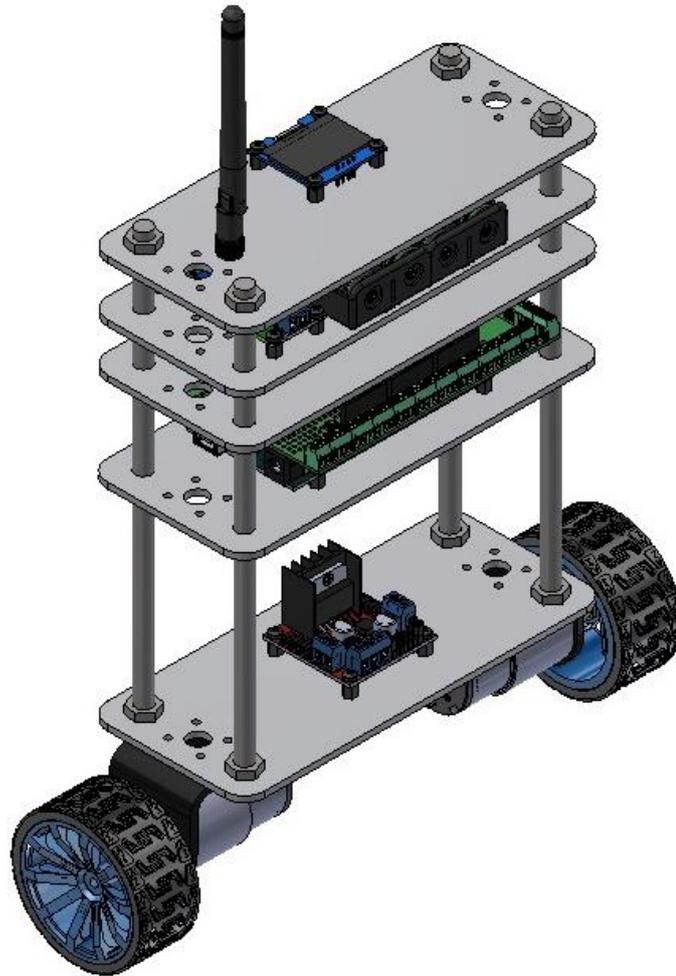
Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a obtenção dos resultados, de modo a construir um robô pêndulo invertido e analisar o funcionamento do controlador desenvolvido para a sua estabilização. Ademais, elenca as propriedades dos materiais utilizados, bem como as características do sistema.

3.1 Estrutura física

No projeto proposto, desenvolveu-se um robô pêndulo invertido de eixo único, capaz de manter-se em equilíbrio, mesmo quando submetido a perturbações externas, de manobrar em espaços pequenos e dispor de estabilidade em rampas.

A partir da concepção do projeto, desenhou-se o modelo da planta no *software* Autodesk Inventor. Sua estrutura é composta por dois materiais, sendo aço carbono galvanizado para suas hastes e chapas de MDF para as bases de sustentação dos elementos eletrônicos. A vista isométrica do robô é apresentada na Figura 26.

Figura 26 - Vista isométrica do robô pêndulo invertido



Fonte: O autor (2023).

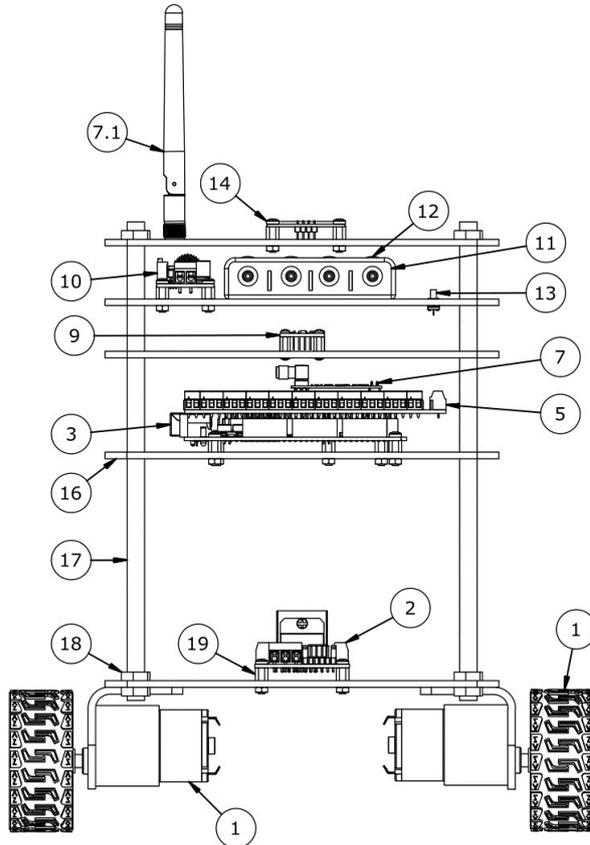
No mesmo desenho, foram importados os componentes utilizados no robô para a determinação de seu posicionamento e perfuração das bases de MDF. O Apêndice A fornece, em maiores detalhes, informações sobre o projeto mecânico e a lista de materiais empregados, além do detalhamento das bases e fixação dos componentes.

3.1.1 Componentes do Sistema

A escolha do método de estabilização da planta se deu pelo controlador PID, por ser este compatível com o comportamento do sistema, além de apresentar baixo custo de implementação e demonstrar-se flexível, com capacidade de alterar o comportamento dos processos sob controle, sendo este transitório ou de regime

permanente. A Figura 27 apresenta um diagrama do robô com seus principais componentes.

Figura 27 – Especificação dos elementos do robô



Item	Descrição
1	Motor DC JGB37-520 (12V 530rpm) com encoder, suporte e kit roda
2	Ponte H dupla L298n
3	Arduino Mega 2590 R3
4*	Conector Plug P4 Fêmea com Borne
5	Placa borne shield para Arduino Mega 2560
6*	Componentes diversos; resistores, LED, botões, capacitor
7	Módulo de transmissão de dados sem fio nRF24L01 + 2.4g
7.1	Antena que acompanha o módulo nRF24L01
8*	Cabo extensor nóduo RF RG174 SMA macho para SMA fêmea
9	Sensor MPU-9250 9-eixos giroscópio + acelerador + magnetômetro
10	Módulo conversor DC-DC Step Down XL4015, 5A
11	Suporte bateria 4 células 18650
12	Bateria 18650 4,2V 8800 mAh
13	Switch deslizante 3 posições
14	Módulo de exibição OLED 1,3" 128x64, comunicação I2C, SH1106
15*	Elementos diversos para fixação
16	Placas de MDF cru 3 mm, para bases e suporte do robô
17	Barra roscada M8 de aço carbono galvanizado
18	Parcas M8 para travamento das bases do robô
19	Elementos de fixação de nylon M2.5 (parafusos, porcas e espaçadores)
20*	Cabos e conectores
21*	Parafusos Cabeça Panela M2x12 e M3X12 + porca
22*	Carregador de múltiplas células (4S) de bateria de lítio Step-Up Boost

*Os elementos ocultos nessa vista ou que não foram possíveis de se representar

Fonte: O autor (2023).

Os elementos foram ordenados de forma a minimizar as distâncias entre o microcontrolador e os dispositivos secundários. Na base superior, instalou-se a tela OLED para a fácil visualização dos dados da planta, a antena *rubber* (formada por um fio elástico em forma de hélice estreita, selado em uma capa de borracha ou plástico para proteger a antena) para transmitir os sinais entre o controle e o robô e um LED para sinalizar a ocorrência da transmissão de dados.

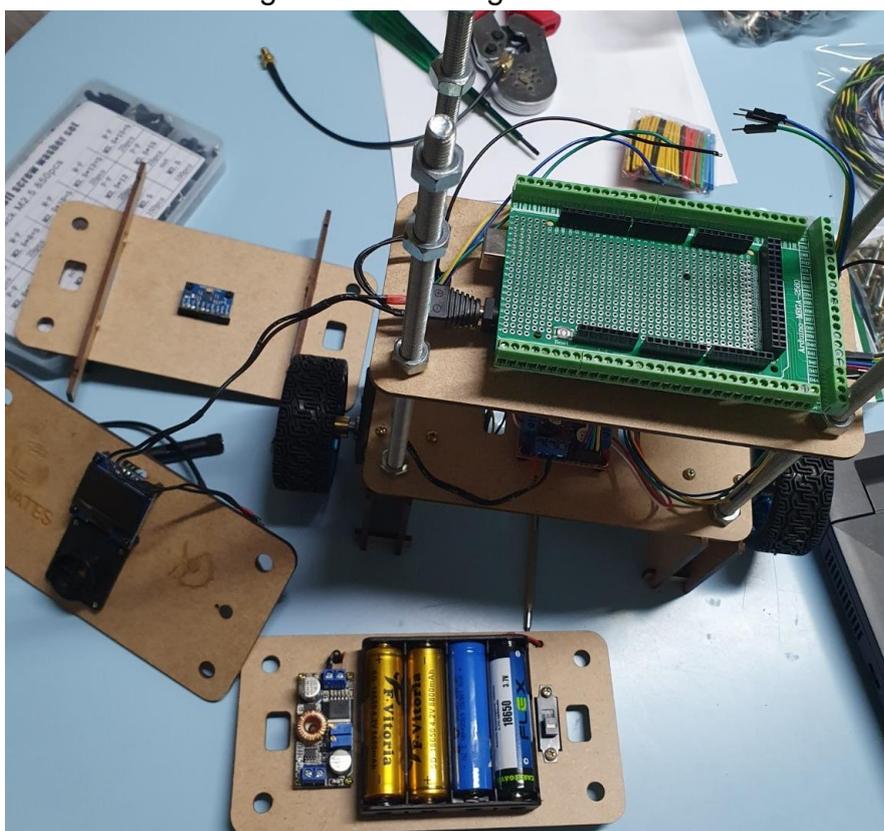
Na base 4 foram posicionados os elementos para a energização de todos os componentes do robô. Utilizaram-se quatro baterias de Li-íon, modelo SD 18650, de 4,2 V, com capacidade de carga de 8800 mAh, ligadas em série. Escolheu-se esta posição devido ao seu elevado peso quando comparado aos demais componentes, de modo a elevar o centro de gravidade do robô e aumentar a instabilidade do pêndulo.

A fim de ajustar a tensão proveniente do circuito de alimentação, instalou-se, também na base 4, um módulo regulador de tensão baseado no componente XL4015 (conversor DC/DC *Step Down*), o qual corrige a tensão de entrada de 16,8 V para 12 V e fornece uma corrente de saída de 5 A, necessários para acionar o Arduino Mega e os motores.

Na base 3, por sua vez, instalou-se o sensor MPU-9250, em uma posição próxima ao centro de massa da planta. Além disso, a posição foi determinada conforme a necessidade de proximidade do sensor com o microcontrolador, uma vez que a comunicação entre eles é realizada a partir de protocolo I2C, que tem como recomendação manter curta distância entre elementos para evitar interferências nos sinais enviados.

Na base 2 acomodou-se o microcontrolador Arduino Mega 2560, o Shield Borne e o módulo nRF24L01+. A posição do Arduino nesta base é resultado da centralização do elemento, para um cabeamento reduzido e mais eficaz. Por fim, na base inferior, foi posicionada a ponte H, próxima aos motores. A Figura 28 apresenta a etapa de montagem da planta.

Figura 28 - Montagem do robô



Fonte: O autor (2023).

O Apêndice B exibe o esquema de ligação entre os componentes do robô. As seções a seguir apontam as características dos elementos e *softwares* que compõem o sistema.

3.1.2 Atuadores

Para controlar o robô pêndulo invertido foram utilizados dois motores CC, responsáveis pela movimentação e correção da inclinação do corpo do pêndulo. Os motores têm seu estator formado por um ímã permanente e a comutação de seu rotor realizada por escovas. Outras características pertinentes são (MOTOR FACTORY STORE, 2023):

- tensão de alimentação de 12 V;
- corrente máxima sem carga de 120 mA;
- corrente nominal de 1 A;
- corrente com rotor travado de 2,3 A;
- velocidade máxima sem carga de 530 rpm;
- velocidade nominal de 407 rpm;
- torque máximo de 3,1 kg.cm;
- torque nominal de 2,2 kg.cm.

Além disso, cada motor possui um *encoder* incremental, acoplado no rotor do motor, com uma resolução de 209 pulsos por volta, utilizado para identificar seu sentido de giro, bem como a velocidade nominal da roda. Estes motores são acionados por uma ponte H, modelo L298N, e sua velocidade ajustada por sinais do tipo PWM, de acordo com as necessidades de correção ou movimentação da planta. A roda que acompanha o conjunto possui 67 mm de diâmetro e 27 mm de espessura. Na Figura 29 é possível verificar o conjunto de motor, suporte para fixação na base do veículo e roda.

Figura 29 - Conjunto do motor e roda do robô



Fonte: Motor Factory Store (2023).

