

PROTÓTIPO DE UM LANÇADOR DE BOLAS DE TÊNIS, BASEADO NA INTEGRAÇÃO DE COMPONENTES DISPONÍVEIS NO MERCADO

ALUNO: FUAD ANDRADE CHEQUER KHOURY, 99103

ORIENTADOR: MAURO DE OLIVEIRA PRATES

E-MAILS: FUADKHOURY@UFV.BR, MAUROPRATES@UFV.BR

Resumo - Uma máquina de lançar bolas de tênis, é um equipamento para treino, que busca simular um jogador. Para isso, o equipamento deve ser capaz de disparar bolas em diferentes ângulos, cadenciar a frequência de lançamento, além de lançá-las com velocidade de até 100km/h, com diferentes tipos de efeitos.

Este projeto teve como objetivo construir um protótipo de um lançador de bolas de tênis, baseado na integração de componentes disponíveis no mercado, desenvolvendo soluções que tornem possível a construção de um equipamento de alto valor, com o mínimo de usinagem e personalização de atuadores.

Todas essas articulações e velocidade de lançamento, trazem desafios quanto a construção do equipamento. Além disso, o equipamento final, capaz de receber uma série de instruções via *bluetooth* e realizar diferentes lançamentos automaticamente, forçando o jogador a se movimentar pela quadra e treinar diferentes situações de jogo. Por fim, foram realizados testes em campo, e os resultados se mostraram promissores para um primeiro protótipo.

Palavras-chave: ESP 32, atuador, servo motor, sensor, controle.

1 - INTRODUÇÃO

Equipamentos automatizados são amplamente utilizados nos dias de hoje, para realizar tarefas repetitivas. No âmbito dos esportes, equipamentos de treinamento estão cada vez mais sendo utilizados como ferramentas auxiliares aos treinadores, pois possuem alto grau de repetibilidade e possibilitam que os treinadores se aproximem dos seus alunos para possíveis correções [1].

A construção de um lançador automático de bolas de tênis funcional, requer o controle de cinco motores distintos. Dois desses motores são responsáveis pelo processo de lançamento das bolas, enquanto um deles é designado para ajustar a altura do lançamento e outro para controlar a direção. Por fim, o quinto motor é responsável por cadenciar o tempo entre cada lançamento e aproveitar todas as bolas do reservatório do equipamento. Essa integração e controle dos motores permite o funcionamento suave e eficiente do lançador, proporcionando uma experiência de treinamento para jogadores de tênis.

O controle dos atuadores é realizado por meio de uma placa eletrônica, que foi montada integrando diferentes placas disponíveis no mercado. Para processar os dados e executar os comandos, optou-se pela utilização de uma placa ESP 32 (Figura 3.7). Esta é responsável por ler os dados dos sensores, estabelecer a comunicação com o usuário por meio do aplicativo *Serial Bluetooth Terminal* e enviar os sinais de comando. Esses sinais de comando são utilizados como entradas para as placas de potência.

A estrutura do equipamento foi construída utilizando uma combinação de aço e MDF. Para a transferência de potência dos motores, foram empregados acoplamentos tanto com peças disponíveis no mercado quanto em peças customizadas, modeladas

no *software Fusion 360* e produzidas na impressora 3D disponível no departamento de engenharia elétrica. Essa abordagem permite adaptar os acoplamentos às necessidades específicas do projeto, garantindo uma conexão eficiente e confiável entre os motores e as cargas envolvidas no sistema.

2 – OBJETIVOS

2.1- Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo construir um protótipo de um lançador de bolas de tênis, baseado na integração de componentes disponíveis no mercado, desenvolvendo soluções que tornem possível a construção de um equipamento de alto valor, com o mínimo de usinagem e personalização de atuadores. Com a finalidade de reduzir custo em baixa escala e com processos simples. Por fim, o equipamento é comparado as máquinas disponíveis no mercado. Além disso, foi desenvolvida a placa eletrônica para controlar o equipamento, essa também foi baseada na integração de placas eletrônicas disponíveis no mercado

2.2 Objetivos específicos

- Transmitir movimento dos atuadores, utilizando polias e mancais.
- Construir peças com corte a laser, e impressão 3D.
- Desenvolver *software* de comando em C++.
- Projetar e construir placa eletrônica.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Atuadores

3.1.1 Motor CC

Responsáveis por acelerar duas roldanas de nylon os motores de ímã permanente, possuem alto torque e fácil controle de velocidade [2]. Cada motor deve ser acionado independente um do outro, isso porque de a relação de velocidade entre essas roldanas, é capaz de gerar diferentes efeitos na bola. Os motores em questão, Figura 3.1, são de 400W de potência, e chegam a 6.000 RPM quando alimentados com 24V [3].

Apesar de uma pequena carga acoplada aos motores (Roldana de nylon), esses motores precisam de alto torque, pois eles devem ser capazes de acelerar e desacelerar rapidamente, para que seja possível realizar diferentes lançamentos com um curto intervalo de tempo entre eles, cerca de 2 segundos.

Figura 3. 1 – Motor CC ímã permanente escovado



(a) Estrutura [3]

Modelo	Tensão (V)	Velocidade, 24V (RPM)	Torque (mN.m)
400W	12 – 24	6.000 RPM	500

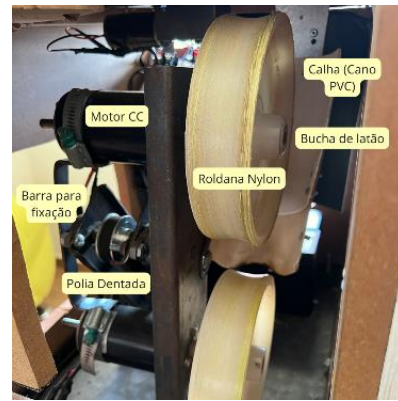
(b) Características elétricas [3]

A estrutura de fixação dos motores, é composta por uma chapa metálica e 4 parafusos na parte da frente. A fim de reduzir a vibração nos motores eles são fixos na parte posterior, por meio de uma barra chata dobrada e duas abraçadeiras metálicas de rosca sem fim. As roldanas de nylon, serão fixadas ao eixo do motor por meio de uma flange em latão e parafuso allen sem cabeça. A figura 3.2 ilustra esse sistema.

