

Prototipagem de robô manipulador com cadeia cinemática aberta, três juntas rotacionais e ímã como órgão terminal.

Murilo Henrique Jesus Miranda⁵, e Ivandro Jose de Freitas Rocha⁶

¹Acadêmico de Engenharia Mecânica/FACEG Email: jesusmurilohenrique@gmail.com

²Orientador(a) e Professor(a) do Curso de Engenharia Mecânica/FACEG Email: ivandro.rocha@evangelicagioianesia.edu.br

Resumo

Os robôs manipuladores, também conhecidos como braços robóticos, representam um dos pilares fundamentais da automação industrial moderna, reproduzindo movimentos humanos de forma precisa, repetitiva e controlada, aplicando princípios de mecânica, eletrônica e controle automatizado. Sua estrutura é composta, em geral, por elos e juntas articuladas que proporcionam graus de liberdade, permitindo a realização de tarefas complexas, como soldagem, pintura, montagem, movimentação de materiais e inspeção de peças. Este projeto visa desenvolver um protótipo de robô manipulador com cadeia cinemática aberta e três juntas rotacionais (RRR), controlado por um microcontrolador Arduino. O projeto abrange o design, a construção e a validação do manipulador, com foco em sua aplicação em tarefas de manipulação precisa. A pesquisa será conduzida em etapas sequenciais, incluindo a revisão da literatura, a modelagem e simulação do robô, a construção do protótipo e a avaliação de seu desempenho. Na fase de construção do manipulador, serão utilizados joysticks para controlá-lo manualmente. Na fase seguinte, o objetivo é programar o manipulador para que ele execute operações autônomas. O órgão terminal do manipulador será um ímã, permitindo a manipulação de objetos metálicos com precisão. Ao concluir o projeto, espera-se entregar um manipulador com duas formas de operação: manual, por meio de joystick, e autônoma, através de programação. O protótipo será avaliado quanto à sua precisão, repetibilidade e capacidade de executar tarefas específicas. Esta pesquisa visa contribuir para o avanço da robótica, especialmente em aplicações industriais e de automação.

Palavras-chave: design; modelagem; simulação; construção, ímã.

Abstract:

Robot manipulators, also known as robotic arms, represent one of the fundamental pillars of modern industrial automation, reproducing human movements in a precise, repetitive, and controlled manner, applying principles of mechanics, electronics, and automated control. Their structure is generally composed of links and articulated joints that allow degrees of freedom, enabling them to perform complex tasks such as delivery, painting, assembly, material delivery, and part inspection. This project aims to develop a prototype robot manipulator with an open kinematic chain and three rotational joints (RRR), controlled by an Arduino microcontroller. The project encompasses the design, construction, and validation of the manipulator, focusing on its application in precise manipulation tasks. The research will be conducted in sequential stages, including a literature review, modeling and simulation of the robot, construction of the prototype, and evaluation of its performance. During the construction phase of the manipulator, joysticks will be used for manual control. In the next phase, the objective is to program the manipulator to perform autonomous operations. The manipulator's terminal organ will be magnetic, enabling the precise manipulation of metal objects. Upon completion of the project, we hope to deliver a manipulator with two modes of operation: manual, via joystick, and autonomous, via programming. The prototype will be evaluated for its accuracy, repeatability, and ability to perform specific tasks. This research aims to contribute to the advancement of robotics, especially in industrial and automation applications.

Keywords: design; modeling; simulation; construction; magnetic.

INTRODUÇÃO

Os manipuladores representam uma classe fundamental de dispositivos utilizados em uma variedade de indústrias, desde a construção até a manufatura de precisão. Estes sistemas, que aproveitam os princípios da mecânica para controlar o movimento e a força, desempenham um papel crucial na automação de processos, na manipulação de cargas pesadas e em uma série de outras aplicações industriais. O desenvolvimento contínuo da automação e dos sistemas de controle associados tem impulsionado a evolução dos manipuladores, tornando-os mais eficientes, precisos e versáteis.