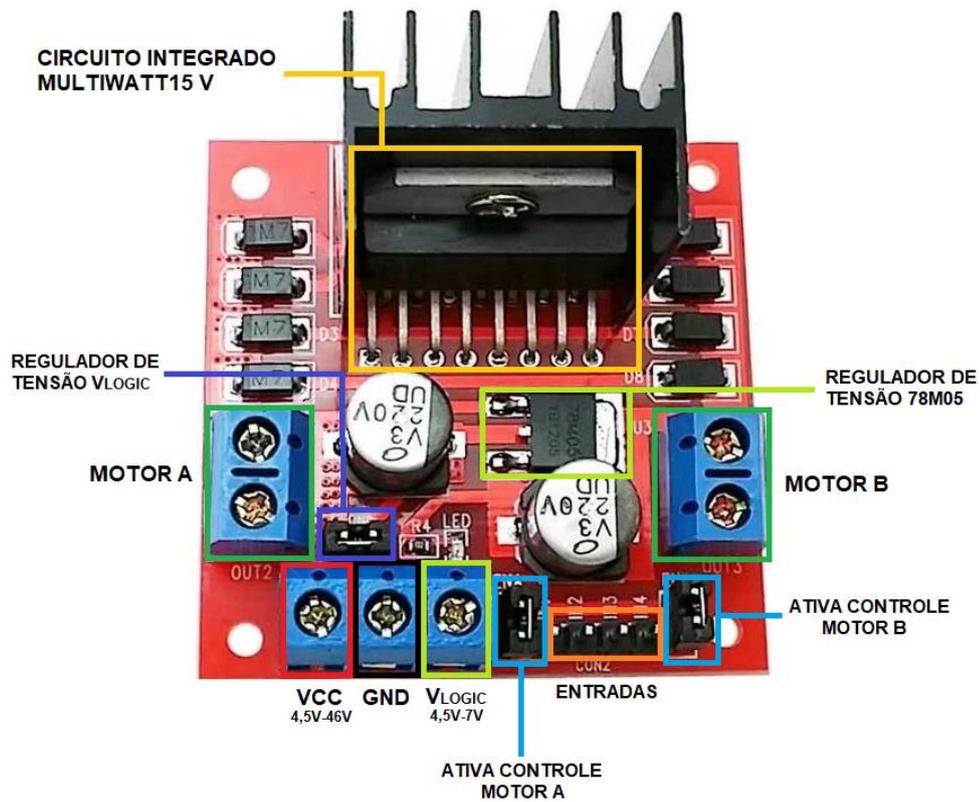
3.1.3 Ponte H

O modelo escolhido de ponte H foi o módulo L298N, por ser um *driver* que permite o acionamento de cargas indutivas com ideal dissipação de potência para a planta proposta, capaz de controlar até dois motores CC ou um motor de passo. Enquanto que microcontroladores conseguem fornecer poucos miliamperes de corrente, este circuito integrado fornece até 2 A por canal, suprimindo a corrente nominal dos motores. Como principais características apresenta (SUSTAINABLE TECHNOLOGY, 2023):

- tensão de operação dos canais de 2,5 a 46 V;
- corrente de operação máxima de 2 A por canal, totalizando 4 A;
- potência máxima de 25 W;
- tensão lógica de 4,5 a 7 V (módulo possui um regulador de tensão 78M05, capaz de suprir 5 V para o chip a partir de uma tensão de entrada entre 7 V a 35 V);
- corrente nível lógico de até 36 mA;
- temperatura de operação de -20 a +135°C.

A Figura 30 expõe o módulo ponte H L298N.

Figura 30 - Módulo Ponte H L298N

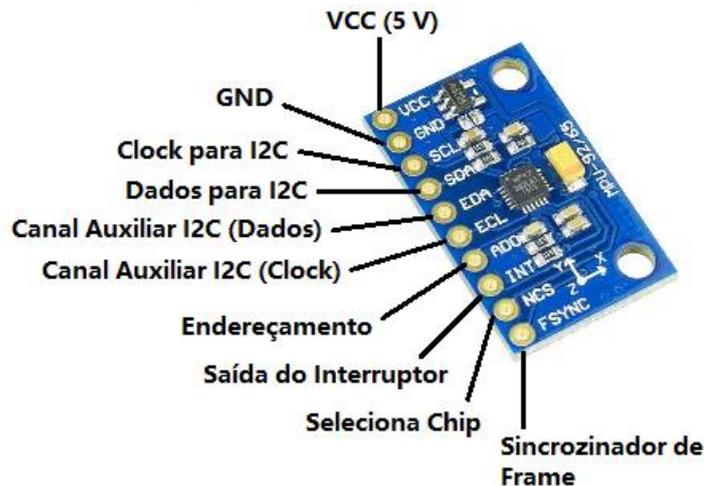


Fonte: Do autor, adaptado de Hobotik (2023).

3.1.4 Sensores Giroscópio e Acelerômetro

Para este trabalho, optou-se por utilizar um sensor do modelo MPU-9250, o qual possui, no mesmo encapsulamento, um conjunto de giroscópio, acelerômetro e magnetômetro. A Figura 31 apresenta este sensor e seus I/Os.

Figura 31 - MPU-9250 *pinout*



Fonte: Eletrogate (2023).

Conforme especificações técnicas do fabricante InvenSense (2016), o MPU-9250 é um dispositivo *Motion Tracking*, ou seja, é um sensor de rastreamento de movimento, de 9 eixos. Destes, 3 eixos são destinados ao giroscópio, 3 eixos ao acelerômetro e os 3 eixos restantes destinados ao magnetômetro, ambos interligados e combinados a um processador de movimento digital (*Digital Motion Processor - DMP*). Contendo um barramento serial I2C dedicado, este dispositivo permite a integração e um desempenho otimizado de movimento.

Como principais características pode-se citar (INVENSENSE, 2016):

- tensão de alimentação de 2,4 a 3,6 V;
- comunicação por protocolo padrão I2C;
- conversor ADC 16 bits;
- corrente operacional de 3,5 mA, quando todos os 9 eixos dos sensores de movimento e o DMP estão ativados;
- consumo de corrente do giroscópio: 3,2 mA;
- consumo de corrente do acelerômetro: 450 μ A;
- consumo de corrente do magnetômetro: 280 μ A;
- faixa do giroscópio: $\pm 250^\circ$, $\pm 500^\circ$, $\pm 1000^\circ$ e $\pm 2000^\circ$;
- faixa do acelerômetro: ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g e ± 16 g;
- faixa do magnetômetro: ± 4800 μ T.

O giroscópio é responsável pela coleta de dados de momento angular do pêndulo. O acelerômetro, por sua vez, é responsável pela medição da aceleração própria do sistema, ou seja, a taxa de variação da velocidade do robô. O magnetômetro é considerado como uma bússola digital, por medir a intensidade e direção do campo magnético da Terra e é utilizado para conhecer a direção e sentido do veículo no ambiente em que se encontra.

3.1.5 Placas de Controle

O sistema de ajuste da posição do robô é controlado através de uma lógica de programação em um microcontrolador Arduino Mega 2560 R3. Elaborado com base no microchip ATmega2560, possui 54 pinos de I/Os, dentre os quais 15 podem ser

utilizados como saídas PWM, 16 entradas analógicas e 4 portas de comunicação serial, além de maior capacidade de memória quando comparado aos demais modelos de Arduino.

Devido aos fatores mencionados e à compatibilidade com todos os *shields* já desenvolvidos para o seu antecessor, Arduino UNO, o componente permite futuras ampliações e melhorias no sistema. Este microcontrolador está fixado no corpo do robô para coletar os dados, transmiti-los ao controle remoto e controlar os atuadores.

Um segundo microcontrolador, Arduino Nano, é utilizado no controle remoto, este que será abordado em 3.1.6. Com tamanho diminuto, porém com capacidades similares a um Arduino UNO, este componente se torna a escolha para envio e recepção dos dados do robô.

Os diagramas elétricos, para ambos os circuitos, foram desenvolvidos no *software* de design de circuito *online* gratuito *EasyEDA* (versão *Standard Edition*). Neste site, também, foi possível desenvolver a placa de circuito impresso (PCB - *Printed Circuit Board*) do controle remoto. O Apêndice B exibe mais informações acerca deste tema.

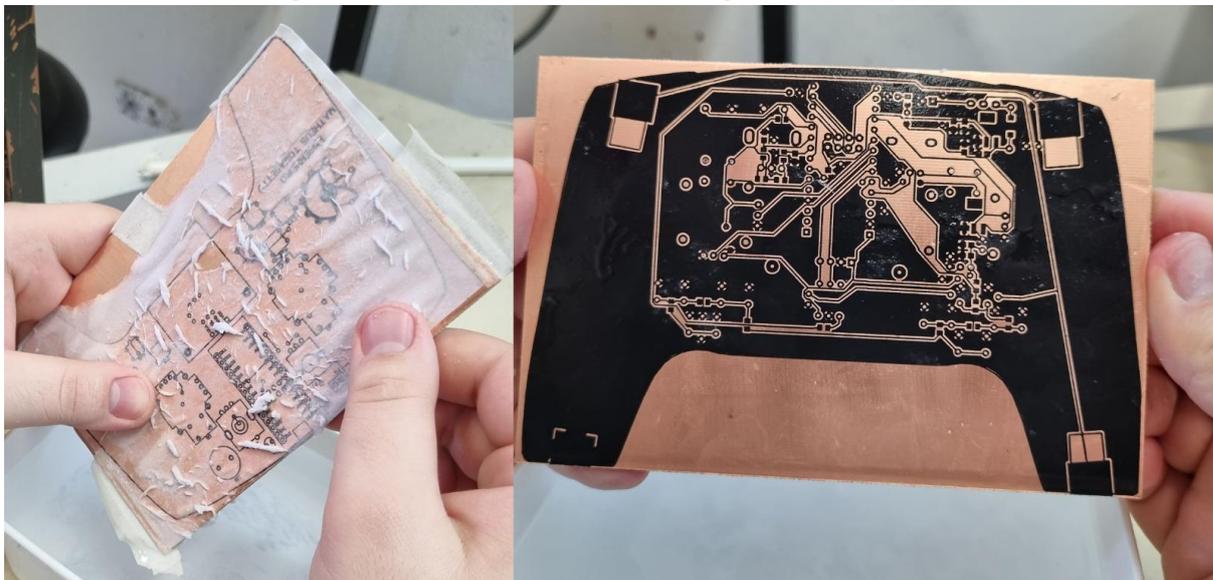
3.1.6 Controle remoto

O controle de movimentos e operações do robô ocorre por meio de um controle remoto, especialmente desenvolvido para esta aplicação. Este controle conta, principalmente, com uma tela OLED para apresentação dos dados do sistema, *joysticks* e botões para a movimentação do robô, além de um *encoder* rotativo capaz de ajustar os parâmetros do PID e de um potenciômetro que regula a velocidade de movimento.

Para a confecção do controle remoto utilizou-se uma placa de fibra de vidro cobreada, dupla face, com dimensões de 10 x 15 cm. O circuito, exibido no Apêndice C, foi impresso em uma folha de papel couchê, essa fixada na placa e que, por meio da aplicação de calor e pressão sobre a folha, transferiu o desenho para o cobre. Após a transferência do desenho e remoção do papel (Figura 32), a placa foi submersa em uma solução de percloroeto de ferro anidro e água, para que o cobre, não protegido

pelo desenho, fosse corroído (Figura 33). Em seguida, realizou-se o acabamento e perfuração da placa (Figura 34).

Figura 32 - Desenho do circuito gravado na placa



Fonte: Do autor (2023).

Figura 33 - Corrosão do cobre exposto na solução



Fonte: Do autor (2023).

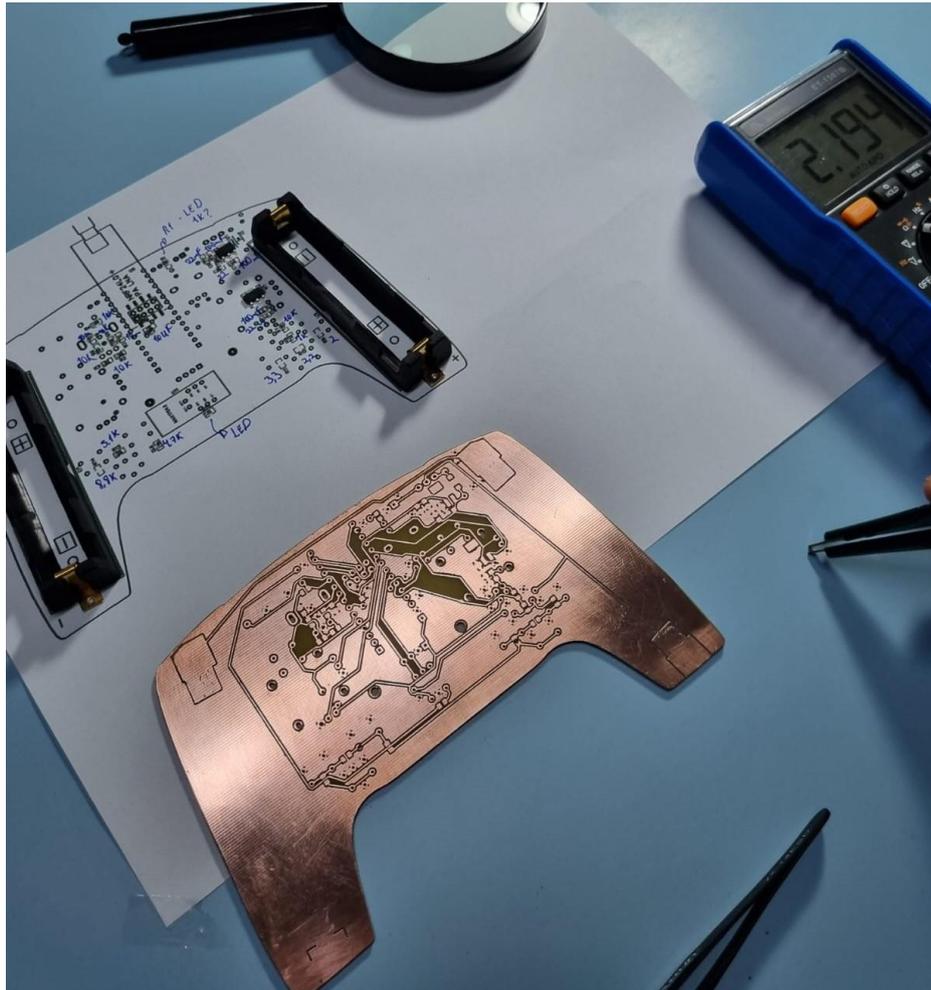
Figura 34 - Perfuração e acabamento da placa



Fonte: Do autor (2023).

