



## **CONSTRUÇÃO DE UM BRAÇO ROBÓTICO CONTROLADO POR SENSORES INERCIAIS**

Stephan Costa Barros  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brazil  
ORCID: 0009-0009-2423-709X

Renato Souza Santana Filho  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brazil  
ORCID: 0000-0003-4428-751X

Samuel de Oliveira Lino  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brazil  
ORCID: 0000-0001-6760-8326

Lucas Soares Leal  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brazil  
ORCID: 0009-0008-1347-1588

Izabella Maria Silva Ribeiro  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brazil  
ORCID: 0009-0006-7623-1405

Ana Julia da Silva Lima  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brazil  
ORCID: 0009-0005-2921-463X

Alcimar Barbosa Soares  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Uberlândia  
Uberlândia, Brazil  
ORCID: 0000-0003-1100-3533

**Resumo** - Este trabalho tem como objetivo principal a elaboração de um braço robótico controlado por sinais biomédicos. Foram feitas mensurações físicas e de eletrônica, com objetivo de criar um sistema embarcado que seja capaz de suportar de maneira eficiente todos os requisitos determinados para o constructo final.

**Palavras-Chave**- Robótica; Sensores; Embarcado.

### **CONSTRUCTION OF A ROBOT ARM CONTROLLED BY INERTIAL SENSORS**

**Abstract** - This work has as main objective the elaboration of a robotic arm controlled by biomedical signals. Were made physical measurements and of electronics, with objective to create an embedded system that is capable of supporting in efficient manner all the requirements determined for the final construct.

**Keywords** - Robotics, Sensors, Embedded.

### **I. INTRODUÇÃO**

Atualmente, as amputações de membros superiores são realizadas principalmente para tratar lesões traumáticas, controlar dores refratárias, conter a dispersão de infecções e necroses e tratar doenças malignas. Apesar de serem pouco frequentes, esse tipo de intervenção cirúrgica é algo assolador que afeta tanto física quanto psicologicamente, uma vez que esses indivíduos perdem autonomia para diversas atividades cotidianas [1]. Uma das principais alternativas para melhorar a qualidade

de vida dessas pessoas é o uso de próteses de membros superiores. Tendo isso em vista, diversos modelos de próteses estão disponíveis no mercado e na literatura, variando em termos de design e nível tecnológico proporcionando ao usuário diferentes funcionalidades, como: próteses estéticas (funcionalidade basicamente nula); próteses ativas acionadas por força própria (têm como objetivo restaurar alguma funcionalidade ao portador); próteses mioelétricas (fornece maior independência ao usuário) [2] [3]. Entre esses modelos destacam-se as próteses robóticas que integram componentes mecânicos eletrônicos e software em um único dispositivo. De acordo com a literatura, o uso de braços robóticos como próteses de membros superiores pode melhorar significativamente a qualidade de vida do usuário, pois, por ter sua estrutura desenvolvida para executar movimentos semelhantes aos naturais, é capaz de devolver a autonomia da pessoa que teve o membro amputado. Quando associados a captura de sinais biomédicos tais como eletromiografia (EMG), redes neurais artificiais [4] e até mesmo comando de voz [5], a eficácia no controle da prótese é ainda mais elevada, proporcionando maior precisão e facilidade de uso. O desenvolvimento de um dispositivo dessa natureza requer o estudo e a integração de múltiplas áreas do conhecimento, como Anatomia Humana, Biomecânica, Programação, Robótica, e outros campos do conhecimento. Assim, o objetivo deste trabalho é projetar e desenvolver um braço robótico inspirado no design no Robô Da Vinci, controlado por sinais biomédicos obtidos a partir de uma luva dotada de sensores inerciais.

## II. METODOLOGIA

A confecção do braço robótico e da luva com sensores inerciais para controle sem fio foi estruturada em quatro etapas: busca bibliográfica, projeto de infraestrutura mecânica, projeto de hardware e desenvolvimento de *software*. Além dessas etapas, foi essencial estabelecer um ambiente de testes que permitisse avaliar a integração completa do sistema por meio de um circuito de atividades para o protótipo final. Esta seção detalha a construção do braço robótico e da luva de controle, abordando os materiais, componentes e ferramentas de *hardware* e *software* aplicadas no desenvolvimento.

### A. Busca bibliográfica

A etapa inicial consistiu em uma busca bibliográfica focada em artigos científicos que abordassem braços robóticos e sistemas embarcados, além de métodos de controle baseados em sinais biomédicos.

Com esse embasamento teórico, foi possível adaptar um projeto 3D de código aberto disponível na plataforma *Maker-Bot's Thingiverse*, garantindo que o protótipo final atendesse às dimensões mínimas para a realização de testes. O modelo escolhido foi o *Robotic Arm* [6], devido à sua simplicidade, que facilita tanto a adequação das peças quanto a reprodutibilidade do projeto.

### B. Projeto mecânico

O modelo tridimensional foi desenvolvido mantendo os mesmos graus de liberdade do original, distribuídos em um eixo na base, quatro no corpo e um na garra do braço. O manipulador foi projetado com três "dedos" para simular o movimento de pinça, sendo adequada para o manuseio de pequenos objetos.

Em relação às dimensões físicas do braço e da luva, algumas modificações foram feitas. As estruturas foram modeladas utilizando o *software Fusion*, de maneira que o comprimento final do braço atingiu cerca de 35 cm, assim como se observa na Figura 1.

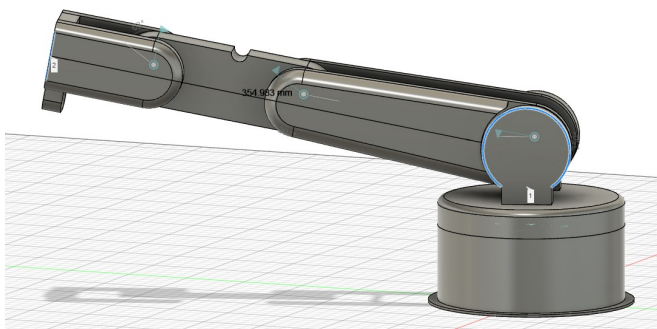


Figura 1: Exemplo de dequação de comprimento realizada no software *Fusion*. Esta modificação foi necessária para atender especificações físicas de um circuito de teste.

Quanto ao material utilizado, a escolha foi feita com base

em três critérios principais: alta resistência mecânica, leveza para não sobrecarregar os atuadores e resistência à fadiga causada por movimentos repetitivos. O material escolhido foi o ácido polilático (PLA), por atender esses requisitos e ser facilmente adquirível. Todas as peças foram impressas individualmente por manufatura aditiva com PLA, exceto os dedos do manipulador, que foram fabricados com PLA flexível (*PLA Flex*) para garantir maior flexibilidade.

### C. Projeto de hardware

O projeto de hardware foi elaborado nas plataformas *EasyEDA* e *KiCAD* e foi dividido em três partes: Circuito de Alimentação, Circuito da Luva de Controle e Circuito dos Motores, observados nas figuras 2, 3 e 4, respectivamente.

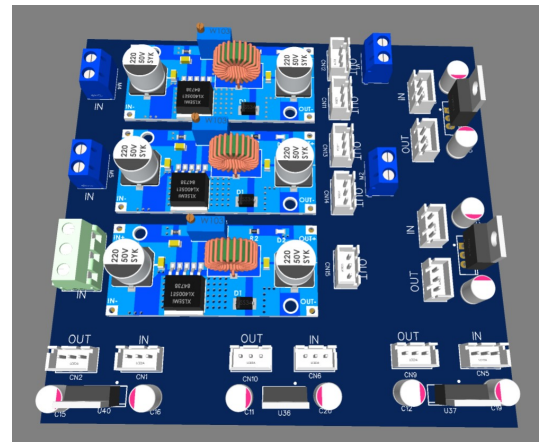


Figura 2: Circuito de alimentação elétrica. A alimentação de todo conjunto de motores é garantida por essa unidade especial, de forma que a corrente máxima do conjunto está sempre garantida caso seja requisitada.

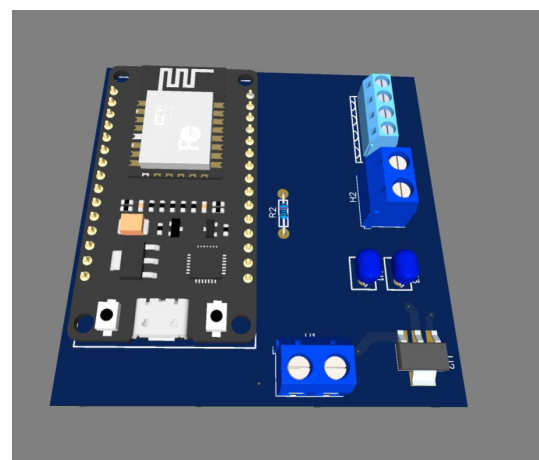


Figura 3: Circuito da luva de controle contendo conectores para o sensor inercial. Os sinais obtidos pelo sensor são transmitidos para o circuito dos servo-motores via ESP-NOW, onde são interpretados e convertidos em acionamento de motores.

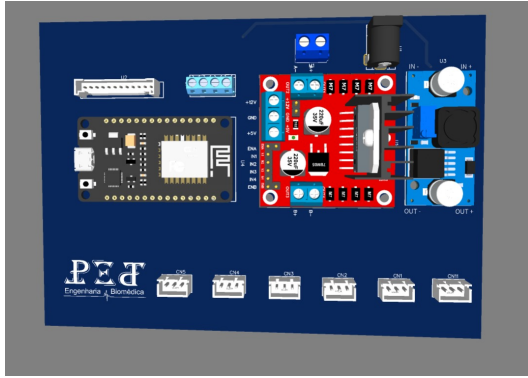


Figura 4: Circuito de controle principal dos motores. Os sinais de PWM são enviados desta unidade para os motores, de forma a executar o movimento final desejado.

1. **Circuito da Luva de Controle:** A luva é alimentada por uma bateria de 9V, regulada para 3.3V, adequada ao ESP32 [7]. O circuito inclui um sensor flex para controlar o efector final do braço robótico e um sensor inercial MPU6050 para captar os movimentos da mão do usuário e traduzi-los em movimentos correspondentes do conjunto. A comunicação entre o elemento de controle e o braço robótico é feita via protocolo ESP-NOW[8], transmitindo os dados do sensor inercial e do sensor flex para o microcontrolador ESP32 que controla a estrutura robótica articulada.
2. **Circuito do Braço robótico:** O ESP32 no robô recebe os dados transmitidos pela luva e processa as informações para controlar os atuadores. Cada tipo de motor tem uma função específica:
  - **Servomotores (MG996R):** Controlam os cinco eixos das articulações. Cada servomotor é alimentado por um regulador L7805, que converte os 12V da fonte para 5V.
  - **Motor de Passo (NEMA17):** Controlado por um driver TB6600 e alimentado diretamente com 12V, de forma a garantir movimentos precisos.
  - **Motor DC (Mini N20):** Controla o movimento de abertura e fechamento do manipulador do sistema, utilizando uma ponte H L298N para alternar a direção de rotação do motor e, assim, permitir a abertura e fechamento.
3. **Alimentação:** Todo o sistema é alimentado por uma fonte de 12V com capacidade de 10A. Os reguladores L7805 garantem a tensão correta para os servomotores, enquanto o driver TB6600 controla a corrente do motor de passo. A ponte H L298N alimenta o motor DC diretamente pela fonte de 12V. Além de um step-down com um regulador LM2596 que garante o nível lógico de 5V para a ponte H e também alimenta o ESP32.

#### D. Projeto de software

O código embarcado no microcontrolador foi desenvolvido utilizando o *PlatformIO*, com uma integração facilitada para

as placas ESP32. As etapas de desenvolvimento do código foram distribuídas em diferentes níveis de controle. Além do controle de hardware, foi criada uma simulação para validar a cinemática do braço robótico, utilizando o *Gazebo*.

1. **Firmware da Luva de controle:** A luva foi programada para ler dados do MPU6050 (acelerômetro e giroscópio) e do sensor flex. Foram aplicados filtros para garantir a precisão das leituras.
  - **Filtro Complementar para MPU6050:** O giroscópio do MPU6050 mede mudanças rápidas de rotação, porém apresenta erro de estado estacionário (drift) [9]. O acelerômetro, por sua vez, mede com precisão o estado estacionário, mas é suscetível a ruídos. Para combinar o melhor de ambos os sensores, foi implementado um filtro complementar [9]. Esse filtro aplica um filtro passa-baixas ao sinal do acelerômetro, reduzindo os ruídos, e um filtro passa-altas ao sinal do giroscópio, mitigando o erro de desvio.
  - **Filtro de Média Móvel para o Sensor Flex:** Implementado para suavizar as leituras do sensor flex, evitando flutuações bruscas [10].
  - Os dados filtrados são armazenados em uma struct message, que contém os valores dos ângulos de Euler pitch, roll, yaw [11], e flex (da leitura do sensor flex). Esses dados são enviados para o ESP32 do robô via ESP-NOW, juntamente do peer address, responsável pelo endereçamento remoto do ESP32 [12].
2. **Firmware do braço robótico:**
  - **FreeRtos :** O firmware do braço robótico foi desenvolvido utilizando Real Time Operating System (RTOS) [13] para o controle multitarefa, necessário para a movimentação múltipla dos servomotores e o motor DC. Com essa ferramenta, é possível criar uma rotina de programação que permita a priorização dos atuadores, na qual o motor de passo possui a maior prioridade, seguido pelos servomotores e, por último, o motor DC.
  - **Estrutura de Semáforos:** A sincronização do acesso aos recursos é garantida por semáforos, permitindo o controle coordenado dos motores [14].
3. **Implementação de Cinemática:** Para a cinemática direta, foi utilizado o método do Produto de Exponenciais (PoE) [15], e para a cinemática inversa, o método Newton-Raphson [15]. Ambos foram implementados em Python para converter os ângulos e posições desejadas da luva em comandos para o robô.
  - **Cinemática Direta (PoE):** Utilizada para calcular a posição final do manipulador com base nos ângulos das juntas.
  - **Cinemática Inversa (Newton-Raphson):** Aplicada para calcular os ângulos necessários para atingir uma posição-alvo.

Uma simulação da cinemática foi realizada no Gazebo com um arquivo XML de *Unified Robot Description File* (URDF) [16], o qual é utilizado para descrever características físicas do braço robótico, tais como: dimensões, posição de cada junta, e velocidade do conjunto.

sectionResultados

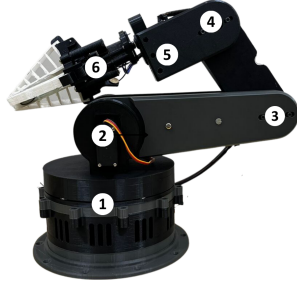


Figura 5: Braço robótico montado e seus 6 graus de liberdade. Cada grau de liberdade representa uma junta, de forma a garantir movimentos detalhados e mais complexos.

O projeto mecânico do manipulador robótico foi executado com sucesso, assim como observado na Figura 5. Todas as peças foram impressas utilizando PLA, com foco na redução de peso e na maximização da mobilidade. Esses requisitos foram atingidos, resultando em uma estrutura leve e funcional, bem como demonstrado em [17]. Os testes de movimentação indicaram que o robô é capaz de executar movimentos suaves e precisos, com ângulos de rotação de até 180 graus nas juntas principais, atendendo às especificações de design inicial. O constructo final foi capaz de abduzir e apreender diversos objetos, assim como se observa na Figura 6.



Figura 6: Braço robótico segurando objeto circular. A apreensão de objetos é garantida pelo motor DC presente na base do atuador.

No que se refere ao projeto elétrico, a distribuição de energia foi planejada de maneira eficiente. Isso porque cada servomotor foi testado individualmente, considerando o torque de cada junta para avaliar o consumo de potência com carga e sem carga. Os testes indicaram que os servos podem operar sob uma carga de até 5kg com um consumo de 0.9A cada, estes resultados só foram possíveis após inúmeras consultas de manuais e datasheets do microcontrolador [7] e do MG996R [18]. A fonte de alimentação escolhida (12V, 10A) foi adequada para suportar a demanda combinada dos servomotores, motor de passo e motor DC. Os testes simultâneos desses componentes confirmaram que o sistema é capaz de operar com

todos os atuadores em conjunto. Apesar de cada regulador L7805 conseguir fornecer até 1.5A [19], há muita dissipação de calor, o que significa que parte da potência fornecida é perdida em forma de calor, não sendo tão eficiente para esta aplicação.

Os módulos de regulação e desacoplamento utilizados no circuito forneceram uma excelente estabilidade de sinais, resultando em uma operação confiável e sem interferências. Isso contribuiu para a consistência do comportamento do robô durante operações prolongadas.

Em relação ao projeto de software, a implementação do RTOS se mostrou crucial para garantir um controle coordenado e eficiente dos motores. A arquitetura multitarefa [14] permitiu a execução de diferentes processos em paralelo, assegurando a priorização do motor de passo, essencial para o controle mais preciso dos movimentos. Além disso, a aplicação de filtros complementares e de média móvel aos sensores inerciais e flexíveis aprimorou a precisão das leituras, reduzindo ruídos e flutuações indesejadas nos dados, como demonstrado [9], o que se refletiu diretamente na precisão do controle dos movimentos.

Apesar dos avanços alcançados, a simulação cinemática do manipulador robótico não pôde ser concluída com sucesso devido à complexidade de implementação do *Robot Operating System* (ROS) [20]. Essa tarefa exige um conhecimento mais aprofundado de sistemas operacionais robóticos, que extrapola o escopo deste trabalho. Futuras iterações do projeto poderão explorar essa abordagem de simulação mais avançada.

### III. DISCUSSÕES

A construção desse tipo de equipamento solicita conhecimentos multidisciplinares de elétrica, mecânica e programação assim como observou o trabalho de [21]. De maneira análoga, este presente trabalho esbarrou também em limitações de natureza econômica, visto que alguns componentes como reguladores de tensão de qualidade não forem passíveis de serem adquiridos com o orçamento atual do grupo.

Apesar de simples e de baixo custo, esta iniciativa é de grande ganho para sociedade pois inspira projetos tais como o de [22], que integrou a reabilitação motora de crianças pós-operadas utilizando um sistema análogo e, de maneira satisfatória, atingiu indicadores ótimos de melhora dos indivíduos observados.

### IV. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o desenvolvimento do manipulador robótico controlado por uma luva eletrônica foram, em grande parte, satisfatórios e alinhados com os objetivos estabelecidos. A implementação baseada nas documentações técnicas e datasheets dos componentes utilizados mostrou-se fundamental para a criação de um sistema robusto e eficiente, com todos os componentes funcionando conforme suas especificações. Essa abordagem metodológica garantiu a confiabilidade do sistema, tanto no nível mecânico quanto no elétrico.

No que diz respeito ao projeto mecânico, a escolha cuidadosa dos materiais, como o PLA para a estrutura e o PLA Flex



para a garra, juntamente com uma calibração adequada e boas configurações da impressora 3D, resultou em um modelo bem estruturado e leve, com aproximadamente 886g. Esses aspectos foram determinantes para atender aos requisitos de mobilidade e resistência, otimizando o desempenho do robô. A inspiração em robôs previamente desenvolvidos, como aqueles encontrados em plataformas como o Thingiverse, também contribuiu para a simplicidade e eficácia da construção, permitindo reprodutibilidade e escalabilidade do projeto.

Por outro lado, no projeto de software, a implementação do FreeRTOS foi essencial para garantir o controle em tempo real e a organização eficiente do código. O uso do RTOS permitiu uma gestão fluida das tarefas relacionadas ao controle dos motores, priorizando as mais críticas, como o motor de passo, sem comprometer a execução dos servomotores e do motor DC. Além disso, a compreensão sólida dos protocolos de comunicação sem fio, como o ESP-NOW, assegurou a integração eficiente entre a luva eletrônica e o manipulador robótico, possibilitando uma resposta ágil e precisa aos comandos.

Entretanto, algumas limitações e desafios foram identificados ao longo do projeto. As limitações ou ausência de alguns componentes, como sensores e motores mais avançados, além da ausência de *step-down* e reguladores de tensão com melhor eficiência, restringiram a complexidade das funções que o robô poderia executar. A simulação cinemática do manipulador, por sua vez, apresentou obstáculos consideráveis, principalmente devido à demanda por um conhecimento mais aprofundado de sistemas operacionais robóticos (ROS) e pela complexidade envolvida na integração desses sistemas em um ambiente simulado. Este problema está diretamente relacionado à necessidade de recursos computacionais mais avançados e ao escopo do projeto, que não incluía uma exploração tão profunda dessas ferramentas.

Em síntese, o projeto atingiu com sucesso grande parte de suas metas, demonstrando que, com a utilização correta de documentações técnicas e boas práticas de engenharia, é possível desenvolver um sistema robótico eficiente e funcional. No entanto, a complexidade da simulação cinemática e algumas limitações de hardware indicam que há espaço para aprimoramentos e estudos futuros, especialmente no que diz respeito à adoção de soluções mais avançadas para simulações e controle robótico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à direção da Faculdade de Engenharia Elétrica, ao tutor PET Engenharia Biomédica Professor Doutor Alcimar Barbosa Soares e a Universidade Federal de Uberlândia.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. SANAR. Amputações: definição, tipos, indicações e riscos. <https://sanarmed.com/amputacoes/>, 2023. Acesso em: 11 out. 2024.
- [2] Ednaldo Alves Junior, GA Mello, and Matheus Panigassi Imenes. Prótese mioelétrica para membro superior. *Pro-*

*jeto de Monografia do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco*, 2016.

- [3] Gustavo Longhi de Carvalho. *Proposta de um método de projeto de próteses de membros superiores com a utilização da engenharia e análise do valor*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2004.
- [4] Luiza Caetano Garaffa. Ativação de um braço robótico através de sinais mioelétricos e redes neurais artificiais como protótipo para um estudo preliminar de sensibilidade háptica. 2018.
- [5] Adriano José Paes Vieira Luz, João Paulo Goulart dos Reis, Everaldo Linares, and Francisco Donizeti Vieira Luz. Desenvolvimento de um braço robótico capaz de reconhecer comandos de voz para auxílio de pessoas com tetraplegia. *RE3C-Revista Eletrônica Científica de Ciência da Computação*, 9(1), 2014.
- [6] LimpSquid. Robotic arm, 2016. Thingiverse. Acessado em: 18 de agosto de 2023.
- [7] Espressif Systems. *ESP32 Series Datasheet*, 2023. Acessado em: 10 de outubro de 2024.
- [8] Roberto Pasic, Ivo Kuzmanov, and Kokan Atanasovski. Esp-now communication protocol with esp32. *Journal of Universal Excellence*, 6(1):53–60, 2021.
- [9] João Cargnelutti and Maria Silva. Complementary filter for mpu6050 sensor data fusion. *Journal of Sensor Technology*, 15(3):123–130, 2020.
- [10] John Smith. *Signal Processing Techniques*. TechPress, 2018.
- [11] Michael Bazanski. *Quaternions and Rotation Sequences*. Springer, 1998.
- [12] Espressif Systems. *ESP-NOW: ESP32 Wireless Communication*, 2023. Available at: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp-now.html>.
- [13] Richard Barry. *FreeRTOS Reference Manual*, 2023. Disponível em: <https://www.freertos.org>.
- [14] Jane W. S. Liu. *Real-Time Systems*. Pearson Education, 2000.
- [15] Howie Choset, Kevin M. Lynch, Seth Hutchinson, and et al. *Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control*. Cambridge University Press, 2016.
- [16] Greg Koenig and Aaron Howard. Urdf: Unified robot description format. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 1–4. IEEE, 2004.
- [17] Andreas Gebhardt. *Additive Manufacturing: 3D Printing for Prototyping and Manufacturing*. Hanser Publications, 2016.

- [18] Tower Pro. *MG996R Servo Motor Datasheet*, 2015. Available at: <https://datasheetpdf.com/pdf-file/1380860/TowerPro/MG996R/1>.
- [19] Texas Instruments. *Lm7805 5v voltage regulator datasheet*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm7805.pdf>, 2016. Acesso em: 14 out. 2024.
- [20] Morgan Quigley, Brian Gerkey, and William Smart. *Programming Robots with ROS*. O'Reilly Media, 2015.
- [21] Estevão dos Prazeres Ananias et al. *Braço robótico colaborativo de baixo custo*. PhD thesis, Universidade Beira Interior, 2022.
- [22] Fabio dos Santos COSTAS, Gustavo Silva de FRANÇA, Caio Galdino GOMES, Ric Ludvic LERRI, Elias Xavier da SILVA, and João Victor de Oliveira TRINDADE. *Braço robótico teleoperado aplicado para a reabilitação infantil através do lúdico*. 2021.