

Protótipo de prótese de mão robótica impressa em 3D com sistema de detecção tátil

Naves, Mariana Pedroso^{*1}; Campos, Daniel Prado²

1 – Curso de Bacharelado em Engenharia de Computação, UTFPR, mnaves@alunos.utfpr.edu.br

2 – Programa de Engenharia da Computação/COENC e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica (PPGEB), UTFPR, daniel.campos.utfpr@gmail.com

*-Correspondência: Rua Denhei Kanashiro, 133 - Ap.302 BLOCO 2 - DOM ANGELO 2, Jardim Aeroporto, Apucarana, Paraná, Brasil, 86812-600.

DOI 10.52050/9788579177149-09

RESUMO

As mãos robóticas são alternativas para amputações ou deformidades congênicas, com o objetivo de restaurar a funcionalidade do membro e promover autonomia. Este estudo visou o desenvolvimento de um protótipo de mão robótica capaz de realizar movimentos básicos e avaliar a sensibilidade ao toque. O protótipo foi impresso em PLA por impressão 3D, integrando sensores de efeito Hall nas pontas dos dedos para o sensoriamento tátil, servomotores para movimentação articular e controle via microcontrolador Arduino Uno. Os testes demonstraram que, apesar do movimento limitado, a resposta tátil foi satisfatória. Conclui-se que este projeto contribui para o estudo de sensores e próteses acessíveis.

Palavras-chave: mão robótica, impressão 3D, retorno háptico.

ABSTRACT

Robotic hands are alternatives for amputations or congenital deformities, aiming to restore limb functionality and promote autonomy. This study aimed to develop a robotic hand prototype capable of performing basic movements and evaluating touch sensitivity. The prototype was 3D printed using PLA and integrated Hall effect sensors at the fingertips for tactile sensing, servomotors for joint movement, and an Arduino Uno microcontroller for control. The tests showed that, despite limited movement, the tactile response was satisfactory. It's concluded that this project contributes to the study of accessible sensors and prosthetic devices.

Keywords: robotic hand, 3D printing, haptic feedback.

1. INTRODUÇÃO

A perda de um membro, seja parcial ou total, não se trata apenas da perda física, mas também de inúmeros aspectos que compõem a individualidade da pessoa (PILLET; DIDIERJEAN-PILLET, 2001). A amputação compromete a autonomia, a autoconfiança e a autoestima do indivíduo, que muitas vezes se vê incapaz de realizar atividades simples do cotidiano, como pegar um copo d'água ou segurar os talheres para se alimentar (SEREN; DE TILIO, 2014). Em 2020, estimava-se que cerca de 1.500 amputações de membros superiores (MMSS) ocorriam anualmente no Brasil (JORGE, 2020). Apesar de esse dado já estar desatualizado, a escassez de pesquisas atualizadas sobre amputações de MMSS no país dificulta a compreensão da real demanda por próteses de mão. Ademais, a obtenção de uma prótese por meio do Sistema Único de Saúde (SUS) ainda não é garantida a todos que a necessitam e os custos de aquisição no setor privado são elevados, tornando esse recurso inacessível para grande parte da população (FAVERO, 2023).

Com o avanço da tecnologia, a manufatura aditiva, popularmente conhecida como impressão 3D, consolidou-se como uma ferramenta promissora na criação de próteses mais acessíveis ao público. Aliada à ampla disponibilidade de componentes eletrônicos de baixo custo no mercado, a impressão 3D viabiliza o desenvolvimento dos equipamentos protéticos que desempenham as funções básicas da mão e que são financeiramente acessíveis para pessoas que os necessitam.

Existem plataformas *open source* que disponibilizam modelos protéticos prontos para impressão e personalização, como o InMoov (INMOOV, 2012) e o Hackberry (EXIII, 2015), permitindo que pesquisadores, profissionais e entusiastas desenvolvam. Esses modelos podem ser fabricados com diferentes tipos de materiais utilizados na impressão 3D, como PLA, ABS e PETG, viabilizando economicamente a produção do produto.