Por fim, após a remoção da tinta e limpeza da placa, foram soldados todos os componentes que constituem o controle. Ainda, foi aplicado um verniz incolor Isotec para proteger e isolar o circuito e dar acabamento. A Figura 35 apresenta o processo de montagem descrito.

Figura 35 – Montagem do controle remoto



Fonte: Do autor (2023).

3.1.6.1 Tela OLED

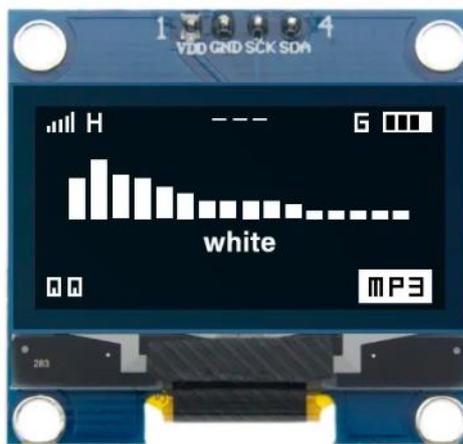
O modelo de tela utilizado tanto no robô, quanto no controle remoto, para possibilitar a visualização de dados e configurações do sistema, é do tipo OLED 1,3". Esta tela possui como principais características, segundo o fabricante (CURTO CIRCUITO, 2023):

- tensão de alimentação de 3 a 5 V;
- tensão lógica de 3,3 a 5 V;
- consumo de energia de 0,08 W;
- resolução de 128x64 pixels;
- ângulo de visão de 160°;

- temperatura de operação de -30 °C a 70 °C;
- interface de comunicação I2C;
- drive interno SH1106.

Os critérios para a escolha do modelo foram a sua fácil implementação de *hardware* e *software*, o baixo consumo de energia, quando comparado a uma tela TFT (Transistor de Película Fina), e o seu tamanho diminuto, que possibilitou a sua inserção no controle remoto. A tela OLED pode ser visualizada na Figura 36.

Figura 36 - Tela OLED



Fonte: Curto Circuito (2023).

3.1.6.2 Módulos de Radiofrequência

A comunicação entre veículo e controle remoto ocorre por meio de módulos nRF24L01+, que operam em uma frequência de 2,4 GHz. Para que ocorra corretamente a comunicação entre os dispositivos, a definição da antena empregada é fundamental neste processo. Para tal, foi utilizada uma antena *rubber* de 2,5 dBi, que se conecta facilmente com o módulo, pois conta com um conector do tipo fêmea SMA-J.

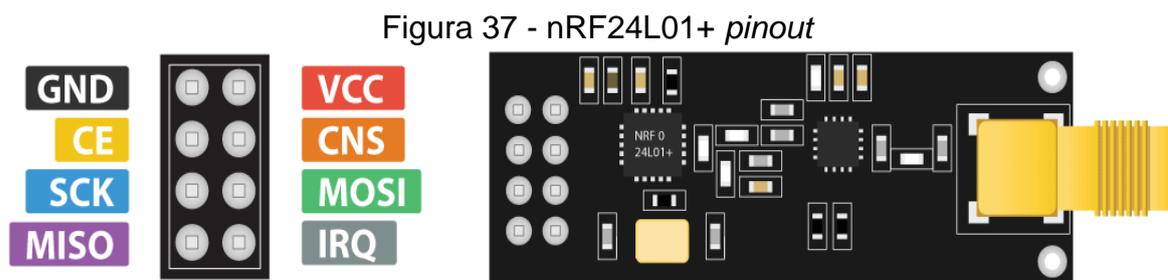
De acordo com o *datasheet* do fabricante Nordic (2010), o módulo de rede sem fio nRF24L01+, transceptor de rádio, envia e recebe informações à distância de sensores, microcontroladores e eletrônicos em geral. A escolha por este componente se deu devido a sua ampla utilização em controles remotos, controladores de jogos,

relógios e sensores esportivos, automação residencial e comercial, redes de sensores de ultra baixa potência, RFID ativo, sistemas de rastreamento de ativos, dentre outras aplicações.

Tem como principais características (NORDIC, 2010):

- equipamento de baixo custo;
- frequência de operação ISM de 2,4 GHz em todo o mundo;
- até 2Mbps em taxa de dados aéreos;
- tensão de operação de 1,9 a 3,6 V;
- TX de 11,3 mA com potência de saída de 0 dBm;
- RX de 13,5 mA com taxa de transmissão de 2 Mbps;
- operação com consumo de energia ultrabaixo;
- consumo de corrente em *stand-by* de 26 μ A;
- consumo de corrente no desligamento de 900 nA;
- possui regulador de tensão embutido;
- realiza manipulação automática de pacotes;
- detém um conector SMA, podendo ser anexada uma antena para melhor alcance de transmissão;
- dispõe de um chip RFX2401C que inclui PA (*Power Amplifier* - amplificador de potência) e LNA (*Low-Noise Amplifier* - amplificador de baixo ruído), permitindo um alcance de transmissão ainda melhor, de até 1000 m em espaço aberto;
- tolera até 5 V em suas entradas.

A Figura 37 exibe a representação do transceptor nRF24L01+ com o detalhamento dos I/Os.

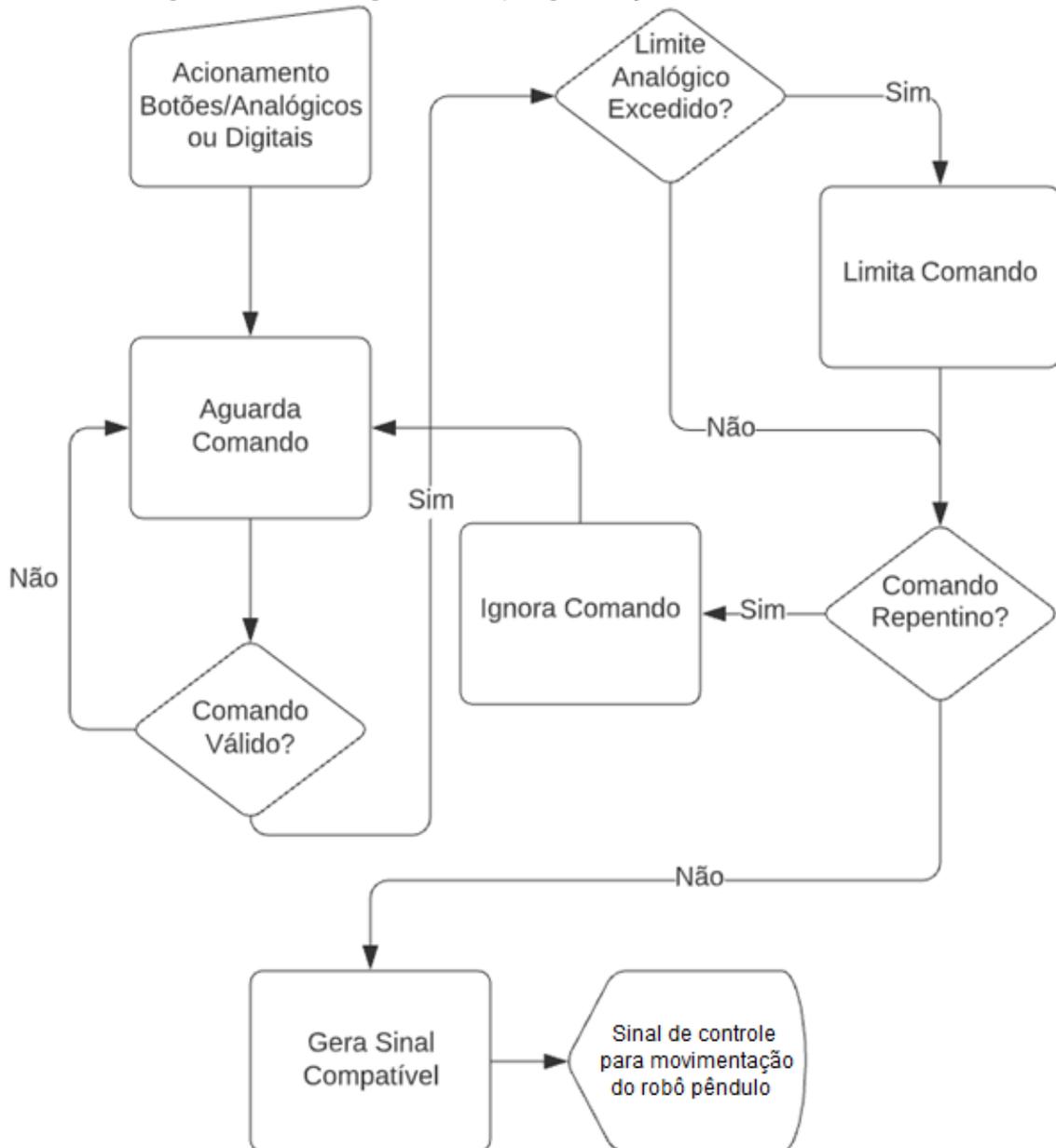


Fonte: Do autor, adaptado de How To Mechatronics (2023).

3.2 Programação

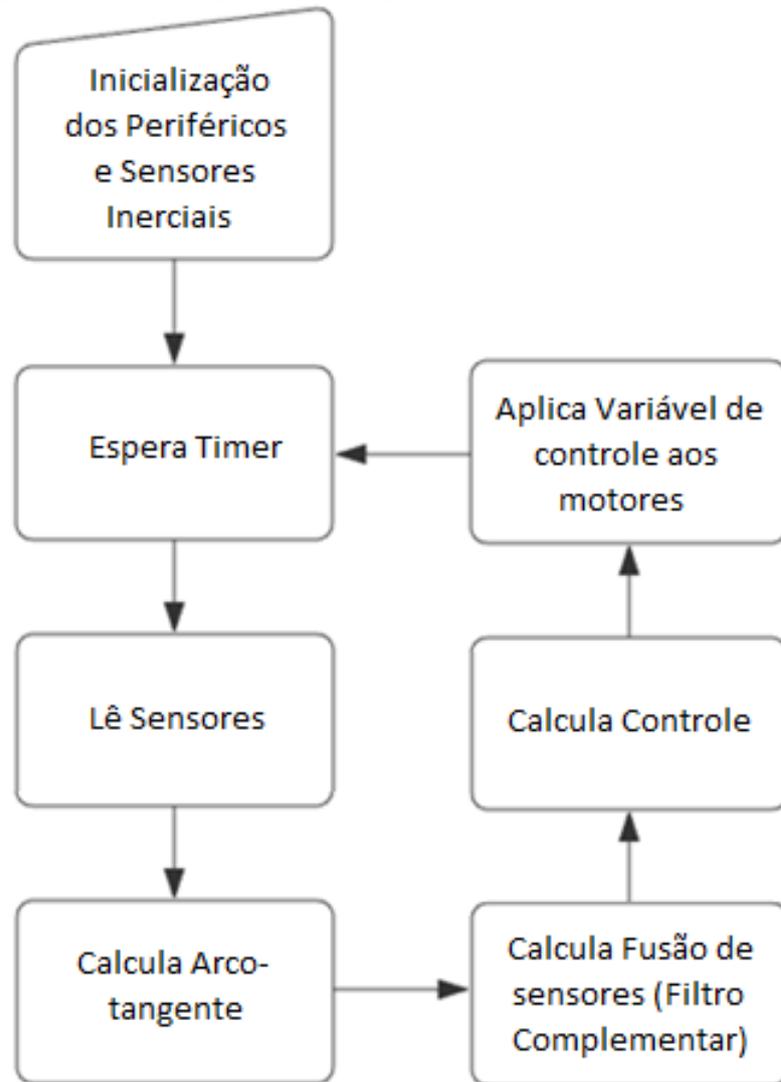
Para que o sistema opere adequadamente, ou seja, se mantenha na vertical e se movimente de acordo com os comandos recebidos, é imprescindível que a programação seja bem definida e executada. Diante disso, foram elaborados dois fluxogramas para auxiliar no desenvolvimento do *software*. A Figura 38 apresenta o fluxograma de controle da trajetória do robô e a Figura 39 apresenta o fluxograma correspondente ao algoritmo de estabilização do robô.