Figura 3.2 - Braço lançador



(a) Modelo 3D



(b) Montagem final

3.1.2 Servo Motor

Para movimentar o braço lançador, o servo motor da Figura 3.3, foi escolhido. Esse atuador é comercializado para atuar em carrinhos de controle remoto, e com pequenas adaptações é capaz de movimentar a chapa que segura as roldanas (Figura 3.2).

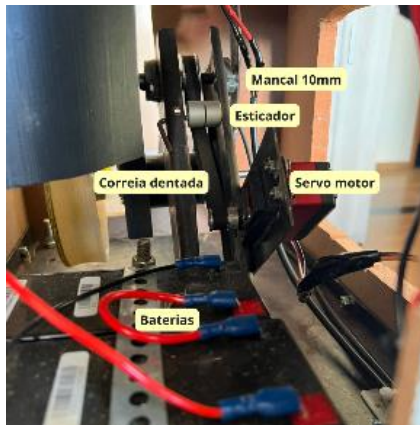
O servo motor supracitado, foi escolhido devida a sua construção robusta, formado por um micromotor CC, caixa de engrenagem em metal, potenciômetro para controle da posição e uma placa de comando ponte H, capaz de ligar o motor em ambas direções, todos imbutidos no encapsulamento da Figura 3.3.

Para conectar o eixo do servo ao eixo que sustenta o sistema 1 (Figura 3.2), foi adotado o uso de polias dentadas. Essas polias, disponíveis no mercado para impressoras 3D, são fabricadas em alumínio e permitem a transmissão do movimento do motor para o eixo desejado, com precisão. No contexto desse projeto, foram empregadas polias com uma proporção em número de dentes igual a 1:3, o que resulta em um torque final de 3 vezes maior que o torque do servo motor. Em contra partida a velocidade angular é reduzida também em 3 vezes, nesse caso isso não é um problema, visto que o motor é capaz de girar 180° em 390ms [4], conforme resumido na Tabela 1. A revolução de 180° resulta em 60° no sistema 1, o que é suficiente para a aplicação.

Figura 3.3 – Servo motor



(a) Servo motor



(b) Montagem Final

Tabela 1 – Parâmetros do servo motor [4]

Servo Motor		
Parametro	Valor	Unidade
Tensão de operação	6,4 – 8	V
Corrente nominal	400 – 510	mA
Torque máximo	60	Kg.cm
Velocidade angular	2,16	ms/1°

3.1.3 Motor com caixa de redução e eixo rosca sem fim

Para alimentar o lançador com bolas de tênis foi utilizado o conjunto disco alimentador mostrado na Figura 3.4 (a) e (b) e um motor (Figura 3.4 (c)). O disco alimentador tem a função movimentar as bolas dentro do recipiente em que elas ficarão armazenadas, quando um dos 4 buracos do disco alimentador encontra com o buraco da base, a bola de tênis cai em direção a calha (Figura 3.2 (a)), e é lançada.

Para girar o disco, foi escolhido o motor da Figura 3.4 (c), que quando alimentado em 24 V, gira a 7RPM [5]. Esse motor foi escolhido devido a seu alto torque, mesmo com baixa potência de motor, além disso seu eixo roscado facilita a conexão com o disco.

Outra vantagem desse motor, é a possibilidade do controle de sua velocidade para realizar o controle do intervalo de tempo entre cada lançamento. O motor girando a sua velocidade máxima, 7RPM, é capaz de atirar uma bola a cada 2,15 segundos, isso porque a cada revolução completa (8,57s) são lançadas 4 bolas.

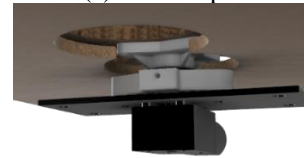
O disco alimentador foi construído em MDF perfurado com corte a laser (Figur 3.4 (a)). A fixação entre o motor e o disco é feito com a flange da Figura 3.4 (d) que é parafusada diretamente no disco. A flange foi projetada para encaixar em duas porcas fixadas ao eixo.

Na Figura 3.4(b) pode-se observar uma chapa metálica para fixação do motor, mancal branco, também projetado para impressão 3D junto a rolamento comercial M8.

Figura 3.4 – Alimentador



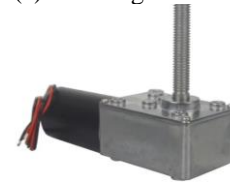
(a) Vista Superior



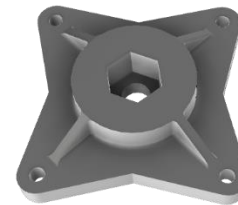
(b) Vista inferior



(c) Montagem Final



(d) Motor CC com caixa de redução [5]



(e) Flange

3.2 Eletrônica – Hardware

A construção de uma placa de comando robusta (Figura 3.5) foi essencial para controlar o equipamento com segurança e eficiência. Essa placa integrou de maneira confiável, diferentes modelos de placas eletrônicas, garantindo a robustez necessária para um dispositivo que é frequentemente transportado. Além disso, como o equipamento é utilizado em uma quadra de tênis, existe a possibilidade de ser atingido por uma bola durante o uso, por isso, boas fixações e conexões elétricas são fundamentais para manter a funcionalidade e a durabilidade do sistema. Além disso, a placa integra, capacitores para reduzir a queda de tensão no momento de aceleração os motores, fúsel para proteção do sistema, chave Liga/Desliga e plug para carregador, tudo isso integrado na parte interna do equipamento,

deixando a vista dos usuários apenas a chave Liga/Desliga, entrada para carregador e porta fúsel para eventual troca.

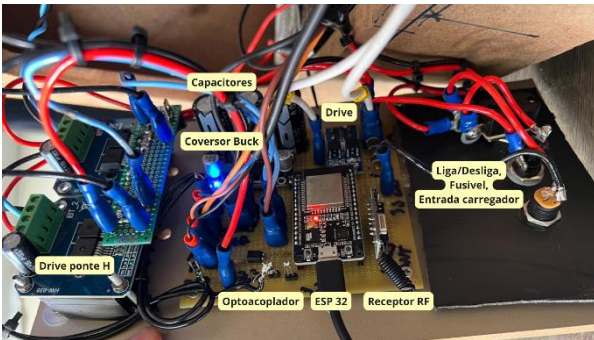


Figura 3.5 – Placa eletrônica de controle

3.2.1 Controlador – ESP 32

O ESP32 (Figura 3.6) é uma placa de desenvolvimento que integra robustez computacional com conectividade Wi-Fi e Bluetooth, muito comum em aplicações de Internet das Coisas (IoT). Equipado com um microcontrolador dual-core Tensilica LX6 que pode operar até 240 MHz, oferece uma ampla gama de interfaces de entrada/saída, incluindo GPIOs, ADCs de 12 bits, UART, SPI, I2C, entre outras [6]. A placa suporta PWM ajustável, permitindo variar a frequência dos pulsos conforme necessário para controle preciso de motores e outros dispositivos. Essa flexibilidade não apenas melhora a eficiência energética, mas também oferece uma resposta mais refinada e suave em sistemas de controle de motores.