Robô Industrial é um equipamento que pode ser programado para realizar uma variedade de tarefas de manipulação e locomoção sob o comando de um controle automático. Robôs são considerados como representantes típicos de sistemas mecatrônicos, os quais integram aspectos de manipulação, sensoriamento, controle e comunicação. Um conceito para o termo mecatrônica refere-se ao projeto e uso de sistemas eletrônicos e computacionais, os quais possibilita que o equipamento se comporte de forma autônoma diante de atividades não repetitivas e não padronizadas. Os sistemas mecatrônicos têm como características principais a separação explícita

entre controle e potência (interconectados através das informações dos sinais dos sensores); o aumento da complexidade; a segurança dependente da confiabilidade de hardware e estabilidade; o enfoque no desenvolvimento de estratégias de controle, visando a compensação das características não lineares dos componentes mecânicos que prejudicam o desempenho [1].

Nesta percepção, busca-se explorar os avanços recentes e as aplicações dos manipuladores na indústria moderna. Entendendo os fundamentos por trás da operação dos manipuladores, em seguida, examina-se os diferentes tipos de manipuladores, destacando suas características distintas e áreas de aplicação.

O desenvolvimento da tecnologia permitiu que esses equipamentos fossem cada vez mais popularizados, visto que o avanço no processamento de dados gerou mudanças não só nos manipuladores, mas também nos sistemas de manufatura. Situação que proporciona que, segundo a IFR (International Federation of Robotics), no período entre 2008 e 2018, o número de robôs adicionados à indústria anualmente mais que triplicasse, chegando ao número estimado de 384 mil unidades no ano de 2018 [2].

Além disso, entender os recentes avanços tecnológicos que têm impulsionado a inovação nesta área, incluindo o uso de sensores de alta precisão, sistemas de controle inteligente e materiais avançados para melhorar a eficiência e a confiabilidade dos manipuladores.

A utilização de manipuladores em tarefas com caminhos predefinidos é algo recorrente em aplicações industriais, situação em que o tempo de trajetória está diretamente ligado ao ciclo de trabalho e, portanto, relacionado com a produtividade e ganhos econômicos, 2 aspectos sempre relevantes nas atividades industriais.

Por fim, explorar a aplicação prática do manipulador em metais. Ao demonstrar o impacto significativo que esses sistemas têm na melhoria da produtividade, segurança e eficiência dos processos. Por meio desta revisão, pretende-se desenvolver e fornecer uma visão aprofundada dos manipuladores focando na manipulação de metais, desde seus princípios fundamentais

destacando seu papel na indústria moderna e as oportunidades contínuas para inovação e desenvolvimento futuros.

A complexidade dos problemas de otimização envolvendo casos de manipuladores com espaço de trabalho de dimensões elevadas e trajetórias com restrições dinâmicas, cinemáticas e de obstáculos. Ressaltando a recorrente utilização de algoritmos heurísticos para otimização nas trajetórias, em razão da alta taxa de sucesso desses em problemas complexos, apesar de nem sempre apresentarem convergência para um mínimo global, característica dos métodos estocásticos, propõem a utilização de trajetória formadas por passos, onde cada um desses é codificado para implementação do algoritmo de enxame de partículas para otimização, através de uma função custo que considera presença de obstáculos, distância percorrida, acelerações e modificações abruptas de trajetórias. Os autores informam que o método possui convergência rápida e que um valor da função custo do ponto ótimo encontrado é menor quando comparado com outros métodos estocásticos [3].

REFERENCIAL TEÓRICO

Sistemas robóticos são equipamentos importantes nos sistemas modernos de manufatura, com aplicação que envolvem diversas áreas do conhecimento: mecânica, eletrônica, controle, informática, sensores, inteligência artificial, dentre outras [4].

A manipulação de materiais metálicos é uma necessidade para a sociedade em diversas indústrias, desde a fabricação até a reciclagem. A utilização de manipuladores oferece uma solução eficiente para esse fim, permitindo movimentos precisos e controle adequado durante as operações de manuseio. A incorporação de ímãs nos manipuladores proporciona uma capacidade adicional para lidar com materiais ferromagnéticos, aumentando sua versatilidade e eficácia.

O conceito de controle refere-se ao processo de fazer uma variável alcançar um valor desejável, chamado valor de referência, de forma adequada e segura. Os avanços

na teoria de controle, junto com a disponibilidade de computação barata, têm conduzido muitas pesquisas e aplicações práticas em áreas tais como manipulação robótica, controle de aviões e foguetes, processos químicos, sistemas de potência, pilotagem de navios e bioengenharia [5].