Figura 38 - Fluxograma da programação do controle remoto



Fonte: Do autor (2023).

Figura 39 - Fluxograma do algoritmo de estabilização do robô



Fonte: Do autor (2023).

De acordo com o exposto na Figura 39, após a inicialização do sistema, o robô pêndulo invertido executa um programa que lê continuamente os sensores e, a partir disso, atua nos motores. Os dados coletados passam pelo filtro complementar, o qual pode ser tratado como um filtro passa-alta e passa-baixa combinados, em que o primeiro atua no giroscópio para estimativa de curto prazo e o segundo atua no acelerômetro para corrigir a estimativa do ângulo com sua referência absoluta.

A ideia básica por trás do filtro complementar é aproveitar as vantagens de diferentes sensores, compensando as fraquezas de um com as forças do outro. Enquanto que o acelerômetro mede a aceleração linear do objeto, o giroscópio mede a taxa de rotação angular. A leitura do giroscópio fornece a taxa de rotação e para obter a orientação, essas taxas são integradas ao longo do tempo. No entanto, a

integração acumula erros ao longo do tempo devido a pequenas imprecisões nos sensores. O filtro complementar entra em cena para corrigir os erros acumulados na orientação derivada do giroscópio. A orientação do acelerômetro é mais precisa a longo prazo, mas é sensível a vibrações e movimentos rápidos.

Após a realização dos comparativos entre os valores fixados e os encontrados no sistema pelos sensores, são executadas medidas de correção na variável através de atuadores e elementos de controle.

Este programa foi desenvolvido na plataforma Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), que possibilita escrever, compilar e enviar os códigos de programação para microcontroladores compatíveis com Arduino. O programa utilizou diversas bibliotecas para o controle PID, gerenciamento de *driver* de motor, comunicação I2C, detecção de acelerômetro e giroscópio, além da comunicação sem fio via nRF24L01+. As principais bibliotecas utilizadas foram: PID_v1.h, que fornece a funcionalidade do controle PID; LMotorController.h, que comanda o *driver* do motor L298N; I2Cdev.h, utilizada para interagir com o sensor MPU-9250; e SPI.h, nRF24L01.h e RF24.h, usadas em conjunto para habilitar a comunicação dos módulos sem fio nRF24L01+.

Após a definição e configuração das variáveis iniciais do sistema, ajustou-se os parâmetros do controlador PID e inicializou-se a comunicação via nRF24L01+. Posteriormente, no *loop* principal, realizaram-se os cálculos do controlador com base nos dados do sensor. Com esses resultados, os motores foram acionados, contribuindo para a estabilização da planta. Durante o processo de estabilização, os dados recebidos via nRF24L01+ foram processados, permitindo ajustes na direção do robô.

4 RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos procedimentos metodológicos propostos. Além disso, aborda as análises referentes ao desempenho do robô após a sua validação.

4.1 Implementação do veículo e do controle remoto

O robô desenvolvido, como mencionado no método, possui uma estrutura composta por aço carbono galvanizado e chapas de MDF. A escolha dos materiais utilizados para a planta teve grande importância, tanto para a sustentação dos elementos, quanto para a estabilização de equilíbrio, visto que as hastes são formadas por um material rígido e não deformável e as chapas por um material de baixa densidade.

A combinação resultou em uma estrutura robusta, porém de baixo peso próprio. Os parâmetros do modelo, provenientes do *software* Autodesk Inventor e de cálculos e medições manuais, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros físicos do modelo

(Continua)

Parâmetros	Valores
Massa total do robô	1,558 (kg)
Massa do carro	0,44 (kg)
Massa do pêndulo	1,118 (kg)
Altura do pêndulo*	0,2265 (m)
Largura do pêndulo	0,18 (m)

(Conclusão)

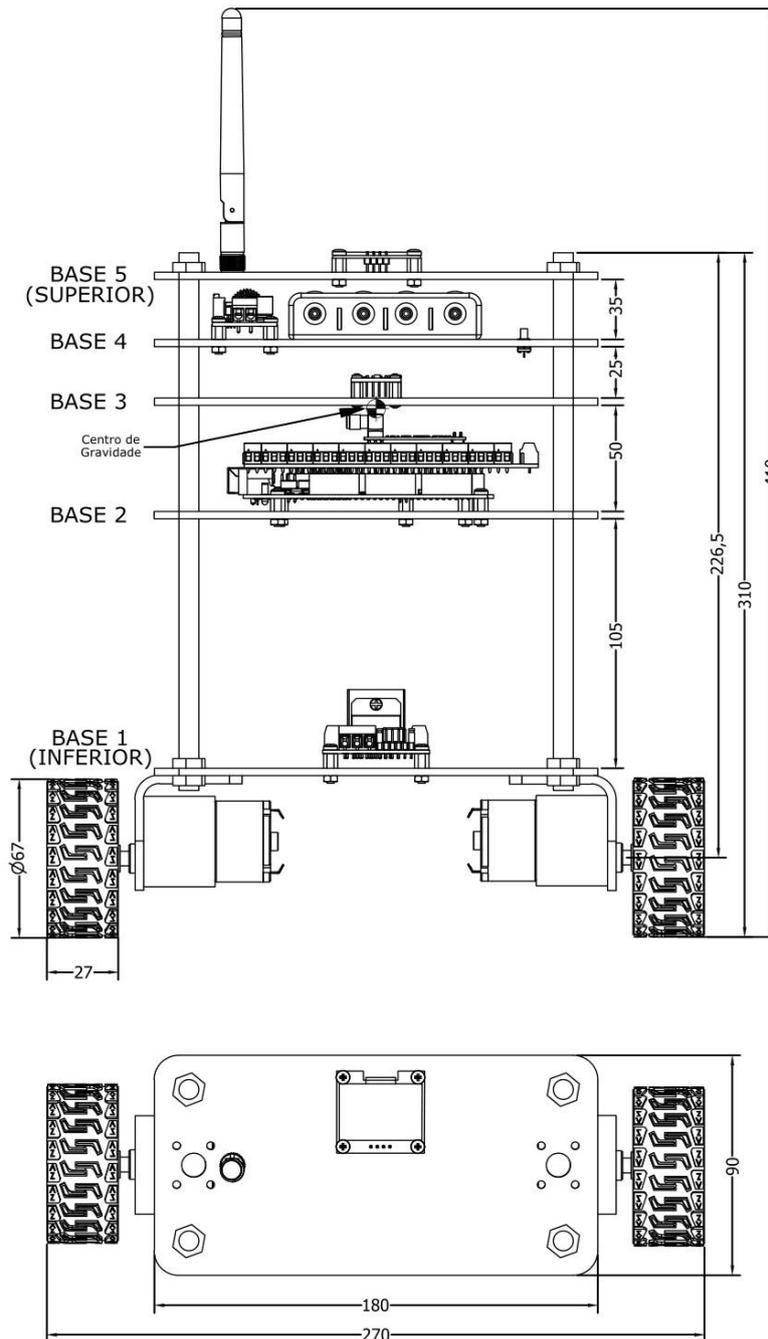
Centro de gravidade do pêndulo	0,152 (m)
Inércia do carro	$9,87 \times 10^{-4}$ (kgm ²)
Inércia do pêndulo	$2,21 \times 10^{-2}$ (kgm ²)

*Desconsiderou-se a altura da antena por seu peso ser desprezível, quando comparado ao peso total do pêndulo.

Fonte: Do autor (2023).

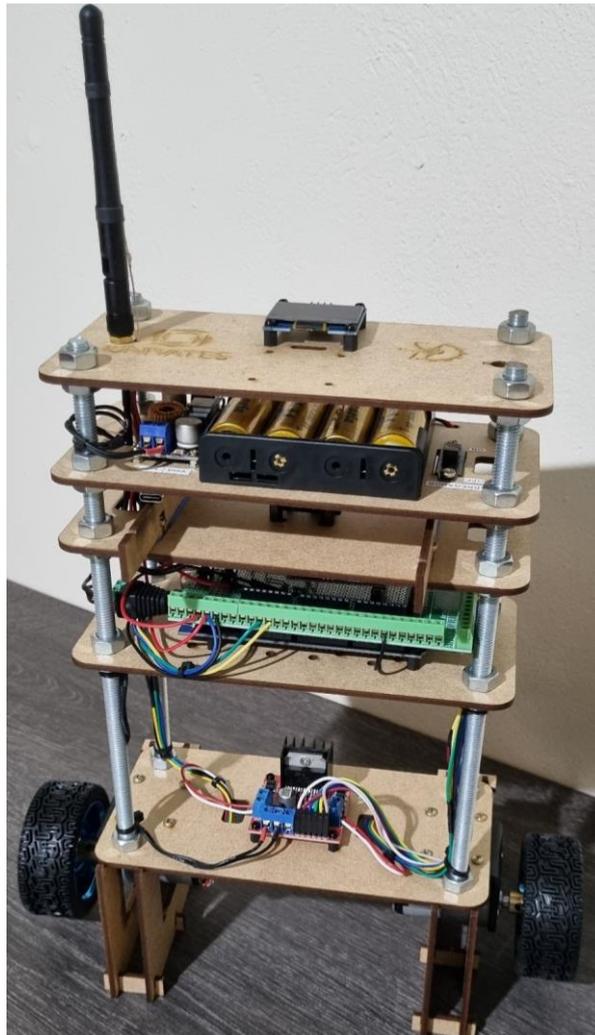
As dimensões do robô podem ser verificadas na Figura 40 e seu protótipo finalizado na Figura 41.

Figura 40 - Detalhamento da estrutura da planta



Fonte: Do autor (2023).

Figura 41 - Robô pêndulo invertido



Fonte: Do autor (2023).

Durante a montagem do robô, percebeu-se que com a fixação de três bases de MDF, este já apresentava robustez o suficiente para sustentar a estrutura da planta. Posto isto, a sua construção poderia ter sido realizada com menos bases, caso tivesse sido projetado para tal.

A placa de circuito impresso que corresponde ao controle remoto foi projetada de forma personalizada, levando em consideração a ergonomia do controlador, podendo este ser facilmente segurado com as duas mãos, garantindo que todos os controles estejam ao alcance dos dedos. Além disso, o design do circuito e o acabamento do controle fizeram com que o mesmo disponha de melhor aparência e aspecto mais profissional.

Na versão atual do controle, destaca-se a implementação de um medidor de bateria baseado no circuito integrado MAX17043. Durante a fase de montagem e testes realizados em uma protoboard, observou-se que a utilização de um simples

divisor de tensão para possibilitar a leitura da tensão da bateria por um dos pinos analógicos do microcontrolador resultava em medições imprecisas. Isso se deve ao fato de que as baterias de íons lítio apresentam um decaimento de tensão não linear, ou seja, sua carga diminui rapidamente no início, permanece estável por um período prolongado e, posteriormente, cessa abruptamente.

Para contornar esse inconveniente, o medidor MAX17043 emprega um algoritmo sofisticado para detectar o estado relativo da carga e direcionar a conversão analógico-digital da capacidade restante da bateria. Esse dispositivo estabelece comunicação com o Arduino por meio do protocolo I2C, fornecendo informações precisas sobre a porcentagem de carga da bateria. Além disso, possui um pino de saída digital designado como alerta, que sinaliza quando a carga diminuiu abaixo de uma determinada porcentagem.