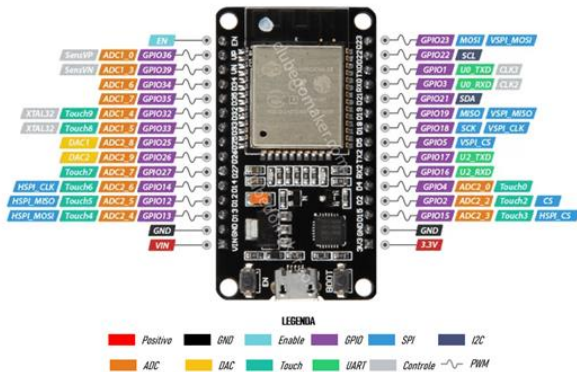


Figura 3.6 – ESP 32 [7]

Este microcontrolador opera com sinais de 3,3 volts e é compatível com a Arduino IDE, proporcionando um ambiente de desenvolvimento familiar baseado em C/C++. Isso simplifica o processo de programação, permitindo que desenvolvedores implementem desde projetos simples até soluções complexas

3.2.2 Controle de velocidade dos motores CC 400W

Como o objetivo final do equipamento é ser capaz de executar lançamentos sucessivos de forma variada, é essencial ajustar velocidade dos motores entre cada lançamento. Como ambos sempre giram no mesmo sentido, o controle deles é feito apenas para a velocidade angular. Para isso, foi utilizada a placa de potência representada na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Placa para controle de velocidade dos motores CC 400W [8].

Essa placa é capaz de acelerar e desacelerar o motor, sendo atuada por um sinal PWM gerado pelo microcontrolador ESP 32, no qual, por meio da largura do pulso recebido, a placa controla a velocidade do motor. Quando o sinal recebido pelo microcontrolador está alto o drive fecha as chaves de tal forma que o motor é conectado a tensão da fonte, com isso, corrente elétrica flui em direção ao motor. No momento que o sinal é baixo, o driver fecha suas chaves de forma que a corrente elétrica tenha um caminho para fluir, então a corrente reduz até atingir um valor negativo, momento em que a energia armazenada está dissipando em forma de calor no drive. Por fim, a média do tempo em que o sinal PWM permanece alto e baixo define a tensão média aplicada ao motor, controlando assim sua velocidade, como descrito na fórmula 7.31 de [2].

3.2.3 Velocidade do alimentador

Para controlar a frequência dos lançamentos, é necessário alterar a tensão aplicada no motor do alimentador (Figura 3.4), por meio do drive mostrado na Figura 3.8, que de forma similar a placa da Figura 3.7, controla a tensão aplicada ao motor, alterando sua velocidade de rotação.

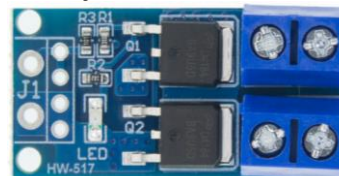


Figura 3.8 – Drive com controle PWM [9]

O módulo recebe um sinal PWM de 3,3 V a 20 V, os MOSFETS possuem uma frequência máxima de chaveamento de 20kHz, e regulam a tensão de saída. Este modelo é mais simples, e é capaz de alimentar o motor apenas com uma polaridade, fazendo com que não seja capaz de frear o motor. No momento que o duty cycle diminui, apenas o atrito e a carga desaceleram o eixo do motor. Porém, neste caso, como o motor gira em

baixa rotação e com carga, a própria carga é capaz de frear o motor quando a tensão média aplicada a ele reduz, chegando rapidamente na velocidade desejada.

3.2.3 Sensor magnético

A fim de fazer diferentes lançamentos, é necessário monitorar o momento em que uma bola é lançada, para que os motores alterem sua velocidade e ângulo, para o próximo lançamento. A forma escolhida para registrar esse momento, foi a inserção de 4 ímãs permanentes na parte inferior do anel alimentador Figura 3.4 (a). E um sensor magnético na base (Figura 3.4 (b)). Com isso, no momento em que o ímã passa sobre o sensor magnético, o controlador registra que uma bola acaba de cair para o braço lançador.

Entretanto, o sensor magnético (Figura 3.9) opera com uma tensão de 6V – 36 V. Já o controlador (Figura 3.6) possui o sinal de entrada digital de 3,3 V, por isso foi implementado um optoacoplador (Figura 3.10), que além de possibilitar a leitura pelo controlador, isola eletricamente o circuito que liga o sensor ao microcontrolador ESP 32 (Figura 3.6)



Figura 3.9 – Sensor magnético 6-36Vdc [10]

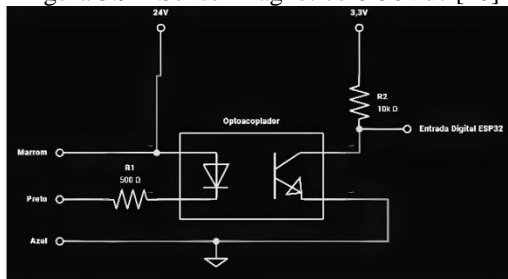


Figura 3.10 - Esquema de ligação sensor magnético

A Figura 3.10 ilustra o esquema de ligação do sensor magnético e optoacoplador, o sensor magnético funciona como um transistor NPN, e sua ligação é feita com 3 fios: Marrom, preto e azul. O sensor foi alimentado com 24, e em série com o LED do optoacoplador liga-se um resistor de 500Ω para limitar a corrente. No momento que o sensor detecta campo eletromagnético ele fecha seus terminais, fazendo com que corrente flua pelo LED e o sinal de luz aciona o fototransistor, que fecha o circuito de controle, neste momento o sinal lido pelo ESP vai a zero, detectando que uma bola foi lançada.

3.2.5 Controle via RF

A fim de melhorar a experiência do usuário foi implantado o controle remoto RF (Figura 3.11), isso porque o jogador pode definir os lançamentos pelo celular através da conexão *bluetooth* e iniciar os

lançamentos apenas com um pequeno controle que cabe no bolso.

A placa receptora recebe o sinal do controle e ativa umas das quatro saídas digitais conectadas ao microcontrolador, de acordo com o botão apertado. Ou seja, até quatro comandos rápidos podem ser implantados para que o usuário possa controlar a máquina à distância, sem a necessidade de carregar seu celular. Outra vantagem desta abordagem é que a placa é responsável por decodificar o sinal enviado pelo transmissor, poupando assim processamento do ESP 32.



Figura 3.11 – Receptor e transmissor RF 433Mhz [11]

3.2.6 Conversor Buck

Para regular a tensão de alimentação dos Servo Motores o controlador CC/CC Buck, da Figura 3.12 foi utilizado.

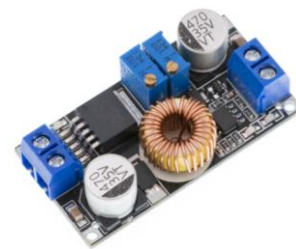


Figura 3.12 – Conversor Buck [12]

Este conversor pode ser utilizado em diversas aplicações, e sua função é reduzir a tensão e mantê-la estável. Este conversor pode ser alimentado com uma tensão entre 8 V e 34 V. A saída pode variar de 1,25 V até 32 V sendo que a tensão de saída sempre será menor que a de entrada. Para ajustar a tensão de saída os *trimpots* azuis (Figura 3.12) são ajustados, alterando a saída do conversor. Após o ajuste para a tensão desejada, a carga deve ser conectada, para que seja feito um novo ajuste de tensão. A corrente de saída máxima é de 5 A. O conversor utiliza um *moosfet* para chavear, com uma frequência de chaveamento igual a 180kHz

3.3 Comando – Software

O controle da máquina de lançar bolas de tênis é realizado pela placa ESP32 (Figura 3.6). O código, desenvolvido em C++ na plataforma Arduino IDE, foi gravado no microcontrolador. Este programa é capaz de

processar comandos recebidos via *bluetooth* e rádio frequência, executar sequências de lançamentos variados, interpretar sinais de sensores e enviar sinais aos atuadores.

O código inicia com a inclusão de bibliotecas essenciais, como a "Servo.h", que simplifica o controle de servomotores. Essa biblioteca fornece funções que permitem definir a posição desejada do servo, facilitando o controle do equipamento.

Após a inclusão das bibliotecas, variáveis de comando e auxiliares são declaradas e inicializadas, e então, são definidos os pinos que conectam as placas de potência, o comando do servomotor e os sensores do sistema. A Tabela 2 resume os pinos configurados no ESP32, indicando suas funções e se são usados como entradas ou saídas.

Tabela 2 – Ligações do microcontrolador ESP32

Pino	Função	Direção
Pinotm	Controle do motor superior (Figura 3.1 (a))	Saída – Placa de controle de velocidade (Figura 3.7)
Pinobm	Controle do motor inferior (Figura 3.1 (a))	Saída – Placa de controle de velocidade (Figura 3.7)
Pinostart	Controle do disco alimentador (Figura 3.4 (a))	Saída – Drive PWM (Figura 3.8)
PinoVservo	Controle do ângulo vertical	Saída – Ligado direto ao Servomotor (Figura 3.3 (a))
Pinofimdecorso	Sensor magnético (Figura 3.9)	Entrada – Circuito da Figura 3.10
PinoRF1	Controle remoto RF botão A	Entrada – Ligado direto ao ESP 32
PinoRF2	Controle remoto RF botão B	Entrada – Ligado direto ao ESP 32

Para os motores de corrente contínua, são configurados canais PWM (Modulação por Largura de Pulso), que controlam a velocidade de rotação. O canal 2 é atribuído ao pino responsável pelo motor superior (pinotm), enquanto o canal 3 controla o motor inferior (pinobm). Ambos os canais são ajustados para operar com uma frequência de 10kHz, permitindo que o microcontrolador envie sinais PWM para os pinos correspondentes, que estão conectados aos drives (Figura 3.7), regulando a velocidade dos motores.

Já o controle do servomotor que ajusta o ângulo vertical dos lançamentos é feito associando o pino do servomotor (pinoVservo) a um intervalo de pulsos específicos, criado pela biblioteca "Servo.h". Esse ajuste

permite que um sinal digital do microcontrolador posicione o braço lançador com precisão.

O *software* inicia sua interação com o usuário ao exibir na tela do smartphone os comandos disponíveis, suas sintaxes e funcionalidades. A função principal do programa, *void loop()*, começa verificando se há algum comando recebido. Se houver, o comando é lido e armazenado na variável comando.

Para identificar o comando enviado, o programa utiliza uma série de condicionais "if" para verificar os primeiros caracteres da variável comando. Quando um comando é reconhecido, o programa executa a ação correspondente no bloco "if" apropriado.

Um exemplo de bloco "if" é o que controla o ângulo vertical dos lançamentos, identificado quando a *string* comando começa com a letra "v". O usuário pode especificar um ângulo entre 0 e 60, que é convertido para o ângulo correspondente e enviado ao servomotor, utilizando o pino especificado na Tabela 2. Caso o valor enviado seja superior a 60, o programa limita o ângulo a 60°, devido a restrições mecânicas do equipamento.

Uma função utilizada em contextos de treinamento é o comando "prog", que permite ao usuário enviar uma sequência de comandos que definem as características de uma sequência de lançamentos e o tempo entre eles. O tempo é controlado pela velocidade do motor da Figura 3.4 (c), em conjunto com o sinal lido pelo sensor magnético. A sequência de lançamentos é armazenada na variável prog.

Após feita a programação, o usuário pode iniciar os lançamentos usando o botão "A" do controle RF ou enviando o comando "1" pelo *bluetooth* do *smartphone*. O treinamento pode ser interrompido a qualquer momento, basta o usuário precionar o botão "B" ou enviando o comando "0" por *bluetooth*.

Durante a sequência de lançamentos, o programa permanece em um loop, entretanto, verifica frequentemente a porta serial e o pino digital do controle RF (Tabela 2). Se qualquer comando for detectado, o equipamento desliga todos os atuadores como medida de segurança. Além disso, um temporizador é ativado, caso o sensor magnético não for acionado por mais de três vezes o tempo do *delay* entre os lançamentos, o motor do disco alimentador é desligado para evitar que uma bola presa cause danos ao motor.

4 Resultados

4.1 – Ângulo vertical

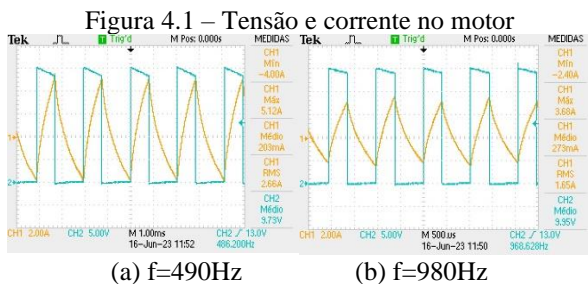
A fim de testar a precisão e repetibilidade do servo motor foram feitas 3 marcações em uma tábua instalada ao lado do braço alimentador (Figura 3.2), com marcações nos ângulos de 30°, 45° e 60°. Após isso, o comando foi enviado para que, a cada 5 segundos, o equipamento variasse a velocidade dos motores e também o ângulo do braço alimentador.

No primeiro experimento foram executados 30 movimentos do braço alimentador, e em todos eles o braço atingiu a posição desejada, com um erro mínimo praticamente imperceptível.

Após isso, durante o funcionamento foi desconectada a alimentação do equipamento e depois reconectada, enviando o mesmo comando. Nesse contexto, o equipamento também entregou um resultado preciso.

4.2 – Eficiência dos motores CC (3.1)

Para visualizar o funcionamento da driver ponte H, foram medidos, a tensão nos terminais do motor e a corrente, como ilustra a Figura 4.1. Em azul, a tensão, e amarelo a corrente. Com isso, conclui-se que no momento de sinal baixo do PWM, as chaves fecham um curto nos terminais do motor, levando a tensão para 0V



Esse modo de operação do drive faz com que a velocidade do chaveamento seja muito importante para a eficiência do equipamento, visto que o motor acelera e desacelera a cada ciclo, ou seja, quanto maior for o tempo de cada ciclo, mais tempo o motor desperdiça energia em forma de calor no momento de frenagem [2].

Essa diferença pode ser observada ao comparar os gráficos da Figura 4.1 (a) e (b), em que, nos dois cenários o mesmo *duty cycle* foi empregado. Observa-se, fazendo a leitura da tensão média nos dois gráficos, representado por CH2 médio, elas possuem valores similares, ou seja, os motores giram em uma mesma velocidade[2]. Entretanto, a potência necessária para manter esse motores em uma velocidade constante é diferente de acordo com a frequência de chaveamento.

Com o chaveamento de 490Hz (Figura 4.1 (a)) a corrente é de:

$$I_{\text{pico a pico}} = 9A \text{ e } I_{\text{RMS}} = 2,6A,$$

Com a frequência de chaveamento de 980Hz (Figura 4.1 (b)):

$$I_{\text{pico a pico}} = 6,1A \text{ e } I_{\text{RMS}} = 1,6A$$

Com a frequência de chaveamento de 980Hz, observa-se uma melhora significativa, em que a corrente RMS diminui 38%.

Devido a grande diferença observada, o microcontrolador ESP32 se mostrou a escolha certa para o projeto, visto que este é capaz de gerar um sinal PWM com frequência maiores que o microcontrolador Arduino.

Assim, novas frequências de chaveamento foram levadas a teste, com um *duty cycle* de 50%.

As Figuras 4.1 , 4.2 e 4.3 ilustram: Em azul, o sinal PWM enviado para a placa de controle de velocidade (Figura 3.6) e em amarelo a corrente do motor. As imagens das Figuras 4.1 e 4.2 mostram as frequências de chaveamento que o microcontrolador Arduino é capaz de operar, aproximadamente, 500Hz e

1.000Hz, respectivamente. Já a Figura 4.3 ilustra a o funcionamento do motor com um chaveamento de 5.000Hz, frequência que o microcontrolador ESP32 é capaz de gerar, sem comprometer outras funcionalidades.

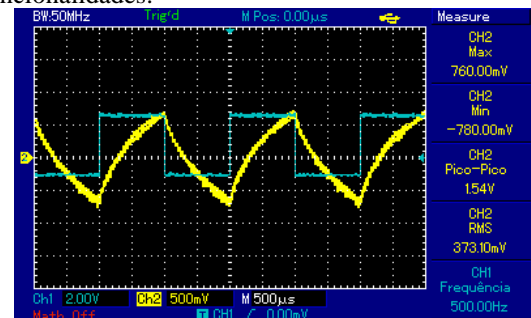


Figura 4.2 – *Duty* 50%, Frequência 500Hz

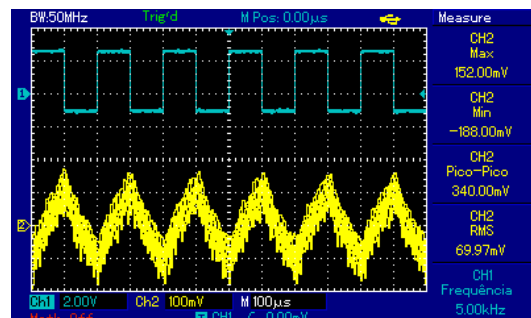


Figura 4.3 – *Duty* 50%, Frequência 5000Hz

A importância da velocidade de chaveamento do PWM, pode ser percebida de forma muito clara neste momento do experimento.

Devido ao funcionamento do drive, o motor acelera e freia a cada ciclo, por isso, quanto maior a frequência, menos tempo o motor tem para dissipar energia antes de acelerar novamente, com isso, é necessário menos potência para manter o motor a uma velocidade constante. Por isso, apesar de ser alimentado em corrente contínua, sempre com a mesma polaridade, observamos uma corrente alternada no motor.

Observa-se na Figura 4.2:

$$I_{\text{pico a pico}} = 15,4A \text{ e } I_{\text{RMS}} = 3,7A,$$

E na Figura 4.3,

$$I_{\text{pico a pico}} = 3,4A \text{ e } I_{\text{RMS}} = 0,69A.$$

Portanto, observou-se que com o mesmo *duty cycle*, a corrente RMS para manter o motor em velocidade constante foi 5 vezes menor quando o chaveamento ocorreu em 5000Hz em comparação ao chaveamento de 500Hz.

Além disso, as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram a corrente fornecida pela fonte de bancada, que ao aumentar a frequência de chaveamento, essa diminui significativamente. Além dos dados elétricos obtidos, experimentalmente o motor ficou quente ao toque, ao operar com a frequências de 500Hz e 1000Hz, e ao aumentar a frequência, o motor não esquentou de forma que fosse sensível ao toque.

Para a análise em osciloscópio, valores superiores a 5000Hz, houve muita interferência no sinal obtido pelo amperímetro. Então, a fim de escolher a

frequência de chaveamento mais adequada, foram feitos testes práticos. Para a frequência de 20.000Hz, os *MOSFETs* aqueceram muito nos momentos de aceleração e frenagem dos motores, e apesar do calor se dissipar rapidamente, o fato do equipamento precisar ser capaz de acelerar e frear diversas vezes em um curto intervalo de tempo, esta frequência foi descartada. Por fim, a frequência escolhida foi de 10.000Hz. Neste caso, as chaves aqueceram pouco, e mesmo após 1 hora de uso, os motores não aqueceram e o ruído proveniente do chaveamento foi bastante reduzido, sem incomodar a audição dos usuários.



Figura 4.4 – Frequência 500 Hz , $I_{in} = 1,23 A$



Figura 4.5 – Frequência 1.000 Hz , $I_{in} = 0,73 A$



Figura 4.6 – Frequência 5.000 Hz , $I_{in} = 0,38 A$

Ao analisar as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 pode-se observar também que a corrente fornecida pela fonte de bancada para manter o motor a uma velocidade constante cai drasticamente com o aumento da frequência de chaveamento.

4.3 – Aceleração dos motores CC (Figura 3.1)

Para testar a capacidade de acelerar e desacelerar os motores CC foi enviado um comando para que a cada 3 segundos o sinal PWM enviado pelo ESP 32 alterasse o *duty cycle* entre 40% e 80%,.

Com isso, quatro parâmetros foram analisados. Em primeiro lugar, a capacidade do motor de acelerar e desacelerar de forma rápida. Os motores possuem um tempo de resposta tão alto que foi adicionado em *software* um *delay* de 500ms, para que toda vez que o sinal PWM alterar, que não seja feito de forma imediata e sim o PWM deve aumentar e diminuir de 1 a 1 dentro de um intervalo de 500ms , a fim de não drenar uma corrente muito elevada das bateras, além de não forçar o o servo motor, visto que quando o sinal PWM é alterado de forma instantanea os motores aceleram muito rápido, causando uma reação no braço alimentador que forçam os mancais, correia e servo motor.

4.4 – Análise da Precisão e Dispersão dos Lançamentos

Para avaliar a precisão do lançador de bolas de tênis, foram realizadas duas baterias de lançamentos, com diferentes parâmetros, como indica a Tabela 3:

Tabela 3: Configuração da máquina nos lançamentos.

Bateria de lançamentos 1		Bateria de lançamento 2	
Motor Superior	99%	Motor Superior	50%
Motor inferior	50%	Motor inferior	50%
Ângulo Vertical	15°	Ângulo Vertical	50°

(a) Lançamento que simula *top spin* (b) Lançamento que simula *lob*

O primeiro lançamento, que simula um *top spin*, é a situação mais comum em uma partida de tênis, onde a bola se dirige ao jogador com rotação no mesmo sentido de seu movimento, acelerando após quicar no chão. O segundo lançamento, um *lob*, caracteriza-se por uma parábola alta, que exige que o jogador faça um *smash* para tentar ganhar o ponto, esta situação de jogo, também é muito treinada pelos atletas.

Em ambos os lançamentos a maquina foi posicionada no mesmo lugar, ao centro da linha de fundo da quadra, Figura 4.7. As medições das coordenadas dos pontos atingidos foram feitas, no primeiro lançamento, a partir do centro da linha de fundo da quadra, e no segundo lançamento, tomando como (0,0) o “T” da quadra, como ilustram as Figuras 4.8 e 4.9.



Figura 4.7 – Ponto de lançamento e pontos acertados

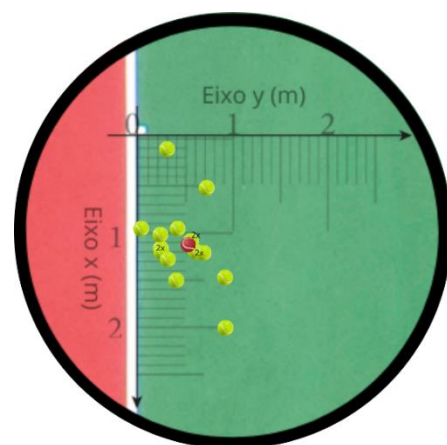


Figura 4.8 – Zoom nos pontos impactados no primeiro lançamento

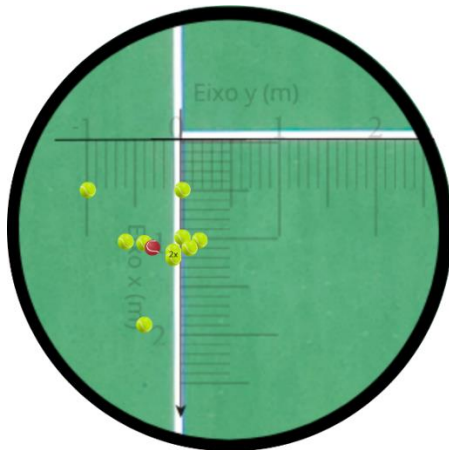


Figura 4.9 – Zoom nos pontos impactados no segundo lançamento

No primeiro teste em campo, foram realizados 15 lançamentos, e no segundo, 10 lançamentos. As coordenadas dos pontos atingidos podem ser observadas na Tabela 4:

Tabela 4: Coordenadas dos lançamentos 1 e 2

Lançamento 1			Lançamento 2		
x	y	Distância Euclidiana do ponto médio (cm)	x	y	Distância Euclidiana do ponto médio (cm)
6	43	106	53	0	59
54	82	62	98	0	25
86	52	26	103	26	49
90	16	47	113	9	33
104	30	29	107	-60	37
107	65	8	111	-38	16
107	65	8	117	-16	12
116	32	26	125	-17	19
120	40	20	192	-40	87
122	69	16	51	-97	93
126	75	23			
127	43	22			
146	100	55			
152	54	41			
202	102	101			
Ponto médio			Ponto médio		
x	y		x	y	
111	58		107	-23	

(a) Coordenadas bateria de lançamentos 1.

(b) Coordenadas bateria de lançamentos 2.

A primeira análise feita, foi calcular a distância euclidiana de cada lançamento em relação ao ponto médio de sua bateria de lançamentos. Na primeira

bateria, Tabela 4 (a), a maior distância euclidiana foi de 106 cm e a menor foi de 8cm. Observa-se também que 87% dos lançamentos ficaram dentro do raio de 1 metro do ponto médio, e 73% dos lançamentos atingiram uma distância inferior a 50cm do ponto médio dos lançamentos.

Por fim, 9 dos 15 lançamentos, 60%, atingiram dentro de um raio de 30 centímetros, como pode ser visualizado na Figura 4.8.

Já na segunda bateria de lançamentos, nenhum dos lançamentos ficou a uma distância superior a 1 metro do ponto médio. Além disso, 40% dos lançamentos atingiram dentro de um raio de 30 centímetros do ponto médio da bateria.

Ademais, o desvio padrão das amostras foi calculado para medir a dispersão dos lançamentos, como mostra a Tabela 5:

Tabela 5: Desvio padrão:

Desvio padrão		Desvio padrão	
x	y	x	y
44	25	39	36

(a) Lançamentos 1

(b) Lançamentos 2

O desvio padrão das amostras dos primeiros lançamentos foi de (44,25), com isso, conclui-se que os pontos se dispersaram mais na coordenada X do que Y, isso significa que a profundidade dos lançamentos, influenciados principalmente pela velocidade dos motores e ângulo do braço lançador, se mantiveram regulares, de forma a concluir que o equipamento é capaz de manter as velocidades dos motores e ângulo de lançamento de forma constante [13].

Já o desvio padrão de 44cm na coordenada X pode estar associado com a largura das roldanas de nylon (Figura 3.2), visto que sua largura é de 35mm, contra 65mm das bolas de tênis, isso faz com que em alguns lançamentos a bola saia com um leve ângulo na horizontal.

Na segunda bateria de lançamentos, apesar de um desvio padrão similar nas coordenadas x e y, observa-se, por meio da Figura 4.10, que três lançamentos afastaram mais do conjunto na coordenada x, provavelmente ocasionados pela largura das roldanas de nylon.

Por fim, conclui-se que o controle dos atuadores se mostrou muito eficiente, entretanto, devido ao fato das roldanas responsáveis por lançar as bolas serem de material e tamanho inadequados, alguns lançamentos ficam fora do padrão definido nas configurações do equipamento. Mas mesmo com esses pequenos desvios, a máquina apresentou boa repetibilidade em seus lançamentos.

4.5 – Comparativo de Custo

A Figura 4.10, ilustra um lançador de bolas fabricado e comercializado no Brasil, e este é usado como comparativo de custo com o protótipo deste projeto. A fim de comparar o custo de construção do protótipo foi comparado preço do equipamento

WiseBall [14] com os custos das peças do protótipo, que estão expostos na Tabela 6.



Figura 4.10 – Lançador de bolas Wiseball [14]

A seguir, na Tabela 6, são detalhados os custos das peças utilizadas na construção do protótipo. Além do baixo custo das peças, o projeto foi desenvolvido com a preocupação em minimizar o custo de mão de obra e usinagem. As peças foram escolhidas estrategicamente para simplificar a montagem do equipamento, tornando o processo de construção simples, rápido e com baixo custo de maquinário. Essa abordagem não apenas reduziu o custo total de fabricação, mas também facilitou a execução do projeto, tornando-o uma solução acessível e eficiente em comparação ao lançador de bolas Wiseball, ilustrado na Figura 4.9.

Tabela 6 – Custo das peças

Custo das peças			
Quantidade	Item	Preço	Total
1	Caixa de madeira	R\$ 150,00	R\$ 150,00
2	Roldana de nylon	R\$ 50,00	R\$ 100,00
2	Bucha de latão	R\$ 50,00	R\$ 100,00
1	Chapa da Base	R\$ 40,00	R\$ 40,00
2	Mancal 10mm	R\$ 10,00	R\$ 20,00
1	Parafuso 10mm	R\$ 10,00	R\$ 10,00
20	Parafusos + Porca	R\$ 1,00	R\$ 20,00
1	Polia Dentada	R\$ 43,00	R\$ 43,00
2	Motor CC	R\$ 185,00	R\$ 370,00
1	Servo Motor	R\$ 97,00	R\$ 97,00
1	Micromotor	R\$ 130,00	R\$ 130,00
2	Baterias	R\$ 75,00	R\$ 150,00
1	ESP 32	R\$ 48,00	R\$ 48,00
2	Drive PWM ponte H	R\$ 19,00	R\$ 38,00
1	Drive PWM	R\$ 3,00	R\$ 3,00
1	Sensor Magnético	R\$ 47,00	R\$ 47,00

Custo das peças			
Quantidade	Item	Preço	Total
1	Receptor e transmissor RF	R\$ 36,00	R\$ 36,00
1	Conversor Buck	R\$ 3,00	R\$ 3,00
1	Placa perfurada	R\$ 25,00	R\$ 25,00
1	Terminais e conectores	R\$ 20,00	R\$ 20,00
1	Botão e fusível	R\$ 20,00	R\$ 20,00
1	Carregador	R\$ 72,00	R\$ 72,00
1	Outros	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Total		R\$	1.642,00

A fim de comparar o custo do equipamento, foi escolhida o lançador da Wiseball (Figura 4.9) que é o único fabricante nacional, outros fornecedores não foram levados em consideração nessa comparação visto que o produto importado é significativamente mais caro que o nacional.

O lançador da Wiseball é comercializado em seu site [14] por R\$12.156,00 a vista no pix. Em comparação a um custo de peças de R\$1.642,00 do equipamento proposto neste trabalho.

Vale ressaltar que todo custo de desenvolvimento e programação foi desconsiderado, visto que o objetivo é estimar o custo de produção do equipamento.

Com isso conclui-se que o objetivo de montar um equipamento funcional e de baixo custo foi alcançado. Com um custo de 8 vezes menor que o equipamento comercializado nacionalmente.

5 Conclusão

Após a realização dos testes e análises, constatou-se que a máquina de lançar bolas de tênis desenvolvida apresentou um desempenho satisfatório, atendendo aos objetivos propostos. O equipamento demonstrou ser eficiente, proporcionando lançamentos consistentes e adequados para a prática de tênis, o que a torna uma excelente ferramenta de treinamento.

Além disso, o projeto mostrou-se viável economicamente, sendo uma solução de baixo custo em comparação com equipamentos similares disponíveis no mercado. A integração da placa ESP32 para o controle dos lançamentos permitiu uma automação eficaz e de fácil operação, facilitando o ajuste dos parâmetros de lançamento e aumentando a flexibilidade do treino.

Portanto, a máquina desenvolvida não só cumpre com as expectativas de desempenho como também oferece uma alternativa acessível e eficaz para treinamentos em quadra, contribuindo significativamente para o aperfeiçoamento técnico dos praticantes de tênis.

Por fim, algumas melhorias ainda podem ser feitas para melhorar o desempenho do protótipo. Para trabalhos futuros, a primeira melhoria seria alterar as

roldanas responsáveis por lançar as bolas, para roldanas mais largas e com material emborrachado.

Além disso, a capacidade de alterar os lançamentos na horizontal, é uma melhoria excencial para aumentar os desafios nos treinos.

– REFERÊNCIAS

[1] T. O. Bompa and G. G. Haff, *Periodization: Theory and Methodology of Training*, 5th ed. Champaign, IL: Human Kinetics, 2009.

[2] S. D. Umans, *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley*, 7th ed, capítulo 7.

[3] "Motor cc imã permanente 400W," Aliexpress. [Online]. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/4001297014718.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.380.7473caa4NyE01R&gatewayAdapt=glo2bra. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[4] "Servo motor," Aliexpress. [Online]. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/1005002926683562.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.239.7473caa4NyE01R&gatewayAdapt=glo2bra. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[5] "Motor cc com caixa de redução," Aliexpress. [Online]. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/1005005530830934.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.59.7473caa4NyE01R&gatewayAdapt=glo2bra. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[6] Espressif Systems, "ESP32 Series Datasheet," [Online]. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[7] "ESP32 Pinout," Clube do Maker. [Online]. Disponível em: <https://clubedomaker.com/esp32-pinout>. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[8] "Drive ponte H 400W," Aliexpress. [Online]. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/item/100500458997>

[7115.html?spm=a2g0o.order_detail.order_detail_item.6.539f4c7fSWaXoV&gatewayAdapt=glo2bra](https://pt.aliexpress.com/item/7115.html?spm=a2g0o.order_detail.order_detail_item.6.539f4c7fSWaXoV&gatewayAdapt=glo2bra). [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[9] "Drive PWM," Aliexpress. [Online]. Disponível em: https://pt.aliexpress.com/item/4000609702577.html?spm=a2g0o.order_detail.order_detail_item.18.4be34c7fAVqpzp&gatewayAdapt=glo2bra. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[10] "Sensor Magnético IM 12mm 3 Fios 6-36VDC," Mercado Livre. [Online]. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1304382606-sensor-magnetico-im-12mm-3-fios-6-36vdc-150ma-de-010mm-detecco-npn-normal-aberto-JM?matt_tool=40343894&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413655&matt_ad_group_id=133855953276&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=584156655519&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=213606259&matt_product_id=MLB1304382606&matt_product_partition_id=2268053647630&matt_target_id=aud-1966490908987:pla-2268053647630&cq_src=google_ads&cq_cmp=14303413655&cq_net=g&cq_plt=gp&cq_med=pla&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjww5u2BhDeARIsALBuLnOzQuiTpnUU0LryI99qqvYfhjt1fRrDUknrD ISP8qqZyn89E8TFLQaAlz EALw wcB. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[11] "Controle Remoto 4 Canais RF 315MHz," Mercado Livre. [Online]. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-3617552405-controle-remoto-4-canais-rf-315mhz-receptor-arduino-JM?matt_tool=63064967&matt_word=&matt_source=google&matt_campaign_id=14303413826&matt_ad_group_id=133431076203&matt_match_type=&matt_network=g&matt_device=c&matt_creative=584156655540&matt_keyword=&matt_ad_position=&matt_ad_type=pla&matt_merchant_id=725327803&matt_product_id=MLB3617552405&matt_produc

[t_partition id=2269730643578&target_id=aud-1966490908987:pla-2269730643578&cc_src=google_ads&cc_cmp=14303413826&cc_net=g&cc_plt=gp&cc_med=pla&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjww5u2BhDeARIsALBuLnNQGSTzql8Z8zxm_6v0c6uPrQNTbEOXfwQpmb-PQuTpmYWJd5jk8B0aAjLFEALw_wcB](https://www.google.com/adsense/partition?id=2269730643578&target_id=aud-1966490908987:pla-2269730643578&cc_src=google_ads&cc_cmp=14303413826&cc_net=g&cc_plt=gp&cc_med=pla&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjww5u2BhDeARIsALBuLnNQGSTzql8Z8zxm_6v0c6uPrQNTbEOXfwQpmb-PQuTpmYWJd5jk8B0aAjLFEALw_wcB).
[Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[12] "Conversor Buck," Aliexpress. [Online]. Disponível em:
https://pt.aliexpress.com/item/1084552308.html?spm=a2g0o.order_detail.order_detail_item.14.4be34c7fVjp2Kh&gatewayAdapt=glo2bra. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].

[13] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7th ed. Wiley, 2018, capítulo 3.

[14] "Canhão Lançadora de Bolas de Tênis Wiseball Tennis Pro 18Ah," Wiseball. [Online]. Disponível em:
<https://www.wiseball.com.br/canhao-lancadora-bolas-de-tenis-wiseball-tennis-pro-18ah&language=pt-br>. [Acesso em: 22 de agosto de 2024].