Os robôs industriais podem ser classificados considerando-se seis aspectos fundamentais [6]:

1. Pelo controle: O sistema de controle de um manipulador determina seu grau de autonomia e a capacidade de realizar tarefas de forma independente.
2. Mobilidade da base: Podem ser fixos ou móveis. Manipuladores fixos ficam em uma única posição e possuem uma área limitada. Manipuladores móveis, se deslocam para realizar suas tarefas, podem ser terrestres (movendo-se sobre rodas ou trilhos), aquáticos (capazes de operar na água) ou aéreos (drones).
3. Estrutura cinemática: refere-se ao arranjo e conexão dos elementos, cadeia cinemática fechada têm multiplas cadeias abertas trabalhando em paralelo, proporcionando maior rigidez e precisão, cadeia cinemática aberta, que compõem a maioria dos manipuladores industriais, possuem elementos conectados em série, permitindo maior flexibilidade e alcance.
4. Grau De Liberdade (GDL): define quantas direções o manipulador pode se mover. Para posicionar uma ferramenta no espaço tridimensional, um robô precisa de 6 GDL: 3 para definir a posição (movimentos em x, y e z) e 3 para definir a orientação (rotações em torno dos eixos x, y e z).
5. Espaço de trabalho: é o volume tridimensional pelo qual ele pode trabalhar, é definido pela configuração das juntas e a extensão dos elementos, diferentes configurações (como juntas rotacionais ou prismáticas) determinam a forma e o alcance do espaço de trabalho, influenciando a sua capacidade.
6. Acionamento: podem ser acionados por diversos tipos de motores e sistemas, servo-sistemas são comuns,

utilizando motores elétricos, pneumáticos ou hidráulicos para mover as partes do robô com precisão.

Outro aspecto do desenvolvimento de manipuladores é a compreensão dos tipos de juntas que os compõem. Existem principalmente dois tipos de juntas:

- Juntas Rotacionais: permitem que um elemento gire em torno de um eixo fixo, proporcionando movimento angular, são utilizadas em braços robóticos para executar movimentos de rotação, alcançam muitas posições e orientações no espaço tridimensional.
- Juntas Prismáticas: juntas que permitem um elemento do manipulador se mover linearmente ao longo de um eixo, proporcionando movimento de translação, são empregadas em sistemas que exigem movimentos lineares precisos, como em aplicações de montagem e manipulação.

O grau de liberdade (GDL) de um robô está diretamente relacionado ao tipo e à quantidade de juntas que o compõem. Cada GDL representa uma dimensão independente de movimento, permitindo deslocamentos lineares (para frente/traz, esquerda/direita, cima/baixo) ou rotacionais em torno dos eixos. Assim, quanto maior o número de juntas, sejam elas rotacionais ou prismáticas, maior será o grau de liberdade do robô. Um GDL elevado amplia a capacidade do manipulador de executar movimentos complexos e precisos, possibilitando alcançar diferentes posições e orientações no espaço. Dessa forma, a configuração e o arranjo das juntas influenciam diretamente a flexibilidade, a destreza e a funcionalidade do sistema robótico.

Manipuladores robóticos com cadeias cinemáticas abertas oferecem vantagens significativas em termos de simplicidade de design e flexibilidade operacional, sendo ideais para tarefas que requerem grande alcance e adaptabilidade. Além da simplicidade e flexibilidade, esses manipuladores também são conhecidos por sua facilidade de controle e manutenção, além de permitir configurações mais diversas e complexas de movimento, adaptando-se melhor a diferentes tipos de tarefas e ambientes [7].

O desenvolvimento de um protótipo de manipulador robótico de cadeia cinemática fechada, composto por três juntas rotacionais (RRR), constitui um avanço relevante para o aprimoramento acadêmico e profissional dos estudantes envolvidos. Esse tipo de robô não apenas aprimora a eficiência e a precisão em operações industriais, como também proporciona uma plataforma versátil e de alta confiabilidade para a realização de diversas aplicações experimentais e tecnológicas.

O desenvolvimento de um protótipo de manipulador robótico com cadeia cinemática aberta, três juntas rotacionais (RRR) e tendo como órgão terminal um ímã, representa um avanço significativo. A construção e programação do protótipo proporcionam uma oportunidade valiosa de aprendizado prático em robótica, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento tecnológico [2].

Existem diversas abordagens voltadas à obtenção de soluções com maior aplicabilidade prática; entretanto, muitas enfrentam desafios tanto na implementação das leis de controle quanto nas limitações físicas dos manipuladores robóticos. Nesse contexto, propõe-se a utilização de técnicas de controle ótimo e programação dinâmica, incorporando critérios baseados no quadrado da velocidade e do torque, a fim de determinar trajetórias temporalmente ótimas que apresentem maior suavidade nos movimentos. [8].