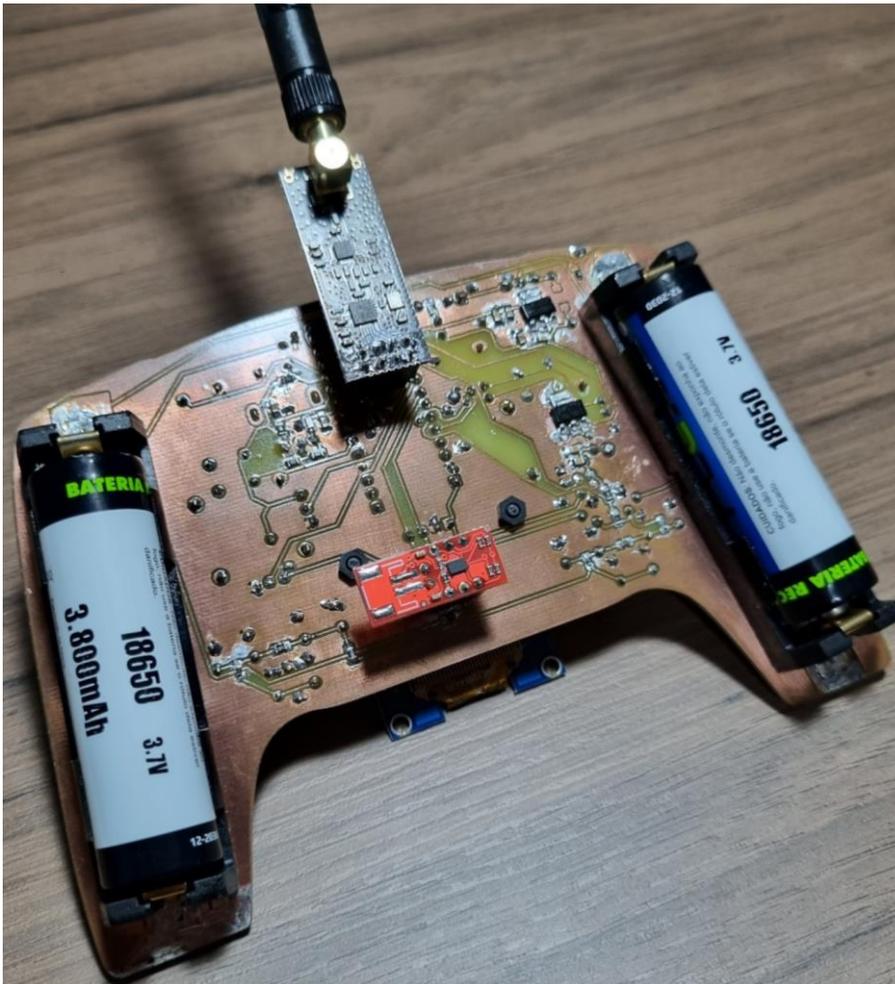
A mesma solução não pode ser empregada para o robô devido à incompatibilidade de tensão. Isso se deve ao fato de que a tensão máxima de entrada do MAX17043 é de 10 V, enquanto a bateria que alimenta o robô é de 16,8 V. A Figura 42 apresenta o controle remoto finalizado, enquanto a Figura 43 exibe detalhes do circuito.

Figura 42 - Controle remoto



Fonte: Do autor (2023).

Figura 43 – Detalhe do circuito do controle remoto



Fonte: Do autor (2023).

4.2 Análise do algoritmo do sistema

A implementação do algoritmo de controle de equilíbrio foi baseada na teoria detalhada nos Capítulos 2 e 3. Os ganhos dos controladores foram obtidos a partir de testes realizados com a planta finalizada. A fusão do algoritmo de controle de equilíbrio e do algoritmo de controle de acionamento diferencial resultou em um robô com a capacidade de manobrabilidade esperada.

Na arquitetura proposta, a comunicação é baseada em um sistema do tipo mestre-escravo, onde o Arduino Mega se comporta como mestre do sensor, da tela OLED e do módulo nRF24L01+. Com isso, o microcontrolador solicita e recebe os dados pertinentes para a movimentação do robô. Desta forma, um programa de

direção projetado para responder conforme a movimentação do *joystick* do controle remoto, foi usado para controlar o movimento do robô.

Para fazer o robô se mover, o ganho da posição é definido como zero e o deslocamento de distância desejado é adicionado ao termo de velocidade. Isso é feito para que o sistema de controle continue a equilibrar o robô, enquanto permite que este se mova. A direção e a distância do movimento são controladas pelo sinal do pequeno deslocamento adicionado ao termo de velocidade.

O controle PID é útil nesta fase, pois irá garantir que o erro de posição entre as rodas seja minimizado, para que o robô se mova em linha reta. A rotação do robô para a direita é obtida aplicando um deslocamento na direção positiva à roda esquerda e um deslocamento na direção negativa à roda direita. Para virar à esquerda, um deslocamento na direção negativa é aplicado à roda esquerda e um deslocamento na direção positiva é aplicado à roda direita. Isso faz com que as rodas se movam em direções opostas enquanto giram, fazendo com que o robô gire no mesmo lugar.

Durante o desenvolvimento, foram identificados problemas relacionados à seleção de componentes e à programação, que não foram previamente percebidos na fase inicial de concepção do projeto. Com isso, a realização de ajustes nas características originais dos componentes foi necessária para assegurar o sucesso do trabalho, além da correção de falhas na programação identificadas durante a implementação do controlador PID.

Outro contratempo encontrado foi o de componentes com mau contato, resultando em leituras erradas de sensores e prejudicando a comunicação entre robô e controle. Para solucionar o problema, os circuitos foram realocados e as ligações entre o microcontrolador e o módulo de radiofrequência nRF24L01, antes feitas com simples conectores, foram soldadas dentro da placa borne *shield* do Arduino Mega.

4.3 Testes práticos

Com a finalidade de comprovar o funcionamento da planta desenvolvida, bem como de seu controle remoto, foram realizados, em um primeiro momento, testes em um ambiente plano e sem perturbações externas, analisando principalmente a

qualidade do controlador de estabilização, a comunicação entre dispositivos e a funcionalidade dos sensores. Para garantir o adequado funcionamento do sistema, fez-se necessário ajustar o controlador PID e verificar a resposta dos atuadores.

É importante observar que o ajuste do controlador PID é uma etapa crucial para alcançar um desempenho estável e ideal em um sistema de controle. Deste modo, a parametrização do controlador seguiu as orientações de Ogata (2010), onde inicialmente foram zerados os parâmetros para o ganho integral e ganho derivativo ($K_i = K_d = 0$). Em seguida, definiu-se um valor para o ganho proporcional (K_p) e, gradualmente, se aumentou o valor até obter uma resposta rápida do sistema, sem oscilações excessivas ou instabilidade.

Tendo alcançado esta resposta, o valor de K_i foi progressivamente elevado até que o erro em estado estacionário fosse eliminado. Por fim, adicionou-se o ganho derivativo para aprimorar a resposta transitória e reduzir o *overshoot*, sendo este ajustado conforme necessário para alcançar sua estabilização vertical.

Para aferir a velocidade dos motores, foram coletados dados a partir de um tacômetro de contato digital, modelo Minipa MDT-2238B, com precisão de $\pm 0,05\%$. Com isso, foi possível constatar que os motores apresentaram velocidades divergentes entre si e daquela informada pelo fabricante. Para o correto funcionamento do robô, fez-se necessário adequar a velocidade do motor para um único valor, por meio de uma relação implementada em *software*.

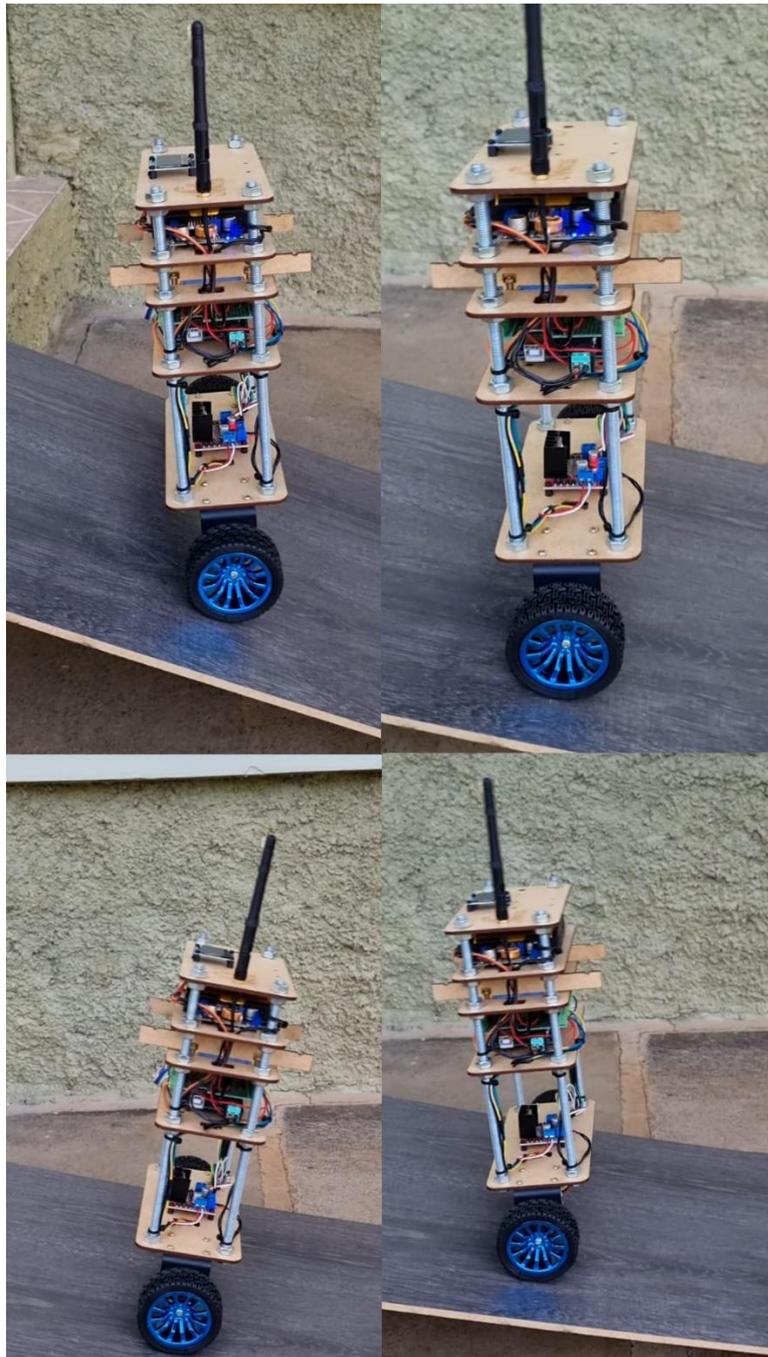
No motor à esquerda do robô observou-se uma velocidade de 488,2 rpm, enquanto que para o motor à direita do robô a velocidade constatada foi de 467,6 rpm. O erro aferido é de aproximadamente 11,77% do valor informado pelo fabricante e de 4,22% entre as velocidades dos motores. Assim, a velocidade foi limitada à rotação do motor de menor capacidade.

Dito isto, vale ressaltar também que um aspecto fundamental, identificado durante os testes e investigado em artigos e trabalhos acadêmicos relacionados à proposta, é que a rotação por minuto do motor para este tipo de aplicação, especialmente em robôs pêndulo invertido com dimensões semelhantes às apresentadas, deve ser de, no mínimo, 200 rpm para alcançar uma resposta eficaz e uma rápida recuperação de posição. No entanto, é imperativo considerar tanto o torque quanto a velocidade, adequando-os conforme as exigências específicas da aplicação. Dessa forma acredita-se que o motor empregado é adequado para a

planta, mesmo que apresente uma considerável folga na sua redução, o dispositivo concilia torque e velocidades adequadas para o pêndulo invertido móvel construído.

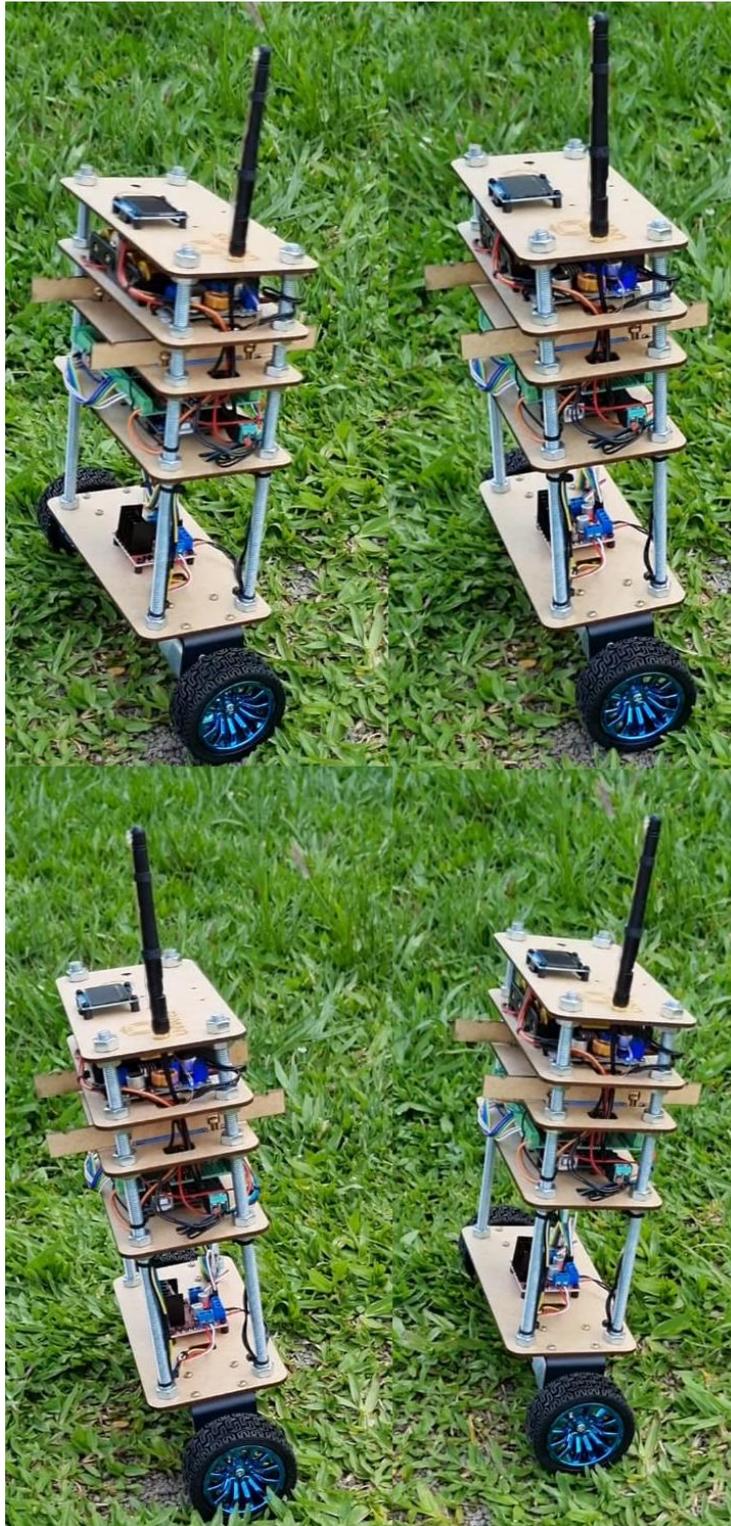
Posteriormente, os testes foram realizados em um ambiente com declive e sujeito a perturbações externas, como movimentação manual ou vento. A partir disso, a planta demonstrou desempenho satisfatório, mantendo-se equilibrada. A rampa estava disposta em inclinação de 7° e 14° , conforme medição realizada por transferidos de aço goniômetro. As Figuras 44 e Figura 45 exibem o exposto.