Acerca desses insumos, o ácido polilático (PLA) é o filamento mais comum. Trata-se de um poliéster biodegradável, compostável, reciclável, caracterizado pelo seu valor acessível, fácil impressão, permitindo uma produção mais rápida e bom acabamento para as peças (Junior; Mello; Imenes, 2016). Por outro lado, a acrilonitrila butadieno estireno (ABS) apresenta resistência mecânica e térmica superiores ao PLA. Entretanto, esse filamento apresenta uma contração térmica considerável durante o resfriamento, de modo que, para a impressão, é necessário uma impressora com laterais fechadas para garantir o controle da temperatura interna (Romero, 2020). Por fim, o tereftalato de polietileno glicol (PETG) é um filamento também de baixo custo, com resistência superior à do PLA nos aspectos: mecânico, químico e térmico. Usa-se o PETG na construção de

peças mecânicas, pois possui maior resistência e maior facilidade de impressão ao ser comparado com o ABS (Romero, 2020).

Atualmente, existem diversas próteses no mercado que utilizam diferentes tipos de sensores. No entanto, o protótipo desenvolvido neste projeto incorpora um sistema desensoriamento tátil baseado em sensores magnéticos de efeito Hall. Esses sensores operam com base na detecção de campos magnéticos gerados por ímãs, dessa forma, quando um ímã se aproxima do sensor, resulta-se em uma variação na tensão de saída. Essa variação pode ser utilizada para identificar a proximidade ou a pressão aplicada em determinadas regiões, funcionando como um mecanismo de detecção de toque ou força (JUNIOR et al, 2020; INMOOV, 2012). A sensibilidade e a resposta rápida desse tipo de sensor o tornam uma alternativa financeiramente acessível com desempenho adequado para aplicações em próteses que buscam incorporar algum nível de retorno sensorial ou controle baseado na interação com o meio.

A bibliografia foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, especialmente o material disponibilizado pelo projeto InMoov, que oferece um passo a passo detalhado para a construção (INMOOV, 2012). O protótipo desenvolvido é voltado para amputações do metacarpo, ou seja, aquelas que ocorrem na mão, embora também possa ser adaptado para amputação transradial. Diferentemente de muitas próteses que posicionam os atuadores no antebraço, assim como o material proposto pelo InMoov, este modelo, em particular, posiciona os atuadores no dorso da mão robótica.

O principal objetivo deste estudo, portanto, é desenvolver um protótipo de prótese de mão capaz de fornecer sensação tátil por meio de retorno háptico, contribuindo para o avanço das pesquisas na área. Além disso, o trabalho visa analisar o desempenho do sistema de sensoriamento tátil implementado, bem como avaliar a amplitude de movimento do modelo impresso.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Em primeira instância, o *design* do protótipo da prótese foi obtido por meio da plataforma *open source* InMoov, sendo o *Hand i2* (INMOOV, 2025) como referência inicial. Todas as peças da mão, antebraço, punho e moldes dos dedos foram impressas com PLA, enquanto as pontas dos dedos foram confeccionadas em borracha de silicone. Contudo, este projeto apresenta diferenças estruturais e funcionais relevantes em relação ao modelo original, quanto aos atuadores e montagem.

Para os atuadores, este trabalho fez uso de servomotores do modelo MG996R de 180°. Ele apresenta engrenagens metálicas, garantindo uma resistência mecânica adequada para aplicações que exigem força moderada. Segundo o

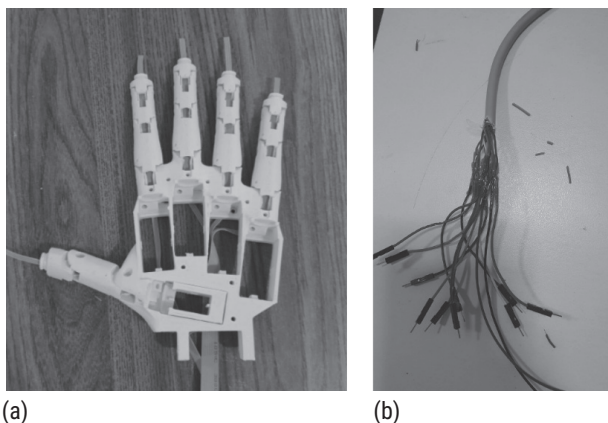
datasheet da Tower Pro (s.d), este modelo fornece um torque de até 9,4 kgf-cm operando a 4,8 V e 11 kgf-cm a 6 V, o que o torna apropriado para acionar os dedos da prótese. Dessa forma, foram utilizados cinco servomotores, um para cada dedo da prótese, fixados no dorso da mão, dispensando a necessidade de suportes adicionais.

