

PROTESE ROBÓTICA DE BAIXO CUSTO BASEADA EM PLATAFORMA ARDUINO®

Thiago Leonardo Maria ⁽¹⁾ (tlmaria97@gmail.com), Marcelo Henrique Souza Bomfim ⁽²⁾ (marcelo.bomfim@ifmg.edu.br), Juarez Pompeu de Amorim Neto ⁽²⁾ (juarez.pompeu@ifmg.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP); Instituto Tecnológico Vale (ITV)

⁽²⁾ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG) Campus Congonhas; Departamento de Mecânica (DMEC)

RESUMO: *O desenvolvimento da robótica ocorreu em função da busca do homem em construir equipamentos que pudessem auxiliá-lo ou mesmo substituí-lo no ambiente de trabalho insalubre. É comum utilizar na indústria robôs com estrutura cinemática serial, neste caso os atuadores e peças movidas são dispostos em série, formando uma única cadeia cinemática aberta, com um efetador que interage com o ambiente no último ligamento. Tais estruturas tentam reproduzir os movimentos do braço humano e atualmente fazem parte da estrutura da maioria dos robôs presentes nas indústrias. A eletromiografia (EMG) pode ser definida como uma técnica de detecção, análise e gravação de sinais elétricos obtidos de contrações musculares, usada tanto para fins de diagnóstico e controle de movimentos, usando conceitos ligados a sistemas biomecânicos e robóticos. Este trabalho tem como objetivo apresentar e detalhar a construção de um braço robótico, utilizando sinais de eletromiografia. Como metodologia de construção, foi empregada a impressora 3D, dessa forma, foi possível reduzir custo e peso na confecção do braço. Cabe ressaltar que a utilização das placas de desenvolvimento Arduino® reduziram drasticamente o custo de hardware. Como resultado, foi obtida uma prótese robótica com o custo inferior a R\$1000,00 (mil reais), o que potencializa a redução de custos em equipamentos de engenharia assistiva.*

PALAVRAS-CHAVE: PRÓTESE ROBÓTICA, BAIXO CUSTO, PLATAFORMA ARDUINO, IMPRESSORA 3D.

LOW-COST ROBOTIC PROSTHESIS BASED ON ARDUINO PLATFORM

ABSTRACT: *The development of robotics occurred as a result of man's quest to build equipment that could assist or even replace him in the work environment. It is common to use robots with a serial kinematic structure in the industry, in this case the actuators and moved parts are arranged in series, forming a single open kinematic chain, with an effector that interacts with the environment in the last ligament. Such structures attempt to reproduce the movements of the human arm and are currently part of the structure of most robots present in industries. Electromyography (EMG) can be defined as a technique for detecting, analyzing and recording electrical signals obtained from muscle contractions, used for both diagnostic purposes and movement control, using concepts linked to biomechanical and robotic systems. This work aims to present and detail the construction of a robotic arm, using electromyography signals. As a construction methodology, a 3D printer was used, thus, it was possible to reduce cost and weight when manufacturing the arm. It is worth noting that the use of Arduino® development boards significantly reduced the hardware cost. As a result, a robotic prosthesis was obtained costing less than R\$ 1.000,00 (one thousand reais), which enhances cost reduction in assistive engineering equipment.*

KEYWORDS: ROBOTIC PROSTHESIS, LOW-COST, ARDUINO® PLATFORM, 3D PRINTER.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o ser humano sempre sonhou em uma forma de eliminar ou atenuar as tarefas mais árduas do seu regime de trabalho, porém a concepção de um robô automático é bem recente, datando da década de 50. A partir disso, os robôs foram empregados primeiramente em ambientes fabris, onde ajudaram de forma muito efetiva a tornar o trabalho mais seguro, rápido e eficiente (LIMA *et al.*, 2017).

Pensando no futuro da robótica é difícil prever com exatidão o que nos aguarda, os cientistas estão cada vez mais empenhados em criar e aprimorar todos os tipos de robôs, o que invariavelmente permitirá uma melhora significativa na qualidade de vida do ser humano.

O objetivo desse trabalho é construir um braço robótico semelhante ao biológico, utilizando como controle eletromiografia e acelerômetros para auxiliar na execução do movimento.

Braços robóticos são dispositivos que podem ser de grande apoio para pessoas com alguma necessidade especial, auxiliando em tarefas domésticas ou até mesmo no ambiente de trabalho (SARRO JÚNIOR *et al.*, 2014).

Em termos de revisão de literatura, este trabalho utilizou artigos acadêmicos, sites e monografias para fundamentar o estudo e o modelo de construção do braço robótico.

A revisão a respeito da eletromiografia, relata que esse método é utilizado para medir os sinais elétricos musculares, estimulados por unidades motoras. O músculo que se encontra em repouso, não apresenta atividade elétrica, sendo assim necessário aplicar sobre ele um estímulo elétrico ou mecânico. Portanto o músculo pode ser estimulado tanto por comandos elétricos fornecidos do córtex motor quanto por impulsos elétricos provenientes de estímulos sensoriais pelas células localizadas na medula (CARVALHO, 2008).

Fibra muscular é uma das células estruturais de um músculo, composta de numerosas miofibrilas que se contraem quando estimuladas. Ao ser gerado um esforço voluntário, há um estímulo muscular e o fornecimento de força, que é resultado de deslocamento dos filamentos no músculo. Dessa forma acontece a despolarização dessas fibras musculares, onde os íons presentes, são transportados para o musculo nas ramificações do neurônio motor (LAMANNA *et al.*, 2012)

Assim, eletromiografia é a leitura dos sinais provenientes dos potenciais de ação dos músculos, os quais são chamados de eletromiogramas, com capacidade de estudo e análise do sistema muscular baseado no processo de despolarização e repolarização das fibras musculares (KONRAD, 2022).

Para a leitura correta dos sinais elétricos são necessários a utilização de eletrodos apropriados e o correto posicionamento do eletrodo no músculo. Os eletrodos não invasivos, atuam de forma branda não fornecendo desconforto na hora do uso. Além disso, possibilita uma leitura rápida e ágil

dos sinais elétricos. No entanto, os sinais obtidos pelos eletrodos não invasivos podem apresentar difícil interpretação, pois como captam mais sinais (provenientes de interferências) possuem aparências mais ruidosa se comparada com o sinal obtido por apenas uma unidade motora (QUEVEDO, 1993).

Segundo Pires *et al.* (2023) a utilização de impressoras 3D causará uma revolução na ortopedia, pois torna as próteses acessíveis e personalizadas. A tecnologia permite a produção de dispositivos médicos personalizados, que podem melhorar significamente a qualidade de vida de pessoas amputadas. Nesse contexto, a impressão 3D permite a criação de membros personalizados e adaptados ao corpo do paciente, implicando em uma alternativa mais acessível e eficiente em termos de tempo e custo em comparação com as próteses tradicionais (PIRES *et al.*, 2023). Com foco no presente trabalho, Pires *et al.* (2023) destacam a utilização de impressão 3D combinada com a robótica para a produção de dispositivos médicos personalizados em grande escala.

Neethan *et al.* (2020) desenvolveram uma mão biônica para atender amputados vítimas de guerra no Sri Lanka. Como metodologia de manufatura foram utilizadas impressoras 3D. Como resultados, foram obtidas próteses de baixo custo, aproximadamente R\$100,00, que ampliaram a qualidade de vida das vítimas.

Em pesquisas desenvolvidas por Ahsan e Hasan (2022) foi utilizada a plataforma Arduino® para a aquisição de sinais oriundos de eletromiogramas (EMG) e envio de comandos para servomotores presentes nas juntas de uma prótese impressa em material polimérico. Como resultados, o trabalho obteve uma prótese funcional e de baixo custo (aproximadamente R\$500,00) e que atendeu satisfatoriamente pessoas amputadas.

Analisando as referências de literatura, pode-se concluir que a manufatura aditiva, através do uso de impressoras 3D, tem e terá um forte impacto no desenvolvimento de equipamentos de engenharia assistiva, tais como próteses, órteses e equipamentos de reabilitação e cirurgia. Cabe ressaltar o emprego da plataforma Arduino®, no que tange a redução de custo de *hardware* e emprego de sistemas *open source*.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os materiais para a construção de um braço robótico tendo em vista que o mesmo possuirá quatro graus de liberdade são:

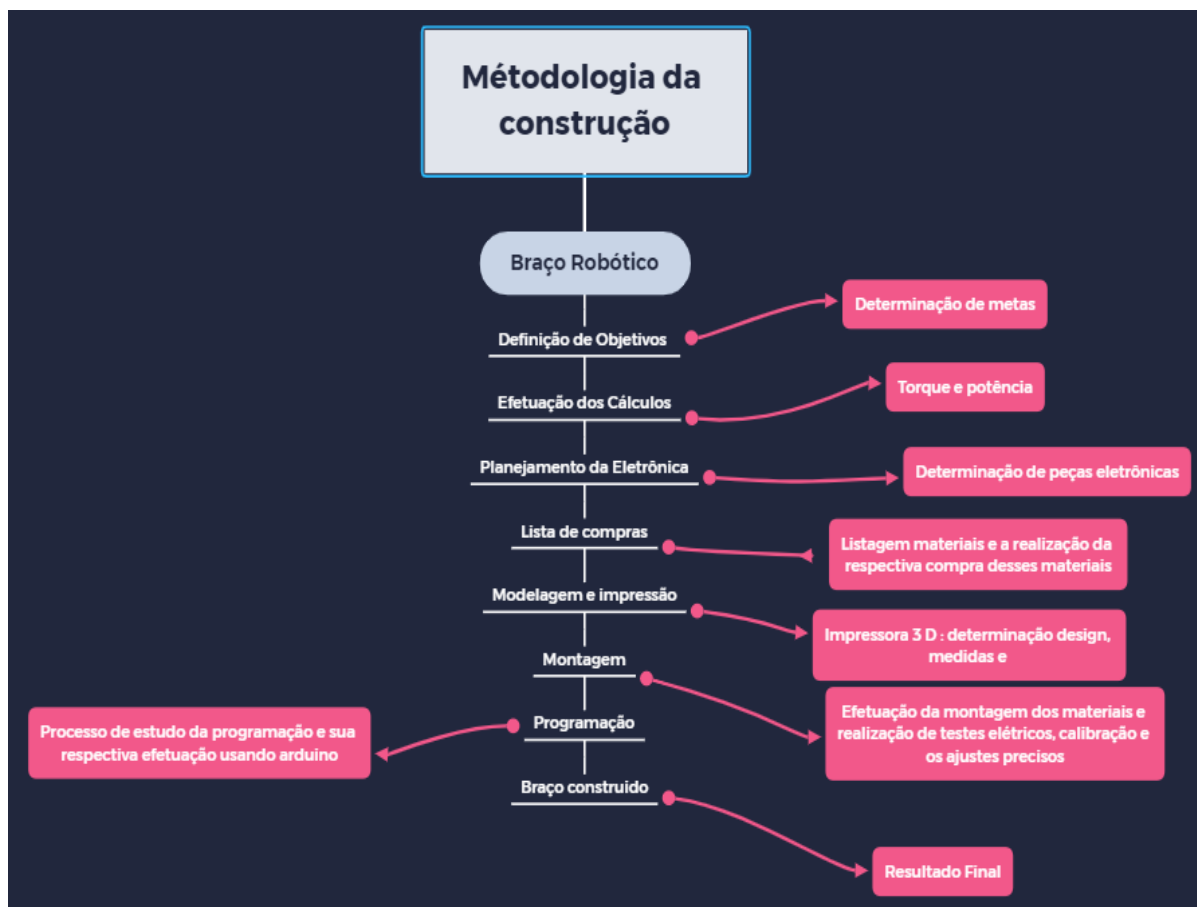
1 Motor Nema 17 17hs4401 4,2kgf.cm

- 1 Servo 30 kg
- 2 Sensores EMG
- Fios
- 1 Fonte 12 V 20 A
- 2 Reguladores de tensão
- 1 Eletrodo biomédico
- 1 Arduino Nano
- 1 Arduino Mega
- 1 Transmissor e Receptor RF
- 3 Motores Tower 995 pro
- 2 Acelerômetros/Giroscópios
- 2 Baterias Lipo 18650
- 1 Circuito regulador
- 1 Redução
- 1 sensor de fim de curso
- 1 driver motor de Passo

2.2 METODOLOGIA

A partir de uma divisão de montagem usando um raciocínio voltado à metodologia de equipes (*Squad Methodology*) (*blog logap 2021*) como forma de agilizar, a construção foi fracionada em pequenos estágios e com vários centros estratégicos chegando-se ao fluxograma apresentado na Figura 1.

FIGURA 1. Fluxograma com a metodologia para construção do braço robótico.



FONTE: Autoria própria (2024).

Cálculo de torque: é o cálculo feito para verificação do torque nas juntas do robô, sendo necessário já a existência do croqui do braço robótico, a massa simulada e a massa dos componentes, se leva em consideração também a limitação da impressora de imprimir uma área de 20 cm x 20 cm. A Equação (1) do volume de cilindro onde R é o raio e h a altura, foi usada para calcular o volume de material usado a partir do diâmetro e comprimento do filamento dado pelo programa de impressão 3D:

$$V = \pi R^2 h \quad (1)$$

A Equação (2) da densidade onde m é a massa, usada para calcular a massa das peças a partir do volume de material usado e da densidade do material.

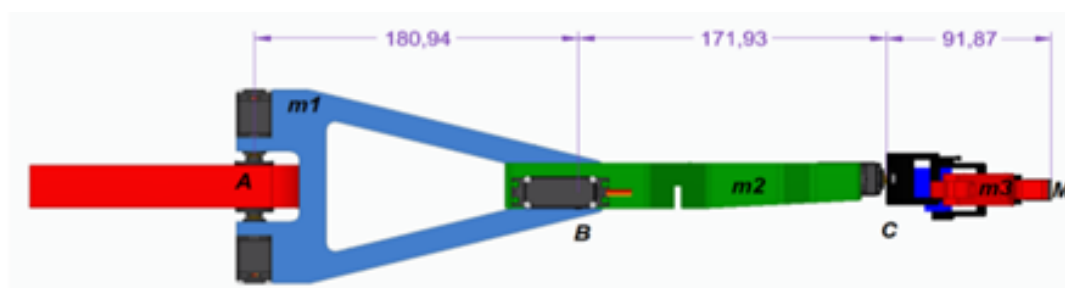
$$D = \frac{m}{V} \quad (2)$$

A Equação (3) do momento onde F é a força utilizada e d o ponto de aplicação, utilizada como um somatório de momentos em cada ponto onde há motor, foi utilizada a massa simulada, a massa dos motores e a distância de cada eixo definida no modelamento 3D.

$$M = \pm F \cdot d \quad (3)$$

Um resumo dos resultados é apresentado na Figura 2.

FIGURA 2. Resultados dos cálculos de torque no braço robótico.



Braço (m1)	249,9847	g	0,249985	kg
Antebraço (m2)	73,2656	g	0,073266	kg
Garra	61,71144	g	0,061711	kg

Torque A	29,41924	kgf/cm
Torque B	13,98561	kgf/cm
Torque C	4,059328	kgf/cm

Motor MG995	57	g	0,057	kg
Motor 9g	11	g	0,011	kg

m1	249,9847	g	0,249985	kg
m2	73,2656	g	0,073266	kg
m3	83,71144	g	0,083711	kg
M	400	g	0,4	kg

d1	180,94	mm	18,094	cm
d2	171,93	mm	17,193	cm
d3	91,87	mm	9,187	cm

FONTE: Autoria própria (2024).

Um cálculo de potência também foi realizado, afim de garantir o melhor dimensionamento de circuitos, dos redutores de tensão e das fontes de alimentação. A Tabela 1 apresenta os resultados desses cálculos.

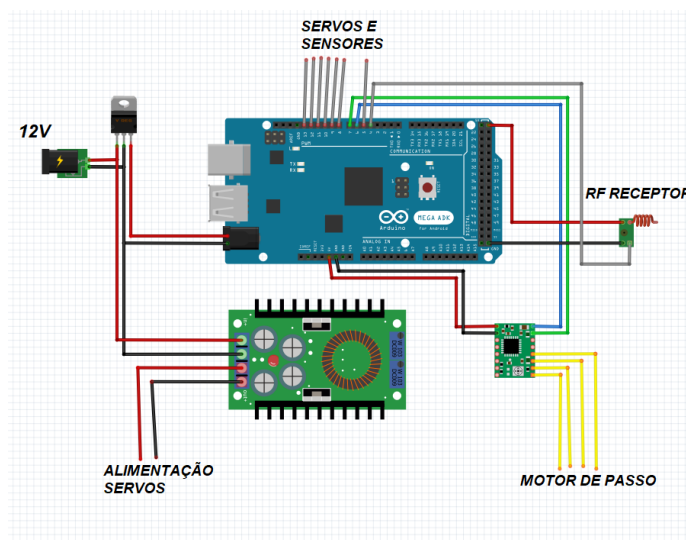
TABELA 1. Cálculos de potência.

Especificação	Tensão (V)	Corrente (A)	Corrente mínima reguladora	
Servo motor	7	7,5	11,3	Conversor DC Step Down
MoreOneRC	6,8	3,8		
Nema 17	12	1,7	1,7	Direto da fonte
Eletrônicos	9	1	1	1 LM 7809

Fonte: Autoria própria (2024).

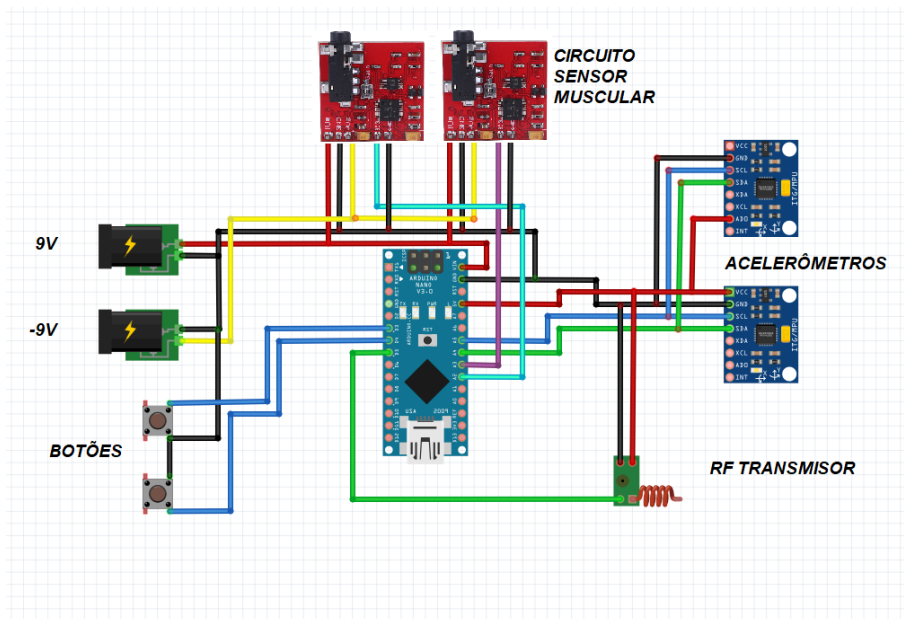
A eletrônica foi dividida em duas partes, a do robô e a de controle. A eletrônica de controle tem o objetivo de fazer a captura dos dados dos sensores musculares e dos acelerômetros, enviando informações para a eletrônica do robô por meio de transmissão RF. A eletrônica do robô tem como objetivo suprir a demanda energética dos motores e receber todas as informações transmitidas pela eletrônica de controle. As Figuras 3 e 4 mostram os circuitos do robô e controle respectivamente.

Figura 3. Circuito esquemático do robô.



Fonte: Autoria própria (2024).

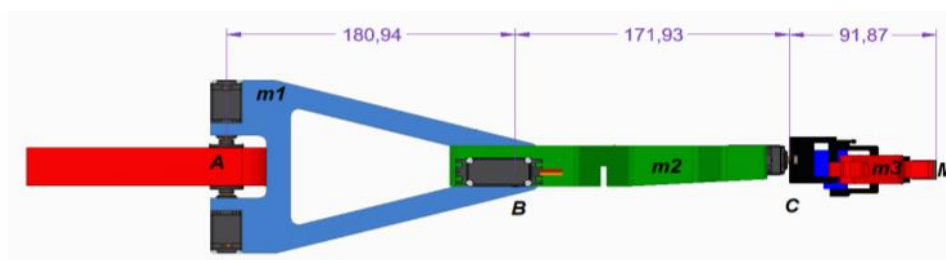
Figura 4. Circuito esquemático de controle.



Fonte: Autoria própria (2024).

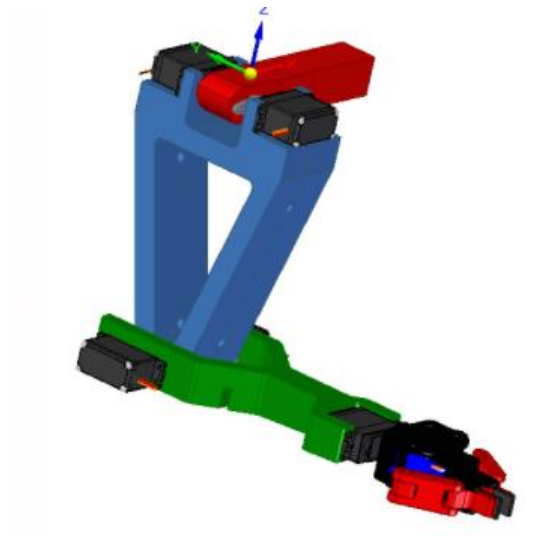
O ponto principal em termos de modelagem foi atender os requisitos impostos nos objetivos e que as partes fossem dimensionadas de modo que não ficassem com o peso acima do que os motores pudessem levantar, a impressão 3D foi realizada e ocorreu uma verificação das medidas antes e depois da prototipagem. As Figuras 5, 6, 7, 8 e 9 mostram os estágios de evolução do projeto.

Figura 5. Estágio 1.



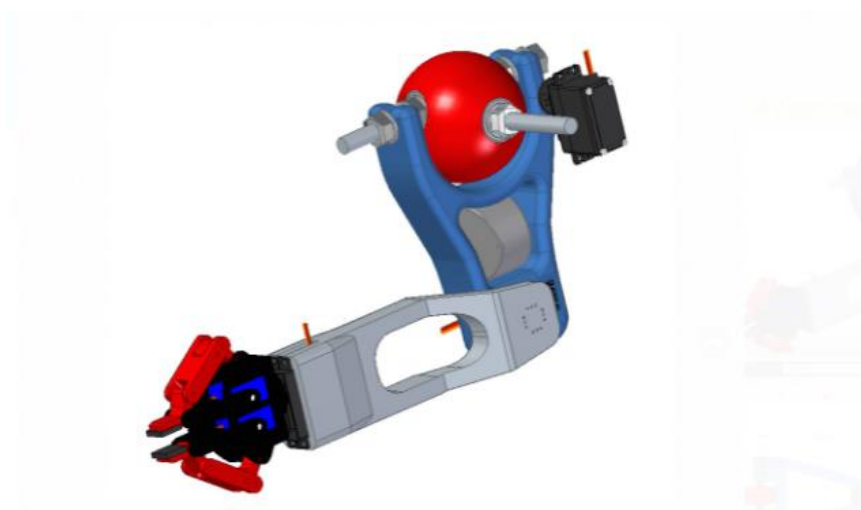
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 6. Estágio 2.



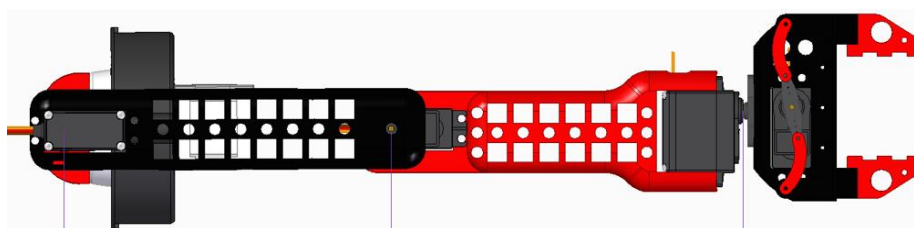
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 7. Estágio 3.



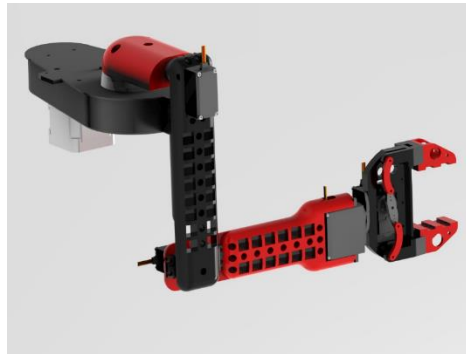
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 8. Estágio 4.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 9. Estágio 5.



Fonte: Autoria própria (2024).

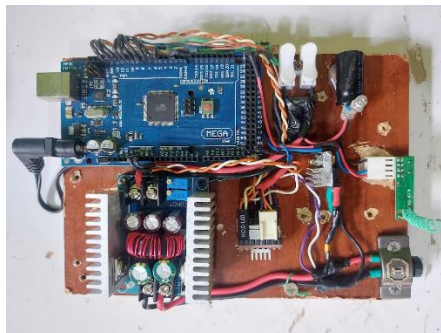
Pelos estágios apresentados, pode ser analisado que ocorreu um estudo topológico com a finalidade de remoção de material em regiões pouco solicitadas. Dessa forma, foi possível desenvolver um braço robótico de baixo peso, o que reduz o tamanho e potência dos motores, bem como o consumo energético do sistema.

A Montagem ocorre da seguinte maneira:

- 1) após a impressão das peças existe um polimento nas mesmas e ajustes se preciso nas impressões;
- 2) então ocorre a montagem da garra;
- 3) ocorre o encaixe do motor na garra;
- 4) montagem do motor de passo na redução;
- 5) montagem do ombro na redução;
- 6) montagem dos circuitos eletrônicos;
- 7) ligações entre o braço e os motores;
- 8) é construído o suporte para o braço feito em madeira;
- 9) coloca-se as fontes e placas eletrônicas;
- 10) ocorre a ligação, por soldagem, dos fios do braço.

A evolução da montagem é apresentada nas Figuras 10, 11, 12, 13 e 14.

Figura 10. Montagem do circuito eletrônico do robô.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 11. Peças predispostas.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 12. Montagem do suporte e inserção da placa.



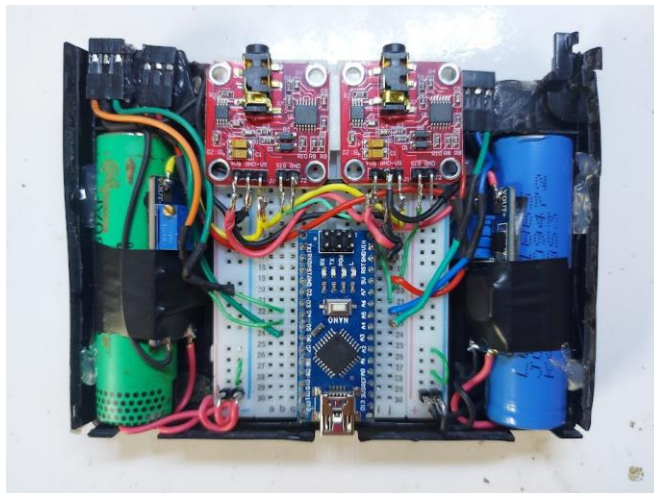
Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 13. Encaixe do braço.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 14. Montagem da eletrônica no sistema de controle do robô.



Fonte: Autoria própria (2024).

A programação foi realizada com base no conceito da linguagem C e o Arduino foi usado como plataforma de prototipagem, usando a biblioteca já existente no próprio Arduino o processo de descobrimento da mais adequada foi feito por meio de testes de compatibilidade com os servos dos motores e a partir disto os sinais serão recebidos pelo EMG que converterá os comandos de movimento do braço.

Em termos de funcionamento do braço robótico o mesmo tem seu funcionamento por meio da captação do sinal de eletromiografia pelos sensores e a partir desse sinal será enviado comandos para os motores do braço de forma que o mesmo se mexa e atue conforme sua programação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado, tem-se o braço robótico construído e em funcionamento. Sua garra apresenta rotação de 90 graus e sustenta 400 g de carga a uma demanda total em corrente de 14 A.

O braço apresentou problemas de imprecisão no sensor devido sua capacidade limitada e por ser inferior a de materiais presentes em laboratórios médicos em razão de a construção do braço ter sido feita procurando criar poucas despesas, dessa forma, preferiu-se a implementação de apenas um sensor eletromiograma e deixar os movimentos por parte dos acelerômetros e por consequência sub utilizando um circuito no braço deixando certa oportunidade para futuras alterações e otimizações do mesmo, de forma que seja utilizado um outro eletromiograma sobressalente em outro grupo muscular (músculo do ombro, por exemplo).

Os ensaios experimentais foram divididos em três partes. Em um primeiro momento, foram verificadas a capacidade de resposta do braço robótico em repetir os movimentos do operador. Os

resultados foram satisfatórios e podem ser observados no link <https://www.youtube.com/watch?v=ICwxd1l-Gz0>. Após essa primeira etapa, o sistema mecatrônico foi empregado em tarefas do cotidiano, tais como encher um copo de água e manipular um ovo. Tais atividades podem ser observadas nos links <https://www.youtube.com/watch?v=vh4f1SitPbU> e <https://www.youtube.com/watch?v=zIOW5S9kxhY>. Novamente a resposta foi satisfatória, validando o emprego do braço em indivíduos que sofreram amputação dos membros superiores.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho atingiu o objetivo de desenvolver uma prótese de baixo custo (aproximadamente R\$1000,00) em plataforma Arduino®.

No que tange a construção mecânica, a utilização da impressora 3D e do uso de materiais poliméricos, permitiu a manufatura de um braço com baixos peso e custo e com boa rigidez.

Com relação ao *hardware* empregado, a plataforma Arduino® apresentou placas de baixo custo (R\$200,00) e que conseguiram de forma satisfatória ler os sinais oriundos de EMGs. Dessa forma, foi possível construir uma prótese com preço acessível e que permitirá um indivíduo amputado realizar tarefas simples do cotidiano, tais como servir água ou manipular um ovo, por exemplo.

Após o emprego em pessoas amputadas, ocorrendo a validação da prótese, a mesma pode ser utilizada em projetos *open source*. Assim, é possível a impressão do produto pelo indivíduo que perdeu o membro.

São sugestões para trabalhos futuros:

1. Utilização de redes neurais artificiais para o reconhecimento de padrões de comando; e
2. Emprego da prótese em indivíduos amputados.

REFERÊNCIAS

AHSAN, M. S. e HASAN, K. (2022). Design and Development of an Electromyography Sensor Actuated Prosthetic Arm. Latin American Applied Research - An international journal. 52. 191-200. 10.52292/j.laar.2022.817.

CARVALHO, L. C. Instrumentação médico-hospitalar. 1. ed. São Paulo: Manole, 2008. 318 p.

KONRAD, P. The ABC of EMG: A Practical Introduction to Kinesiological Electromyography. Disponível em: Microsoft Word - The EMG Booklet 27.doc (noraxon.com). Acesso em 29 jan. 2022.

LAMANNA, F. L. *et al.* Controle de um braço robótico por sinal eletromiográfico. In: X Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, 2012, Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia (UFU), 24 - 28 set 2012.

LIMA II, E. J; BOMFIM, M. H. S; MOURÃO, M. A. M. POLIBOT – POWER Lines Inspection RoBOT. dez 2017 Industrial Robot: An International Journal 45(1): 98–109.

NEETHAN, R; NIDERSHAN, S; MUGILGEETHAN, V; THARSIKA, T; ANBURUVEL, A. A study of three-dimensional (3-D) printed prosthetic upper limb models in local context, Materials Today: Proceedings, Volume 23, Part 1, 2020, Pages 8-11.

PIRES, M. E. P., BOMFIM, V. V. B. da S., Alba, D. J. M., CAPISTRANIO, Y. DE M., SOUZZA, H. R. B., SALES, F. DE C. D., ... COSTA, A. C. M. de S. F. da. (2023). Impressão 3D na Ortopedia: Onde Estamos e Aonde Podemos Chegar. Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação, 9(4), 951–965.

QUEVEDO, A. A. F. Desenvolvimento de um sistema de análise digital de sinais eletromiográficos. 1993. 108f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas: Campinas, 1993.

SARRO JUNIOR, A. D; MENDES JÚNIOR, J. J. A; FRANTZ, S. H. Controle de um braço robótico através de eletromiografia. 2014. 114f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

Squad methodology: what it is, how it works and what are the main benefits for technology companies. LogAp. 27 dez 2021. Disponível em: <<https://logap.com.br/en/blog/squad-methodology/>>. Acesso em: 30 jan 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Robert Cruzoaldo Maria por ter fornecido recursos para a compra de peças.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.