Figura 44 - Teste do robô sobre rampa



Fonte: Do autor (2023).

Figura 45 - Teste do robô em superfície irregular



Fonte: Do autor (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como premissas o desenvolvimento e controle de um robô pêndulo invertido de pequena escala, capaz de manter-se equilibrado sobre um eixo e duas rodas e movimentar-se conforme comandos realizados à distância. Ao concluir o embasamento teórico, a elaboração da planta e a programação do *software* de controle, torna-se possível identificar os principais obstáculos enfrentados durante a implementação desse sistema, bem como identificar as áreas passíveis de aprimoramento.

Através dos métodos discutidos neste estudo, este projeto teve sucesso em atingir o objetivo de equilibrar um robô autônomo de duas rodas baseado no modelo de pêndulo invertido. Durante os testes, o robô foi capaz de manter sua posição vertical ajustando levemente as rodas. Contudo, o robô ainda manifesta oscilações em seus movimentos durante seu regime permanente.

Uma das complicações que prejudicaram a formulação da ação de controle foi a presença de folgas nas engrenagens da redução do motor, tornando-se um desafio mecânico a ser resolvido. Além disso, a presença de ruídos nos sinais dos sensores e o atraso nas respostas aos distúrbios do sistema contribuíram para tornar o sistema instável. A estabilidade só foi alcançada depois da aplicação da resposta ao impulso e a inclusão de filtros na programação. Com a aplicação de um filtro o desvio do giroscópio foi reduzido, permitindo uma estimativa mais precisa do ângulo de inclinação e sua derivada para o robô.

Adicionalmente a isso, a obtenção de dispositivos eletrônicos que atendessem às exigências do sistema e a realização da integração destes elementos no *software* mostraram-se desafios. A fim de superar essas dificuldades, foi necessário modificar

as características originais da planta e realizar ajustes nos programas para corrigir as falhas cometidas.

São necessárias pesquisas adicionais para investigar como a linearização da dinâmica do modo do sistema pode ser aplicada para aprimorar a estabilidade e robustez do robô. Uma tentativa de controlar o sistema utilizando métodos não lineares é altamente recomendada para pesquisas futuras. Dessa forma, os movimentos oscilatórios do robô durante o equilíbrio podem ser eliminados, fazendo com que assim, o controle preciso da trajetória e a navegação por pontos de referência possam ser implementados.

Dado que o protótipo permaneceu equilibrado e a resposta do sistema não convergiu para a instabilidade, pode-se afirmar que os objetivos propostos para a realização deste trabalho foram atingidos.

Considerando a possibilidade de aprimoramento do sistema, a partir da aquisição de diferentes *hardwares* com maior precisão e com a implementação de outros quesitos que não foram abrangidos por esta análise, é possível elencar algumas sugestões para melhorias no projeto e eventuais trabalhos futuros:

- Implementar um sistema para coleta de dados de toda a planta, para posterior comparação entre métodos e melhor entendimento da teoria de controle aplicada;
- Empregar outras técnicas de controle, incluindo diferentes tipos de controladores e filtros, analisando os dados coletados de modo a comparar os resultados de estabilização obtidos;
- Implementar uma rotina de simulações nos *softwares* MATLAB e Simulink para testar controladores e filtros antes mesmo de aplicá-los no robô;
- Utilizar microcontroladores com características superiores, principalmente no que diz respeito à capacidade de processamento, quantidade de pinos com interrupções e *clock* mais alto. Como exemplos destacam-se o ESP32 ou placas Raspibery Pi. É importante salientar sobre a utilização de placas com tensão de comando e comunicação no nível lógico de 3,3 V, como é o caso ESP32, uma vez que vários dos componentes do robô são muito sensíveis aos 5 V,

comuns em placas Arduino e, com isso, evita-se o uso de conversores de nível lógico;

- Confeccionar todo o circuito em uma PCB personalizada, facilitando e garantindo a qualidade entre as conexões dos dispositivos;
- Alterar os motores por unidades com folga reduzida ou, alternativamente, por motores de passo, para diminuir interferências e otimizar o tempo de resposta do robô.

REFERÊNCIAS

ALFIAN, Rio I.; MA'ARIF, Alfian; SUNARDI, Sunardi. Noise Reduction in the Accelerometer and Gyroscope Sensor with the Kalman Filter Algorithm. **Journal of Robotics and Control (JRC)**, Yogyakarta, Indonesia, v. 2, n. 3, p. 180-189, mai. 2021. ISSN: 2715-5072 DOI: 10.18196/jrc.2375. Disponível em: <<https://journal.umy.ac.id/index.php/jrc/article/view/10014/5771>>. Acesso em: 20 set. 2023.

ALMEIDA, Fernanda. O que é encoder?. **HI Tecnologia**, Campinas, SP, 2018. Disponível em: <<https://materiais.hitecnologia.com.br/blog/o-que-%C3%A9-encoder-para-que-serve-como-escolher-como-interfacear/>>. Acesso em: 01 out. 2023.

ANATEL. **PLANO DE ATRIBUIÇÃO, DESTINAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL**. ANATEL, 2020. Disponível em: <<https://sistemas.anatel.gov.br/anexar-api/publico/anexos/download/db36871563204c812e300856bd9b2794>>. Acesso em: 08 abr. 2023.

ARDUINO. **Arduino Nano**. Disponível em: <<https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano>>. Acesso em: 11 jul. 2023.

BAGDANOFF, J. L.; Citron, S. J., **Experiments with an inverted pendulum subject to random parametric excitation**. pp. 447-452, 1965. Disponível em: <<https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.1909711>>. Acesso em: 20 jul. 2023.

BIM, Edson. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 4. ed. Barueri, SP: GEN LTC, 2018.

BLITZER, L.; **Inverted pendulum**. vol. 33, no. 12, pp. 1076-1078, 1965. Disponível em: <<https://aapt.scitation.org/doi/abs/10.1119/1.1971158>>. Acesso em: 20 set. 2023.

BOCCHI, Nerilso; FERRACIN, Luiz Carlos; BIAGGIO, Sonia Regina. **Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental**. Química Nova Escola, 2000. Disponível em:

<http://qnint.sbq.org.br/qni/popup_visualizarConceito.php?idConceito=45&semFrame=1>. Acesso em: 21 jun. 2023.

BOSTON DYNAMICS. **ATLAS™**. Boston Dynamics, 2023. Disponível em: <<https://www.bostondynamics.com/atlas>>. Acesso em: 2 jan. 2023.

BOUAT, Matthieu. Entendendo o efeito do PWM ao controlar um motor DC sem escovas. **Portescap**, Cotia, SP, 2021. Disponível em: <https://www.portescap.com/-/media/project/automation-specialty/portescap/portescap/pdf/whitepapers/wp_understanding_the_effect_of_pwm_por.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2023.

COELHO, Fábio A. A. **Projeto e implementação de um robô do tipo pêndulo invertido móvel**. 2012. Monografia (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade São Francisco, Itatiba, SP, 2012. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/63517201-Fabio-a-a-coelho-projeto-e-implementacao-de-um-robo-do-tipo-pendulo-invertido-movel.html>>. Acesso em: 16 abr. 2023.

CORREIA, Miguel F. P. V., **Análise de Movimento em Sequências de Imagens**. 1995. Tese (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores – Perfil de Automação Industrial) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, fev. 1995. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12052/2/Texto%20integral.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

CRISP, John. **Introduction to Microprocessors and Microcontrollers**. 2 ed. Reino Unido: Elsevier, 2004.

CURTO CIRCUITO. **Display OLED 128x64 Px - 1.3" - 4 Pin**. Curto Circuito, 2023. Disponível em: <<https://curtocircuito.com.br/display-oled-128x64-px-1-3-4-pin-branco.html>>. Acesso em: 20 set. 2023.

DADAFSHAR, Majid. Accelerometer and gyroscopes sensors: operation, sensing, and applications. **Maxim Integrated**, [s.l.], 2014. Disponível em: <<https://pdfserv.maximintegrated.com/en/an/AN5830.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2023.

DAWOUD, Shenouda; DAWOUD, Peter. **Serial Communication Protocols and Standards: Rs232/485, Uart/Usart, Spi, Usb, Insteon, Wi-Fi and Wimax**. 1. ed. Dinamarca: River Publishers, 2020.

ELETROGATE, Blog. **Acelerômetros MPU-6050, MMA8452 e MPU-9250**. Blog Eletrogate, 2023. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/acelerometros-mpu-6050-mma8452-e-mpu-9250/>>. Acesso em 12 abr. 2023.

ERIK CHEEVER'S HOME PAGE, professor at Department of Engineering of Swarthmore College, **An Introduction to escalar Kalman Filter**, Disponível em: <www.swarthmore.edu/NatSci/echeeve1/Ref/Kalman/ScalarKalman.html>. Acesso em: 05 jun. 2023.

FAGUNDES, Renan dos S. **Robô pêndulo invertido**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2015. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/127656/000971128.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 8 set. 2023.

FATTINI, Dangelo e. **Anatomia Básica dos Sistemas Orgânicos**. São Paulo: Novo Atheneu, 2000.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; NAEINI, Abbas E. **Feedback Control of Dynamic Systems**. 7. ed. Saddle River, New Jersey, EUA: Pearson Higher Education, Inc., 2014.

HOBOTIK. **Driver Motor Ponte H L298n**. 2023. Hobotik, 2023. Disponível em: <https://www.hobotik.com.br/MLB-1867392995-driver-motor-ponte-h-l298n-_JM>. Acesso em 18 ago. 2023.

HANABUSA, Russel. Comparing JTAG, SPI, and I2C. **Spansion**, Sunnyvale, Califórnia, EUA, 13 abr. 2007. Disponível em: <http://lpvo.fe.uni-lj.si/fileadmin/files/Izobrazevanje/OME/Comparing_Serial_Interfaces_an_01_e.pdf>. Acesso em: 16 set. 2023.

HOW TO MECHATRONICS. **nRF24L01 – Como Funciona, Interface Arduino, Circuitos, Códigos**. How To Mechatronics, 2023. Disponível em: <<https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/arduino-wireless-communication-nrf24l01-tutorial/>>. Acesso em: 17 jun. 2023.

IBRAHIM, Dogan. **Designing Embedded Systems with 32-Bit PIC Microcontrollers and Mikroc**. 1. ed. Salford, Manchester, UK: Newnes, 2014. 480 p.

INVENSENSE. **MPU-9250 Product Specification Revision**. InvenSense, 2016. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132035/TDK/MPU-9250.html>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

JOHNSON ELECTRIC. **DC Motors: Basic Configuration**. Johnson Electric, 2023. Disponível em: <<https://www.johnsonelectric.com/resources-for-engineers/dc-motors/dc-motors-basic-configuration>>. Acesso em: 22 jun. 2023.

KERSCHBAUMER, Ricardo. **Microcontroladores**. Luzerna, Santa Catarina: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Catarinense. 2018. Disponível em: <professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf> Acesso em: 21 jul. 2023.

KALMAN, R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. **Journal of Basic Engineering**, Baltimore, Maryland, EUA, n. 82, série D, p. 35-45, 1960. Disponível em: <<https://www.cs.unc.edu/~welch/kalman/media/pdf/Kalman1960.pdf>>. Acesso em 03 jul. 2023.

KIM, S. B.; Bui, T. H.; Nguyen, T. T.; Chung, T. L. **A simple nonlinear control of a two-wheeled welding mobile robot**. International Journal of Control, Automation, and Systems, vol. 1, no. 1, pp. 35-42, 2003.