O modelo proposto pelo InMoov sugere o posicionamento dos servomotores no antebraço, em vez do dorso da mão. Caso se opte por instalá-los no dorso, o próprio tutorial propõe a impressão de um suporte adicional para acomodar servomotores menores, do modelo MG90S. No entanto, o modelo desenvolvido neste trabalho diverge dessa abordagem: os atuadores maiores foram posicionados diretamente no dorso da mão robótica, sem a necessidade de suportes adicionais. Assim, a montagem do protótipo foi realizada em três etapas principais: instalação da fiação para conexão dos sensores, simulação dos tendões nos dedos e fixação dos sensores táteis.

A conexão dos sensores táteis foi realizada utilizando um cabo flat de 10 vias, o qual foi segmentado para permitir as ligações individuais dos terminais terra (também conhecido pela sigla GND, que se refere ao termo em inglês: *Ground*), saída (denominado em inglês por OUTPUT) e tensão de alimentação (conhecido por VCC, do inglês *Voltage Common Collector*) de cada sensor de efeito Hall, conforme ilustrado na Figura 1(a).

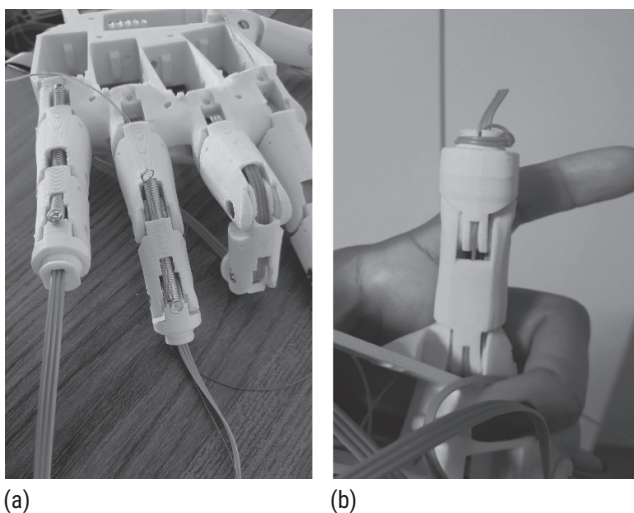
Adicionalmente, a interligação entre os demais componentes do protótipo, incluindo atuadores e sensores, com o microcontrolador foi feita por meio de um cabo manga blindado de 12 vias, presente na Figura 1(b). Esse tipo de cabeamento foi escolhido por sua capacidade de minimizar interferências eletromagnéticas, assegurando a estabilidade elétrica e menor ruído na transmissão dos sinais.

Figura 01 - Cabo flat acoplado no protótipo (a); Junção de todos os fios do sistema através do cabo manga (b).



Para a simulação dos tendões dos dedos foram utilizadas molas e linhas. As cinco molas, com dimensões de 4,5 x 44,5 mm, auxiliam na movimentação dos dedos e garantem o retorno à posição original após qualquer movimento, ilustrada na Figura 2(a). Para a tração, foi utilizada uma linha de polietileno, conhecida como linha de pedreiro, escolhida por sua alta resistência mecânica e durabilidade, presente na Figura 2(b). Essa linha foi acoplada entre os servomotores e as falanges dos dedos, transmitindo o movimento gerado pelos servomotores.

Figura 02 - Molas utilizadas (a); Linha de polietileno para a tração (b).



