

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO FACULDADE DE
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA ENGENHARIA BIOMÉDICA

CAROLINE NATSUMI HONDA
GABRIELA MEL RODRIGUES DOS SANTOS
MARIANA REIS PINTO
VITÓRIA ROSA MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PRÓTESE ROBÓTICA DE
EXTREMIDADE DOS MEMBROS SUPERIORES CAPAZ DE
REALIZAR PARCIALMENTE A FUNÇÃO DE UMA MÃO SAUDÁVEL**

SÃO PAULO
2024

CAROLINE NATSUMI HONDA
GABRIELA MEL RODRIGUES DOS SANTOS
MARIANA REIS PINTO
VITÓRIA ROSA MEDEIROS

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PRÓTESE ROBÓTICA DE
EXTREMIDADE DOS MEMBROS SUPERIORES CAPAZ DE
REALIZAR PARCIALMENTE A FUNÇÃO DE UMA MÃO SAUDÁVEL**

Monografia final apresentada à Pontifícia
Universidade Católica de São Paulo, como
requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Lionel Fernel Gamarra

SÃO PAULO
2024

**DESENVOLVIMENTO DE UMA PRÓTESE ROBÓTICA DE
EXTREMIDADE DOS MEMBROS SUPERIORES CAPAZ DE
REALIZAR PARCIALMENTE A FUNÇÃO DE UMA MÃO SAUDÁVEL**

Monografia final apresentada à Pontifícia
Universidade Católica de São Paulo, como
requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Biomédica.

São Paulo, 25 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof.

Prof.

Prof.

AGRADECIMENTOS

Queremos começar este momento expressando nossa profunda gratidão a Deus, cuja orientação e provisão foram fundamentais em cada etapa desta jornada acadêmica. Sua graça e bondade foram a força motriz por trás de cada conquista e superação ao longo deste processo.

Às nossas queridas famílias, agradeço por seu apoio incondicional e amor constante. Suas orações e encorajamento foram um verdadeiro sustento nos momentos de desafio.

Agradecemos também à Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP) e a todos os professores pelos ensinamentos ao longo do curso. Em especial, ao professor Lionel Gamarra, que auxiliou na escrita da monografia e confiou no projeto do começo ao fim.

E, é claro, aos membros deste grupo, que se tornaram não apenas colegas, mas verdadeiros amigos e parceiros nesta jornada. Através da nossa união, encontramos força, inspiração e apoio mútuo, construindo não apenas esta primeira etapa do TCC, mas também laços duradouros de amizade e cumplicidade.

Muito obrigado, Senhor, por tudo que nos proporcionou.

RESUMO

No Brasil, milhares de pessoas nascem ou desenvolvem algum tipo de deficiência física ao longo da vida, ou ainda possuem familiares e amigos com alguma deficiência, que torna necessário o uso de próteses para seu dia-a-dia. A autonomia de um indivíduo em tarefas básicas é um fator relevante para o desenvolvimento de próteses. Mais especificamente, o desenvolvimento de próteses capazes de detectar os sinais mioelétricos dos músculos e processá-los, possibilitando que seu usuário realize os movimentos básicos do membro afetado. Dito isto, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma prótese robótica de extremidade dos membros superiores capaz de realizar parcialmente a função da mão de uma pessoa saudável a partir dos sinais elétricos de seu membro residual.

Para conquistar nosso objetivo, foi feita primeiramente uma busca sistemática de artigos publicados sobre próteses robóticas de membros superiores. Em seguida, foi realizada a montagem da mão e sua conexão com o circuito elétrico, utilizando um Arduino UNO, servomotores, sensores de sinais elétricos e peças impressas em 3D em material PLA. Realizamos então testes na prótese, integrando a mão ao circuito eletrônico e verificando a captação e processamento dos sinais mioelétricos e a conformidade da flexão e extensão dos dedos realizada de acordo com a contração e relaxamento.

Além disso, foi conduzido um segundo teste, com o objetivo de avaliar a capacidade da mão robótica de segurar objetos de diferentes formatos. Foram selecionados itens esféricos, cilíndricos e retangulares, permitindo analisar sua eficácia em diversas situações de manipulação. Os resultados demonstraram que a prótese foi capaz de segurar com sucesso objetos de diferentes formatos, mostrando sua versatilidade.

Através dos testes, pudemos observar o funcionamento da prótese, com a detecção e processamento dos sinais e a consequente flexão e extensão sendo bem-sucedidos. Uma opção de calibração para sua adequação em diferentes pessoas foi implementada através de um aplicativo, otimizando o protótipo. Assim, os testes demonstraram um funcionamento satisfatório do modelo.

A prótese demonstrou desempenho satisfatório e responsivo aos sinais mioelétricos, com ajustes feitos para garantir adaptação a diferentes perfis de usuários. Os resultados obtidos reforçam o potencial do protótipo para futuras aplicações e desenvolvimento contínuo.

Palavras-chave: Prótese de mão; Sensores EMG; Impressão 3D; Servomotores.

ABSTRACT

In Brazil, thousands of people are either born with or develop some form of physical disability over the course of their lives, or have family members and friends with disabilities that necessitate the use of prosthetics in their daily lives. The autonomy of an individual in performing basic tasks is a crucial factor in the development of prosthetics. More specifically, the development of prosthetics capable of detecting the myoelectric signals from muscles and processing them, enabling the user to perform basic movements of the affected limb. That said, the aim of this study is to develop a robotic upper limb prosthetic capable of partially replicating the function of a healthy hand based on the electrical signals from the residual limb.

To achieve our objective, a systematic review of published articles on upper limb robotic prosthetics was conducted. Subsequently, the hand was assembled and connected to the electrical circuit, using an Arduino UNO, servomotors, electrical signal sensors, and 3D-printed parts made from PLA material. We then carried out tests on the prosthesis, integrating the hand into the electronic circuit and verifying the detection and processing of myoelectric signals, as well as the compliance of finger flexion and extension with muscle contraction and relaxation.

Additionally, a second test was conducted to evaluate the robotic hand's ability to grasp objects of different shapes. Spherical, cylindrical, and rectangular items were selected, allowing us to assess its effectiveness in various manipulation scenarios. The results showed that the prosthesis successfully grasped objects of different shapes, demonstrating its versatility.

Through these tests, we observed the prosthesis's functionality, with successful detection and processing of signals resulting in proper flexion and extension of the fingers. A calibration option for adapting the prosthesis to different individuals was implemented via an application, optimizing the prototype. Thus, the tests demonstrated satisfactory performance of the model.

The prosthesis demonstrated satisfactory performance and responsiveness to myoelectric signals, with adjustments made to ensure adaptability to different user

profiles. The results reinforce the potential of the prototype for future applications and continuous development.

Key words: *Hand prosthesis; EMG sensors; 3D printing; Servomotors.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Primeiro grupo de ossos do membro superior	16
Figura 2: Segundo e terceiro grupo de ossos do membro superior.	17
Figura 3: Quarto grupo de ossos do membro superior.	17
Figura 4: Tabela identificando o músculo a inervação e mostrando as ações que este conjunto é responsável.	18
Figura 5: Zonas da musculatura da mão e da topografia das lesões.	19
Figura 6: Vista anterior profunda do ombro e braço direitos.	20
Figura 7: Fluxograma do desenvolvimento da prótese de mão mioelétrica.	27
Figura 8: Modelo de prótese de mão robótica Handy Lite.	28
Figura 9: Esquema de blocos do circuito elétrico para controle da prótese.	29
Figura 10: Componentes da prótese alterados - Partes correspondentes à falange proximal (à esquerda) e distal (à direita) alteradas isoladas (A), Conjunto das partes alteradas (à esquerda) ao lado do conjunto original (à direita) em contexto (B).	31
Figura 11: Componentes da prótese - Palma (A), Partes correspondentes à falange distal, proximal e base do dedo (B).	32
Figura 12: Protótipo montado, com servomotores - Vista frontal (A), Vista lateral (B), Vista posterior (C).	33
Figura 13: Esquema do circuito elétrico para controle da prótese.	33
Figura 14: Conexão dos eletrodos do sensor de ECG AD8232.	34
Figura 15: Protótipo em funcionamento durante: Relaxamento muscular (A), Contração muscular (B).	35
Figura 16: Interface do aplicativo.	36
Figura 17: Formato retangular: Pente de Cabelo (A), Necessary (B), Celular (C), Carteira (D).	39
Figura 18: Formato irregular: Alicate (A), Tesoura (B), Bolsa (C).	40
Figura 19: Formato esférico: Bolinha.	40
Figura 20: Formato cilíndrico: Fita crepe adesiva (A), álcool em spray (B).	41
Figura 21: Formato cilíndrico de objetos não retidos pela mão robótica: Garrafa de água de Plástico (A), Garrafa de água Metálica (B), Controle Remoto (C).	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultado do teste de preensão de objetos de diferentes formatos.	38
---	----

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

STL	<i>Standard Triangle Language</i>
PLA	Poliácido Láctico
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
ECG	Eletrocardiograma
GUI	<i>Graphical User Interface</i>

SUMÁRIO

1. Introdução	15
1.1 Anatomia do braço e mão	15
1.1.1 Extensão e Flexão da mão	18
1.1.2 Músculo de controle dos movimentos da mão	20
1.2 Tecnologia Assistiva	21
1.3 Próteses do membro superior	22
1.3.1 Próteses Passivas	23
1.3.2 Próteses Ativas	23
1.3.2.1 Dispositivos ativados por sinais mioelétricos	24
2. Objetivos	26
2.1 Objetivos gerais	26
2.2 Objetivos específicos	26
3. Materiais e Métodos	27
3.1 Definição e Impressão das peças da mão Robótica	27
3.2 Desenvolvimento Eletrônico da Prótese	28
3.2.1 Arduino UNO	29
3.2.2 Servomotores	29
3.3. Aquisição e Processamento dos Sinais Mioelétricos	29
3.3.1 Sensor EMG	29
3.3.2 Controle da Prótese	30
3.4 Testes de Desempenho da Mão Robótica	30
3.4.1 Teste de Preensão	30
4. Resultados	31
4.1 Impressão 3D do Modelo de Mão	31
4.2 Montagem da Prótese	32
4.3 Desenvolvimento do Circuito Eletrônico	33
4.3.1 Aquisição de Sinais	34
4.3.2 Controle do Movimento	34
4.3.3 Atuadores	35
4.4 Aplicativo	36

4.5 Teste de Prensão de Objetos de Diferentes Formatos	37
5. Conclusão	42
6. Perspectivas do Trabalho	43
7. Referências Bibliográficas	44

1. Introdução

O capítulo apresentado a seguir aborda as bases teóricas do trabalho que consiste em informações acerca de amputações físicas e soluções que vêm sendo aplicadas para proporcionar a inclusão e qualidade de vida de seus portadores. Para o entendimento completo do cenário que esses indivíduos vivem, é importante conhecer a linguagem utilizada por eles, e quais tecnologias vêm sendo utilizadas para ajudá-los a serem inseridos na sociedade. No texto, discutiremos sobre robótica assistiva e próteses robóticas, além de apresentar a situação atual brasileira sobre os temas pesquisados.

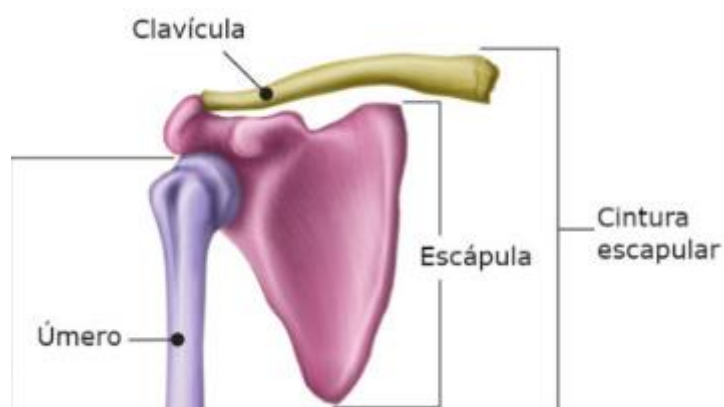
1.1 Anatomia do braço e mão

A mão humana é a região mais distal do membro superior do corpo humano e consiste de ossos específicos sobre os quais vários músculos se inserem, e uma coleção de estruturas neurovasculares responsáveis pela drenagem e inervação (HANSEN, 2019).

A estrutura dos ossos do membro superior é dividida em grupos de estruturas que são responsáveis pela composição dos membros superiores, seu movimento e suas funções (MELATTI, 2014).

O primeiro grupo é formado pela Cintura escapular que é composta pela clavícula e escápula (MELATTI, 2014). A escápula é responsável pela fixação dos músculos do ombro e do braço, que permitirá uma variedade de movimentos. A clavícula, por sua vez, ajuda a conectar o membro superior ao tronco, fornecendo suporte e estabilidade ao ombro como demonstra a figura 1. O primeiro grupo é formado pela Cintura escapular que é composta pela clavícula e escápula (HANSEN, 2019).

Figura 1: Primeiro grupo de ossos do membro superior



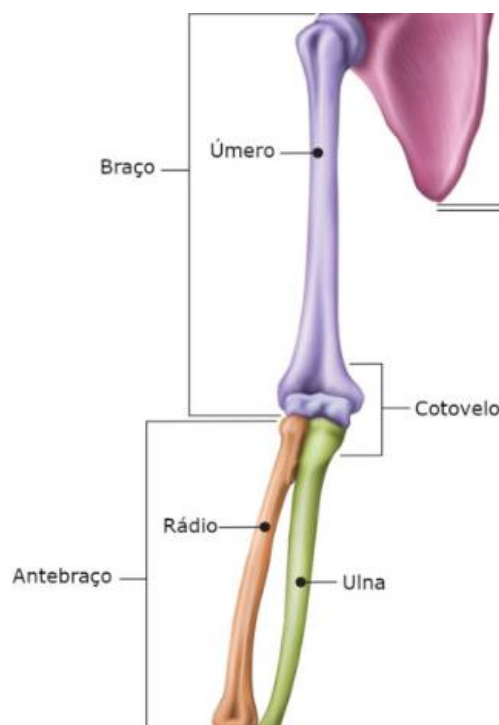
Fonte: MELATTI, 2014.

O segundo grupo é denominado popularmente de “braço” é composto exclusivamente pelo úmero que se caracteriza por ser o osso mais longo do membro superior. Esse osso longo conecta-se diretamente à cavidade glenóide, que forma a articulação glenoumeral (HANSEN, 2019).

O úmero também é capaz de se articular com o Rádio e a Ulna (figura 2), formando a articulação do cotovelo, esse grupo é encarregado por movimentos como flexão, extensão, rotação e pronação do antebraço e da mão (MELATTI, 2014).

O terceiro grupo é popularmente conhecido como antebraço e é composto pelo rádio e ulna. O rádio é essencial para permitir a rotação do antebraço, enquanto a ulna fornece estabilidade estrutural e forma a articulação do cotovelo juntamente com o úmero (HANSEN, 2019).

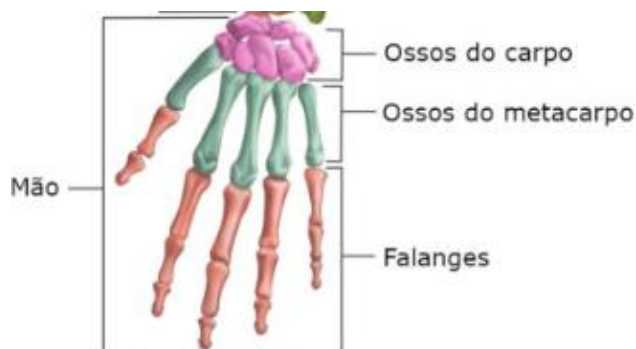
Figura 2: Segundo e terceiro grupo de ossos do membro superior.



Fonte: MELATTI, 2014.

O quarto e último grupo é formado pelos ossos da mão: carpos, metacarpos e falanges (figura 3). Eles proporcionam estrutura e suporte para a mão, permitindo movimentos como agarrar, segurar, e manipular objetos para realizar atividades delicadas. Além disso, os ossos da mão protegem os tecidos moles, como músculos, nervos e vasos sanguíneos, e também estão envolvidos na transmissão de forças durante atividades físicas (HANSEN, 2019).

Figura 3: Quarto grupo de ossos do membro superior.



Fonte: MELATTI, 2014.

O conjunto dos nervos responsáveis por realizar os movimentos do membro superior juntamente com os músculos da região é chamado de plexo braquial, localizado no pescoço e axila (HANSEN, 2014). Esta inervação é formada pelos ramos anteriores dos quatro nervos espinhais cervicais inferiores (C5, C6, C7 e C8) e do primeiro torácico (T1) (HANSEN, 2019).

A figura 4 mostra o músculo, sua inervação e as ações pela qual o conjunto dos dois é responsável.

Figura 4: Tabela identificando o músculo a inervação e mostrando as ações que este conjunto é responsável.

MÚSCULO	INSERÇÃO PROXIMAL (ORIGEM)	INSERÇÃO DISTAL (INSERÇÃO)	INERVAÇÃO	AÇÕES PRINCIPAIS
Pronador redondo	Epicôndilo medial do úmero e processo coronoide da ulna	Metade da face lateral do rádio	Nervo mediano (C6, C7)	Pronação do antebraço e flexão do cotovelo
Flexor radial do carpo	Epicôndilo medial do úmero	Base do 2º osso metacarpal	Nervo mediano (C6, C7)	Flexão e abdução do punho
Palmar longo	Epicôndilo medial do úmero	Metade distal do retináculo dos m. flexores e aponeurose palmar	Nervo mediano (C7, C8)	Flexiona a mão na articulação do punho e comprime a aponeurose palmar
Flexor ulnar do carpo	<i>Cabeça umeral:</i> epicôndilo medial do úmero <i>Cabeça ulnar:</i> olécrano e borda posterior da ulna	Ossos pisiforme, hâmulos do osso hamato e 5º osso metacarpal	Nervo ulnar (C7-C8 e T1)	Flexão e adução do punho
Flexor superficial dos dedos	<i>Cabeça umeroulnar:</i> epicôndilo medial do úmero, ligamento colateral ulnar e processo coronoide da ulna <i>Cabeça radial:</i> metade superior da parte anterior do rádio	Corpos das falanges médias dos quatro dedos mediais na face palmar	Nervo mediano (C8-T1)	Flexão das falanges médias dos quatro dedos mediais; também flexiona fracamente as falanges proximais, o antebraço e o punho
Flexor profundo dos dedos	Três quartos proximais das faces medial e anterior da ulna e membrana interóssea	Bases das falanges distais dos quatro dedos mediais na face palmar	<i>Parte medial:</i> nervo ulnar (C8-T1) <i>Parte lateral:</i> nervo mediano (C8-T1)	Flexão das falanges distais dos quatro dedos mediais; auxilia na flexão do punho
Flexor longo do polegar	Face anterior do rádio e membrana interóssea adjacente	Base da falange distal do polegar na face palmar	Nervo mediano (interósseo anterior) (C7-C8)	Flexão das falanges do primeiro dedo (polegar)
Pronador quadrado	Quarto distal da face anterior da ulna	Quarto distal da face anterior do rádio	Nervo mediano (interósseo anterior) (C7-C8)	Pronação do antebraço

Fonte: HANSEN, 2019.

1.1.1 Extensão e Flexão da mão

Os movimentos extensores da mão são realizados por dois conjuntos de músculos: os extensores intrínsecos, que são aqueles que possuem sua origem e inserção na própria mão e os músculos extrínsecos, cuja origem vem do cotovelo e antebraço (FRANCISCO, 2007).

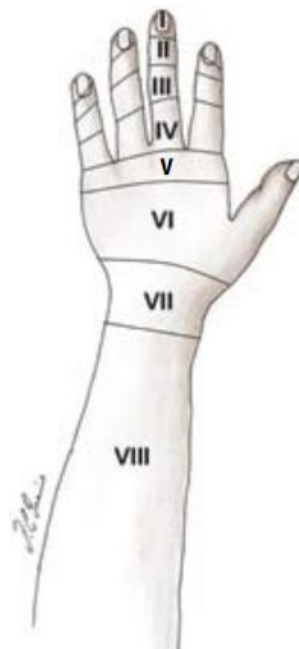
Os músculos extensores extrínsecos, como o próprio nome indica, são responsáveis pela extensão das articulações metacarpofalangeanas e

interfalangeanas, realizando a extensão dos dedos indicador e mínimo (RAGHEB D, 2005).

Já os músculos extensores intrínsecos são os lumbricóides e interósseos, que, além de estenderem as articulações interfalangeanas, também contribuem na flexão das metacarpofalangeanas. Os pesquisadores Kleinert e Verdan, a fim de diferenciar rupturas tendíneas de aderência do tendão ou desordens neurológicas, propuseram um sistema de classificação em zonas das musculaturas do membro (figura 5), sendo elas (FRANCISCO, 2007):

- Zona I: articulação interfalangeana distal;
- Zona II: falange média;
- Zona III: articulação interfalangeana proximal;
- Zona IV: falange proximal;
- Zona V: articulação metacarpofalangeana;
- Zona VI: dorso da mão;
- Zona VII: compartimentos extensores do punho;
- Zona VIII: músculos extensores extrínsecos.

Figura 5: Zonas da musculatura da mão e da topografia das lesões.



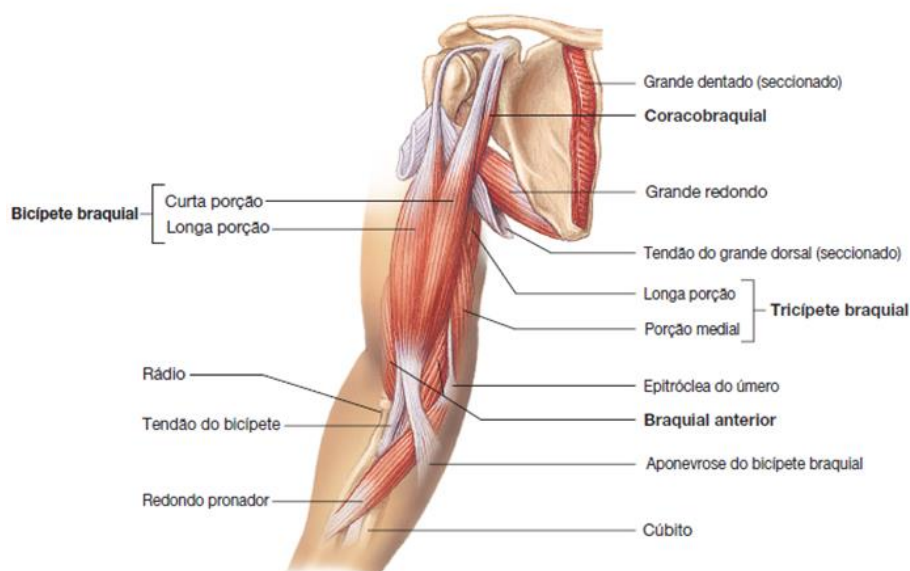
Fonte: FRANCISCO, 2007.

1.1.2 Músculo de controle dos movimentos da mão

A musculatura do membro superior é responsável por uma variedade de movimentos, desde simples gestos até tarefas mais complexas. Ela é composta por diversos músculos que trabalham de forma coordenada para produzir movimento e estabilidade (HANSEN, 2019).

Os principais músculos do membro superior responsáveis por realizar os movimentos são o bíceps braquial, tríceps braquial e o deltoide. Juntamente com os músculos do antebraço, que são responsáveis por realizar os movimentos de rotação e flexão no punho, como demonstrado de forma mais detalhada na figura 6 (HANSEN, 2019).

Figura 6: Vista anterior profunda do ombro e braço direitos.



Fonte: SEELEY, 2017.

O bíceps braquial está localizado na parte frontal do membro superior, popularmente conhecido de “bíceps” pois possui dois pontos de origem. Esse músculo se origina na escápula e se funde em um tendão único que se conecta ao rádio (osso do antebraço). Este músculo é responsável por desempenhar atividades como: levantar objetos, carregar sacolas e flexionar o cotovelo (HANSEN, 2019).

O tríceps braquial está localizado na parte posterior do membro superior. Ele é composto por três partes denominadas cabeças musculares: cabeça longa, cabeça lateral e cabeça medial. As três cabeças convergem para um tendão comum que se conecta ao osso do úmero. Este músculo é responsável pela extensão do cotovelo, endireitando o braço após a flexão e também por realizar o movimento de “empurrar” como em exercícios de flexões e supinos (HANSEN, 2019).

O deltoide é um músculo do membro superior, mais precisamente no ombro, dividido em três partes: deltoide anterior, que ajuda na flexão e na rotação interna do membro, deltoide médio, que é responsável pela abdução do braço e deltoide posterior, que contribui para a extensão e rotação externa. Juntas essas três partes realizam a estabilização dos movimentos realizados (HANSEN, 2019).

1.2 Tecnologia Assistiva

Conforme a Lei Brasileira de Inclusão, 13.146 de julho de 2015, tecnologia assistiva é um termo que se refere a produtos, equipamentos, dispositivos, recursos, metodologias, estratégias, práticas e serviços que tenham como objetivo promover a funcionalidade, relacionada à atividade e à participação da pessoa com deficiência ou com mobilidade reduzida, visando à sua autonomia, independência, qualidade de vida e inclusão social. Entre os recursos deste tipo de tecnologia disponíveis, destacam-se as órteses, próteses e meios auxiliares de locomoção.

Nesse contexto, a tecnologia assistiva representada por órteses, próteses e meios auxiliares de locomoção se mostra um elemento essencial na atenuação do impacto das limitações impostas pela deficiência, auxiliando a funcionalidade, independência e promoção da participação e inclusão social de pessoas com deficiência física. A órtese é definida como qualquer material permanente ou transitório que auxilie as funções de um membro, órgão ou tecido, desde que sua colocação ou remoção não requeira a realização de um ato cirúrgico (Ministério da Saúde, 2016). Estes dispositivos são projetados para oferecer suporte, alinhamento, estabilidade ou correção de membros afetados por lesões, deformidades ou disfunções físicas, e desempenham um grande papel na reabilitação física e melhoria

da mobilidade, trazendo mais facilidade e conforto à realização de atividades diárias de seus usuários (Ministério da Saúde, 2016).

Meios auxiliares de locomoção se referem a aparelhos ou dispositivos que auxiliam a função motora, sem corrigir ou substituir um membro. Este tipo de tecnologia assistiva proporciona uma mobilidade pessoal independente, ampliando funções físicas e oferecendo apoio adicional durante o deslocamento, que pode ou não ser através da marcha (World Health Organization, 2008). Deste modo, esses dispositivos facilitam a mobilidade e promovem a acessibilidade em diversos ambientes, permitindo que as pessoas com deficiência se desloquem com mais facilidade em casa, no trabalho, em escolas e espaços públicos, aumentando sua independência e inclusão social (World Health Organization, 2008).

O termo prótese compreende qualquer material permanente ou transitório que substitua parcial ou totalmente um membro, órgão ou tecido (Ministério da Saúde, 2016). As próteses são uma das grandes conquistas da engenharia biomédica, possibilitando a substituição de membros perdidos à conta de amputações, traumas ou anomalias congênitas. Os avanços na área de materiais, design e tecnologia trouxeram às próteses modernas um movimento mais natural, restabelecendo tanto a capacidade física quanto a autoestima e integração social de seus usuários (Ministério da Saúde, 2016). Os tipos de próteses serão explorados mais a fundo no próximo tópico.

1.3 Próteses do membro superior

Próteses são dispositivos artificiais arquitetados para substituir uma parte faltante do corpo. Estes artefatos dão aos seus usuários a oportunidade de reproduzir a função que seria realizada pelo membro ausente. Assim, as próteses se mostram um elemento essencial para a restauração da habilidade de realizar atividades cotidianas para as pessoas que as utilizam (BRACK; AMALU, 2021).

As próteses de membro superior apresentam uma solução para a deficiência gerada pela ausência da mão. Devido à falta de acompanhamento especializado, problemas de funcionalidade, confiabilidade, aparência, conforto e usabilidade, muitas vezes seus usuários acabam as abandonando. Por isso, a comunicação com o usuário

final do produto, averiguando as expectativas de design e operação do protótipo durante seu desenvolvimento é muito importante para que o projeto da prótese seja bem sucedido, assim como uma boa compreensão da anatomia dos membros superiores, seções de amputação da mão e do efeito geral das próteses no usuário (BRACK; AMALU, 2021). Aqui, as próteses serão classificadas em 3 grupos principais: ativas, passivas e ativadas por sinais do corpo.

1.3.1 Próteses Passivas

As próteses passivas são utilizadas nos casos em que a aparência e o conforto são a prioridade. Em geral, estes dispositivos são projetados para que tenham a aparência o mais próximo possível do real. Diferentemente das próteses ativas, as próteses passivas não contêm componentes mecânicos ou elétricos capazes de realizar movimentos articulados. Apesar de suas ações serem limitadas a empurrar, puxar e segurar objetos, as próteses passivas são uma escolha popular entre os usuários, principalmente entre os que sofreram recentemente uma amputação (BRACK; AMALU, 2021).

Ao proporcionar uma aparência natural e simétrica, as próteses passivas auxiliam na reintegração social e na melhoria da autoestima do usuário, além de ajudar a reduzir o estigma associado à amputação, facilitando a aceitação e inclusão do usuário na sociedade (BRACK; AMALU, 2021).

As próteses passivas têm um funcionamento relativamente simples, e costumam ser feitas de materiais leves, como plástico, silicone ou fibra de vidro, moldados de acordo com o membro ausente do usuário. A fixação da prótese ao membro residual pode ser feita por meio de correias, encaixes e adesivos de pele, dependendo da preferência e conforto do usuário (CASTANEDA, 2021).

1.3.2 Próteses Ativas

As próteses ativas são dispositivos avançados projetados para atender às necessidades específicas do usuário e ao seu nível de amputação. O grande diferencial entre essas próteses em relação às passivas é que as ativas podem gerar potência, permitindo que seu usuário realize movimentos controlados e

funcionalidades adicionais, proporcionando uma maior independência e qualidade de vida (CASTANEDA, 2021). A combinação de dispositivos passivos e ativos no desenvolvimento de um projeto voltado ao atendimento às necessidades dos pacientes com um membro ausente tem grande potencial no desenvolvimento de próteses de membro superior, e devem ser vistas como complementares uma à outra no projeto destes dispositivos (CASTANEDA, 2021).

O funcionamento destas próteses varia conforme seu modelo, mas em geral, são controladas por sinais musculares, processados e traduzidos à movimentos pré-estabelecidos da prótese. Os usuários devem ser instruídos pelos profissionais da área quanto ao controle de suas próteses, devendo treinar e praticar seu uso até que se adaptem à funcionalidade e controle da prótese (BRACK; AMALU, 2021).

Este tipo de prótese tem como objetivo principal a restauração da funcionalidade do membro acometido, permitindo que usuários realizem as diversas atividades do dia a dia com maior facilidade e independência. O movimento controlado auxilia os usuários destas próteses a superar os limites impostos pela ausência do membro, facilitando o alcance de uma vida ativa e produtiva (BRACK; AMALU, 2021).

1.3.2.1 Dispositivos ativados por sinais mioelétricos

As próteses ativas de membro superior controladas por sinais mioelétricos marcam uma grande e impactante inovação na área da reabilitação de pessoas com extremidades dos membros superiores acometidas. Com estas próteses, motores elétricos com fontes de alimentação externa são associados a sensores e um microcontrolador para que os sinais elétricos dos músculos remanescentes do usuário possam ser utilizados para controlar seus movimentos, trazendo uma recuperação de funcionalidade avançada e mais próxima do real (CASTANEDA, 2021).

As próteses de mão mioelétricas são compostas por sensores que captam os impulsos elétricos gerados pelos músculos do paciente, permitindo que o usuário controle os movimentos de abrir e fechar a mão e realizar a preensão de objetos através da contração dos músculos remanescentes do membro acometido. Os sinais captados pelo sensor são enviados a um microcontrolador, que os processa e analisa, que os traduzem em movimentos, realizados por motores localizados na prótese.

Treinamento e prática ensinam o usuário a controlar os movimentos da prótese, ajustando-o gradualmente à funcionalidade e controle do dispositivo (CASTANEDA, 2021).

Estas próteses controladas por sinais mioelétricos proporciona a seus usuários uma restauração das funções da mão acometida, permitindo que realizem atividades cotidianas, melhorando sua qualidade de vida, dando a estes mais liberdade e autonomia enquanto contribuem para a reabilitação psicológica do paciente, ajudando-o a recuperar sua confiança em si e em suas habilidades (BRACK; AMALU, 2021).

Apesar dos avanços nessa tecnologia, o custo deste tipo de prótese torna o acesso limitado. Por isso, pacientes com menos condições financeiras são barrados de fazer uso desta tecnologia. Além disso, o custo de reparos e manutenção destas próteses, que podem ser danificadas por fatores do ambiente, como água, pó e sujeira, acabam a deixando ainda mais cara do que as outras alternativas (BRACK; AMALU, 2021).

2. Objetivos

2.1 Objetivos gerais

Desenvolver uma prótese robótica de extremidade dos membros superiores capaz de realizar parcialmente a função da mão de uma pessoa saudável.

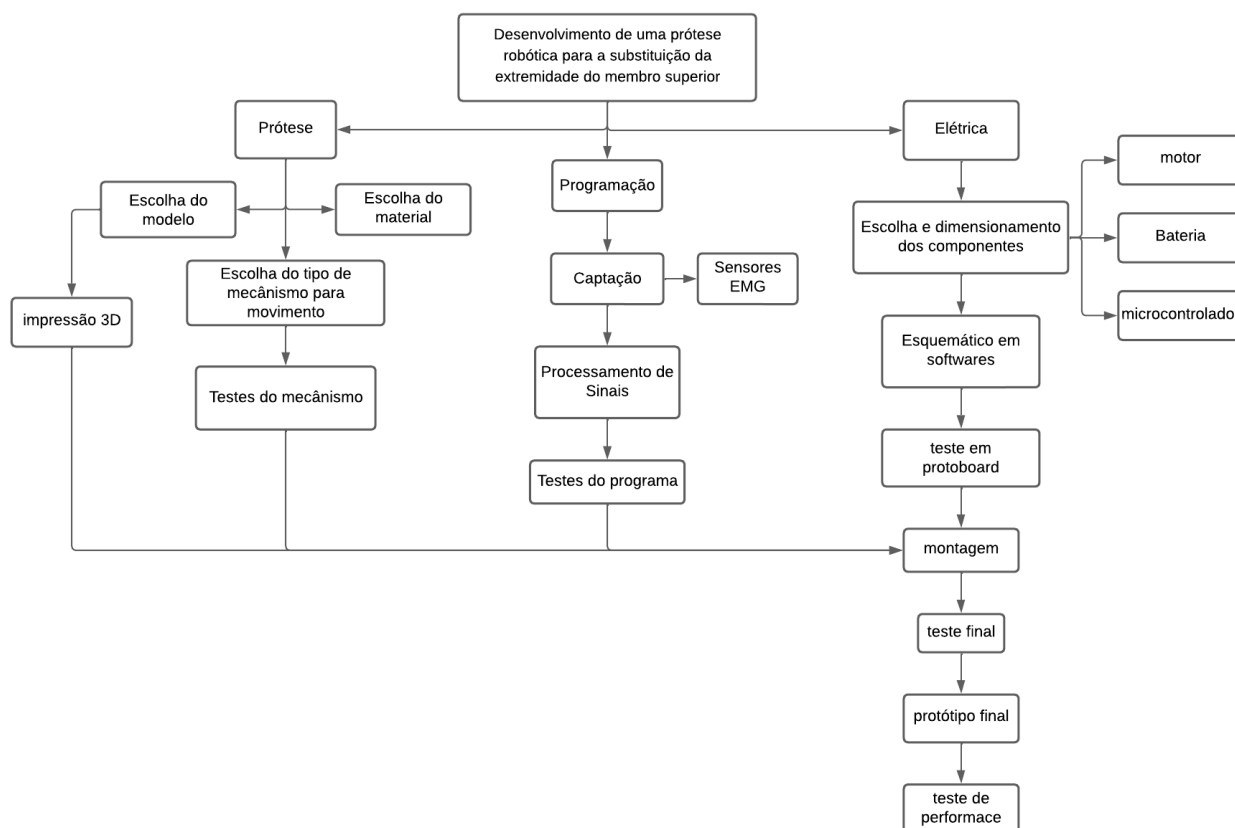
2.2 Objetivos específicos

- Construir um circuito eletrônico para captação, processamento e controle da mão robótica;
- Modelar e imprimir uma prótese de mão mioelétrica em software de desenho 3D;
- Montar e avaliar a eficácia do uso do protótipo desenvolvido na realização das tarefas do dia a dia.

3. Materiais e Métodos

O desenvolvimento da prótese possui três frentes principais: construção da prótese, elaboração da programação e composição da parte elétrica (Figura 7). Para a construção da prótese, o material, o modelo e o tipo de mecanismo de movimento a serem utilizados foram definidos. Para a programação, o sistema de captação e processamento de sinais foi desenvolvido. Por fim, para a parte elétrica, os componentes elétricos do circuito foram escolhidos e dimensionados, e o esquema do circuito proposto foi testado no software online *Tinkercad*. Com todas as frentes finalizadas, o protótipo foi montado e testado.

Figura 7: Fluxograma do desenvolvimento da prótese de mão mioelétrica.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Definição e Impressão das peças da mão Robótica

Selecionamos o modelo de mão *Handy Lite* (Youbionic, Vigevano, Itália), que pode ser vista na figura 8, e cujos arquivos de extensão STL (*Standard Triangle*

Language, que fornecem a instrução necessária para que o software das impressoras 3D processem os designs digitais, permitindo a construção de objetos) foram modificados para dar 2 graus de liberdade de movimento (conjunto de deslocamentos e rotações que um corpo pode executar) para cada dedo e impressos na impressora *ENDER 3 S1 PLUS* (Creality, Shenzhen, China), do laboratório de materiais da PUC-SP, campus da Consolação. Os componentes foram impressos com filamento de ácido polilático (PLA) *MAX HIGH SPEED* (National 3D, São Paulo, Brasil), obtendo assim as peças que compõem a mão.

Figura 8: Modelo de prótese de mão robótica Handy Lite.



Fonte: YOUBIONIC, 2019.

3.2 Desenvolvimento Eletrônico da Prótese

Foram utilizados 10 servomotores, posicionados em cada uma das articulações metacarpofalângicas, interfalangeanas proximais e interfalângica. Os servomotores são controlados por um Arduino UNO (OEM, Ivrea, Itália).

3.2.1 Arduino UNO

O microcontrolador Arduino UNO R3 (OEM, Ivrea, Itália) foi escolhido para controlar a prótese de mão robótica. Cada placa Arduino UNO R3 possui 6 pinos de saída modulada por largura de pulso (PWM, do inglês, *Pulse Width Modulation*), utilizada no controle de servomotores.

3.2.2 Servomotores

Foi utilizado o Micro Servo SG92R (Tower Pro, Taipei, Taiwan), com motor capaz de girar de 0° a 180°, nos sentidos horário e anti-horário. Os motores recebem o sinal de controle diretamente das saídas PWM do Arduino UNO.

3.3. Aquisição e Processamento dos Sinais Mioelétricos

3.3.1 Sensor EMG

A aquisição dos sinais mioelétricos foi feita através do sensor de eletrocardiograma (ECG) AD8232 (Analog Devices, Norwood, EUA), feito para medir a atividade elétrica do coração. Neste projeto, fizemos o uso adaptado deste sensor, utilizando-o sobre o bíceps braquial, para que captasse a atividade muscular através do potencial de ação deste músculo, de modo que quanto mais forte for a contração muscular realizada, maior será o sinal de saída do sensor, que será processado pelo microcontrolador Arduino UNO e utilizado no controle da prótese. O esquema com o circuito proposto pode ser visto na figura 9.

Figura 9: Esquema de blocos do circuito elétrico para controle da prótese.



Fonte: Autoria própria.

3.3.2 Controle da Prótese

O sensor eletromiográfico capta os sinais do bíceps do paciente e transmite em sua saída um valor de 0 a 5 V de acordo com o nível de contração muscular detectado. Este sinal é então transmitido ao Arduino UNO e utilizado para deslocar angularmente o servomotor, que movimenta os dedos da mão. Assim, a contração e relaxamento muscular controlam a abertura e fechamento da mão.

3.4 Testes de Desempenho da Mão Robótica

Para validar o funcionamento da prótese, faremos um teste de preensão de objetos de diferentes formatos.

3.4.1 Teste de Preensão

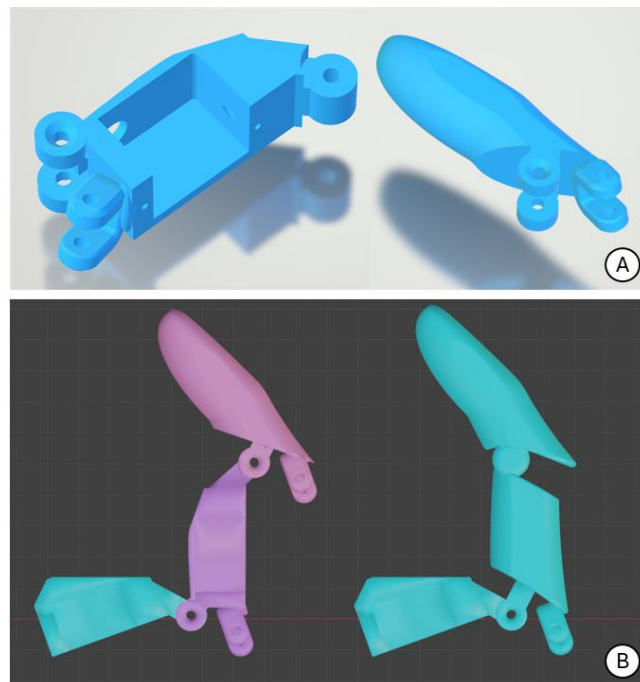
Através deste teste, avaliamos a capacidade da mão projetada de segurar objetos de diferentes formatos. Para isso, escolhemos objetos com variados formatos, que foram posicionados entre os dedos da mão e verificamos sua capacidade de segurá-los. A eficácia da prótese na preensão de cada objeto foi registrada em uma planilha, permitindo a análise da eficiência da prótese em diferentes situações.

4. Resultados

4.1 Impressão 3D do Modelo de Mão

Para dar à prótese 2 graus de liberdade por dedo, o arquivo de cada componente da Youbionic Handy Lite foi alterado no software Blender (v4.1.1.0), onde a parte correspondente à falange foi dividida em duas, sendo a proximal adaptada para suportar um servomotor, e distal adaptada para poder ser movimentada pelo atuador. Deste modo, o dedo que possuía um único grau de liberdade, em outras palavras, uma única direção de deslocamento (inclinação para frente e para trás), que ocorria na articulação metacarpofalangeana, passou a ter dois pontos de mobilidade, cada um com 1 grau de liberdade, fazendo com que o dedo como um todo passasse a ter 2 graus de liberdade. O resultado das alterações pode ser visto na figura 10.

Figura 10: Componentes da prótese alterados - Partes correspondentes à falange proximal (à esquerda) e distal (à direita) alteradas isoladas (A), Conjunto das partes alteradas (à esquerda) ao lado do conjunto original (à direita) em contexto (B).



Fonte: Autoria própria.

O modelo de mão utilizado neste projeto foi produzido utilizando a técnica de manufatura aditiva da impressão 3D, e o material escolhido para impressão foi o PLA, conhecido por sua rigidez e resistência.

Após a impressão feita no laboratório de materiais da PUC-SP, ficamos com 4 componentes: a palma da mão; a base do dedo e sua haste; a parte proximal da falange; a parte distal da falange. O resultado da impressão pode ser visto na figura 11.

Figura 11: Componentes da prótese - Palma (A), Partes correspondentes à falange distal, proximal e base do dedo (B).

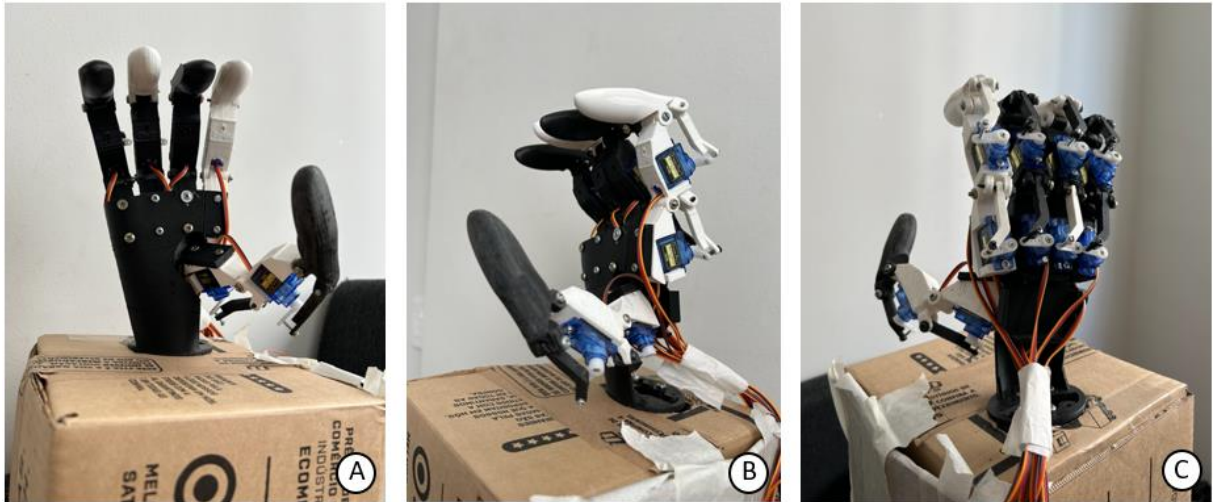


Fonte: Autoria própria.

4.2 Montagem da Prótese

As partes impressas da prótese foram conectadas por parafusos, disponibilizados pelo laboratório de materiais da PUC-SP. A ponta do dedo foi conectada à haste e à base da falange proximal, que foi conectada à base e à haste do metacarpo, conectada à parte interior da palma. Um servomotor foi inserido em cada suporte de cada base, e sua hélice foi conectada à haste, de modo que quando o servomotor fosse ativado, movendo sua hélice no sentido horário, a haste seria empurrada para cima, dobrando o dedo (Figura 12).

Figura 12: Protótipo montado, com servomotores - Vista frontal (A), Vista lateral (B), Vista posterior (C).

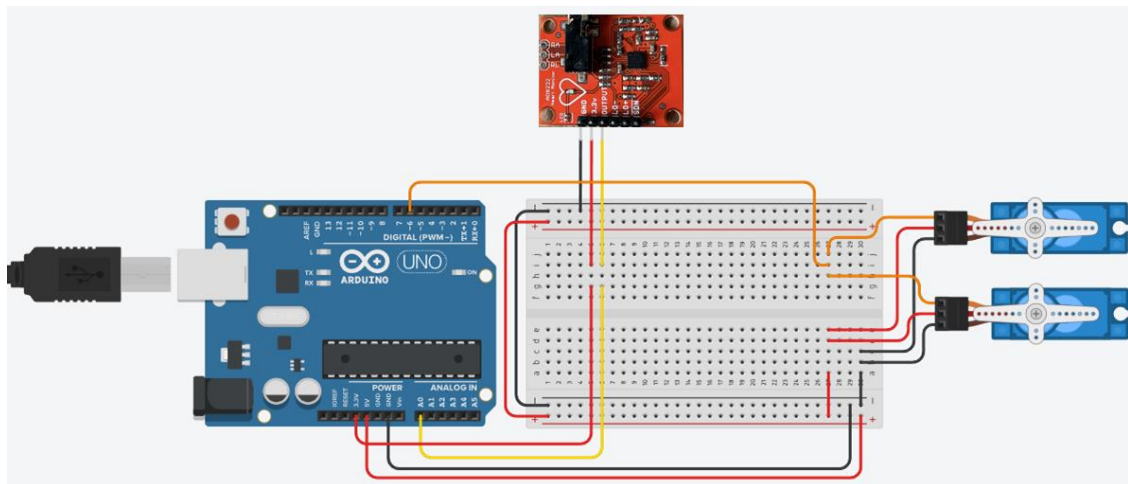


Fonte: Autoria própria.

4.3 Desenvolvimento do Circuito Eletrônico

O circuito eletrônico da prótese de mão robótica foi desenvolvido para fornecer controle preciso e responsivo à contração muscular do usuário, e simulado no software *tinkercad* para validar seu funcionamento (figura 13). O sistema pode ser dividido em 3 módulos principais: aquisição de sinais; controle; atuadores.

Figura 13: Esquema do circuito elétrico para controle da prótese.

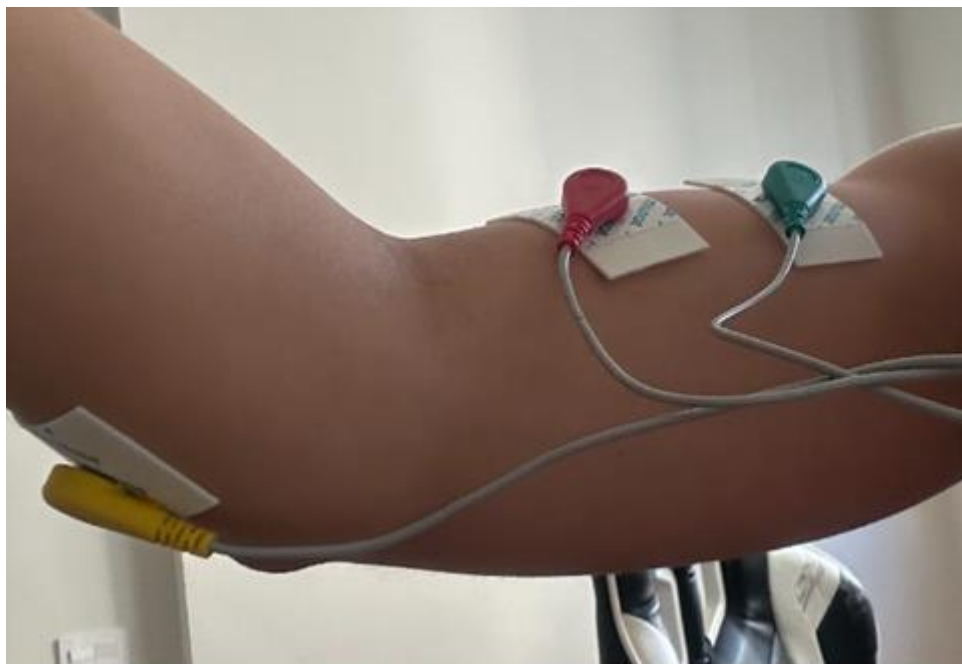


Fonte: Autoria própria.

4.3.1 Aquisição de Sinais

Para esta primeira etapa do projeto, optamos por usar o sensor de eletrocardiograma (ECG) AD8232 (*Analog Devices*, Norwood, EUA), que é compatível com o microcontrolador Arduino utilizado, preciso e tem um custo acessível. Adaptamos este sensor de ECG para uso como um sensor eletromiográfico, o posicionando sobre os músculos do bíceps, cujo sinal será utilizado para acionar os atuadores da prótese. Os eletrodos indicados pelas cores verde e vermelho foram posicionados sobre o bíceps braquial, e o amarelo sobre o músculo palmar longo, logo abaixo do cotovelo (Figura 14). O sensor tem sua alimentação e terra conectados aos pinos de 3,3 V e GND do Arduino, e os sinais captados por ele são transmitidos ao microcontrolador através do pino analógico A0.

Figura 14: Conexão dos eletrodos do sensor de ECG AD8232.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Controle do Movimento

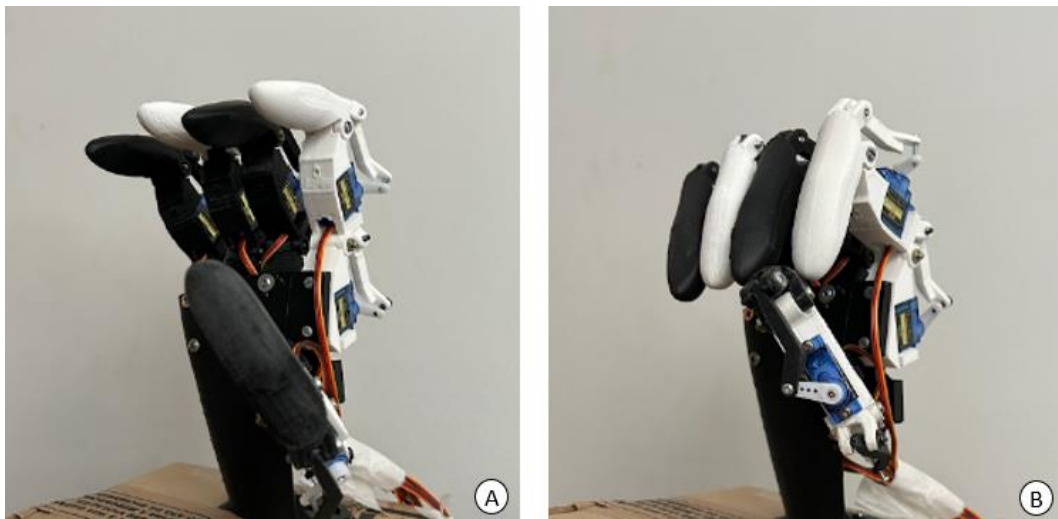
Os sinais do músculo são captados pelo sensor e transmitidos ao Arduino UNO. Este microcontrolador foi escolhido por sua popularidade neste tipo de aplicação e pelo seu custo acessível. O programa desenvolvido para o microcontrolador permite

que este analise os dados recebidos do sensor e categorize o estado do músculo como em contração ou em relaxamento. Os pinos D3, D5, D6, D9, D10, D11 do Arduino UNO correspondem a saídas PWM, e são utilizados no controle do módulo atuador. Para este projeto, os dez servos foram conectados à porta D6 do Arduino, pela qual o movimento dos dedos da prótese é controlado. Assim, a informação de que há uma contração muscular é transmitida do Arduino aos atuadores.

4.3.3 Atuadores

Os atuadores foram posicionados nas bases localizadas no lado interno da palma da mão e nas falanges proximais de cada dedo, como pode ser visto na figura 13, e suas hélices são conectadas na parte adjacente do dedo à sua frente. Uma fonte de 5 V foi ligada ao circuito para alimentar os servomotores. O microcontrolador ativa o atuador (servomotor), que gera um movimento angular na haste conectada a ele, movimentando a peça seguinte para frente, dobrando o dedo. Quando o usuário da prótese relaxa o músculo, o microcontrolador envia um sinal ao atuador, que volta à sua posição original, esticando o dedo (figura 15).

Figura 15: Protótipo em funcionamento durante: Relaxamento muscular (A), Contração muscular (B).



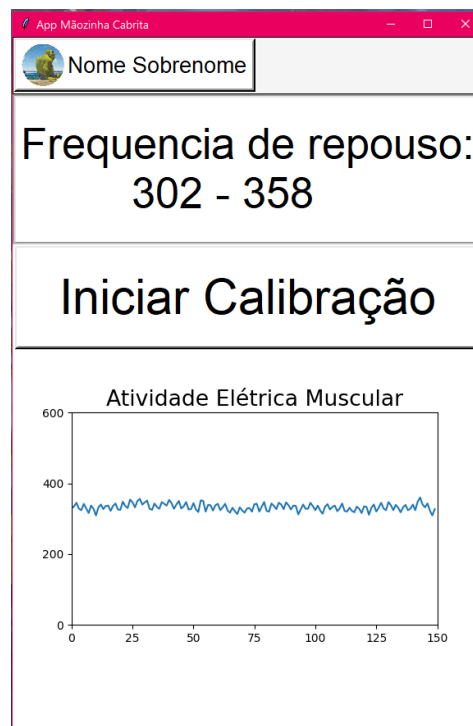
Fonte: Autoria própria.

4.4 Aplicativo

Durante o desenvolvimento da mão robótica, foi identificado que cada pessoa possui diferentes níveis de força muscular. Para garantir que qualquer indivíduo, independentemente de sua força muscular, possa utilizar a prótese de maneira eficaz, foi criado um aplicativo que mede a contração muscular e calibra a mão robótica de acordo com as necessidades específicas de cada usuário. Esse processo de calibração permite uma adaptação personalizada, proporcionando maior conforto e funcionalidade para os usuários.

O aplicativo foi desenvolvido utilizando o *Tkinter*, uma biblioteca padrão do Python para a criação de interfaces gráficas (GUI, do inglês *Graphical User Interface*). O *Tkinter* é amplamente utilizado para construir interfaces simples e intuitivas, e neste projeto ele foi escolhido por sua capacidade de integrar gráficos e componentes interativos, essenciais para a medição e visualização dos dados musculares, como mostrado na figura 16.

Figura 16: Interface do aplicativo.



Fonte: Autoria própria.

A interface do aplicativo foi projetada para ser acessível e funcional. A primeira seção consiste em um botão que permite ao usuário inserir seu nome e foto, personalizando a experiência. Em seguida, há a medição da frequência de repouso, que capta os sinais do braço do usuário quando está relaxado. Isso é importante porque os valores de repouso variam de pessoa para pessoa. Após essa etapa, o usuário encontra o botão de calibração. Ao acioná-lo, o sistema solicita que o usuário relaxe o braço, e o aplicativo coleta as medidas do sinal durante esse período, identificando o intervalo que corresponde ao estado de repouso muscular.

E, por fim, a interface exibe um gráfico em tempo real que monitora a contração muscular do usuário, permitindo um acompanhamento preciso das mudanças na atividade muscular. Essa funcionalidade visual facilita tanto a calibração quanto o uso contínuo da prótese, tornando o processo mais dinâmico e eficiente.

4.5 Teste de Preensão de Objetos de Diferentes Formatos

O objetivo é avaliar a capacidade da mão robótica de segurar objetos de diferentes formatos, selecionando uma variedade de itens, como esféricos, cilíndricos e retangulares, para realizar testes que analisem sua eficácia em diversas situações de manipulação. Na Tabela 1 é possível verificar os resultados obtidos durante o teste de preensão de objetos.

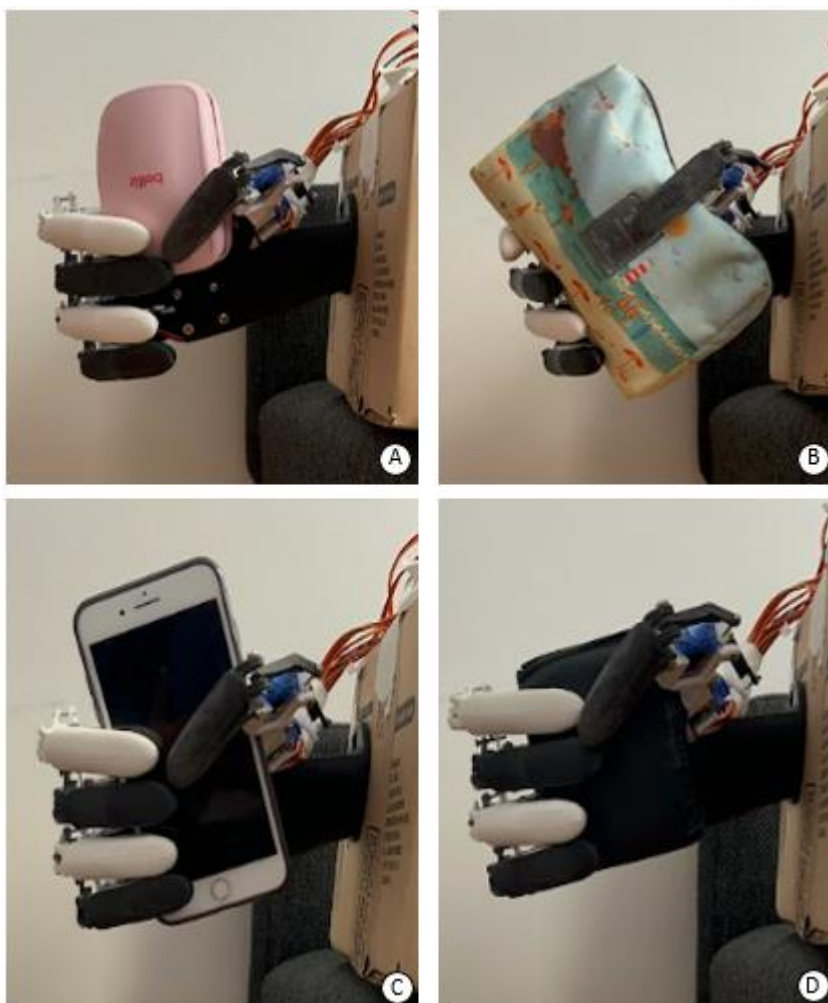
Tabela 1: Resultado do teste de preensão de objetos de diferentes formatos.

Objeto	Formato	Preensão (Sim/Não)	Justificativa	Modificações Necessárias
Necessaire	Retangular	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Pente de cabelo	Retangular	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Carteira	Retangular	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Celular	Retangular	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Tesoura	Irregular	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Ferramenta: Alicate	Irregular	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Bolsa	Irregular	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Fita Crepe Adesiva	Cilíndrico	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Álcool em Gel	Cilíndrico	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Bolinha	Esférico	Sim	Boa preensão com pressão adequada	Nenhuma
Garrafa de água Metálica	Cilíndrico	Não	Falta de aderência, escorregou da mão	Usar material texturizado ou rugoso para melhorar a aderência
Garrafa de água de Plástico	Cilíndrico	Não	Falta de aderência, escorregou da mão	Usar material texturizado ou rugoso para melhorar a aderência
Controle Remoto	Retangular	Não	Falta de aderência, escorregou da mão	Usar material texturizado ou rugoso para melhorar a aderência

Fonte: Autoria própria.

A seguir, apresentamos as imagens que ilustram a pegada do objeto, evidenciando a interação da mão robótica com diferentes formatos e texturas, bem como a eficácia da preensão em cada caso. A Figura 17 apresenta objetos em formato retangular, que foram escolhidos para avaliar a capacidade da mão robótica em realizar preensões com superfícies planas e angulares.

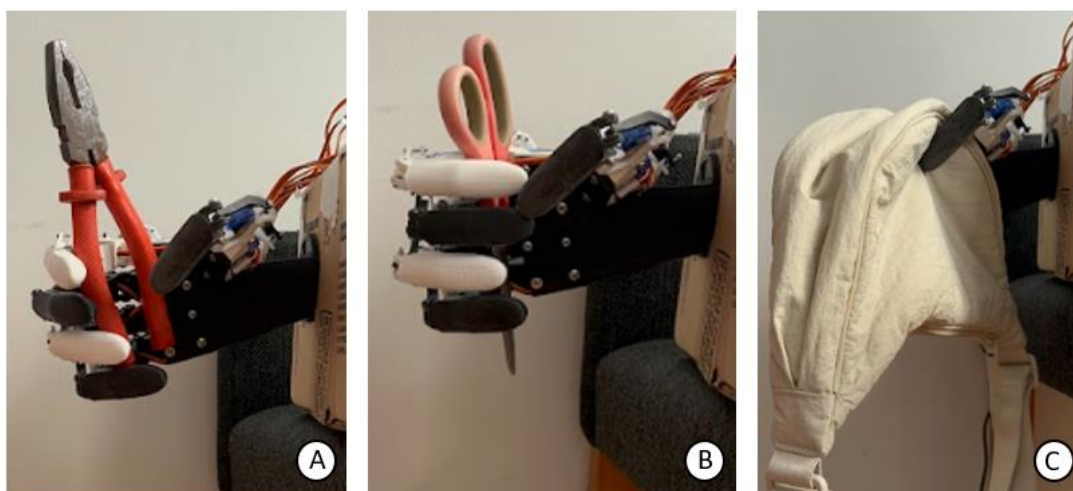
Figura 17: Formato retangular: Pente de Cabelo (A), Nécessaire (B), Celular (C), Carteira (D).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18, são exibidos objetos de formato irregular, permitindo analisar a adaptabilidade da mão robótica em agarrar itens com contornos variados.

Figura 18: Formato irregular: Alicate (A), Tesoura (B), Bolsa (C).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 ilustra um objeto esférico, que testa a eficácia da preensão em superfícies arredondadas.

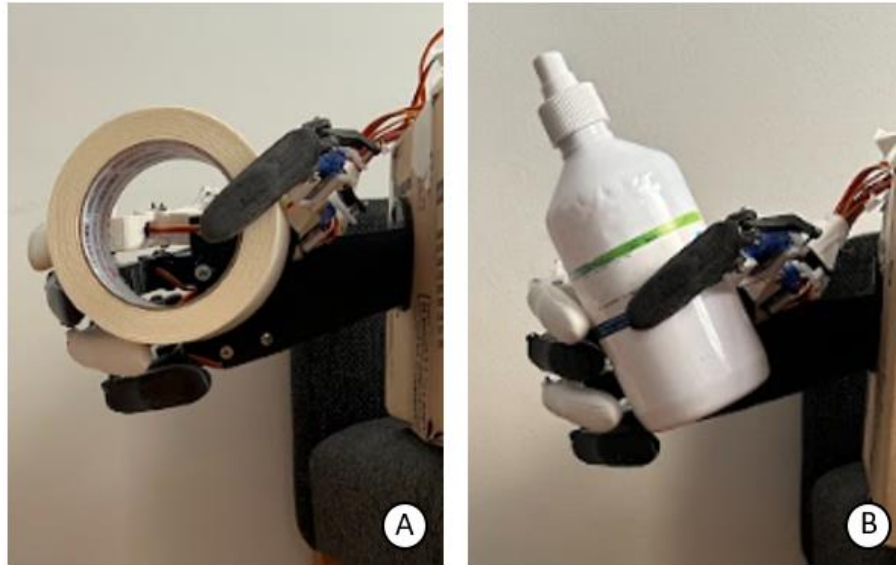
Figura 19: Formato esférico: Bolinha.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 mostra objetos em formato cilíndrico, possibilitando a avaliação da preensão em itens que requerem uma abordagem de agarre específica.

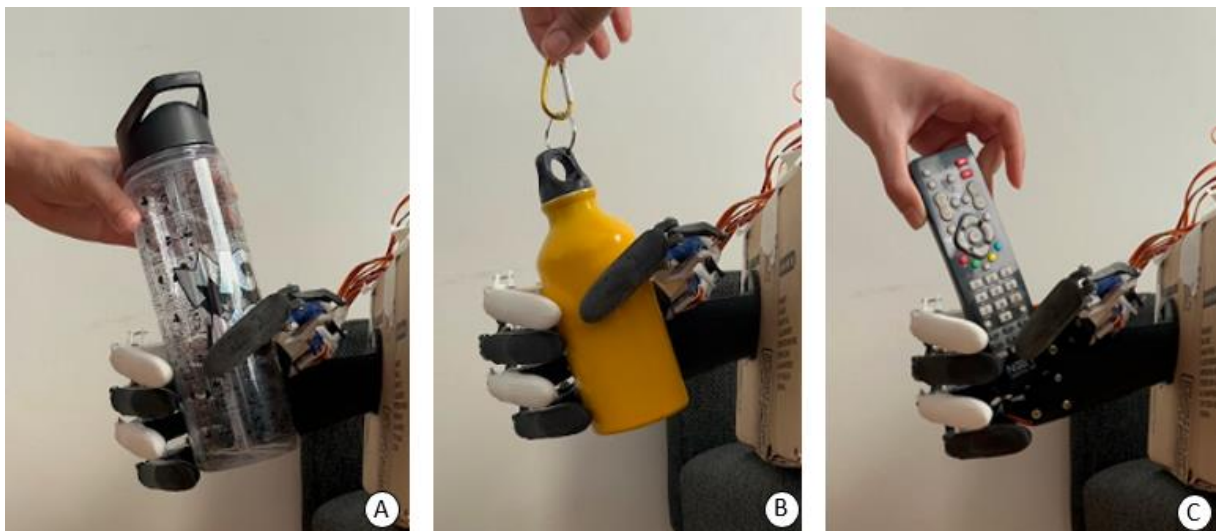
Figura 20: Formato cilíndrico: Fita crepe adesiva (A), álcool em spray (B).



Fonte: Autoria própria.

Por fim, na Figura 21, observa-se o formato cilíndrico e retangular de objetos que não foram retidos pela mão robótica devido à falta de aderência adequada. A superfície lisa e a baixa fricção da mão robótica contribuíram para a falha no agarre, resultando na queda dos objetos.

Figura 21: Formato cilíndrico de objetos não retidos pela mão robótica: Garrafa de água de Plástico (A), Garrafa de água Metálica (B), Controle Remoto (C).



Fonte: Autoria própria.

5. Conclusão

Este trabalho buscou o desenvolvimento de uma prótese do membro superior, capaz de realizar parcialmente a função de uma mão saudável. Trata-se de uma pesquisa multidisciplinar, que envolve o estudo de diferentes áreas de conhecimento da engenharia biomédica, como acessibilidade (com a adição de uma prótese capaz de recriar os movimentos da mão), eletrônica (uma vez que a prótese é construída com componentes eletrônicos e envia os sinais recebidos para imitar os movimentos), desenho mecânico (com a prototipagem no software Blender), manufatura aditiva (com impressão 3D dos componentes), programação e robótica.

A primeira versão da prótese foi capaz de realizar sua função como planejado, e o código desenvolvido se mostrou bem sucedido no processamento dos sinais mioelétricos e sua tradução em movimentos no protótipo. Os três dedos restantes foram adicionados à mão, e um encaixe para fixá-la no antebraço foi desenvolvido. Com a finalização desses passos, realizamos os testes de desempenho da prótese e a aperfeiçoamos para o uso no dia a dia do usuário.

O projeto como um todo se destacou como uma solução viável e de baixo custo para superar as limitações causadas pela ausência da extremidade do membro superior, permitindo a flexão e extensão dos dedos por meio da contração do bíceps do usuário. A conclusão desse trabalho só foi possível graças à integração de diferentes áreas da engenharia, como a eletrônica, mecânica e impressão 3D, demonstrando a importância da abordagem interdisciplinar. Essa sinergia garantiu o desenvolvimento eficiente do dispositivo, desde o design e fabricação até a funcionalidade precisa e responsiva, unindo tecnologias e conhecimentos complementares para atender às necessidades do usuário.

6. Perspectivas do Trabalho

O trabalho em questão mostrou-se adequado para os objetivos planejados, porém pode ser considerado como possíveis melhorias futuras a aderência manual necessária para garantir a firmeza e evitar o deslizamento do objeto manipulado, assim como a uma maior quantidade de posições a serem assumidas pelas falanges. Além disso, o movimento manual é integral, envolvendo todos os dedos, o que impede a execução isolada por apenas um ou dois dedos, promovendo a participação simultânea de toda a mão.

Outro fator limitante está no fechamento manual ocorrendo sem exercer pressão total sobre o objeto, mantendo um pequeno espaço entre os dedos e a palma da mão. Esse vão residual pode, em certas situações, restringir o tipo de objeto que pode ser adequadamente segurado.

A melhoria desses três fatores proporciona uma maior capacidade de realizar uma variedade mais ampla de atividades diárias com a mão, ampliando a funcionalidade manual e permitindo maior eficiência e autonomia nas tarefas rotineiras.

7. Referências Bibliográficas

- HANSEN, John T. **Netter's Anatomy Coloring Book**. 2. ed. Philadelphia: Elsevier, 2019.
- MELATTI, Julianna. **Ossos do braço: anatomia**. Anatomia. 2014. Disponível em: <https://www.infoescola.com/corpo-humano/ossos-do-braco/#1o-segmento-cintura-escapular-composto-pela-clavicula-e-escapula>. Acesso em: 27 abr. 2024.
- FRANCISCO, M. C. et al. **Mecanismo extensor da mão: desvendando a anatomia e avaliação por métodos de imagem**. Revista Brasileira de Reumatologia, v. 47, n. 4, p. 290–294, jul. 2007.
- SEELEY, R. R. et al. **Anatomia e Fisiologia de Seeley**. 10. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017.
- RAGHEB D, STANLEY A, GENTILI A, HUGHES T, CHUNG CB. **MR imaging of the finger tendons: normal anatomy and commonly encountered pathology**. Eur J Radiol 56(3): 296-306, 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção Especializada à Saúde. Departamento de Atenção Especializada e Temática. **Manual de boas práticas de gestão das Órteses, Próteses e Materiais Especiais (OPME)**. Brasília: Ministério da Saúde, 2016. Disponível em: <http://bvsmis.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_praticas_gestao_proteses_materiais_especiais.pdf>. Acesso em 03 maio 2024.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines on the provision of manual wheelchairs in less resourced settings**. Geneva: World Health Organization; 2008.
- BRACK, R.; AMALU, E. H. **A review of technology, materials and R&D challenges of upper limb prosthesis for improved user suitability**. Journal of Orthopaedics, 2021.
- CASTANEDA, Luciana. **Próteses de membros superiores e inferiores: indicações e confecção**. UFMA - Especialização em Atenção Básica, 2021.
- YOUBIONIC. **Handy Lite**. Disponível em: <<https://www.youbionic.com/handy-lite>>. Acesso em 08 agosto 2024.