

Rafael Dias Campos

Jogo de Xadrez com Manipuladores Robóticos

Belo Horizonte

2023

Rafael Dias Campos

Jogo de Xadrez com Manipuladores Robóticos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG

Departamento de Computação

Curso de Engenharia da Computação

Orientador: Ramon da Cunha Lopes

Belo Horizonte

2023

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Curso de Engenharia de Computação

Avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso

Aluno: Rafael Dias Campos

Título do trabalho: Jogo de Xadrez com Manipuladores Robóticos

Data da defesa: 30/06/2023

Horário: 14:00

Local da defesa: CEFET-MG Campus II à Avenida Amazonas 7675. Prédio 17 (DECOM), sala 401.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi avaliado pela seguinte banca:

Professor Ramon da Cunha Lopes - Orientador

Departamento de Computação

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Professora Mara Cristina da Silveira Coelho - Membro da banca de avaliação

Departamento de Computação

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Professor Rogério Martins Gomes - Membro da banca de avaliação

Departamento de Computação

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Professor Tales Argolo Jesus - Membro da banca de avaliação

Departamento de Computação

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Resumo

Atualmente, existe uma grande procura por funcionários especializados em Tecnologia da Informação (TI) e áreas similares, sendo percebida no mundo todo uma carência de profissionais qualificados. Esse problema ocorre parcialmente devido a um desinteresse à capacitação técnica por parte de crianças e jovens, frequentemente devido a uma concepção de que essas áreas são difíceis. Com o foco neste aspecto, esse projeto visa desenvolver um sistema que implementa o jogo de Xadrez utilizando manipuladores robóticos. Este sistema pode ser apresentado para crianças e jovens em feiras educativas e eventos similares para introduzir conceitos básicos e instigar o interesse pelas áreas de computação, elétrica e controle. Sistemas já existentes para mover peças de xadrez com braços mecânicos geralmente apresentam um custo elevado, pois priorizam a velocidade e precisão nos movimentos para que uma máquina jogue contra um jogador humano em campeonatos. Por isso, eles não são muito adequados para usos educacionais e tem-se a necessidade de desenvolver um sistema barato e com foco na simplicidade e na capacidade de proporcionar divertimento para os jogadores. Com o desenvolvimento desse trabalho, foi possível implementar um sistema simples que permite jogar xadrez entre um jogador humano e um jogador robô ou entre dois jogadores humanos, com um deles controlando o robô.

Palavras-chave: Manipuladores Robóticos. Controle Digital. Xadrez.

Abstract

Currently, there is a great demand for specialized professionals in IT and in similar areas, and it is perceived a worldwide shortage of qualified professionals. This problem occurs partially due to a lack of interest in technical training on the part of children and young adults, often due to a conception that these areas are difficult. Focusing on this aspect, this project aims to develop a low-cost system that implements the game of chess using robotic arms. This system can be presented to children and young adults in educational fairs and similar events with the aim of instigating interest in the areas of computing, electrical engineering and control systems engineering. Existing systems to move chess pieces with robotic arms usually have a high cost, as they prioritize speed and precision in movements so that a machine can play against a human player in tournaments. Therefore, they are not very suitable for educational uses and there is a need to develop a cheaper system and with a focus on simplicity and the ability to provide fun for players. With the development of this project, it was possible to implement a simple system that allows playing chess between a human player and a robot player or between two human players, with one of them controlling the robot.

Keywords: Robotic Arms. Digital Control. Chess.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Braço Robótico com peças de Xadrez	12
Figura 2 – Jogador de Xadrez Robótico com Visão Computacional	13
Figura 3 – Uma Ferramenta Computacional para Manipulação de um Braço Robótico	14
Figura 4 – Tabuleiro de xadrez	16
Figura 5 – Peças de xadrez	17
Figura 6 – Tabuleiro de xadrez no início de uma partida	18
Figura 7 – Movimento de <i>En Passant</i>	19
Figura 8 – Manipulador robótico Mentor	22
Figura 9 – Manipulador robótico RD5NT	22
Figura 10 – Braço Robótico RD5NT ao lado de um tabuleiro de xadrez	23
Figura 11 – Manete para o jogador	23
Figura 12 – Diagrama de controle do sistema	24
Figura 13 – Largura do pulso do sinal de controle	25
Figura 14 – Microcontrolador ESP32	25
Figura 15 – Módulo de ponte H	26
Figura 16 – Montagem do sistema	27
Figura 17 – Esquemático simplificado de um CI L293D e um CI 74LS02	28
Figura 18 – Layout do circuito de acionamento	30
Figura 19 – Circuito de acionamento produzido	30
Figura 20 – Leitura da posição das juntas	31
Figura 21 – Movimento das juntas do manipulador	33
Figura 22 – Cálculo do ângulo do torso	34
Figura 23 – Visualização do ângulo do ombro e do cotovelo	35
Figura 24 – Cálculo do ângulo do pulso	36
Figura 25 – Modelo simplificado do manipulador	37
Figura 26 – Tela do programa mostrando o tabuleiro atualizado	40
Figura 27 – Manipulador robótico em posição de repouso	41
Figura 28 – Manipulador robótico movimentando para a casa de origem	41
Figura 29 – Manipulador robótico pegando a peça	42
Figura 30 – Manipulador robótico levando a peça para a casa de destino	42
Figura 31 – Manipulador robótico soltando a peça	43
Figura 32 – Manipulador robótico retornando para a posição de repouso	43

Lista de tabelas

Tabela 1 – Notação das peças	20
Tabela 2 – Exemplos de notação algébrica	20
Tabela 3 – Características do manipulador robótico Mentor	21
Tabela 4 – Características do manipulador robótico RD5NT	21
Tabela 5 – Parâmetros do controlador PID	32
Tabela 6 – Comandos enviados pelo computador para o microcontrolador	38
Tabela 7 – Mensagens enviadas pelo microcontrolador para o computador	38
Tabela 8 – Tempo de execução de cada movimento	44

Lista de abreviaturas e siglas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> [Conversor Analógico Digital]
CI	Circuito Integrado
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
STEM	<i>Science, Technology, Engineering and Mathematics</i> [Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática]
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i> [Proporcional Integral Derivativo]
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> [Modulação de Largura de Pulso]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	TRABALHOS RELACIONADOS	13
3	METODOLOGIA	15
4	PLANEJAMENTO	16
4.1	Regras de xadrez	16
4.1.1	Tabuleiro	16
4.1.2	Peças	17
4.1.3	Início do jogo	17
4.1.4	Fim de Jogo	18
4.1.5	Movimentos especiais	18
4.1.6	Notação	19
4.2	Escolha do equipamento	20
4.2.1	Manipuladores	20
4.2.2	Manete para o jogador	23
4.2.3	Microcontrolador	24
4.2.4	Circuito de acionamento	25
4.2.5	Computador	26
4.3	Projeto do sistema	26
5	DESENVOLVIMENTO	28
5.1	Desenvolvimento do circuito de acionamento	28
5.2	Leitura de comandos da manete	30
5.3	Leitura da posição das juntas	31
5.4	Controle dos motores	32
5.5	Cálculo dos ângulos desejados	32
5.6	Movimentação de peças	37
5.7	Comunicação com o computador	38
5.8	Implementação da lógica de xadrez	39
5.9	Análise de Desempenho	43
6	CONCLUSÃO	45
6.1	Limitações	45

REFERÊNCIAS	46
APÊNDICES	48
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DE ACIONAMENTO	50

1 Introdução

Atualmente, existe uma grande procura por funcionários especializados em Tecnologia da Informação (TI) e áreas similares, sendo percebida no mundo todo uma grande carência de profissionais qualificados para atuar nessas áreas. Apesar do grande crescimento nas áreas de STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) [Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática], o número de profissionais qualificados nessas áreas não acompanha esse crescimento e a perspectiva é de que essa situação se acentue ainda mais no futuro ([LEPRINCE-RINGUET, 2021](#)).

Devido a essa carência de profissionais, torna-se importante a busca por formas de incentivar o aprendizado e a busca por conhecimento por parte dos jovens. Visando solucionar esse problema, foi decidido realizar um trabalho que incorpore conceitos de robótica, já que seu uso em atividades com crianças consegue influenciar positivamente o desenvolvimento de habilidades da área de STEM, conforme estudos realizados nos Estados Unidos e Europa ([DOROUKA; PAPADAKIS; KALOGIANNAKIS, 2020](#)), e projetos desenvolvidos no Brasil ([ZILLI; LAMBERT, 2010](#)).

Com base nisso, foi proposto realizar o desenvolvimento de uma plataforma que utilize recursos computacionais passível de ser utilizada para demonstrar conceitos nas áreas de computação, elétrica e controle. Para aumentar o interesse por esta plataforma foi decidido incorporar um jogo de tabuleiro no projeto e foi escolhido o Xadrez, por ser um jogo que exige raciocínio lógico e estratégico, além de ser popular e bastante conhecido. Correlacionando ambas essas ideias, implementou-se um jogo de Xadrez que pode ser jogado utilizando-se braços robóticos, similar ao que é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Braço Robótico com peças de Xadrez



Fonte: <<https://www.youtube.com/watch?v=OHazT3y0WpI>>

No Capítulo 2 serão apresentados alguns trabalhos que apresentam características semelhantes ao que foi proposto e foram utilizados como base para o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, no Capítulo 3 será apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4 será apresentado um resumo sobre as regras do xadrez e o planejamento do projeto, incluindo a definição dos componentes utilizados e a forma de integração entre eles. Posteriormente, no Capítulo 5 será apresentado o desenvolvimento do projeto e uma análise de seu desempenho, incluindo a montagem dos componentes físicos, e o desenvolvimento dos *softwares* utilizados. Por fim, no Capítulo 6 serão apresentadas as conclusões obtidas com o desenvolvimento do projeto e sugestões para trabalhos futuros.

2 Trabalhos Relacionados

Durante a pesquisa realizada para o desenvolvimento deste trabalho, foram encontrados alguns trabalhos que apresentam características semelhantes ao que foi proposto. Neste capítulo, serão apresentados alguns desses trabalhos, para mostrar o que foi feito e como foi feito, além de mostrar as diferenças entre eles e o trabalho proposto.

O trabalho apresentado por [MORAES \(2021\)](#) apresenta um sistema para jogar xadrez contra um computador utilizando um tabuleiro físico. Neste trabalho, foi desenvolvido um tabuleiro modificado que utiliza motores de passo e um eletroímã para movimentar as peças, conforme apresentado na Figura 2. Além disso, foi implementado um sistema de visão computacional para detectar qual peça foi movimentada pelo jogador.

Figura 2 – Jogador de Xadrez Robótico com Visão Computacional



Fonte: [MORAES \(2021\)](#)

Em outra frente, o trabalho de [CARDONA et al. \(2012\)](#) apresenta uma ferramenta para manipular um braço robótico utilizando um computador. Essa ferramenta recebe os ângulos desejados de cada junta do braço e realiza o movimento, utilizando-se de cinemática direta, conforme apresentado na Figura 3. Lançando-se mão dessa ferramenta, é possível movimentar o braço robótico com base nos ângulos, entretanto não é possível diretamente definir sua posição final.

Figura 3 – Uma Ferramenta Computacional para Manipulação de um Braço Robótico



Fonte: [CARDONA et al. \(2012\)](#)

[OLUNLOYO1 et al. \(2014\)](#) apresenta um estudo sobre cinemática inversa de um braço robótico de cinco juntas. Neste trabalho, é apresentado um método para calcular os ângulos de cada junta, com base na posição final desejada. A partir desse método, é possível movimentar o braço robótico com mais facilidade, pois não é necessário calcular os ângulos manualmente.