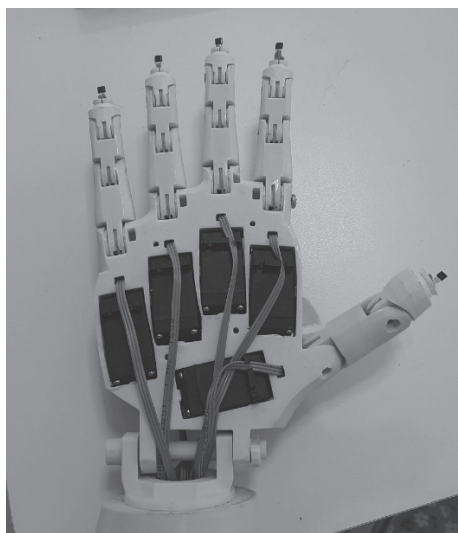
Para o sensoramento tátil, como apresentado na Figura 3(a), foram utilizados cinco sensores magnéticos de efeito Hall do modelo AH3503, instalados nas extremidades dos dedos do protótipo. Esses sensores foram escolhidos por apresentarem baixo custo e fácil integração com microcontroladores.

As pontas dos dedos foram confeccionadas em uma borracha de silicone diferente da sugerida pelo projeto InMoov, embora tenham sido utilizados os moldes originais impressos em 3D também em PLA no formato das falanges distais, disponibilizados pela própria plataforma. A mistura para a confecção foi preparada utilizando borracha de silicone e 40 gotas de catalisador. Em seguida, o material foi vertido nos moldes e deixado em repouso à temperatura ambiente por cerca de 24 horas até ficar pronto. Após esse período, as pontas de silicone foram removidas dos moldes e, com o auxílio de uma retífica, foi realizado um pequeno furo central em cada uma delas para o encaixe externo dos ímãs. Por fim, as pontas de silicone foram fixadas nos dedos da prótese.

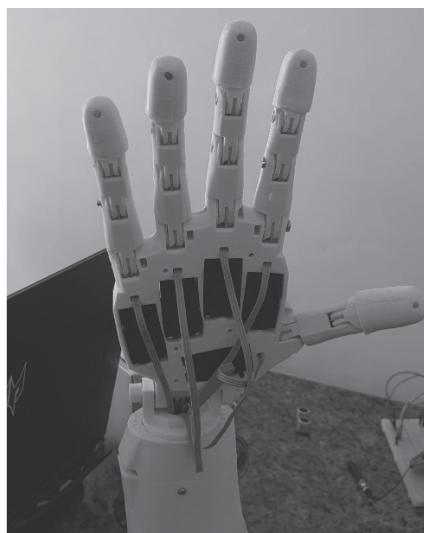
Pequenos ímãs cilíndricos de neodímio (3 mm × 2 mm) foram inseridos manualmente nos furos realizados nas pontas de silicone, posicionados de forma alinhada com os sensores de efeito Hall instalados na estrutura rígida dos dedos, ilustrado na Figura 3(b). Essa configuração garante que, ao pressionar qualquer dedo, o ímã se aproxima do sensor, gerando uma variação no campo magnético detectável.

Dessa forma, essa variação de campo é convertida em um sinal analógico, que é enviado à placa Arduino Uno, a qual realiza a leitura por meio de seus pinos de entrada analógica. A interpretação dos dados é feita por meio do Ambiente de Desenvolvimento Integrado Arduino (IDE Arduino), utilizando a ferramenta *Serial Plotter*, que permite a visualização em tempo real da resposta tátil. Assim, o sistema é capaz de identificar o momento do toque e fornecer um *feedback* tátil.

Figura 03 - Sensores magnéticos de efeito Hall AH3503 acoplados (a); ímãs acoplados nas pontas dos dedos de silicone (b).



(a)



(b)

Para a configuração dos movimentos, utilizou-se também o Arduino Uno, para controlar os servomotores. O Arduino envia sinais elétricos por meio de uma técnica chamada PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*, ou modulação por largura de pulso), que permite determinar a posição angular do eixo do servomotor. A variação da largura desses pulsos define o ângulo em que o motor deve alcançar, possibilitando movimentos controlados, como girar para a direita, para a esquerda ou permanecer em uma posição específica. Desse modo, o movimento de rotação

dos servomotores puxa a linha de polietileno, que consequentemente comprime a mola, permitindo a flexão do dedo.