A base teórica desses sistemas é fundamentada nos princípios mecânicos, que se baseiam na transmissão de força por meio de acionamentos motorizados, sejam elétricos ou não e com cadeia aberta.

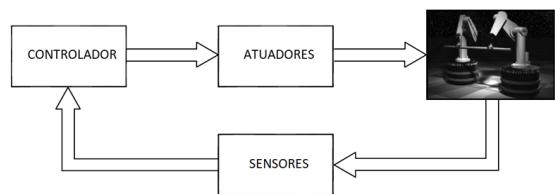
A teoria por trás da aplicação de ímãs em manipuladores está enraizada nos conceitos da magnetização elétricos, ímãs permanentes ou eletroímãs são capazes de gerar um campo magnético que pode ser controlado através de alterações na corrente elétrica ou na disposição física dos materiais magnéticos [9].

Isso possibilita a manipulação precisa de materiais ferromagnéticos, como metais, facilitando a seleção, elevação e movimentação deles, a integração de sistemas de controle eletrônico permite uma operação mais refinada dos

manipuladores hidráulicos, possibilitando a automação de tarefas repetitivas e a otimização dos processos industriais. Esses sistemas de controle são fundamentados em princípios de engenharia elétrica, envolvendo o uso de sensores, atuadores e algoritmos de controle para garantir um desempenho preciso e seguro [10].

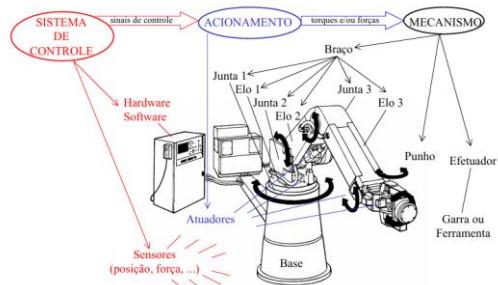
Os manipuladores robóticos podem ser decompostos em quatro subsistemas: mecânico (estrutura do braço); sensores (internos ou externos ao manipulador); controlador (responsável por processar as informações dos sensores para fornecer sinais adequados aos atuadores); atuadores (responsáveis por acionar o sistema mecânico). Na Figura 1 são mostradas as interações entre os subsistemas presentes em um sistema robótico, onde os sensores fornecem informações do manipulador e/ou do ambiente que esse está inserido. Esses dados são processados pelo controlador que envia sinais para os atuadores de modo que os elos se movimentem e que o robô execute tarefas da maneira desejada [11].

Figura 1 – interação de componentes



Fonte: Luche, Gabriel. 2020

Figura 2 – Detalhamento de sistemas



Fonte: Valdierio, Antonio. 2005

A estrutura de um manipulador robótico consiste em uma sequência de corpos rígidos, denominados elos,

interligados por articulações, denominadas juntas. A cadeia cinemática de um manipulador pode ser caracterizada como aberta, onde uma única sequência de elos conecta os extremos da cadeia, ou fechada, onde a sequência de elos forma um caminho fechado.

A estrutura mecânica de um robô manipulador é geralmente composta por um braço que garante mobilidade e um punho que confere destreza, além de uma ferramenta, ou efetuador, que realiza a tarefa requirida, a definição de graus de liberdade é advinda do número de variáveis independentes necessárias para determinar a posição de cada elo do mecanismo.

O espaço de trabalho de um manipulador representa a região do espaço em que o efetuador do manipulador pode acessar. O formato e volume do espaço de trabalho dependem de restrições cinemáticas, relacionadas às limitações de juntas e da própria estrutura mecânica como um todo. Fatores, como restrições espaciais do ambiente de trabalho e posicionamento dos objetos, devem ser levados em consideração na escolha do espaço de trabalho do manipulador.

O tipo e a sequência dos GDL da base até o efetuador permitem a classificação dos manipuladores em cartesiano, cilíndrico, esférico, SCARA e antropomórfico.

A cinemática de robôs é o estudo da configuração e movimento da estrutura através de uma análise geométrica, desconsiderando limites ou ações do movimento, assim como, capacidade dos atuadores. A análise cinemática pode ser classificada como direta e inversa.

Cinemática direta consiste no problema da determinação da posição e orientação da ferramenta ou efetuador do manipulador no espaço de trabalho cartesiano a partir das variáveis de junta do mesmo [12].

O problema da cinemática inversa consiste em, a partir da posição e orientação do efetuador, encontrar as variáveis de junta do mesmo. Este problema é relacionado com o planejamento de trajetórias, visto que para determinação do movimento desejado do efetuador deve ser

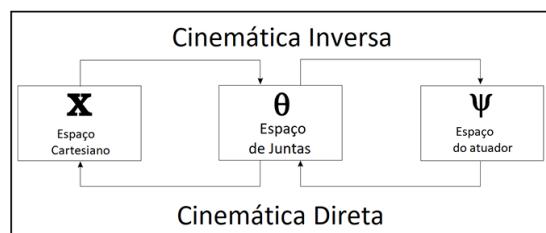
determinado o movimento das juntas e, por consequência, também dos atuadores [12].

Um determinado vetor das variáveis de juntas é chamado de configuração, e pode ser considerado um ponto de um espaço que contempla todas as possíveis configurações que o robô pode assumir, denominado espaço de configuração (espaço de juntas). Essa abordagem é usualmente utilizada em técnicas de planejamento de trajetórias de 10 manipuladores que possuem obstáculos em seu espaço de trabalho.

A mesma ideia se aplica para posicionamento dos atuadores, formando o espaço de atuadores, e para o posicionamento e orientação do efetuador, formando o espaço cartesiano (ou de ferramenta).

A Figura 3 representa a correspondência entre as cinemáticas inversa e direta através do mapeamento entre espaço cartesiano, espaço de juntas (espaço de configuração) e espaço dos atuadores. De modo geral o problema de mapeamento entre os espaços de juntas e atuadores não é complexo, visto que as relações cinemáticas são facilmente determinadas com precisão, devido à simplicidade dos acoplamentos mecânicos presentes. Isso não se repete nas relações de mapeamento entre o espaço cartesiano e de juntas, pois consistem geralmente de uma relação não-linear [13].

Figura 3 - Correspondencias entre cinematicas



Fonte: Luche, Gabriel. 2020

Existe dois requisitos principais relacionados com a viabilidade de aplicação de robôs industriais. O primeiro é o aumento da produtividade e pode ser notado na indústria de manufatura, principalmente na automobilística. O segundo é a segurança e está relacionado ao fato de robôs

poderem desempenhar tarefas muito perigosas ao ser humano, como por exemplo as atividades realizadas em ambientes espaciais, nucleares e submarinos.

Dentro deste contexto, a necessidade de aplicação de automação e robótica também em ambientes industriais altamente insalubres, tais como os de soldagem, pintura, polimento, tratamentos térmicos e químicos, além da movimentação de cargas [14].

Outro grande nicho de possibilidades de aplicação de manipuladores robóticos está no setor agrícola, onde os avanços tecnológicos em eletrônica, informática e geoprocessamento têm permitido a realização de projetos audaciosos na mecanização e no gerenciamento das tarefas rurais, gerou à chamada Agricultura de Precisão [14].

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do protótipo de robô manipulador com cadeia cinemática aberta e eletroímã como órgão terminal, serão utilizados o espaço físico e os recursos computacionais disponíveis no centro tecnológico da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, localizada na cidade de Goianésia-GO.

Inicialmente, foram identificadas as necessidades e especificações do manipulador, levando em consideração os tipos de metais a serem manipulados, as dimensões e pesos dos objetos, bem como as restrições operacionais e de segurança. Com base nos requisitos estabelecidos, foi realizado um projeto conceitual do manipulador, considerando a disposição dos componentes mecânicos e magnéticos. Foram exploradas diferentes configurações e materiais para garantir a robustez e eficiência do sistema.

Serão selecionados materiais adequados, como alumínio e plástico, e componentes, incluindo servomotores, ímãs, Arduino, cabos wire, modulo joystick, fonte 40V, para a montagem física do manipulador. Conectores e partes plásticas serão fabricados utilizando impressão 3D com o PLA velvet preto, garantindo precisão e flexibilidade no design. Após isto, joysticks devidamente conectados as placas de Arduino UNO e servo motores

serão utilizados para controlar manualmente o manipulador, permitindo teste prático e ajustes no controle.

A seleção dos componentes levou em conta critérios de desempenho, compatibilidade e disponibilidade no mercado. Os componentes selecionados foram montados e integrados de acordo com o projeto conceitual. Foram realizados testes de funcionamento preliminares para garantir a adequada interação entre os elementos do sistema.

Paralelamente à montagem mecânica, foi desenvolvido o sistema de controle eletrônico do manipulador. Foram programados algoritmos de controle no Arduino IDE para gerenciar os movimentos e a ativação dos ímãs, garantindo um bom funcionamento.

Tabela 1 – Lista de materiais

Qtde	Material
1	Eletroímã Solenoide
2	Servo motor
1	Protoboard - Matrix de contato
1	Arduino UNO
1	kit cabo jumper
2	Modulo joystick analógico
1	Módulo Regulador De Tensão Lm2596s conversor
1	Fonte Chaveada 12v 30a
1	Filamento Pla Velvet Preto
1	Arduino Sensor Shield V5.0

Figura 4 – Imagens dos materiais.

A) Arduino Sensor Shield V5.0



B) Servo motor



Fonte: Próprio autor, 2025

Fonte: Próprio autor, 2025

C) Fonte Chaveada 12v 30a



Fonte: Próprio autor, 2025

D) Módulo Regulador De Tensão



Fonte: Próprio autor, 2025

E) Eletroímã Solenoide



Fonte: Próprio autor, 2025

F) kit cabo jumper



Fonte: Próprio autor, 2025

G) Modulo joystick analógico



Fonte: Próprio autor, 2025

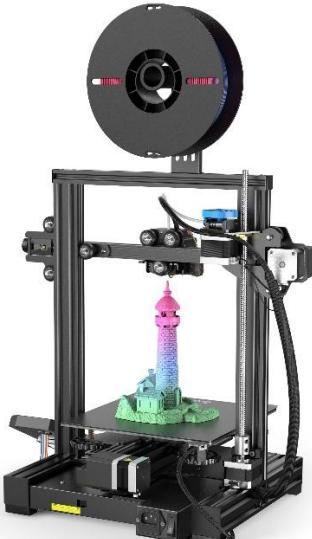
H) Arduino UNO



Fonte: Próprio autor, 2025

Os elos e juntas serão imprimidos utilizando uma impressora 3D devido a sua versatilidade, utilizando o filamento PLA, conforme demonstra a Figura 5.

Figura 5 – Impressora 3D



Fonte: Próprio autor, 2025.

A programação do Arduino será feita em linguagem C/C++, utilizando bibliotecas específicas para o controle de motores e sensores. Inicialmente, o controle será feito manualmente por meio de joysticks. Em uma fase subsequente, o objetivo é programar o manipulador para realizar operações autônomas, integrando algoritmos de controle e sensores para uma maior eficiência e precisão.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante o desenvolvimento do protótipo diversas dificuldades foram encontradas, como o desenvolvimento foi feito por um método empírico, com a impressão das peças (elos e juntas) e tendo os componentes separados foi posto sobre a superfície para mapeamento de algo faltante conforme a Figura 6 abaixo

Figura 6 – Posição das peças.



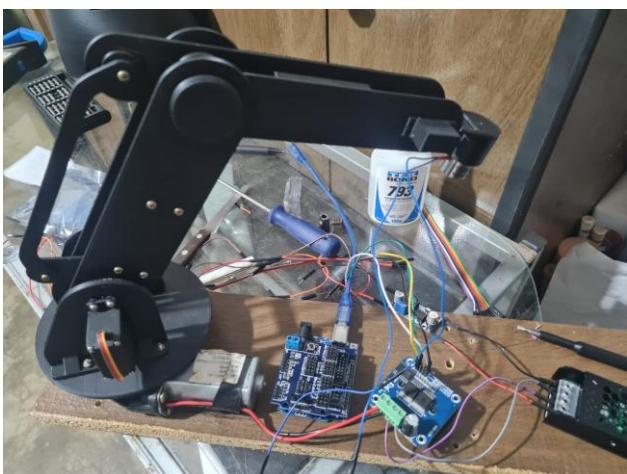
Fonte: Próprio autor, 2025

No desenvolvimento do código de comando em linguagem C++ ocorreu alguns erros de desenvolvimento e corrigiu-se de acordo com as falhas apresentadas pelo manipulador ao se mover.

Figura 7 – Estrutura montada

Fonte: Próprio autor, 2025

Conforme demonstrado na Figura 7 realizou se a montagem preliminar da parte estrutural do protótipo, a fim de averiguar os encaixes e caso fosse necessário, realizar ajustes, os ajustes até então mapeados foram na base devido ao motor que será instalado e no local do eletroímã.

Figura 8 – todos os componentes.

Fonte: próprio autor

Na Figura 8 é possível visualizar a montagem final do trabalho na base de fixação onde para fins didáticos os componentes ficam expostos e os cabos devidamente conectados.

CONCLUSÃO

Por fim, a aplicação prática do manipulador em metais é de suma importância para o avanço tecnológico da

sociedade. Ao demonstrar o impacto de melhoria que o mesmo pode proporcionar em um processo simples de manipulação de metais significa que esses sistemas têm uma produtividade alta, segura e eficiência em vários processos industriais, civis, mecânicos, dentre outros.

A montagem foi bem-sucedida aplicando novas técnicas e modelos porém com diversas oportunidades de melhorias para futuros trabalhos em desenvolvimento.

A implementação do eletroímã evitou possíveis danos nas peças e chapas metálicas provando assim a sua melhor eficiência em comparação com a garra que poderia ocasionar alguma quebra nos materiais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ceroni, José A; NOF, Shimon Y. Robots terminology. In NOF, Shimon Y (Ed) Handbook, of industrial robots. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1999 p. 1261- 1317.
2. Valdieiro, Antoio Carlos. Controle de Robos Hidraulicos com compensação de atrito; 2005, Universidade Federal de Santa Catarina, fev 2005, pg 177.
3. **LEE, Sung-Uk; CHANG, Pyung H.** *Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with switching action with integral sliding surface.* Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, v.4, p. 3955–3960, May 2001.
4. Gao, M., Ding, P., e Yang, Y. Time-Optimal Trajectory Planning of Industrial Robots Based on Particle Swarm Optimization. In 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). IEEE, 2015
5. **FRANKLIN, Gene F.; POWELL, I. David; EMAMI-NAEINI, Abbas.** *Feedback control of dynamic systems.* 3. ed. Stanford: Addison-Wesley, 1994.

6. ÁNGELES, Jorge. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms*. 2. ed. New York: Springer, 2007.
7. Spong, M. W. *Robot Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1st edition, 1989.
8. Bobrow, J., Dubowsky, S., e Gibson, J. *Time-Optimal Control of Robotic Manipulators Along Specified Paths*, The International Journal of Robotics Research, vol. 4(3), p. 317, 1985.
9. Silva, Fabricio Ströher da. *Eletrônica Industrial*. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
10. RIASCOS, LUIS ALEJANDRO; SUAREZ, RAMON JESUS. *Robótica Industrial: Teoría y aplicaciones*. 2nd ed. Pearson Education, 2010.
11. LUCHÉ, Gabriel de Borba. *Otimização de trajetórias em relação ao tempo em manipulador hidráulico*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
12. SPONG, MARK W.; HUTCHINSON, SETH; VIDYASAGAR, M. *Robot Modeling and Control*. New York: John Wiley & Sons, 2006.
13. Ceccarelli, M. *Fundamentals of mechanics of robotic manipulation*. Springer, 2011
14. Valdiero, A. C. *Controle de Robôs Hidráulicos com Compensação de Atrito*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
15. Warren, John-David, *Arduino para robótica*. – São Paulo: Blucher, 2019.
16. PRUDENTE, Francisco. *Automação Industrial - Pneumática: teoria e aplicação*. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
17. STEWART, Harry L. *Pneumática e Hidráulica*. São Paulo: Hemus, 2016.
18. ANDERSON, CHRIS. *Makers: A nova revolução industrial*. São Paulo: Saraiva, 2012.
19. ARDUINO. Documentation. Disponível em <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage>. Acesso em 17 de junho de 2024.
20. CRAIG, JOHN J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 3rd ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.
21. NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING and NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. *Industrial robots and their applications*. Washington, DC: The National Academies Press, 2019.
22. SANTOS, ADRIANO; GORGULHO JÚNIOR, ÁLVARO. *Automação e Robótica Industrial*. 1st ed. LTC, 2015.
23. SICILIANO, BRUNO; KHATIB, OUSSAMA (Eds.). *Springer Handbook of Robotics*. Berlin: Springer, 2008.
24. THINGIVERSE. Disponível em <https://www.thingiverse.com/thing:6202648>. Acesso em 16 de junho de 2024.