A partir do estudo desses trabalhos, foi possível definir o escopo do trabalho proposto e observar as diferenças em relação aos trabalhos relacionados. O trabalho proposto implementa o jogo de xadrez, assim como o trabalho de [MORAES \(2021\)](#), porém utiliza um braço robótico para movimentar as peças. Para isso, foi necessário desenvolver uma ferramenta que permite a comunicação entre um computador e o braço robótico, assim como o trabalho de [CARDONA et al. \(2012\)](#). Por sua vez, o controle do braço é feito através de um sistema de cinemática inversa, assim como o trabalho de [OLUNLOYO1 et al. \(2014\)](#), porém com um menor número de juntas.

3 Metodologia

O desenvolvimento do projeto foi dividido em duas etapas: uma de planejamento e outra de execução.

Durante a etapa de planejamento, foram definidos os componentes necessários para a construção do projeto, bem como a forma de integração entre eles. Além disso, foi feito um estudo sobre o controle de um braço robótico e sobre as capacidades do microcontrolador escolhido para o projeto.

Na etapa de execução, foi feita primeiramente a montagem dos componentes físicos do projeto. Em seguida, foi desenvolvido o *software* do microcontrolador, responsável por controlar os motores e receber os comandos do usuário. Por fim, foi desenvolvido o *software* do computador para implementar as regras do jogo de xadrez e comunicar com o microcontrolador.

4 Planejamento

Antes de iniciar o desenvolvimento do projeto, foi feita uma pesquisa sobre as regras do jogo de xadrez. Em seguida, foram especificados os recursos necessários para a montagem do sistema e sua utilização. Esta seção descreve as regras do jogo, a escolha do equipamento e o projeto inicial do sistema.

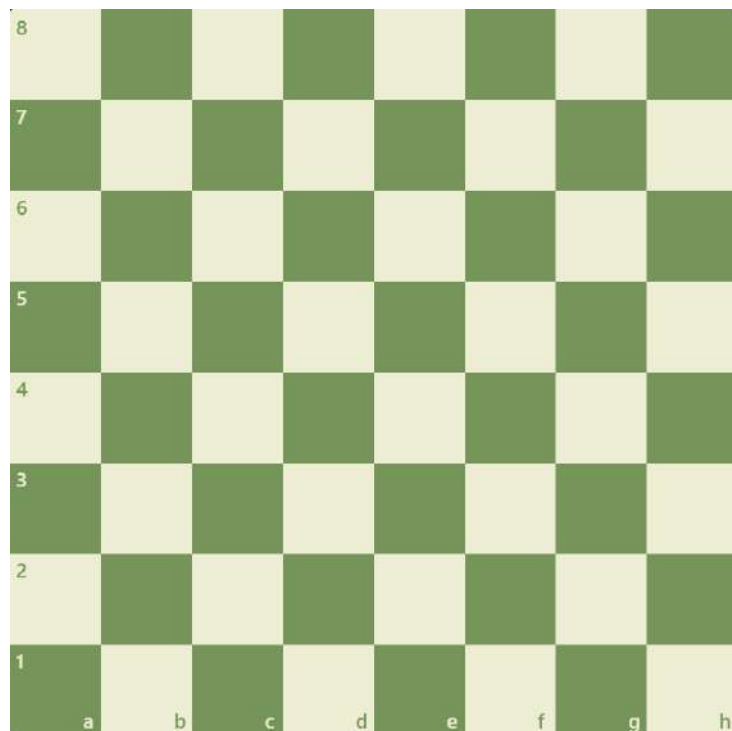
4.1 Regras de xadrez

O jogo de xadrez é um jogo de tabuleiro para dois jogadores. Sua origem é incerta, mas acredita-se que ele tenha surgido na Índia, antes mesmo da era cristã (ALVESI, 2023).

4.1.1 Tabuleiro

O tabuleiro de xadrez é composto por 64 casas quadradas, alternadamente claras e escuras, dispostas em uma grade 8x8 conforme a Figura 4. Cada casa é identificada por uma letra de *a* a *h* e um número de *1* a *8* e pode comportar no máximo uma peça.

Figura 4 – Tabuleiro de xadrez



Fonte: <<https://www.chess.com>>

4.1.2 Peças

O jogo de xadrez possui 6 tipos de peças ilustradas na Figura 5. Cada uma dessas peças utiliza diferentes regras para se movimentar pelo tabuleiro.

Figura 5 – Peças de xadrez



Fonte: Do próprio autor

O Rei é a peça mais importante do jogo, e pode se mover para qualquer casa adjacente, horizontal, vertical ou diagonalmente. Entretanto, ele não pode se mover para uma casa em que esteja em xeque, ou seja, em que ele possa ser capturado na próxima jogada.

A Torre pode se mover para qualquer casa na mesma linha ou coluna em que se encontra. Por outro lado, o Bispo pode se mover para qualquer casa na mesma diagonal em que se encontra.

A Dama é a peça mais poderosa do jogo, e pode se mover como um Bispo ou como uma Torre, ou seja, ela pode se deslocar para qualquer casa na mesma linha, coluna ou diagonal em que se encontra.

O Cavalo pode se mover duas casas em uma direção e uma casa em uma direção perpendicular, em forma de um *L*. Ele também é a única peça que pode pular outras peças.

Por fim, o Peão pode se mover uma casa para frente, ou duas casas para frente se ainda não tiver se movido no jogo. Ele também pode capturar uma peça adversária que esteja uma casa na diagonal à sua frente.

4.1.3 Início do jogo

Para se iniciar uma partida de xadrez, o tabuleiro deve ser posicionado de forma que a casa *a1* seja branca. As peças brancas devem ser posicionadas na primeira linha, seguindo a ordem: Torre, Cavalo, Bispo, Dama, Rei, Bispo, Cavalo e Torre. As peças pretas devem ser posicionadas na oitava linha, seguindo a mesma ordem. Os peões brancos devem ser posicionados na segunda linha e os peões pretos na sétima linha. A Figura 6 apresenta o tabuleiro no início de uma partida.

Figura 6 – Tabuleiro de xadrez no início de uma partida

Fonte: <<https://www.chess.com>>

Depois de montado o tabuleiro, o jogador que estiver com as peças brancas deve realizar a primeira jogada. Em seguida, os jogadores devem realizar jogadas alternadas, até que o jogo termine conforme descrito na Subseção 4.1.4.

4.1.4 Fim de Jogo

O objetivo do jogo de xadrez é dar xeque-mate no Rei adversário, ou seja, deixar o Rei adversário em xeque e sem nenhuma casa para onde se mover. Quando isso acontece, o jogo termina e o jogador que deu xeque-mate vence a partida.

Além disso, o jogo também pode terminar empatado. Isso pode acontecer quando algum dos jogadores não possui nenhum movimento válido, quando os jogadores concordam com o empate, quando o mesmo movimento é repetido três vezes ou quando nenhum jogador tiver peças suficientes para dar xeque-mate.

4.1.5 Movimentos especiais

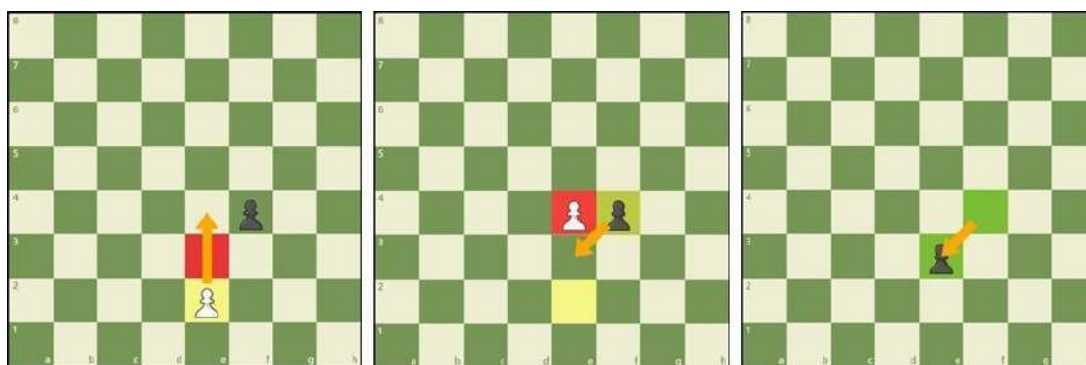
Além dos movimentos descritos na Subseção 4.1.2, o jogo de xadrez possui alguns movimentos especiais.

O movimento de *Roque* pode ser realizado pelo Rei e por uma Torre, desde que ambas as peças ainda não tenham se movido no jogo e não haja nenhuma peça entre elas.

Para realizar o movimento, o Rei deve se mover duas casas em direção à Torre, e a Torre deve ser posicionada na casa adjacente ao Rei. O movimento de *Roque* pode ser realizado para a direita ou para a esquerda, denominados *Roque* curto e *Roque* longo, com base na quantidade de casas que a Torre se move.

O movimento de *En Passant* pode ser realizado por um Peão para capturar um Peão adversário em uma situação especial. Caso o Peão adversário tenha se movido duas casas na jogada anterior, e esteja na mesma linha que um Peão capturador, é possível realizar o movimento de *En Passant*. Nesse caso, o Peão capturador deve se mover para a casa em que o Peão adversário estaria se tivesse se movido apenas uma casa na jogada anterior, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Movimento de *En Passant*



Fonte: <<https://www.chess.com>>

O movimento de *Promoção* pode ser realizado por um Peão quando ele chega na última linha do tabuleiro. Nesse caso, o Peão deve ser substituído por uma Dama, Torre, Bispo ou Cavalo, conforme a escolha do jogador. Não é permitido realizar o movimento de *Promoção* para um Rei ou outro Peão.

4.1.6 Notação

Para descrever os movimentos realizados em uma partida de xadrez, é utilizada a notação algébrica. Nessa notação, é utilizada a identificação da casa do tabuleiro, conforme descrito na Subseção 4.1.1, e a identificação da peça que se moveu, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 – Notação das peças

Peça	Notação
Rei	K
Dama	Q
Torre	R
Bispo	B
Cavalo	N
Peão	-

Caso mais de uma peça possa realizar o mesmo movimento, é utilizada a notação da coluna em que a peça se encontra. Além disso, é utilizada as notações *O-O* e *O-O-O* para representar os movimentos de *Roque* curto e *Roque* longo, respectivamente. O símbolo *x* é utilizado para representar uma captura. Os símbolos *+* e *#* são utilizados para representar um xeque e um xeque-mate, respectivamente. Por fim, podem ser adicionados os símbolos *!* e *?* para representar um bom e um mau movimento, respectivamente.

A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de notação algébrica.

Tabela 2 – Exemplos de notação algébrica

Lance	Descrição
e4	Peão para a casa <i>e4</i>
exd5	Peão da coluna <i>e</i> captura a peça na casa <i>d5</i>
Qd8	Dama para a casa <i>d8</i>
Qxd8	Dama captura a peça na casa <i>d8</i>
Nf3!	Cavalo para a casa <i>f3</i> (movimento bom)
Red1	Torre da coluna <i>e</i> para a casa <i>d1</i>
O-O?	<i>Roque</i> curto (movimento mau)
Qe2+	Dama para a casa <i>e2</i> e xeque
Qe2#	Dama para a casa <i>e2</i> e xeque-mate

4.2 Escolha do equipamento

Para o desenvolvimento do projeto, foram disponibilizados, pela instituição CEFET-MG, dois manipuladores robóticos e diversos dispositivos que podem ser utilizados para seu controle. A partir desse equipamento, e de outros disponíveis no mercado, foi decidido como o projeto seria realizado. Os equipamentos utilizados para o projeto estão descritos a seguir.

4.2.1 Manipuladores

Os principais elementos deste trabalho são os manipuladores robóticos, portanto foi feito inicialmente um estudo sobre seu funcionamento e sobre como seu controle pode ser realizado para movimentar as peças de xadrez.

Tabela 3 – Características do manipulador robótico Mentor

Eixo	Movimento angular (graus)	Comprimento (mm)
Torso	210	185
Ombro	180	165
Cotovelo	230	150
Esquerdo do Pulso	320	0
Direito do Pulso	320	0
Pulso <i>Pitch</i> (Arfagem)	140	-
Pulso <i>Roll</i> (Rolamento)	320	-

Tabela 4 – Características do manipulador robótico RD5NT

Eixo	Movimento angular (graus)	Comprimento (mm)
Torso	293	110
Ombro	107	120
Cotovelo	284	160
Pulso	360	0

Foi disponibilizado um manipulador robótico de modelo Mentor de cor preta, conforme a Figura 8, e um manipulador de modelo RD5NT de cor azul, conforme a Figura 9. Eles possuem diversas juntas movimentadas por motores de corrente contínua, e permitem que o manipulador funcione de forma similar a um braço humano. Além disso, cada junta possui um potenciômetro que indica a posição atual do eixo, por meio de um sinal analógico.

O manipulador Mentor apresenta 5 graus de liberdade e uma garra que pode ser utilizada para pegar e soltar objetos. Além disso, ele possui caixas de redução em seus motores, o que permite que ele mantenha sua posição mesmo após o desligamento dos motores. Suas dimensões e faixas de movimento são apresentadas na Tabela 3 (OLUNLOYO; AYOMOH; ADEOTI, 2011).

Já o manipulador RD5NT possui apenas 4 graus de liberdade e uma garra. Além de não possuir caixa de redução em seus motores, ele utiliza molas em alguns eixos, o que faz com que perca sua posição quando os motores são desligados. Portanto, seu controle deve ser realizado de forma contínua para que permaneça na posição desejada. Suas dimensões e faixas de movimento são apresentadas na Tabela 4 (RIUL; MONTENEGRO; FERREIRA, 2018).

Figura 8 – Manipulador robótico Mentor



Fonte: <http://arquivo.eng.br/robotica>

Figura 9 – Manipulador robótico RD5NT



Fonte: <http://arquivo.eng.br/robotica>

Foi decidido utilizar o manipulador de modelo RD5NT para o projeto, pois ele possui menos graus de liberdade na sua garra, o que facilita a implementação do algoritmo de controle. Além disso, ele possui uma garra de tamanho adequado para pegar as peças de xadrez sem derrubar as outras peças do tabuleiro. Apesar de não possuir caixa de redução em seus motores, isso não é um problema, pois o controle do manipulador será realizado de forma contínua. A Figura 10 apresenta o manipulador RD5NT ao lado de um tabuleiro de xadrez.

Figura 10 – Braço Robótico RD5NT ao lado de um tabuleiro de xadrez



Fonte: Do próprio autor

4.2.2 Manete para o jogador

Para que o jogador possa interagir com o manipulador, foi decidido utilizar uma manete de modelo *batpad*, que possui dois *joysticks*, conforme a Figura 11.

Esses *joysticks* devem ser alimentados com 3,3 ou 5 V e permitem a leitura de posição em duas dimensões, através de sinais analógicos. Eles também possuem um botão que envia um sinal digital ao ser pressionado.

Figura 11 – Manete para o jogador



Fonte: <https://www.robocore.net/acessorios-robocore/control-batpad>

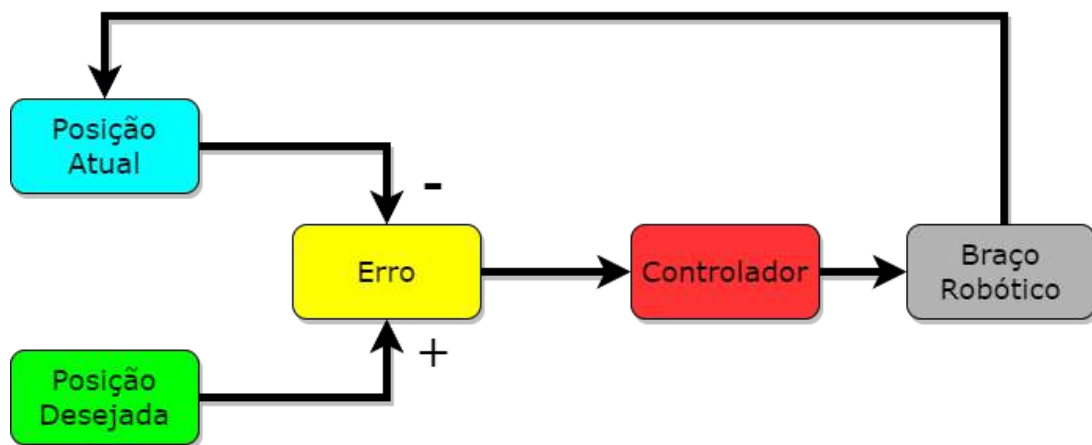
4.2.3 Microcontrolador

Para realizar a integração entre a manete e o manipulador, foi decidido utilizar um microcontrolador ESP32, conforme a Figura 14. Esse microcontrolador possui um *clock* de 240MHz, 4MB de memória *flash* e 320KB de memória *RAM*. Ele apresenta ao todo 34 pinos que podem ser utilizados como entrada ou saída, e suporta sinais analógicos e digitais (ESPRESSIF, 2023).

Para permitir o controle manual do manipulador robótico, o microcontrolador faz a leitura dos sinais analógicos e digitais provenientes da manete com alguns de seus 18 canais de *ADC* (*Analog to Digital Converter*)[Conversor Analógico Digital]. E para permitir o controle automático, ele recebe sinais de controle de um computador através de um cabo USB. A partir desses sinais, o ESP32 realiza o cálculo das posições desejadas de cada junta do manipulador.

Para controlar os motores, o microcontrolador primeiramente faz a leitura dos sinais analógicos provenientes dos potenciômetros de cada junta. A partir desses sinais, é possível determinar a posição atual de cada junta. Com base na posição atual e na posição desejada, o microcontrolador envia um sinal de controle para os motores do manipulador robótico, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama de controle do sistema

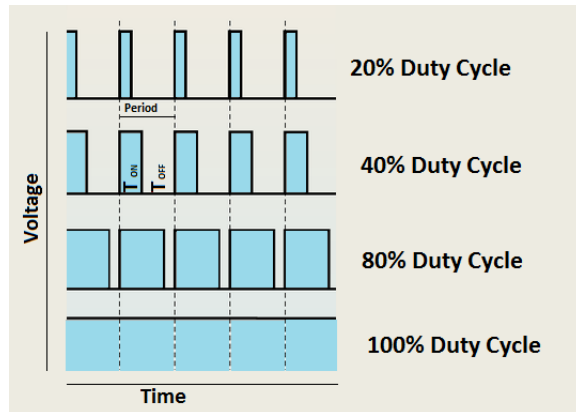


Fonte: Do próprio autor

Os sinais de controle são digitais do tipo *PWM* (*Pulse Width Modulation*), que variam de 0 a 3,3 V e possibilitam o controle da velocidade de rotação dos motores através da variação da tensão média. Essa variação é feita através da escolha de valores diferentes de *Duty Cycle* [Ciclo de Trabalho], que podem variar de 0% a 100%, e determinam a largura de pulso do sinal, conforme ilustrado na Figura 13. Valores maiores de *Duty Cycle* resultam em maior velocidade de rotação do motor, pois o sinal permanece em nível alto por um período maior de tempo. Por outro lado, valores menores de *Duty Cycle* resultam

em menor velocidade de rotação do motor, pois o sinal permanece em nível alto por um período menor de tempo. Para definir o sentido de rotação do motor, foi utilizado um sinal digital que indica se ele deve girar no sentido horário ou anti-horário.

Figura 13 – Largura do pulso do sinal de controle



Fonte: <https://create.arduino.cc/projecthub/muhammad-aqib/arduino-pwm-tutorial-ae9d71>

Figura 14 – Microcontrolador ESP32



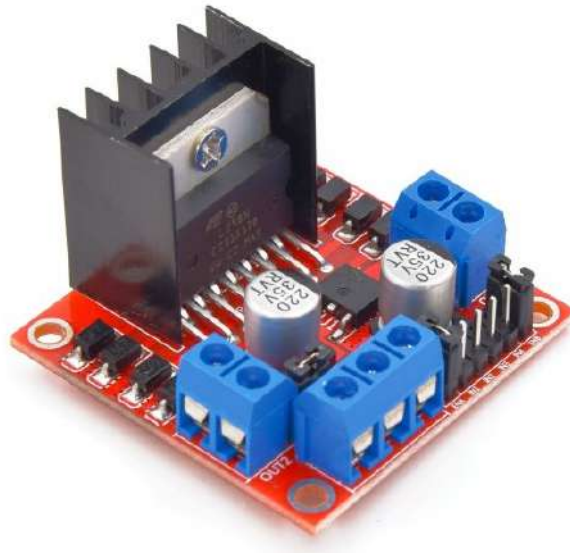
Fonte: <https://www.robobuilders.com.br/nodemcu-esp32-38-pinos-devkit>

4.2.4 Circuito de acionamento

Para controlar os motores do manipulador, é necessário o uso de um circuito de acionamento para converter os sinais de baixa potência provenientes do microcontrolador em sinais de maior potência que movimentam as juntas do manipulador robótico. Esse circuito é alimentado com 12 V, recebe sinais digitais de direção e de *PWM* do ESP32 e envia sinais digitais para os motores do manipulador.

Para obter essa funcionalidade, foi decidido utilizar módulos de ponte H, que são circuitos integrados (CI) utilizados para aplicar uma tensão variável a um componente por meio de um sinal de *PWM*. Eles também permitem alterar a direção em que a corrente é aplicada no componente, o que possibilita inverter o sentido de rotação de um motor (DIGILENT, 2012). A Figura 15 apresenta um módulo de ponte H disponível no mercado, que utiliza o CI L298N.

Figura 15 – Módulo de ponte H



Fonte: <https://www.smart-prototyping.com/L298N-Dual-H-bridge-Motor-Driver-Board>

4.2.5 Computador

Para gerenciar o jogo de xadrez, foi decidido utilizar um computador. Ele é responsável por implementar a lógica do jogo de xadrez e enviar sinais de controle para o ESP32, que por sua vez controla o manipulador robótico.

Para realizar a comunicação entre o computador e o ESP32, pode ser usado o protocolo serial, através de um cabo USB. Através dele o computador envia sinais indicando para qual casa do tabuleiro o manipulador deve mover, e quando ele deve pegar ou soltar uma peça. Por outro lado, o ESP32 envia sinais indicando quando o movimento foi finalizado e, no modo manual, qual movimento o jogador deseja realizar.

Para implementar as regras do jogo, é necessário desenvolver um *software* para interagir com uma *engine* de xadrez. Essa *engine* é um *software* que implementa as regras do jogo e permite que o computador jogue xadrez contra um humano ou contra outro computador. Ao integrar o *software* desenvolvido com uma *engine*, é possível verificar quais movimentos são válidos, determinar qual movimento será jogado pelo computador e identificar quando o jogo terminou. Por fim, o computador também é responsável por converter um movimento em uma sequência de comandos que devem ser enviados ao ESP32.

4.3 Projeto do sistema

Após a definição de todos os equipamentos a serem utilizados, foi feito o projeto do sistema, indicando como os componentes devem ser conectados.

A manete deve ser alimentada com 3,3 V e ser conectada ao ESP32 para permitir a leitura dos sinais de entrada. Essa conexão é realizada com 10 cabos, sendo 5 para cada *joystick* com seu respectivo botão.

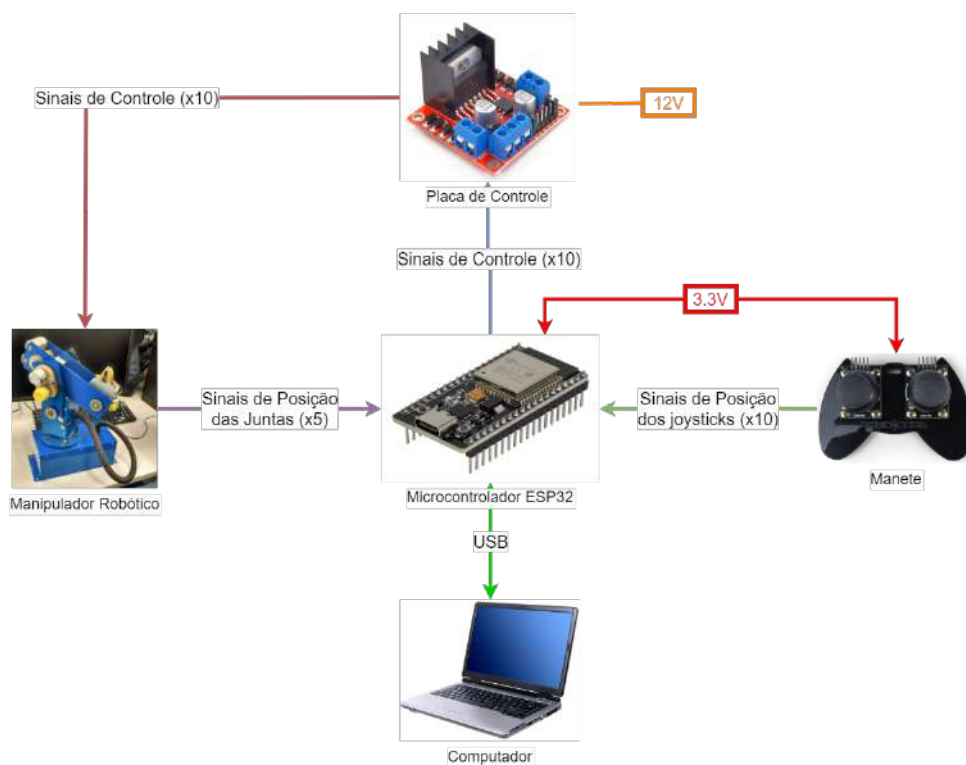
O circuito de acionamento deve ser alimentado com 12 V e também deve ser conectado ao ESP32 para receber os sinais de controle. Essa conexão é realizada com 10 cabos, 2 para o controle de cada junta do manipulador robótico. Essa circuito também deve ser conectado aos motores do manipulador robótico, também com 10 cabos, 2 para cada junta.

O manipulador robótico deve ser conectado ao ESP32 para o envio dos sinais de posição de cada junta. Essa conexão é realizada com 5 cabos, um para cada junta.

Por fim, o ESP32 deve ser alimentado com 3,3 V e deve ser conectado a um computador para a implementação da lógica do jogo.

A montagem do sistema é mostrada na Figura 16.

Figura 16 – Montagem do sistema



Fonte: Do próprio autor

5 Desenvolvimento

Após o planejamento do projeto, foi feito o desenvolvimento de cada etapa. Inicialmente, foi feito o desenvolvimento do circuito de acionamento para poder acionar os motores. Em seguida, o *software* para o microcontrolador foi desenvolvido para realizar a leitura dos dados da manete e controlar o manipulador robótico. Em sequência, foi desenvolvido o *software* para o computador, que implementa a lógica do jogo de xadrez. Por fim, foi feita uma análise do desempenho do sistema.

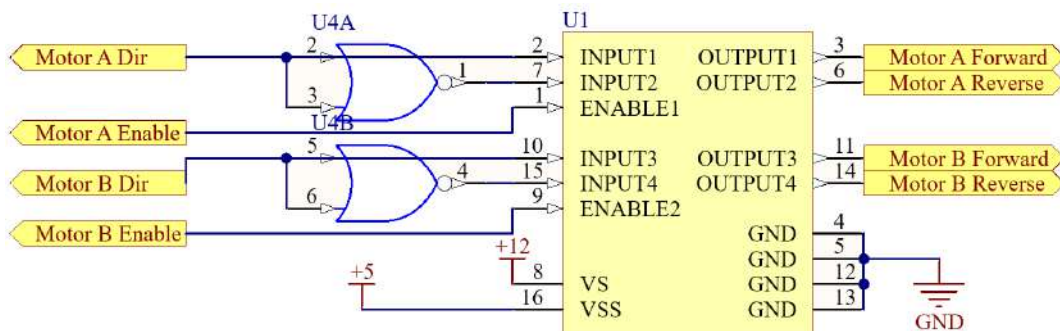
5.1 Desenvolvimento do circuito de acionamento

Primeiramente, foi feito o desenvolvimento do circuito de acionamento dos manipuladores, pois ele é necessário para as próximas etapas do projeto. Para isso, foi necessário definir quais componentes utilizar e como conectá-los.

Conforme descrito na subseção 4.2.4, o circuito de acionamento deve utilizar uma ponte H para o controle de cada junta. Para isso, foi escolhido o CI L293D, que possui duas pontes H e suporta tensões de 12V. Como é necessário controlar 6 motores, foram utilizados 3 CI L293D.

Para simplificar o controle e evitar problemas de acionamento duplo das entradas das pontes H, foi utilizado o CI 74LS02 como um inversor lógico. Dessa forma, o circuito de acionamento possui para cada junta uma entrada de *Enable* para ligar/desligar o acionamento da junta, e uma porta de *Direction* para definir a direção de movimentação dela. A partir dessas entradas, o CI L293D é acionado e o motor é controlado. A Figura 17 mostra o esquemático simplificado de um CI L293D e um CI 74LS02.

Figura 17 – Esquemático simplificado de um CI L293D e um CI 74LS02



Fonte: Do próprio autor

Com os componentes principais definidos foi feito o desenvolvimento do esquemático

do circuito de acionamento com o auxílio do *software Altium Designer*. O Apêndice A mostra o esquemático completo do circuito de acionamento. Nesse esquemático foram adicionados resistores de *pulldown* para garantir que as entradas dos CI L293D e 74LS02 permaneçam em nível lógico baixo caso não estejam conectadas ao microcontrolador. Também foram adicionadas *LEDs* para indicar a alimentação de 5V e 12V do circuito.

Após o desenvolvimento do esquemático, foi feita a montagem da Placa de Circuito Impresso (PCB), ainda com o auxílio do *software Altium Designer*. Para isso, os componentes foram posicionados no *layout* da placa, tendo em vista a economia de espaço e a necessidade de manter os componentes próximos para facilitar sua conexão. Em seguida, as trilhas e vias que realizam a conexão dos componentes foram desenhadas. Para permitir a conexão de todos os componentes, foi necessário utilizar uma placa com 2 camadas. A Figura 18 mostra o *layout* final do circuito de acionamento.

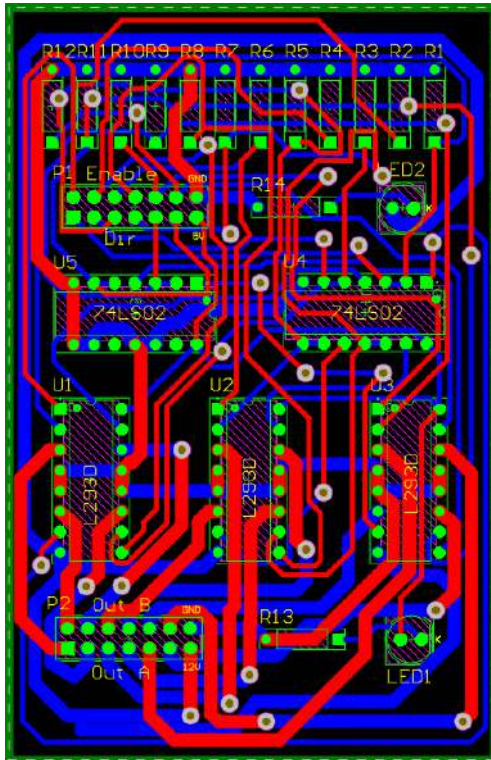
Com o *layout* finalizado, foi feita a produção da PCB de forma manual. Para isso, o negativo do *layout* foi impresso em uma folha de transparência. Depois, uma placa de circuito impresso de duas camadas foi cortada no tamanho desejado.

Em seguida, foi feita a transferência do *layout* para a placa. Para isso, uma fina camada de tinta fotossensível destinada para PCB foi aplicada sobre a placa. Essa tinta foi pré-curada a 75°C durante 15 minutos com o auxílio de uma base de aquecimento, para garantir que ela não se descolasse da placa. Após a pré-cura, a tinta foi exposta à luz ultravioleta por 3 minutos, utilizando a transparência com o *layout* como máscara. Em seguida, a placa foi submersa em uma solução de carbonato de sódio para realizar a revelação do *layout*. Após a placa ser revelada, a tinta foi curada a 85°C durante 30 minutos.

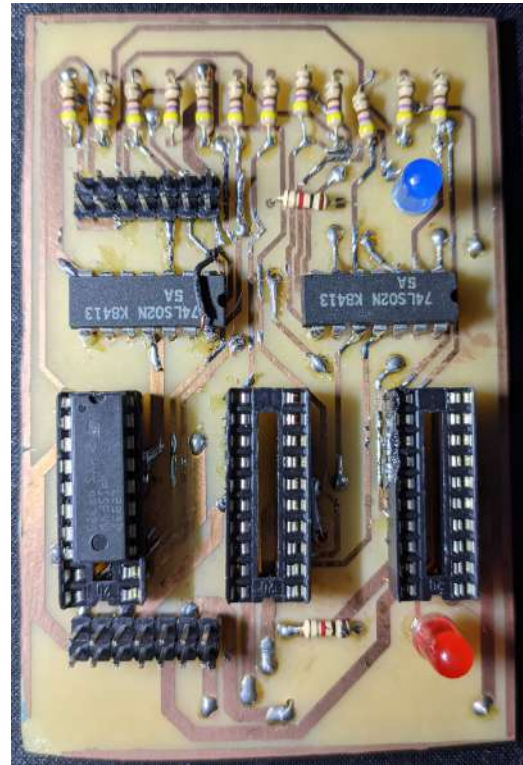
Esse processo de transferência do *layout* foi repetido para a segunda camada da placa. Em seguida, foi utilizada uma solução de percloroeto de ferro para corroer as áreas de cobre que não receberam tinta. Após a corrosão, a placa foi mergulhada em uma solução de hidróxido de sódio para remover a tinta.

Após a corrosão da PCB, foi feita a perfuração das vias e dos furos para os componentes. Por fim, foi feita a soldagem dos componentes na placa e a conexão das vias. A Figura 19 mostra o circuito de acionamento montado.

Figura 18 – Layout do circuito de acionamento
Figura 19 – Circuito de acionamento produzido



Fonte: Do próprio autor



Fonte: Do próprio autor

5.2 Leitura de comandos da manete

Após a montagem da placa de controle, foi iniciado o desenvolvimento do *software* para o microcontrolador, utilizando o *software PlatformIO*.

Inicialmente, foi implementada uma funcionalidade para realizar a leitura dos dados da manete que, conforme descrito na subseção 4.2.2, possui dois *joysticks* com dois eixos e um botão cada.

Para realizar a leitura dos eixos dos *joysticks*, foram utilizadas as entradas analógicas do microcontrolador. Como o ESP32 utiliza um conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits, os valores lidos variam de 0 a 4095. Valores próximos de 2048 representam a posição central do *joystick*, enquanto valores próximos de 0 ou 4095 representam as posições extremas. Para aprimorar a usabilidade da manete, foi implementada uma área de *deadzone*, na qual o valor lido é considerado como zero, para evitar que o manipulador se movimente sem a intenção do usuário.

Para realizar a leitura do botão, foi utilizada uma entrada digital. Esses botões possuem um *pull-up* interno, o que significa que o valor lido é 1 quando o botão não está pressionado e 0 quando o botão está pressionado.

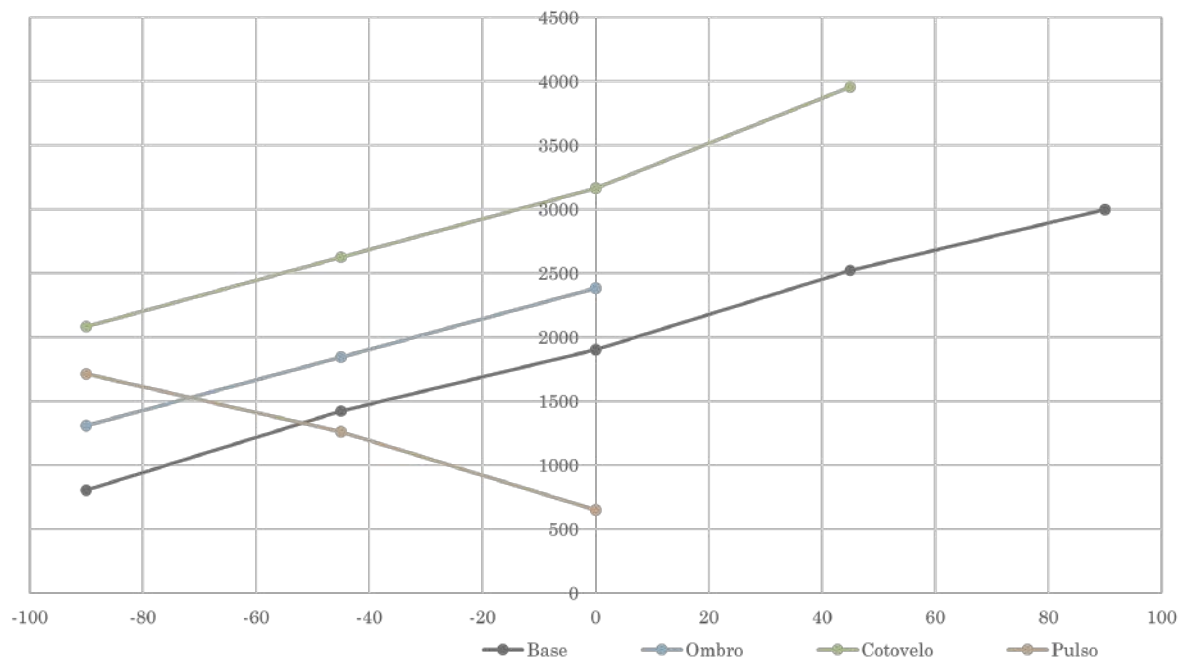
Os valores lidos são armazenados em uma variável, que é utilizada por outras funcionalidades do *software*.

5.3 Leitura da posição das juntas

Para ler a posição das juntas do manipulador robótico, foi utilizado como base o *software* desenvolvido anteriormente para ler os dados das manetes.

Primeiramente, foi utilizado um programa simples para medir os valores de tensão do potenciômetro de cada junta em diferentes ângulos, utilizando o módulo de *ADC* do microcontrolador. A partir disso, foi observado que a tensão de saída altera de forma aproximadamente linear com o ângulo, e foi criada uma equação linear para cada junta, que relaciona a leitura realizada pelo microcontrolador com seu ângulo atual, conforme os dados apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Leitura da posição das juntas



Fonte: Do próprio autor

Com base nessas equações, foi implementada uma funcionalidade para calcular os valores que devem ser lidos pelo ESP32 quando o manipulador robótico estiver em uma determinada configuração.

5.4 Controle dos motores

O controle dos motores, responsável por mover o manipulador robótico para que ele atinja uma determinada configuração, foi incorporado no *software* desenvolvido na seção anterior.

Para isso, foi implementado um controlador digital PID no microcontrolador ESP32. Esse algoritmo realiza a leitura dos valores de tensão de cada junta e obtém o erro a partir da diferença entre o valor desejado e o valor atual. A partir desse erro, é calculada a integral dos erros até o momento e a derivada entre o erro atual e o último erro. Por fim, esses valores (erro atual, integral dos erros e derivada do erro) são multiplicados, respectivamente, por três parâmetros (K_p , K_i e K_d) e os resultados são somados.

Esse valor final é utilizado para definir os sinais de saída do microcontrolador para a placa de controle. O módulo desse valor de saída do PID define o *Duty Cycle* do sinal de *PWM*, enquanto o seu sinal (positivo ou negativo) define a direção de movimentação do motor.

Depois da implementação do controlador PID foram feitos diversos testes para encontrar valores adequados para os parâmetros K_p , K_i e K_d . Para isso, foi enviado um comando para movimentar uma junta para um determinado ângulo. Após a junta estabilizar na posição desejada, foi enviado um outro comando para movimentá-la para um ângulo diferente, distante do primeiro. Para alguns valores dos parâmetros, foi observado um comportamento muito lento do sistema, enquanto para outros valores foi observado um comportamento muito instável, com *overshoot* e oscilações. Depois de diversos testes, foram encontrados os valores apresentados na Tabela 5, que possibilitam um movimento relativamente rápido e estável do manipulador robótico. Durante esses testes, foi observado um comportamento instável do sistema para valores altos de K_d , portanto foi necessário utilizar um valor baixo para esse parâmetro.

Tabela 5 – Parâmetros do controlador PID

Junta	K_p	K_i	K_d
Torso	400	10	5
Ombro	500	40	0
Cotovelo	500	30	0
Pulso	100	2	0,1

Fonte: Do próprio autor

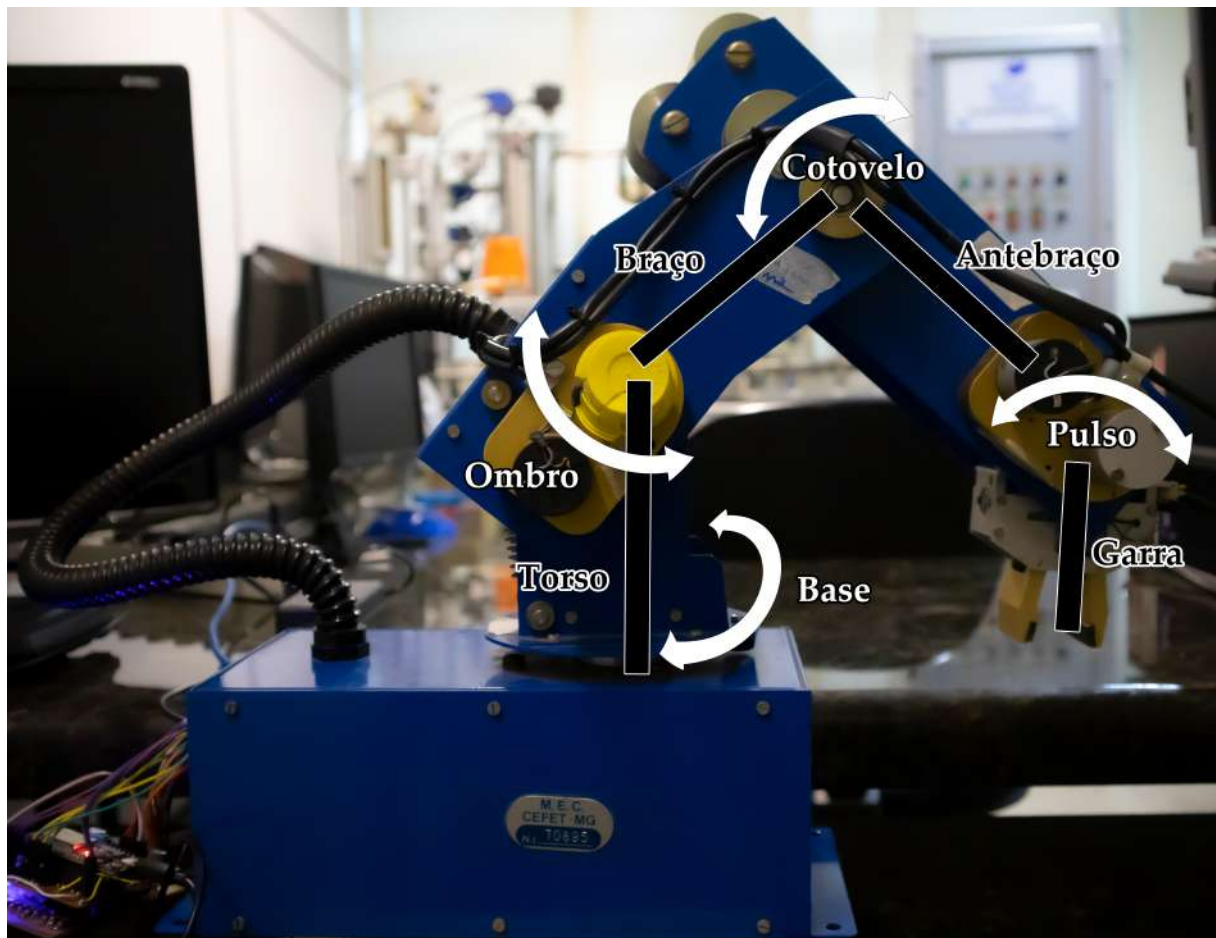
5.5 Cálculo dos ângulos desejados

Após implementar o controle do manipulador a partir dos ângulos desejados para cada junta, foi necessário desenvolver o código que realiza o cálculo da configuração

necessária para que o manipulador robótico alcance uma determinada posição no espaço, por meio da cinemática reversa.

Primeiramente, foi feita uma análise de como cada junta do manipulador robótico se movimenta. Como pode ser observado na Figura 21, o torso se movimenta horizontalmente, perpendicularmente ao eixo Z. Por outro lado, o ombro, cotovelo e pulso se movimentam verticalmente, paralelamente à base do manipulador.

Figura 21 – Movimento das juntas do manipulador

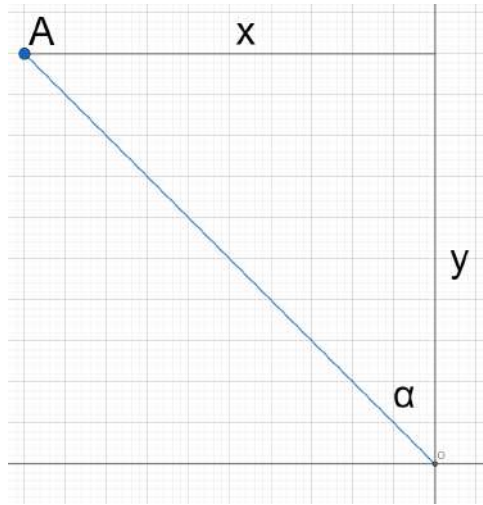


Fonte: Do próprio autor

Em seguida, foi feita uma equação para o ângulo da primeira articulação (torso). Como essa é a única junta capaz de rotacionar perpendicularmente ao eixo Z, seu ângulo pode ser calculado de forma independente das outras juntas, a partir apenas dos valores de x e y da posição desejada, ignorando o valor de z . Como é possível observar na Figura 22, o ângulo dessa junta deve formar um triângulo retângulo com catetos de comprimento x e y . A partir disso, o ângulo do torso (α) pode ser calculado como:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{y}\right) \quad (5.1)$$

Figura 22 – Cálculo do ângulo do torso

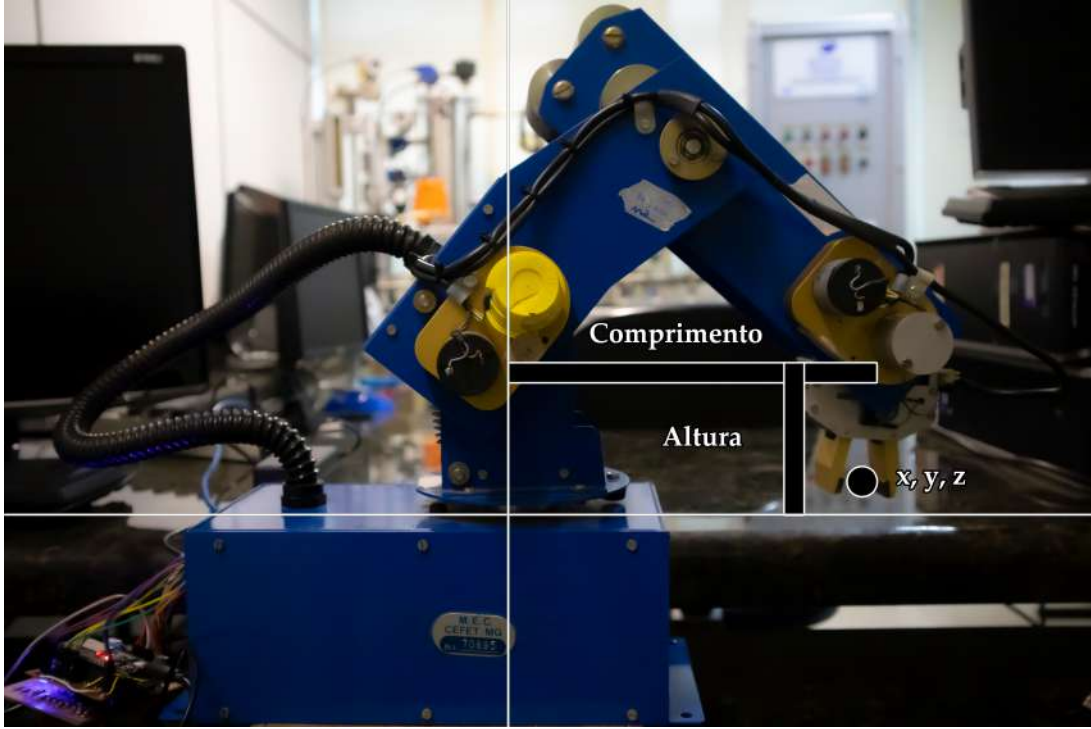


Fonte: Do próprio autor

Em seguida, foi feito o cálculo dos ângulos restantes (ombro, cotovelo e pulso). Para que seja possível pegar as peças sem interferir nas outras em casas próximas, é indispensável que a garra do manipulador esteja sempre perpendicular com o tabuleiro. Dessa forma, apenas é necessário calcular os ângulos do ombro e do cotovelo de forma que o ombro termine nas posições x e y desejadas, entretanto sua altura final deve ser igual ao z desejado acrescentado do comprimento da garra, para que a ponta da garra esteja no z desejado.

Com base nisso, podemos simplificar os dados necessários para calcular os ângulos do ombro (β) e do cotovelo (θ). Essa parte do manipulador deve ter um comprimento total definido pela hipotenusa do triângulo retângulo apresentado na Figura 22, com catetos x e y . E sua altura total deve ser igual ao z desejado, subtraído dos comprimentos da garra e do torso do manipulador. Isso pode ser visualizado mais claramente na Figura 23.

Figura 23 – Visualização do ângulo do ombro e do cotovelo



Fonte: Do próprio autor

Portanto, temos as seguintes equações, que relacionam os valores de x , y , z , comprimento do torso (\overline{torso}) e comprimento da garra (\overline{garra}) com o comprimento e altura do conjunto ombro-cotovelo:

$$comprimento = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.2)$$

$$altura = z - \overline{torso} - \overline{garra} \quad (5.3)$$

A partir desses valores de comprimento e altura, o cálculo desses ângulos se reduz a um problema de cinemática inversa de um manipulador com dois graus de liberdade. Existem duas soluções para esse tipo de problema, uma com o ângulo do segundo eixo positivo em relação ao primeiro, e outra com esse ângulo negativo. Devido às limitações da movimentação do ombro do manipulador utilizado, foi escolhida a solução na qual o ângulo do cotovelo é negativo (TORRES-REYES, 2018). As equações a seguir podem ser utilizadas para calcular o ângulo do ombro (β) e do cotovelo (θ) a partir do comprimento e altura do conjunto ombro-cotovelo, calculados anteriormente, assim como do comprimento do braço ($\overline{braço}$) e do antebraço ($\overline{antebraço}$).

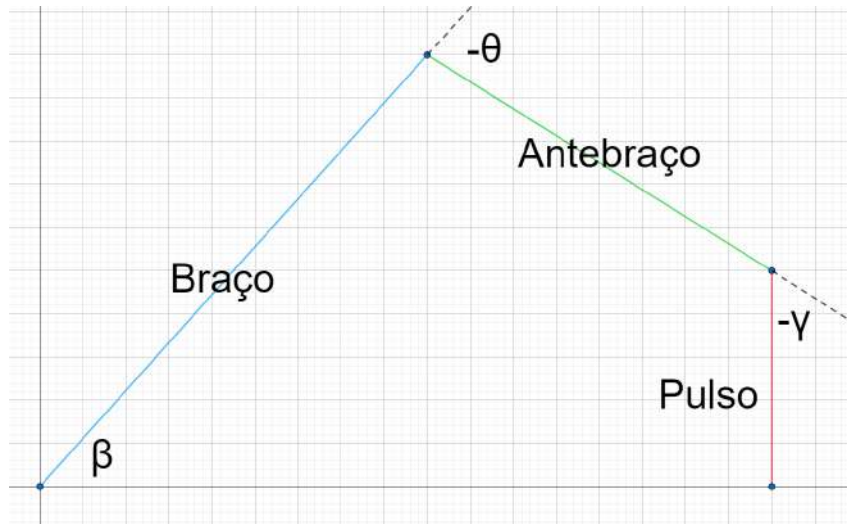
$$\theta = -\arccos\left(\frac{comprimento^2 + altura^2 - \overline{braço}^2 - \overline{antebraço}^2}{2 \cdot \overline{braço} \cdot \overline{antebraço}}\right) \quad (5.4)$$

$$\beta = \arctan \frac{\text{altura}}{\text{comprimento}} + \arcsin \left(\frac{\overline{\text{antebraço}} \cdot \sin(\theta)}{\overline{\text{braço}} + \overline{\text{antebraço}} \cdot \cos(\beta)} \right) \quad (5.5)$$

Por último, resta calcular o ângulo do pulso (γ), que deve ficar perpendicular ao tabuleiro. Para isso, pode ser descrito um quadrilátero envolvendo o braço, antebraço, pulso e o tabuleiro, conforme representado na Figura 24. Como a soma dos ângulos internos de um quadrilátero deve ser igual a 360° , pode-se obter a equação abaixo:

$$\gamma = 90^\circ - \beta - \theta \quad (5.6)$$

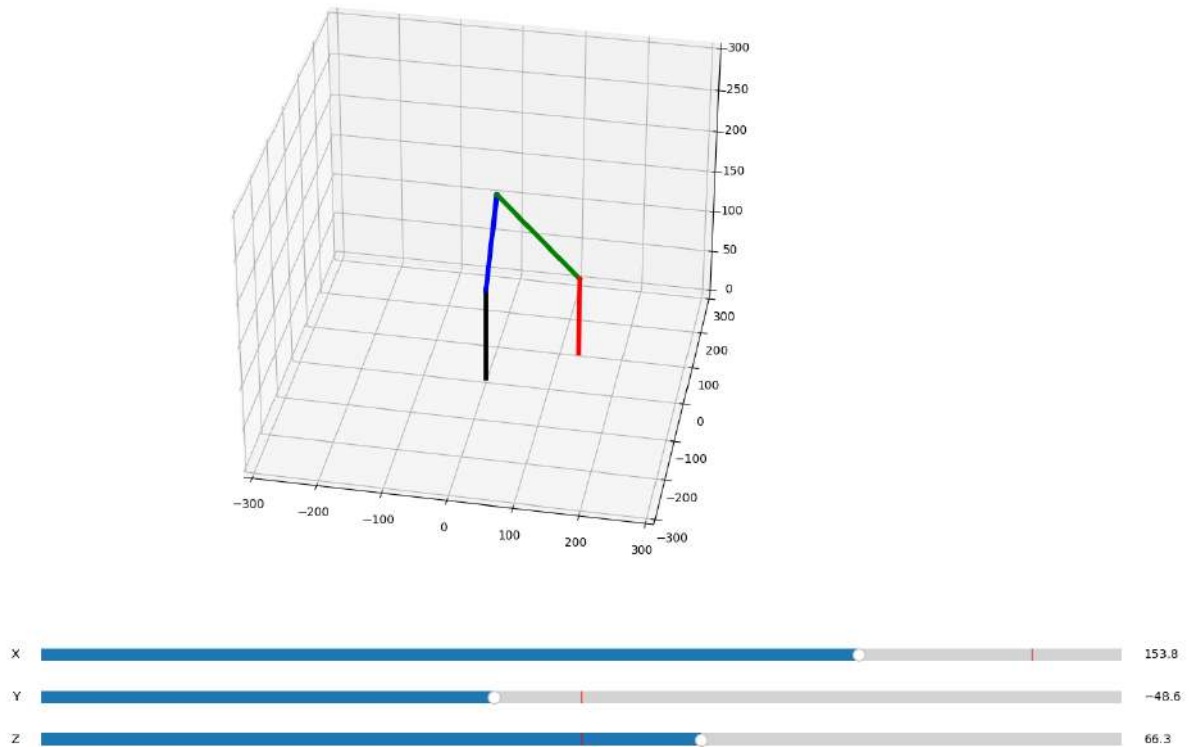
Figura 24 – Cálculo do ângulo do pulso



Fonte: Do próprio autor

Para facilitar a visualização dos ângulos e permitir uma comparação visual entre a posição desejada do manipulador e sua posição real, foi desenvolvido um simples *script* em Python que implementa um modelo simplificado do manipulador. Esse *script* permite movimentar o modelo para uma determinada posição x , y e z , e exibe os ângulos calculados para cada junta. A Figura 25 mostra o modelo desenvolvido.

Figura 25 – Modelo simplificado do manipulador



Fonte: Do próprio autor

5.6 Movimentação de peças

Depois de desenvolvida a funcionalidade de cálculo dos ângulos para movimentar o manipulador para uma determinada posição, foi necessário adicionar uma funcionalidade para utilizar o manipulador para pegar, mover e soltar as peças de xadrez.

Para isso, foi primeiramente definido de forma prática uma altura de movimentação do manipulador, que permite que ele mova livremente sem derrubar nenhuma peça e uma altura para pegar as peças, na qual a garra consegue alcançar e pegar qualquer peça. Em seguida, foram mapeadas as coordenadas x e y de todas as casas do tabuleiro. Devido à uma limitação no tamanho do manipulador utilizado, não foi possível alcançar algumas casas, portanto as peças nessas casas devem ser movimentadas manualmente pelo jogador.

A partir disso, foi implementada uma funcionalidade para movimentar o manipulador para uma determinada casa do tabuleiro, apenas nos eixos x e y . Em seguida, foi adicionada uma funcionalidade para pegar e outra para soltar a peça que está na casa atual do manipulador, movimentando-o apenas no eixo z e acionando a garra. Por fim, foi feita uma funcionalidade para movimentar o manipulador para a posição de repouso e outra para movimentá-lo para a posição de descarte de peças.

Devido à relação não linear entre os ângulos das juntas e a posição do manipulador,

foi observado que o manipulador não se movimentava adequadamente entre as casas do tabuleiro, frequentemente derrubando peças. Para solucionar esse problema, cada movimento do manipulador foi dividido em diversos movimentos menores, de forma que o manipulador se movimenta de forma mais suave e controlada.

5.7 Comunicação com o computador

Após finalizar a movimentação das peças, foi desenvolvido o módulo responsável por realizar a comunicação entre o microcontrolador e o computador.

Conforme descrito na subseção 4.2.5, essa comunicação é feita via protocolo serial, por meio de um cabo USB. Entretanto, ainda era necessário definir o formato dos dados que serão enviados e recebidos.

Para isso, foram definidos alguns comandos que podem ser enviados pelo computador para o microcontrolador, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Comandos enviados pelo computador para o microcontrolador

Comando	Descrição	Formato
move	Movimentar para casa	move x y
grab	Pegar peça	grab
release	Soltar peça	release
discard	Movimentar para posição de descarte	discard
reset	Movimentar para posição de repouso	reset
wait	Aguarde por n milissegundos	wait n

Fonte: Do próprio autor

Ao final da execução de cada comando, o microcontrolador envia uma mensagem de confirmação para o computador, informando se o comando foi executado com sucesso (OK) ou não (FAIL).

Para possibilitar o controle manual do manipulador, foram definidas algumas mensagens que podem ser enviadas pelo microcontrolador para o computador, conforme descrito na Tabela 7.

Tabela 7 – Mensagens enviadas pelo microcontrolador para o computador

Mensagem	Descrição	Formato
joystick	<i>Joystick</i> foi movimentado	joystick <up down left right>
select	Botão do <i>joystick</i> foi pressionado	select

Fonte: Do próprio autor

5.8 Implementação da lógica de xadrez

Depois de finalizar a comunicação entre o microcontrolador e o computador, foi desenvolvido o *software* responsável por implementar a lógica do jogo de xadrez.

O *software* foi desenvolvido em Python, utilizando a biblioteca *stockfish* (ZHELYABUZHSKY, 2022) para realizar comunicação com a *engine* de xadrez *Stockfish* 15.1 (ROMSTAD; COSTALBA; KIISKI, 2022). Essa *engine* é responsável por verificar quais movimentos são válidos e calcular qual movimento o computador deve jogar em cada turno.

Além da utilização da biblioteca *stockfish*, foi necessário implementar algumas funcionalidades manualmente que não existem nela. Em primeiro lugar, foi implementada uma função para adquirir quais movimentos são válidos para a posição atual do tabuleiro, utilizando o comando *go perft 1* da *engine* *Stockfish*. Em seguida, foi desenvolvida uma funcionalidade para detectar quando a partida acabou, verificando se não existe mais nenhum movimento válido para o jogador atual. Por último, foi feita uma função para verificar se o jogo terminou empatado, verificando a avaliação da posição atual do tabuleiro pela *engine* *Stockfish*.

Para comunicar com o microcontrolador, foi utilizada a biblioteca PySerial (LIECHTI, 2020). Através dessa biblioteca, é possível enviar e receber as mensagens descritas na seção 5.7. Após enviar uma mensagem para o microcontrolador, o *software* aguarda uma mensagem de confirmação para indicar o sucesso ou falha da execução do comando.

Ao iniciar uma partida, o programa exibe uma mensagem para o usuário escolher qual modo de jogo deseja utilizar: jogar contra o computador ou contra outra pessoa. No primeiro modo, o *software* *Stockfish* 15.1 é utilizado para calcular qual movimento o computador irá jogar, enquanto no segundo modo, o jogador que estiver controlando o manipulador pode movimentá-lo pelas casas do tabuleiro e pegar peças sem restrição, entretanto ao tentar soltar uma peça, é feita uma consulta ao *Stockfish* 15.1 para validar se a jogada desejada é válida. Em ambos os modos de jogo, os movimentos realizados pelo jogador humano que não controla o manipulador robótico devem ser digitados manualmente no computador.

Em seguida, o programa exibe uma mensagem para o usuário escolher qual cor de peças deseja utilizar: brancas ou pretas. Depois disso, caso o usuário tenha escolhido jogar contra o computador, o programa exibe uma mensagem para o usuário escolher qual nível de dificuldade deseja utilizar. Esse nível pode variar de 1 a 20, sendo 1 o nível mais fácil e 20 o nível mais difícil. Por fim, o programa inicia a partida e exibe o tabuleiro atualizado a cada jogada, conforme ilustrado na Figura 26. O usuário deve digitar o movimento que deseja realizar no formato *<casa de origem><casa de destino>*, por exemplo *e2e4* para mover o peão da casa *e2* para a casa *e4*.

Figura 26 – Tela do programa mostrando o tabuleiro atualizado

```

Enter number of players (1/2): 1
Enter color for robot (w/b): b
Enter difficulty (1-20): 20
+---+---+---+---+---+---+---+
| r | n | b | q | k | b | n | r | 8
+---+---+---+---+---+---+---+
| p | p | p | p | p | p | p | p | 7
+---+---+---+---+---+---+---+
|   |   |   |   |   |   |   |   | 6
+---+---+---+---+---+---+---+
|   |   |   |   |   |   |   |   | 5
+---+---+---+---+---+---+---+
|   |   |   |   |   |   |   |   | 4
+---+---+---+---+---+---+---+
|   |   |   |   |   |   |   |   | 3
+---+---+---+---+---+---+---+
| P | P | P | P | P | P | P | P | 2
+---+---+---+---+---+---+---+
| R | N | B | Q | K | B | N | R | 1
+---+---+---+---+---+---+---+
  a  b  c  d  e  f  g  h

Enter move: e2e4

```

Fonte: Do próprio autor

Ao detectar uma captura de peça, o programa primeiro controla o manipulador para movimentar a peça capturada para a posição de descarte. Em seguida é feita a movimentação da peça que capturou para a casa de destino. Foi feito um tratamento especial para capturas do tipo *en passant*, pois nesses movimentos a peça capturada não está na casa de destino. Nesse caso, a casa do peão capturado pode ser obtido através da linha da peça capturadora e da coluna da casa de destino.

Um outro tratamento especial foi feito para movimentos de roque, pois nesses movimentos duas peças são movimentadas ao mesmo tempo. Nesse caso, o manipulador primeiro movimenta o rei para a casa de destino e em seguida movimenta a torre para a casa de destino.

Por fim, caso o manipulador robótico esteja jogando com as peças pretas, o programa realiza uma conversão da posição do tabuleiro para realizar o movimento adequado. Nesse caso, o tabuleiro é invertido horizontalmente e verticalmente, e as casas de origem e destino são convertidas para suas respectivas casas invertidas. Dessa forma, o manipulador pode movimentar as peças pretas da mesma forma que movimenta as peças brancas.

A Figura 27 mostra o manipulador robótico em sua posição de repouso, aguardando o jogador humano realizar seu movimento. Depois disso, o computador realiza seu movimento e o manipulador se movimenta para a casa de origem da peça que deseja movimentar, conforme ilustrado na Figura 28. Ao chegar na casa de origem, o manipulador

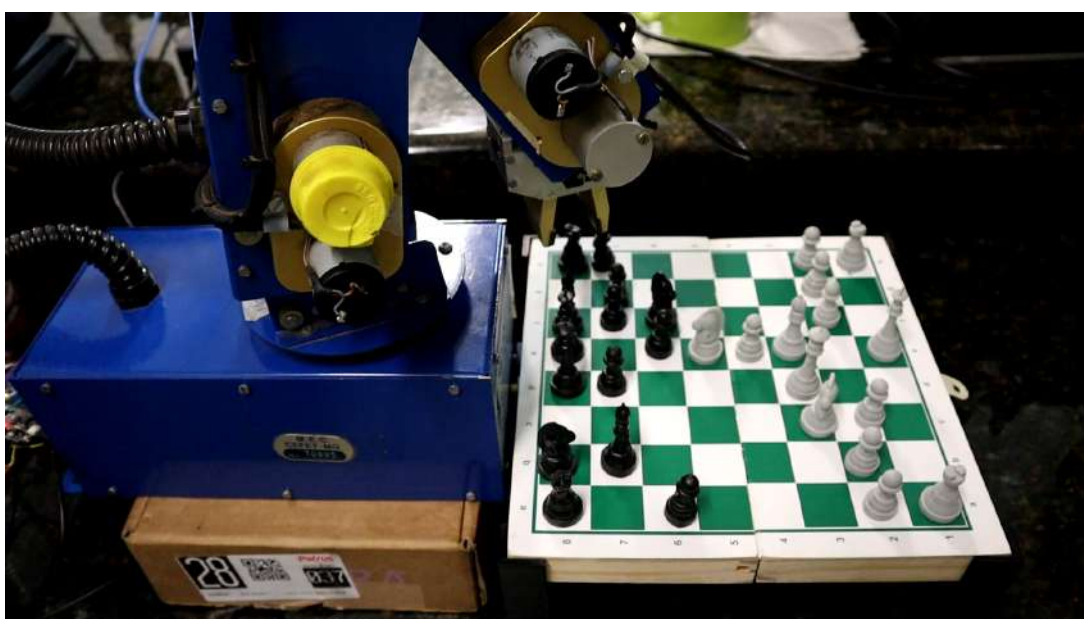
se movimenta no eixo z e pega a peça, como ilustrado na Figura 29. Após pegar a peça, o manipulador se movimenta para a casa de destino, conforme ilustrado na Figura 30. Em seguida, o manipulador se movimenta no eixo z e solta a peça, como ilustrado na Figura 31. Por fim, a Figura 32 mostra o manipulador retornando para sua posição de repouso, onde aguarda o próximo movimento do jogador humano.

Figura 27 – Manipulador robótico em posição de repouso



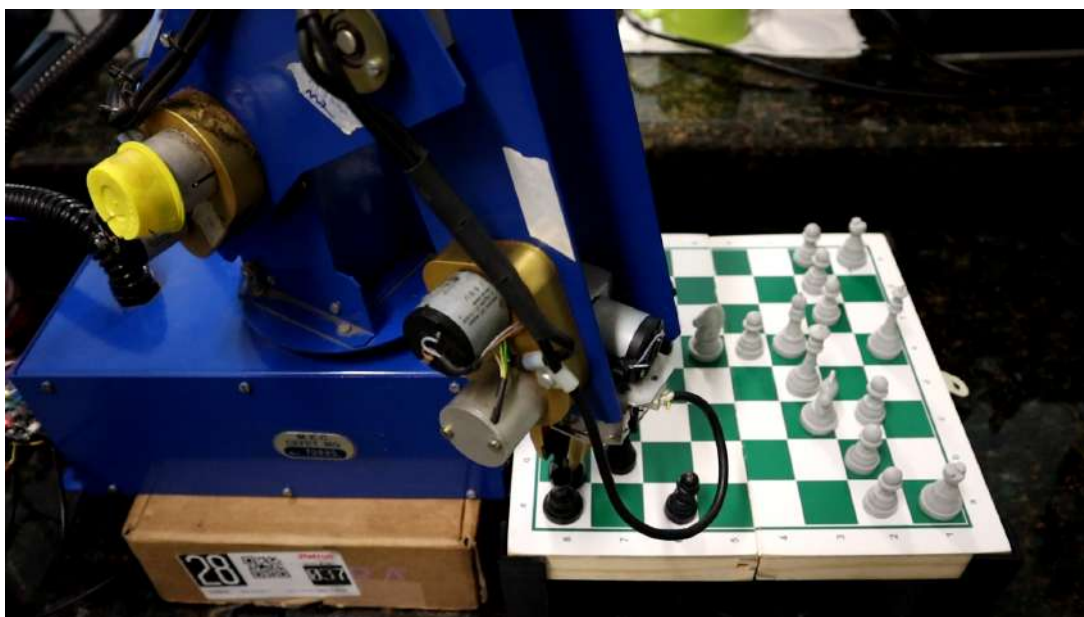
Fonte: Do próprio autor

Figura 28 – Manipulador robótico movimentando para a casa de origem



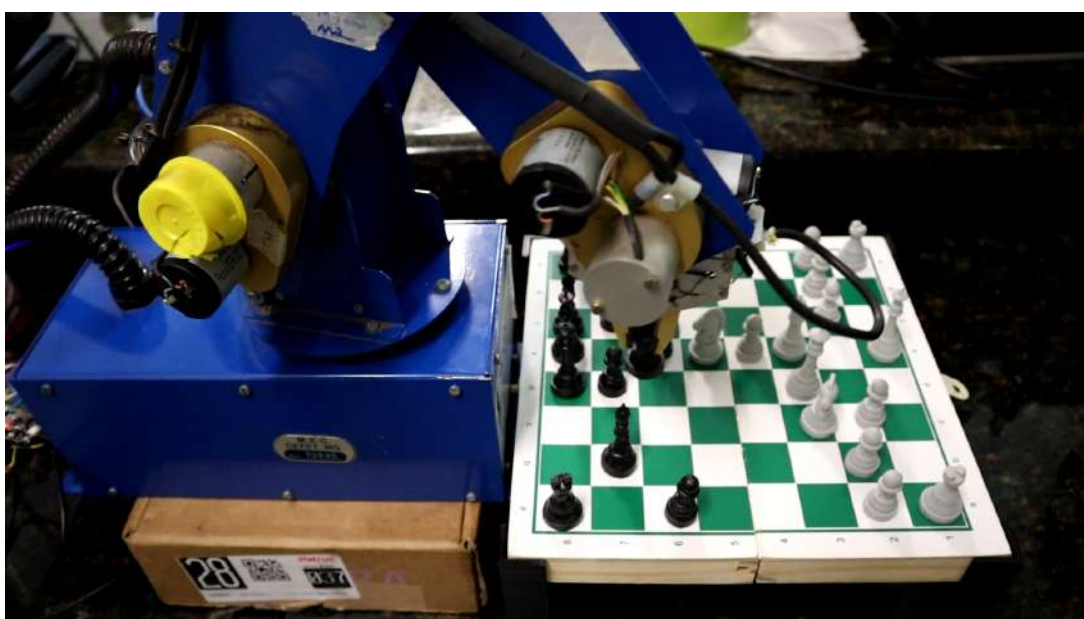
Fonte: Do próprio autor

Figura 29 – Manipulador robótico pegando a peça



Fonte: Do próprio autor

Figura 30 – Manipulador robótico levando a peça para a casa de destino



Fonte: Do próprio autor

Figura 31 – Manipulador robótico soltando a peça



Fonte: Do próprio autor

Figura 32 – Manipulador robótico retornando para a posição de repouso



Fonte: Do próprio autor

5.9 Análise de Desempenho

Depois de finalizado o desenvolvimento do sistema, foi feita uma análise de sua performance, com o objetivo de verificar quanto tempo o manipulador robótico leva para realizar um movimento.

Para isso, foi jogada uma partida contra o computador, anotando o tempo gasto para cada movimento realizado pelo manipulador robótico. O resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8, utilizando a notação algébrica descrita na Subseção 4.1.6. O vídeo dessa partida pode ser acessado no link <https://youtu.be/6tGpsd19aSE>.

Tabela 8 – Tempo de execução de cada movimento

	Humano	Computador	Tempo (s)
1	e4	c5	20.7
2	Nf3	e6	19.0
3	Nc3	a6	23.2
4	Bc4	b5	21.5
5	Bb3	c4	20.9
6	Bxc4	bxc4	41.8
7	d3	cx d3	41.8
8	Qxd3	Bb7	21.6
9	Be3	Nf6	18.8
10	Ne5	Nc6	21.2
11	O-O	Nxe5	40.0
12	Qe2	Qc7	19.8
13	f3	Bc5	19.8
14	Bxc5	Qxc5+	41.4
Tempo médio			26.5
Tempo médio movimento			20.7
Tempo médio captura			41.3

Como pode ser observado na Tabela 8, o manipulador gasta em torno de 21 segundos para movimentar uma peça. Movimentos de captura requerem a movimentação de duas peças, portanto gastam o dobro do tempo. Esse tempo é relativamente alto para um jogo competitivo de xadrez, entretanto é adequado para o objetivo proposto neste trabalho.

6 Conclusão

A partir do desenvolvimento deste trabalho, foi possível obter uma plataforma simples e de baixo custo que permite o jogo entre duas pessoas ou entre uma pessoa e o computador. Essa plataforma pode ser apresentada para crianças e jovens em feiras e eventos para introduzir conceitos básicos de computação, engenharia elétrica e controle de sistemas, além de instigar o conhecimento nessas áreas.

6.1 Limitações

O projeto apresenta algumas limitações que podem ser melhoradas em trabalhos futuros.

Em primeiro lugar, o manipulador robótico escolhido não apresenta tamanho suficiente para alcançar todas as casas do tabuleiro, o que limita o jogo, principalmente quando uma pessoa está controlando o dispositivo. A escolha de um modelo de manipulador robótico com maior alcance pode resolver esse problema.

Além disso, o projeto não apresenta um sistema de detecção de peças no tabuleiro, o que faz com que o usuário tenha que informar ao computador qual peça foi movida. A implementação de um sistema de visão computacional pode tornar o sistema muito mais interativo e intuitivo.

Por fim, o controle do manipulador não é muito preciso, o que pode causar erros na movimentação das peças. Em algumas situações, o manipulador pode derrubar uma peça ao tentar movimentá-la. A implementação de um sistema de controle mais robusto pode resolver esse problema e evitar que erros aconteçam durante a movimentação. Também é possível implementar um sistema de detecção de erros durante a movimentação das peças utilizando visão computacional.

Referências

- ALVESI, I. *Xadrez: o que é, regras, objetivo e história*. 2023. Disponível em <<https://www.significados.com.br/xadrez/>>. Acesso em 03/07/2023.
- CARDONA, A. et al. Uma ferramenta computacional para manipulação de um braço robótico. 2012. Disponível em: <<https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4277/4203>>.
- DIGILENT. *H-Bridges*. 2012. Disponível em <<https://learn.digilentinc.com/Documents/325>>. Acesso em 10/12/2022.
- DOROUKA, P.; PAPADAKIS, S.; KALOGIANNAKIS, M. Tablets and apps for promoting robotics, mathematics, stem education and literacy in early childhood education. Int. J. Mobile Learning and Organisation, Vol. 14, No. 2, 2020, Rethymnon and Heraklion, Crete, Greece, 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/340405779_Tablets_and_apps_for_promoting_robotics_mathematics_STEM_education_and_literacy_in_early_childhood_education>.
- ESPRESSIF. *ESP32 Series Datasheet*. 2023. Disponível em <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em 02/06/2023.
- LEPRINCE-RINGUET, D. *The shortage of tech workers is about to become an even bigger problem for everyone*. [S.l.]: ZDNET, 2021. Disponível em <<https://www.zdnet.com/article/the-shortage-of-tech-workers-is-about-to-become-an-even-bigger-problem-for-everyone>>. Acesso em 10/11/2022.
- LIECHTI, C. *Pyserial*. 2020. Disponível em <<https://pypi.org/project/pyserial>>. Acesso em 22/05/2023.
- MORAES, L. D. R. de. *Jogador de Xadrez Robótico com Visão Computacional*. Dissertação (Bacharelado em Ciência da Computação) — Universidade de Caxias do Sul, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/9675>>.
- OLUNLOYO, V. O.; AYOMOH, M.; ADEOTI, I. On the mentor arm position placement problem: A forward kinematics analysis. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/258998642_On_the_Mentor_Arm_Position_Placement_Problem_A_forward_Kinematics_Analysis>.
- OLUNLOYO1, V. et al. Inverse kinematics analysis of a five jointed revolute arm mechanism. 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281003482_Inverse_Kinematics_Analysis_of_a_Five_Jointed_Revolute_Arm_Mechanism>.
- RIUL, J. A.; MONTENEGRO, P. H. de M.; FERREIRA, G. de S. Controle neural de três elos de um robô de cinco graus de liberdade. 2018. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~tem2/Proceedings_TEMM2018/data/papers/7315.pdf>.
- ROMSTAD, T.; COSTALBA, M.; KIISKI, J. *Stockfish*. 2022. Disponível em <<https://stockfishchess.org>>. Acesso em 22/05/2023.

TORRES-REYES, N. *2-Link Kinematics of Planar Robotic Arm*. 2018. Disponível em <https://www.dashub.org/unlv/wiki/doku.php?id=2_link_kinematics>. Acesso em 26/05/2023.

ZHELYABUZHISKY, I. *Stockfish*. 2022. Disponível em <<https://pypi.org/project/stockfish>>. Acesso em 22/05/2023.

ZILLI, G. M.; LAMBERT, G. Desenvolvendo a educação através da robótica móvel: Uma proposta pedagógica para o ensino de engenharia. 2010. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/9/artigos/606.pdf>>.

Apêndices

APÊNDICE A – Esquemático do circuito de acionamento