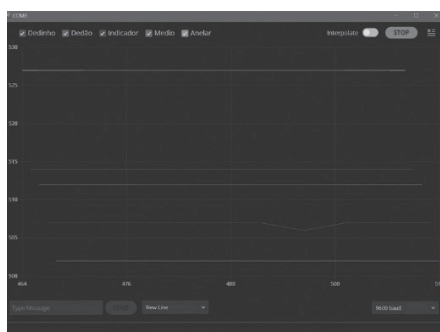
Considerando a complexidade envolvida na construção do protótipo, foi elaborado um tutorial (MEDIUM, 2024) que descreve, de forma detalhada, todas as etapas de montagem, conexão dos componentes e configuração do sistema.

3. RESULTADOS

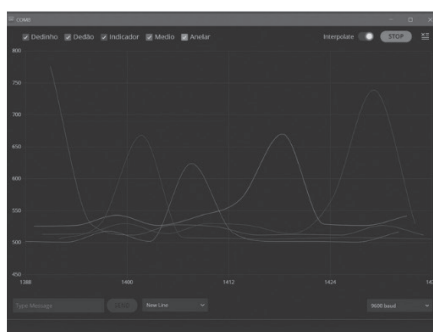
Os testes realizados demonstraram movimentos funcionais e independentes de cada dedo da prótese. Os sensores magnéticos de efeito Hall foram capazes de fornecer *feedback* tátil a partir do toque, com os sinais sendo analisados em tempo real por meio da ferramenta *Serial Plotter* do Ambiente de Desenvolvimento Integrado Arduino (IDEArduino).

Durante os testes, os dedos foram observados inicialmente em repouso, presente na Figura 4(a) e, em seguida, pressionados fisicamente, um a um, para verificar a resposta dos sensores, conforme ilustrado na Figura 4(b). Adicionalmente, também foi testada a aproximação de um ímã maior externo aos sensores, com o objetivo de validar a detecção do campo magnético de forma controlada e perceber a variação do campo, obtendo o mesmo resultado satisfatório. Para complementar a análise, foi montado um circuito simples com LEDs que acendiam sempre que o ímã era pressionado contra o dedo, evidenciando a funcionalidade do sistema de detecção tátil.

Figura 04 - Repouso, sem pressionar os dedos (a); Retorno háptico por meio do pressionamento dos dedos (b).



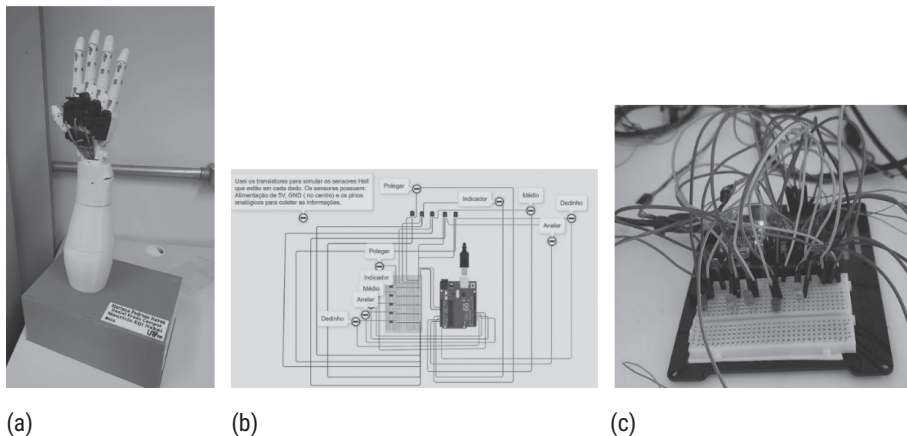
(a)



(b)

A Figura 5(a) apresenta o protótipo completo; a Figura 5(b), o circuito simulado referente ao funcionamento dos sensores; e a Figura 5(c), o circuito físico implementado. Além disso, o tempo de impressão no processo de fabricação de todas as peças em PLA levou mais de 70 horas.

Figura 05- Protótipo completo (a); Circuito simulado (b); Circuito físico implementado (c).



Importante a ressalva de que o tutorial do projeto InMoov sugere a inserção do ímã diretamente na parte interna da ponta dos dedos, incorporado ao molde de silicone. Esse experimento foi realizado, porém observou-se que a distância entre o ímã interno e o sensor de efeito Hall era muito pequena, resultando em quase nenhuma variação no campo magnético detectado. Essa baixa amplitude do sinal impediu uma resposta sensorial satisfatória.