LABORATÓRIO DE GARAGEM. **Controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo)**. Laboratório de Garagem, 2012. Disponível em: <<https://labdegaragem.com/profiles/blogs/artigo-controlador-pid-proporcional-integral-derivativo-parte-1>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

LAGES, Walter F. **Modelagem de Sistemas Discretos**. 2011. Apostila (Curso de Sistemas de Controle Digital) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2011. Disponível em: <<http://www.ece.ufrgs.br/~fetter/eng04037/model.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

LOWENSTERN, E. R.; **Stabilizing effect of imposed oscillations on a dynamical system**. Philosophical Magazine, vol. 13, pp. 458-486, 1932. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14786443209461948>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

MAGALHÃES, Diogo Augusto Bêta. **Análise de cobertura e modelagem do sinal rádio móvel em ambiente com vegetação na faixa 700 - 4000 mhz**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Niterói, RJ, 19 fev. 2020. Disponível em: <<http://www.ppgeet.uff.br/site/wp-content/uploads/2021/05/Diogo-Augusto.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

MAIMON, Felipe. **Projeto de um sistema eletrônico para o controle de motores de alta potência por PWM**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Pontifícia Universidade Católica – PUC, Rio de Janeiro, RJ, dez. 2004. Disponível em: <http://meggi.usuarios.rdc.puc-rio.br/teses/TFC04_Felipe_Maimon.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

MEDEIROS, Julio C. de O. **Princípios de Telecomunicações: Teoria e Prática**. 5 ed. São Paulo: Érica - 2018.

MENDONÇA, Hélio S. SPI e I2C. **Páginas da Atividade Docente e de Investigação**, Porto, Portugal, 2023. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~hsm/misc/old/comp/spi-e-i2c/>>. Acesso em: 24 set. 2023.

MODULAR CIRCUITS. **Pontes H – o básico**. Modular Circuis, 2011. Disponível em: <<https://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>>. Acesso em: 05 set. 2023.

MONK, Simon. **30 projetos com Arduino**; Tradução: Anatólio Laschunk. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.

MOTOR FACTORY STORE. **Motor para engrenagem com codificador e kit de roda, 37mm de diâmetro, 12v/24v**. Disponível em: <https://a.aliexpress.com/_mLI2lsu>. Acesso em: 20 jan. 2023.

MUSET, Bogdan; EMERICH, Simina. Distance Measuring using Accelerometer and Gyroscope Sensors. **Carpathian Journal of Electronic and Computer Engineering**, Napoca, Romênia, v. 5, p. 83-86, 2012. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b67298f582dc4955da2a4b5dc1ec9166e98bbfb7>>. Acesso em 14 jul. 2023.

MYERS, Paul. Interfacing using Serial Protocols Using SPI and I2C. **CiteSeer**, [s.l.], 2023. Disponível em: <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=534c218137aad5f26a5080496338f740f3da7b15>>. Acesso em 12 set. 2023.

NESS, D. J.; **Small oscillations of a stabilized, inverted pendulum**. vol. 35, n. 10, p. 964-967, 1967. Disponível em: <<https://doi.org/10.1119/1.1973655>>. Acesso em: 17 set. 2023.

NORDIC. **nRF24LU1+**. Nordic Semiconductor, 2010. Disponível em: <https://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF24LU1P_PS_v1.1.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2023.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. Pearson Prentice Hall. São Paulo, 2010.

PEDROSO, Caio C. de S.; MODESTO, Eduardo La P. **Sistema de controle de pêndulo invertido**. 2017. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Mecatrônica Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, PR, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9505/1/CT_COMET_2017_2_06.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2023.

PARK, Sanghyuk; HOW, Jonathan. Examples of Estimation Filters from Recent Aircraft Projects at MIT, Nov. 2004. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/16-333-aircraft-stability-and-control-fall-2004/fb8395efd40e5f4a79b98fda10c85de3_l15_filter_examp.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.

SAHBA, M. Computer-aided design of feedback controllers for nonlinear systems with applications to control of a double-inverted pendulum. **IEE Proceedings - D (Control Theory and Applications)**, Stevenage, Hertfordshire, UK, v. 130, 6 ed., p. 350 – 358, nov. 1983. DOI: 10.1049/ip-d.1983.0058. Disponível em: <<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-d.1983.0058>>. Acesso em 18 set. 2023.

SEAL. **Sistema de Transmissão sem fio**. PUC-RIO. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5387/5387_4.PDF>. Acesso em: 10 abril 2023.

SCHILLING, Darlei E. **Modelagem E Controle de um Robô de Eixo Único em Sistema de Pêndulo Invertido**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUÍ, Ijuí, RS, 2017. Disponível em: <<https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/bitstream/handle/123456789/4810/Darlei%20Elias%20Schling.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 25 ago. 2023.

STARR, Gregory P. **Introduction to Applied Digital Control – Second Edition**. 2006. Artigo (Curso de Engenharia Mecânica) – Universidade do Novo México, Novo México, EUA, 2006. Disponível em: <<http://www.me.unm.edu/~starr/teaching/me581/textbook.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2023.

STEPHENSON, A. **On a new type of dynamic stability**. *Memoirs and Proceedings of the Manchester Literary and Philosophical Society* 52, 8 (1908), 1–10.

SUNDIN, Christian; THORSTENSSON, Filip. **Autonomous Balancing Robot: Design and construction of a balancing robot**. 2012. 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suécia, 2012. Disponível em: <<https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/163397.pdf>>. Acesso em: 01 set. 2023.

SUSTAINABLE TECHNOLOGY. **Datasheet L298 - Dual full-bridge driver**. ST Life Augmented, 2023. Disponível em: <<https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2023.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre, RS: AMGH Editora, 2014.

VALADAO, Gabriel R. **Controle de um robô pêndulo invertido sobre duas rodas**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Pato Branco, PR, 22 jun. 2022. Disponível em: <<https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/29128/1/controlerobopenduloinvertido.pdf>>. Acesso em: 3 set. 2023.

VALENTI, Chris. **Implementing a PID Controller Using a PIC18 MCU**. Microchip, AN937, 2004. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00937a.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2023.

WARDANA, A. A.; TATAKI, T.; AOYAMA, T.; ISHII, I. Dynamic modeling and step-climbing analysis of a two-wheeled stair-climbing inverted pendulum robot. **Advanced Robotics** - Taylor & Francis, v. 34, n. 5, p. 313–327, 2020. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01691864.2019.1704868>>. Acesso em: 19 jul. 2023.

WELCH, Greg; BISHOP, Gary. **An Introduction to the Kalman Filter**. 2001. Apostila (Curso de Ciência da Computação) – Universidade da Carolina do Norte, Chapel Hill, EUA, 2001. Disponível em: <<https://courses.cs.washington.edu/courses/cse571/03wi/notes/welch-bishop-tutorial.pdf>>. Acesso em: 03 out. 2023.

YAMAKAWA, Takeshi. Stabilization of an inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system. **Science Direct**, Universidade de Kumamoto,

Japão, v. 32, n. 2, p. 161-180, set. 1989. Disponível em: <
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0165011489902522#!>>.
Acesso em: 19 set. 2023.

APÊNDICE A – DETALHAMENTO DA ESTRUTURA DO ROBÔ

Lista dos componentes do robô pêndulo invertido

Item	Descrição	Quantidade (un)	Valor unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
1	Motor DC JGB37-520 (12V 530rpm) com encoder, suporte e kit roda	2	92,05	184,1
2	Ponte H dupla L298n	1	42	42
3	Arduino Mega 2590 R3	1	171,8	171,8
4	Conector Plug P4 Fêmea com Borne	1	4,41	4,41
5	Placa borne shield para Arduino Mega 2560	1	87	87
6	Componentes diversos; resitores, LED, botões, capacitor	1	7,8	7,8
7	Módulo de transmissão de dados sem fio nRF24L01 + 2.4g	1	28,42	28,42
8	Cabo extensor nóduo RF RG174 SMA macho para SMA fêmea	1	16,24	16,24
9	Sensor MPU-9250 9-eixos giroscópio + acelerador + magnetômetro, comunicação I2C	1	64,34	64,34
10	Módulo conversor DC-DC Step Down XL4015, 5A	1	43,41	43,41
11	Suporte bateria 4 células 18650	1	12,4	12,4
12	Bateria 18650 4,2V 8800 mAh	4	25	100
13	Switch deslizante 3 posições	1	5,45	5,45
14	Módulo de exibição OLED 1,3" 128x64, comunicação I2C, SH1106	1	25,52	25,52
15	Elementos diversos para fixação	1	19,8	19,8
16	Placas de MDF cru 3 mm, para bases e suporte do robô (cortadas a laser)	1	95	95
17	Barra roscada M8 de aço carbono galvanizado (1 m)	1	10	10
18	Porcas M8 para travamento das bases do robô	40	0,35	14
19	Elementos de fixação de nylon M2.5 (parafusos, porcas e espaçadores)	1	5,04	5,04
20	Cabos e conectores	1	43,92	43,92
21	Parafusos Cabeça Panela M2x12 e M3x12 + porca	1	37,66	37,66
22	Carregador de múltiplas células (4S) de bateria de lítio Step-Up Boost	1	26,19	26,19
			TOTAL	1044,5

Lista dos componentes do controle remoto

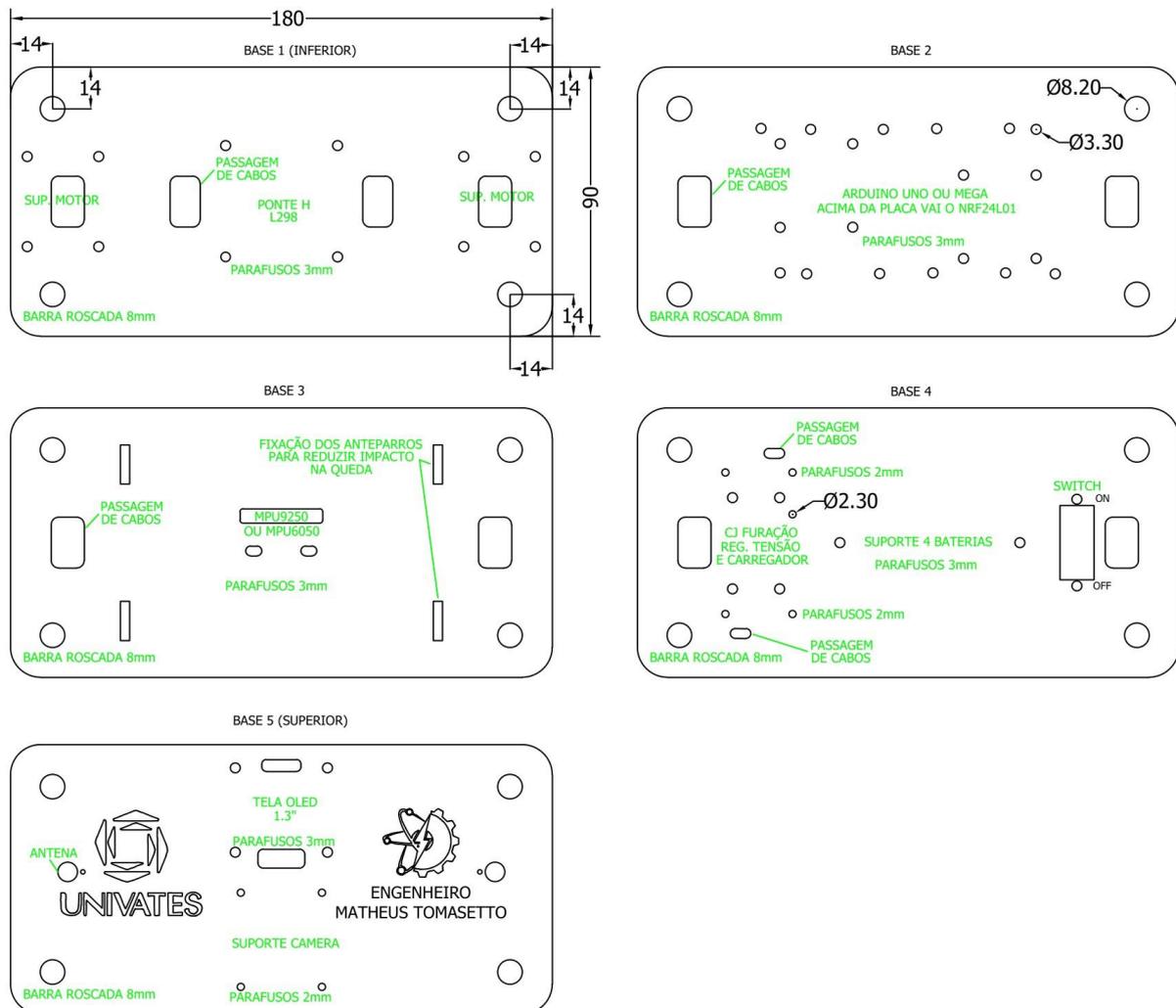
Item	Descrição	Quantidade (un)	Valor unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
1	Microcontrolador Arduino Nano	1	48,15	48,15
2	Módulo de transmissão de dados sem fio nrf24l01 + 2.4g	1	28,42	28,42
3	Placa de Fibra de Vidro Cobreada Dupla Face 10x15cm	1	24,67	24,67
4	Encoder rotativo EC11 estriado + Knob	1	11,95	11,95
5	Potenciômetro Vertical Único RK097N B20K + Knob	1	6,98	6,98
6	Joystick 3 eixos	2	17,59	35,18
7	Switch deslizante 3 posições	1	5,45	5,45
8	Módulo medidor de bateria MAX17043, Interface I2C	1	26	26
9	Elementos diversos de fixação de nylon M2.5 (parafusos, porcas e espaçadores)	1	1,84	1,84
10	Suporte bateria 18650	2	16,56	33,12
11	Bateria 18650 Li-Ion Recarregável 3.7V 3800mAh	2	19,62	39,24
12	Regulador de tensão AMS1117 3.3V	1	5,32	5,32
13	Regulador de tensão AMS1117 5.0V	1	5,32	5,32
14	Kit pasta para solda PPD S600	1	43,8	43,8
15	Botões 6x6x13	7	1,23	8,61
16	Resistores 0805 valores variados	17	0,15	2,55
17	Capacitores 0805 (10nF, 22uF e 100uF)	8	0,26	2,08
18	Diodo 1N4007	1	0,25	0,25
19	LED 3mm	2	0,3	0,6
20	Conjunto de barramentos e pinos diversos para fixação de componente	1	11,1	11,1
21	Elementos de fixação de nylon M2.5 (parafusos, porcas e espaçadores)	1	8,56	8,56
22	Cloreto Férrico Ou Percloroeto De Ferro 98% 250g Implastec	1	28,11	28,11
23	Carregador de multiplas celulas (2S) de bateria de lítio Step-Up Boost	1	26,19	26,19
			TOTAL	403,49

O custo total do projeto é de R\$ 1447,99, englobando não apenas os custos de importação, mas também os impostos incidentes nos materiais. Vale destacar que esse valor é calculado com base na quantidade unitária, sem considerar que os componentes foram adquiridos em dezenas ou centenas de unidades.

Os desenhos a seguir ilustram a disposição de todas as furações e a colocação dos componentes utilizados no projeto. Para simplificar a determinação das furações, o design do robô foi exportado do Inventor e ajustado no AutoCAD. Em seguida, os desenhos 2D dos componentes foram obtidos nos sites dos fabricantes/vendedores e, posteriormente, esses componentes foram alinhados nas bases, garantindo que

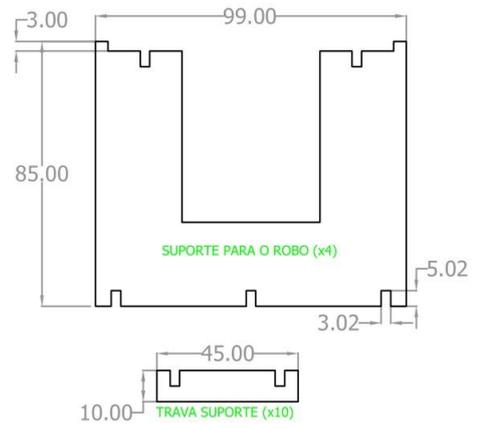
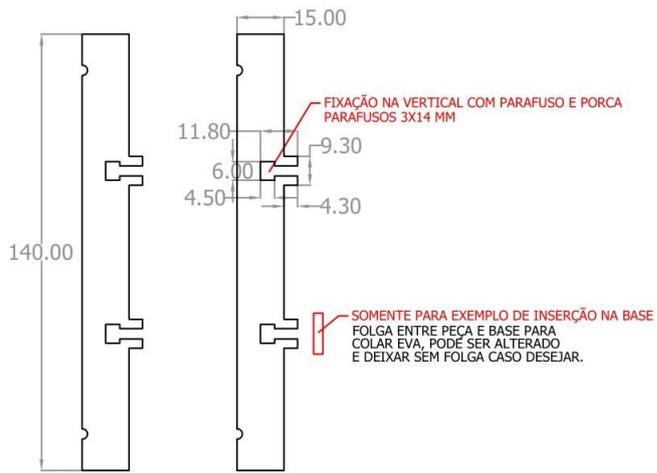
permanecessem centralizados com o eixo do robô. Finalmente, a posição das furações foi verificada em relação aos elementos físicos para garantir sua precisão.

As dimensões estão expressas em milímetros e o desenho é meramente representativo, não correspondendo à escala original de 1:1.

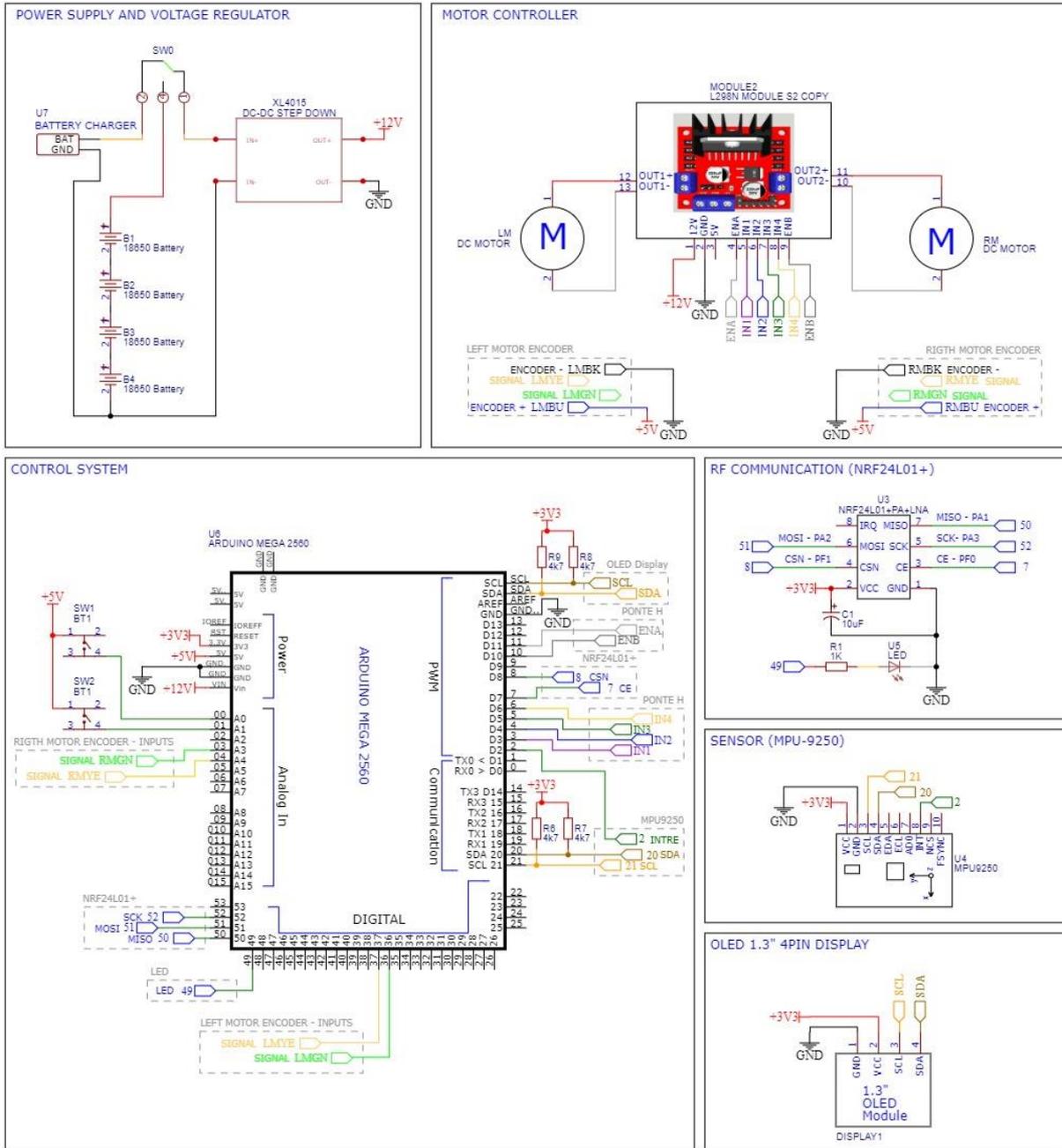


Os detalhes a seguir foram incorporados durante o desenvolvimento do projeto. À esquerda, é possível observar um conjunto de anteparos, cujo propósito é proteger e minimizar o impacto de quedas nos componentes eletrônicos e suas conexões. A fixação na base do robô foi realizada utilizando parafusos e porcas de 3 mm e, para absorver o impacto, inseriu-se espuma sintética EVA entre as placas de MDF. Além disso, foram posicionadas espumas nas extremidades dos anteparos para amortecer o impacto após uma queda. Com o intuito de facilitar a implementação e a montagem do robô, também foi projetado um pequeno suporte para sua sustentação, este exibido à direita.

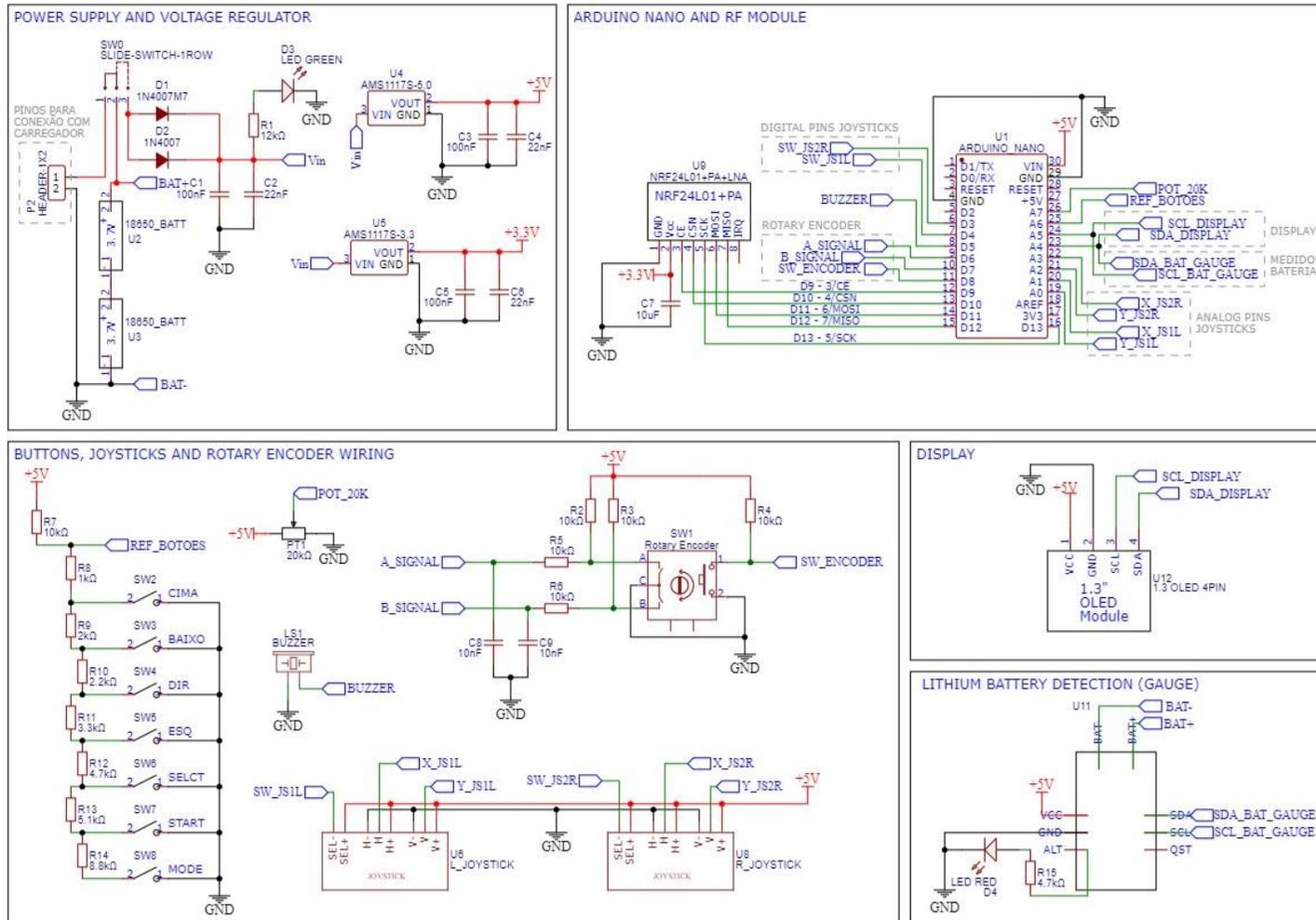
ANTEPARRO PARA REDUZIR IMPACTO NA QUEDA



APÊNDICE B – DIAGRAMA ELÉTRICO DA PLANTA



APÊNDICE C – DIAGRAMA ELÉTRICO E CIRCUITO DO CONTROLE REMOTO



OBS.: - Diodo D2 adicionado devido à indisponibilidade de um diodo SMD.

- R1 deve ser dimensionado conforme a tensão das baterias, podendo ser de valor maior dependendo das tensões das baterias em série U2 e U3

Nas figuras a seguir, é possível visualizar o esquema do circuito aplicado à placa de fibra de vidro cobreada dupla face. Ambos os desenhos foram espelhados e estão representados na escala real utilizada no projeto, permitindo a reprodução do controle a partir desses diagramas.