Diante disso, optou-se por posicionar os ímãs externamente às pontas dos dedos, alinhados com os sensores. Essa nova configuração aumentou a variação do campo magnético durante o toque, permitindo uma melhor captação, de modo a aprimorar o retorno háptico quando os dedos são pressionados.

Apesar dos resultados satisfatórios, o protótipo apresentou limitações em relação à apreensão de objetos, especialmente aqueles com formato cilíndrico e circular, não conseguindo segurá-los. Além disso, o silicone utilizado nas pontas dos dedos mostrou-se excessivamente maleável, o que comprometeria a firmeza necessária para a resposta tátil se caso o protótipo segurasse algo.

Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de um tipo de silicone com maior rigidez, que mantenha a sensibilidade ao toque. Também sugere-se a remodelagem do protótipo, com o reposicionamento do polegar de forma mais anatômica, de modo a melhorar o agarre e permitir apreensões mais funcionais.

Outras melhorias incluem a implementação de algoritmos de calibração automática para adaptar o sistema às variações de força entre diferentes usuários. Além disso, a integração com algoritmos de aprendizado de máquina pode permitir o reconhecimento de padrões de toque juntamente com a integração de sinais mioelétricos (EMG) que podem ampliar as funcionalidades da prótese em aplicações de uso diário.

4. DISCUSSÃO

O modelo proposto, Hand i2 (INMOOV, 2025), de fato não apresenta características anatômicas, apresentando limitações de movimento, especialmente no polegar, o que compromete a preensão de certos objetos. No entanto, a escolha por esse modelo se deu por sua ampla documentação *open-source*, incluindo tutoriais detalhados, arquivos prontos para impressão 3D e uma comunidade ativa, o que facilitou a montagem e a replicação do projeto.

Apesar dessas restrições estruturais, o modelo permitiu a análise prática da integração entre sensores táteis de efeito Hall e atuadores, possibilitando a investigação da funcionalidade e sensibilidade do sistema de forma experimental. Assim, apesar de suas limitações, o Hand i2 representou uma excelente base para estudo e identificação de melhorias para versões futuras mais próximas da anatomia real.

Outro aspecto relevante diz respeito à escolha dos atuadores MG996R, que possuem rotação limitada a 180°. Para permitir o fechamento completo da mão e melhorar a preensão de alguns objetos, seriam mais apropriados servomotores com rotação de 360°. Em síntese, a limitação angular dos atuadores utilizados também comprometeu o desempenho do protótipo impossibilitando o fechamento completo dos dedos.

Inicialmente, foi considerado o uso dos motores MG90S, menores e recomendados no tutorial original do InMoov. No entanto, durante os testes, verificou-se que esses motores não forneciam torque suficiente para movimentar os dedos do protótipo. Ao tracionar os tendões artificiais, os MG90S eram excessivamente forçados, o que poderia levar à queima dos motores. Além disso, sua utilização exigia suportes adicionais para acoplá-los no protótipo. Diante disso, optou-se pelos motores MG996R, que dispensaram essas modificações e apresentaram melhor desempenho, apesar da limitação angular de 180° mencionada anteriormente.

Em relação à coleta de dados, foram identificadas pequenas imprecisões na resposta dos sensores de efeito Hall, com atrasos no retorno háptico. Esses atrasos podem ter sido causados por interferências na fiação, nas conexões por solda ou na instabilidade do circuito montado. Para futuras implementações, recomenda-se o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (conhecida por PCB, do inglês *Printed Circuit Board*), a fim de garantir maior estabilidade elétrica e precisão na leitura dos sinais. Além disso, a substituição da placa de desenvolvimento Arduino pelo ESP32 pode contribuir para a redução da latência e o aprimoramento geral da resposta do sistema.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs e desenvolveu um protótipo de prótese de mão baseado em impressão 3D, controlado por um microcontrolador Arduino Uno, alimentado por uma fonte externa de 200 W com saída de 5 V/17 A. O sistema permitiu a flexão simultânea dos dedos, com cinco graus de liberdade e um ângulo de movimentação limitado a 180°, determinado pelos servomotores MG996R.

Embora o sistema tenha apresentado retorno háptico ao toque, por meio de sensores de efeito Hall, houve desafios, como a pequena distância entre o ímã e o silicone incorporados aos dedos, além de possíveis interferências estruturais. A limitação dos motores de angulação de 180° também impediu o fechamento completo da mão, dificultando a validação da preensão de objetos em situações cotidianas.

Apesar dessas limitações, o projeto contribui significativamente para a democratização da tecnologia assistiva, ao adotar uma abordagem de código aberto e fabricação acessível por impressão 3D, pois se alinha a iniciativas, como o projeto InMoov, no desenvolvimento de soluções acessíveis e personalizáveis na área de engenharia biomédica.

Para estudos futuros, recomenda-se a reformulação do protótipo de modo a possibilitar a apreensão de objetos, permitindo validar seu desempenho funcional esensorial em contextos reais. Além disso, sugere-se a substituição dos servomotores por modelos com rotação de 360°, o que permitiria uma melhor amplitude nos movimentos. Propõe-se também a integração de sinais mioelétricos (EMG) como forma de controle sensorial, ampliando a funcionalidade, a naturalidade dos movimentos e a resposta adaptativa da prótese. Recomenda-se também o desenvolvimento de algoritmos de calibração e o uso de técnicas de aprendizado de máquina para o reconhecimento de padrões de toque, tornando o sistema mais responsivo. Tais aprimoramentos têm o potencial de elevar o protótipo a um novo patamar de aplicabilidade prática e usabilidade clínica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à instituição de ensino superior pela oportunidade de realizar este projeto em uma Iniciação Científica interdisciplinar, assim como ao orientador pelo apoio e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho, pois sem ele esse projeto não existiria.

REFERÊNCIAS

EXIII. *HACKberry*. 2015. Disponível em: <http://exiii-hackberry.com/>. Acesso em: 08 de jun. 2025.

FAVERO, R. *Pacientes não têm garantia de acesso a próteses, órteses e outros equipamentos por meio do SUS em 2023*. 2023. Site Gaúcha Zero Hora (GZH). Disponível em: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/>. Acesso em: 11 mar. 2025.

INMOOV. *Open Source 3D Printed Life Size Robot*. 2012. Disponível em: <https://inmoov.fr/>. Acesso em: 08 de jun. 2025.

JORGE, A. R. F. *Dados Epidemiológicos Nacionais de Amputação e Proposta de Dispositivo para Treinamento de Usuários de Próteses de Membro Superior*. 2020. 84 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia, 2020.

JUNIOR, E. A.; MELLO, G. A. F. de; IMENES, M. P. *Prótese Mioelétrica para membro superior*. 2016. 100 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade São Francisco (UFS), Campinas, 2016.

MEDIUM. *TUTORIAL: Desenvolvimento de um protótipo de uma prótese de uma mão mecânica/robótica*. Disponível em: <https://medium.com/@mari.pedroso/prot%C3%B3tipo-desenvolvimento-de-um-prot%C3%B3tipo-de-uma-pr%C3%B3tese-de-uma-m%C3%A3o-mec%C3%A2nica-rob%C3%B3tica-tutorial-781fd3b58eee>. Acesso em: 11 mar. 2025

PILLET, J.; DIDIERJEAN-PILLET, A. *Aesthetic hand prosthesis: gadget or therapy presentation of a new classification*. Journal of Hand Surgery-American Volume, 2001. p. 523-528. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:7251693>. Acesso em: 10 mar. 2025.

ROMERO, R. C. *Desenvolvimento de prótese passiva para mão humana com sistema mecânico para restaurar movimento dos dedos*. 2020. 155 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Minas Gerais, 2020. SEREN, Renata; DE TILIO, Rafael. *As vivências do luto e seus estágios em pessoas amputadas*. Revista da SPAGESP, v. 15, 2014, p. 64-78. Acesso em: 11 mar. 2025.

TOWER PRO. *MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo*. Datasheet, [s.d]. Disponível em: https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf.