

Desenvolvimento de sistema de atuação de luva robótica pneumática para fins de reabilitação de pacientes pós-AVC

Melo, Gabriel Merlini de^{*1}; Itturriet, Fábio Pires²; Inafuco, Augusto Tetsuo Prado³; Machoski, Pablo⁴; Mendes Junior, José Jair Alves¹

1 – Departamento de Eletrônica UTFPR, gabmel@alunos.utfpr.edu.br; jjjunior@utfpr.edu.br

2 – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, UTFPR, fabioitturriet@utfpr.edu.br

3 – Departamento de Eletrônica, UTFPR, inafuco@alunos.utfpr.edu.br

4 – Departamento de Eletrônica, UTFPR, pabломachoski@alunos.utfpr.edu.br

* -Correspondência: Av. Sete de Setembro, 3165 - Rebouças, Curitiba - PR, 80230-901.

DOI 10.52050/9788579177149-05

RESUMO

Recentemente, a utilização de luvas robóticas vestíveis tem se mostrado promissora no tratamento de sobreviventes de acidentes vasculares cerebrais (AVCs). Este trabalho descreve o desenvolvimento de um *hardware* de controle para uma luva robótica baseada em atuadores e músculos pneumáticos. O projeto utilizou a luva robô de reabilitação RRG-100, da fabricante Havicten, preservando sua estrutura mecânica e modificando apenas os seus aspectos eletrônicos e de programação. O circuito desenvolvido permite o controle individual ou simultâneo de dedos, possibilitando o fechamento da mão do usuário. Assim, este projeto oferece uma abordagem inovadora que amplia as possibilidades de tratamento na reabilitação pós-AVC.

Palavras-chave: Luva robótica, pneumático, AVC.

ABSTRACT

Recently, the use of wearable robotic gloves has shown promise in the treatment of survivors of stroke (AVC). This work describes the development of a control hardware for a robotic glove based on actuators and pneumatic muscles. The project utilized the RRG-100 rehabilitation robotic glove from the manufacturer Havicten, preserving its mechanical structure while only modifying its electronic and programming aspects. The developed circuit allows for individual or simultaneous control of the fingers, enabling the closure of the user's hand. Thus,

this project offers an innovative approach that expands the treatment possibilities in post-stroke rehabilitation.

Keywords: Robotic glove, pneumatic, stroke.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a incidência de doenças cardiovasculares acomete uma parcela significativa da população, podendo-se citar entre eles, o Acidente Vascular Cerebral (AVC). Em 2013, cerca de 2231 brasileiros haviam sofrido AVC, sendo que 568 desses possuíam deficiências severas associadas à doença (BENSENOR et al., 2015). A forte relação entre doenças cardiovasculares e deficiências motoras também é percebida no restante do globo. Em 2022, os AVCs foram a terceira maior causa de morte e deficiência combinadas (FEIGIN et al., 2022).

Nesse contexto, o tratamento de quadros clínicos pós-AVC, bem como o desenvolvimento de dispositivos para reabilitação, ganha relevância. Usualmente, esse primeiro processo se dá por meio de sessões terapêuticas voltadas a exercícios repetitivos e a tarefas específicas, demonstrando resultados positivos (FARDIPOUR; HADADI, 2022). Para aprimorar o desempenho da terapia, tem-se aplicado o uso de dispositivos robóticos acessórios, fator que revelou vantagens significativas em relação à abordagem convencional (FARDIPOUR; HADADI, 2022). Dentre esses equipamentos, uma categoria que vem ganhando espaço é a de luvas robóticas vestíveis (KO et al., 2023).

Existem atualmente diversos modelos de luvas robóticas vestíveis disponíveis no mercado. Dentre eles, há variações nas formas de geração de movimento, transmissão de força e controle. As luvas PneuGlove e XGlove, por exemplo, possuem, respectivamente, atuação pneumática e por servomotores (FARDIPOUR; HADADI, 2022). Já a CyberGlove III tem sua resposta baseada em sensores resistivos, enquanto a KeyGlove, em acelerômetros (CAEIRO-RODRÍGUES et al., 2021). Em uma perspectiva geral no contexto de reabilitação, os motores apresentam-se como método gerador mais recorrente, sendo seguidos pelos atuadores pneumáticos (LIU et al., 2022). Já com relação aos meios de propagação, a frequência mais percebida segue a ordem decrescente de mecanismos de barras, tendões artificiais e músculos pneumáticos (LIU et al., 2022). Por fim, os métodos de controle mais aplicados se dão na ordem decrescente de programação pré-definida, resposta à aplicação de força e sinais de eletromiografia (LIU et al., 2022).

As vantagens associadas aos diferentes constituintes dos dispositivos variam e possuem aplicações em cenários distintos. No entanto, fazendo-se uma análise geral, as luvas baseadas em atuadores pneumáticos revelam maior número de benefícios quando comparadas às outras (LIU et al., 2022). Alguns desses fatores

estão associados à facilidade de produção e de uso desses equipamentos, promovendo maior acessibilidade ao público em geral.

Dessa forma, a relevância nacional do tratamento de quadros clínicos pós-AVC e a aplicação de luvas robóticas vestíveis no processo de reabilitação motivaram o desenvolvimento de um *hardware* de controle de uma luva baseada em atuadores e músculos pneumáticos. A escolha por métodos de geração e de propagação de força por meio de ar comprimido se deu com base nas vantagens oferecidas, que promovem a facilidade de seu desenvolvimento em ambiente acadêmico.

Nesse cenário, este projeto visa desenvolver o *hardware* de controle para uma luva robótica pneumática. O equipamento utilizado para o trabalho é a luva robô de reabilitação modelo RRG-100 da fabricante Havicten (HAVICTEN, 2023). A sua parte mecânica foi conservada, tendo sido alterados apenas os aspectos eletrônicos e de programação. Desse modo, foi elaborado um circuito capaz de controlar os movimentos da luva, com os dedos atuando independentemente ou em conjunto.

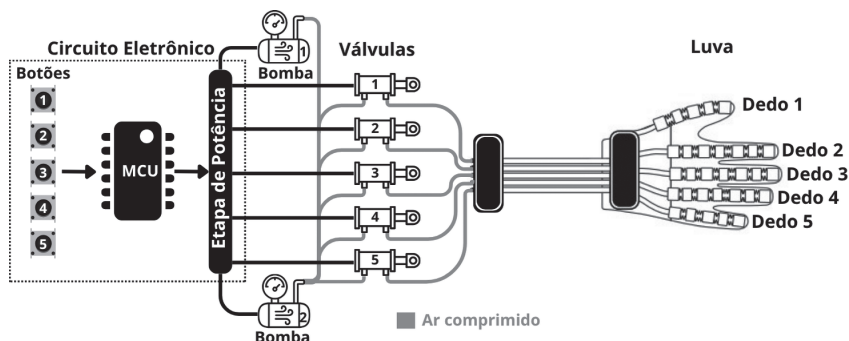
Uma das contribuições deste trabalho é a apresentação de uma proposta de hardware de funcionamento para essas luvas robóticas, as quais são enquadradas na categoria de órteses. Com elas, o usuário não precisa ficar atrelado a apenas um sistema de controle (que é fornecido pelo fabricante do dispositivo), possibilitando a criação de rotinas mais robustas e diferenciadas para o processo de reabilitação e permitindo a manutenção do equipamento, fator esse ausente na maior parte dos dispositivos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O circuito desenvolvido teve como critérios iniciais: a necessidade de fornecer 12 V aos atuadores pneumáticos e às válvulas pneumáticas, bem como 5 V para a alimentação do microcontrolador (em inglês, *microcontroller unit* (MCU)) utilizado; de permitir o movimento isolado de cada dedo, bem como o movimento conjunto de dois ou mais dedos e de possibilitar o controle da intensidade da força impressa pela luva.

Para tanto, desenvolveu-se um circuito, apresentado na Figura 1, que, ao ser conectado na fonte de alimentação, iniciaria a atuação das bombas. Essas estão conectadas às válvulas pneumáticas, que permitem ou não a passagem de ar para a luva em função do acionamento dos botões. Cada botão, os quais são da categoria *push buttons*, é responsável por controlar uma válvula, ao passo que cada válvula regula a passagem de ar para um dedo da mão, permitindo a operação individual desses.

Figura 1 - Diagrama ilustrativo da composição geral do sistema. À esquerda, está presente o circuito eletrônico que promove o controle da operação da luva e seus elementos. Ao centro, os componentes pneumáticos relacionados à impressão de força e consequente movimentação dos dedos. À direita, a luva pneumática.



Fonte: autoria própria.

Além disso, utilizou-se um circuito de disparo com base nos transistores TIP122. Essa configuração se dá a partir do acionamento do pino base do transistor por um sinal recebido pelo MCU, que regula a conexão entre a entrada de 12 V no coletor e a saída do emissor no plano de terra (do inglês, *ground* (GND)).

A entrada recebida do MCU é no formato de saída binária para as válvulas ou de modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation* (PWM)) de 10 Hz de frequência para as bombas. Esse último processo consiste em modular o comprimento de onda de um sinal, usualmente contínuo e de formato quadrado, a fim de alterar o valor médio equivalente. Dessa forma, é possível gerar, a partir de um sinal com valor máximo de 12 V, valores médios de 0 a 12 V em função da definição do ciclo de trabalho (do inglês, *duty cycle*).

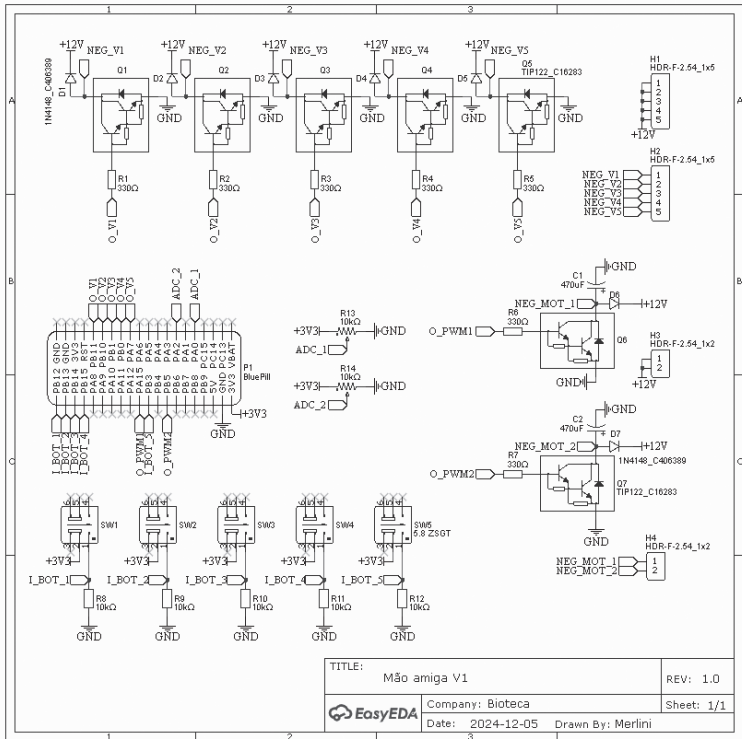
Esse controle variável na base do transistor é refletido em uma permissibilidade alterável entre os pinos coletor e emissor, provendo uma variação na força impressa pela luva. O *duty cycle* do PWM é coordenado pela leitura do sinal analógico associado à tensão incidente sobre potenciômetros, a qual variava conforme era alterada a sua resistência. Para possibilitar o seu uso no *duty cycle*, o sinal foi convertido em digital a partir do uso de conversores analógicos digitais (do inglês, *analog digital converters* (ADC)).

Para o controle das válvulas, realizou-se uma estrutura condicional a partir da recepção ou não de sinal de tensão em pinos específicos do MCU, que estava associada à emissão de saídas em outros pinos determinados. Essas saídas serviam como estímulo para a saturação dos transistores, que permitiam a chegada da tensão e da corrente adequadas ao funcionamento das válvulas.

Dessa forma, com base na necessidade de utilizar dois ADCs; produzir dois PWMs e realizar saídas diversas a partir de uma unidade controladora central, foi selecionado o microcontrolador STM32F103C8, o qual é programado em linguagem de programação C no ambiente de desenvolvimento STM32CubeIDE. A plataforma apresenta robustez nas possibilidades no sistema de uso e uma disposição intuitiva das configurações, simplificando a definição das funções e a programação dos MCUs da família STM32. Ainda, a fim de favorecer o desenvolvimento do projeto, foi utilizada a placa *bluepill*, que já possui o MCU acoplado e seus pinos conectáveis disponíveis nas laterais da placa.

Finalmente, após a realização de testes iniciais no circuito, percebeu-se que o sinal se comportava de forma muito fatiada, reduzindo o desempenho da luva. Portanto, foram realizados ajustes na tensão incidente sobre os atuadores pneumáticos utilizando-se capacitores de 470 μ F. Em seguida, foi desenvolvido o circuito do projeto, conforme apresentado na Figura 2, aprimorando o posicionamento dos componentes na plataforma EasyEDA.

Figura 2 - Esquemático do circuito no EasyEDA.



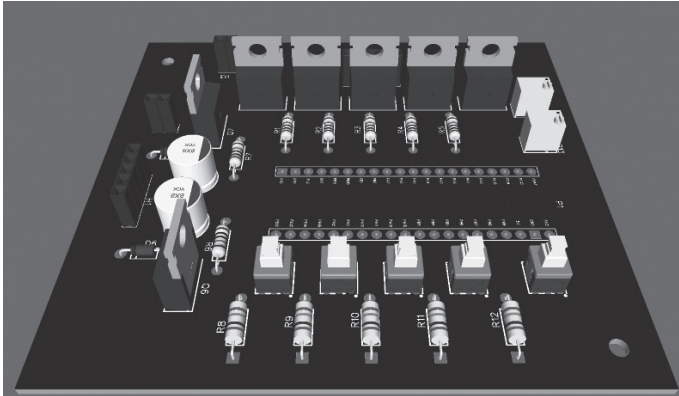
Fonte: autoria própria.

Para a garantia de que a corrente de base nos transistores não atingisse um valor muito elevado, foram utilizados resistores de 330 Ω . Já para assegurar a eficiência dos botões de controle dos dedos, aplicou-se resistores de 10 k Ω entre o componente e o GND. Além disso, utilizou-se diodos 1N4148 em paralelo às válvulas, atuando como diodos de roda livre a fim de evitar uma corrente de retorno em situações de desativação, a qual poderia resultar em danos no circuito.

Os transistores escolhidos foram do modelo TIP122 em razão da sua configuração interna *darlington* e da consequente capacidade de grande amplificação. Para os potenciômetros, por sua vez, determinou-se uma resistência de 10 k Ω em virtude do maior intervalo para variação de tensão. Os botões, por fim, não exigiram um modelo específico, desde que fossem da categoria *pushbuttons*, visando conservar o modo desejado para a luva sem requerer pressão contínua do usuário no dispositivo.

A partir do esquemático, foi desenvolvida a placa de circuito impresso (do inglês, *printed circuit board* (PCB)) na plataforma EasyEDA, definindo as regiões destinadas para cada grupo do circuito e permitindo uma visualização prévia de como seria o formato da placa real, conforme apresentado na Figura 3. A PCB caracterizou-se por possuir dimensões 96,34 x 85,34 mm; concentrar os botões de controle das válvulas na porção inferior, a fim de favorecer a ativação ou desativação; manter agrupados na porção lateral esquerda os componentes associados à operação das bombas; reunir os sistemas de disparo das válvulas na porção superior e os potenciômetros na porção lateral direita. A *bluepill* ficou posicionada no centro da placa, de forma a facilitar a criação das trilhas de conexão. Vale ressaltar que os potenciômetros foram substituídos por potenciômetros em miniatura ajustáveis (do inglês, *trimpots*) nessa etapa em virtude de promoverem a redução das dimensões utilizadas.

Figura 3 - Visualização 3D no EasyEDA da PCB do projeto.



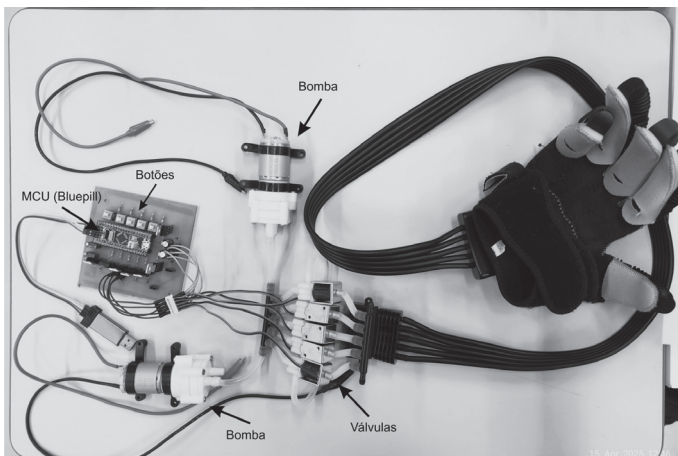
Fonte: autoria própria.

A PCB foi produzida em um dos laboratórios da UTFPR e testada em conexão com a luva para checar o seu desempenho.

3. RESULTADOS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um circuito para controle de uma luva robótica pneumática utilizada no tratamento pós-AVC de pessoas que sofreram perda ou redução de mobilidade. A Figura 4 revela a PCB conectada à luva para a dinâmica de funcionamento.

Figura 4 - Foto da PCB conectada à luva para a dinâmica de funcionamento.



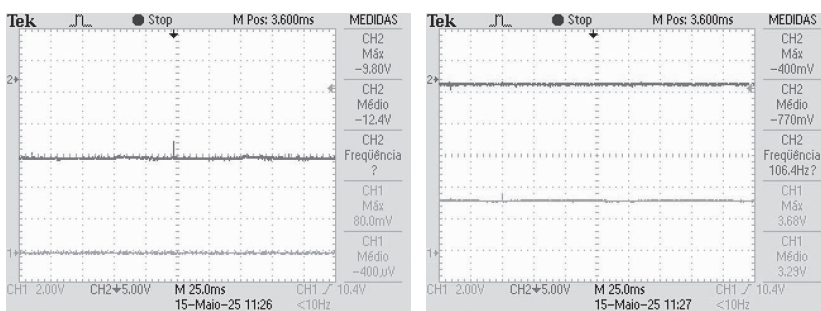
Fonte: autoria própria.

O circuito promoveu a aplicação de força por meio de pressão pneumática para o movimento de fechamento da mão quando acionados os botões e removendo o estímulo ao se desativar os botões. Cada dedo teve controle isolado, podendo atuar de forma independente dos outros.

A Figura 5 apresenta a relação entre as tensões no botão e na válvula associada a ele. Vale ressaltar que, em virtude do polo negativo do motor estar conectado ao coletor do transistor ao invés de ao GND, não foi possível fazer a aferição da tensão direta na válvula. Dessa forma, visando utilizar o GND como parâmetro comum para ambas as medições, foi conectado o polo negativo dos canais ao GND, o polo positivo do canal um ao botão e o polo positivo do canal dois ao coletor do transistor associado à válvula em questão. Com isso, mediu-se as tensões sobre o botão e sobre o transistor, de modo que o valor apresentado no canal dois equivale à diferença entre a alimentação (12 V) e o consumo da válvula.

Assim, percebe-se que, na primeira imagem, a tensão está toda concentrada no transistor, enquanto que, após a ativação do botão, a tensão no TIP122 vai à aproximadamente zero, revelando que o valor restante da diferença em relação aos 12 V está sobre a válvula.

Figura 5 - Medidas do osciloscópio a fim de revelar a relação entre a ativação dos botões e das válvulas. Em ambas as medições o botão foi conectado ao canal um e o transistor associado à válvula, ao canal dois. À esquerda é apresentada a situação em que o botão está desativado. À direita, a situação em que o botão está ativado.

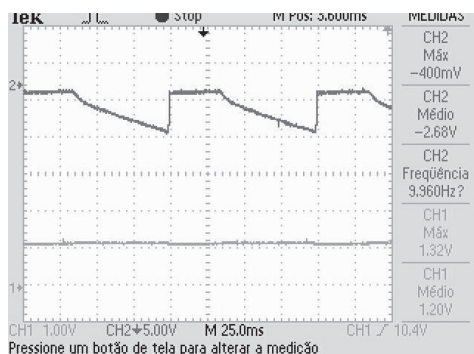


Fonte: autoria própria.

Além disso, a intensidade de força impressa pode ser regulada pelo PWM a partir da variação da resistência nos *trimpots*. A relação entre a tensão no *trimpot* e o *duty cycle* do PWM é evidenciada na Figura 6. Houve, para possibilitar a medição simultânea, a mesma adaptação realizada nas aferições dos botões, com a diferença de que o polo positivo do canal um foi conectado ao pino intermediário do *trimpot* e o positivo do canal dois, ao transistor associado à bomba pneumática em questão. Desse modo, a tensão apresentada no canal dois revela a diferença

entre a alimentação (12 V) e a tensão incidente no atuador pneumático, de forma que foi possível demonstrar a tensão sobre a bomba ao se inverter a forma de onda obtida. A curva exponencial presente entre os ciclos é decorrente da atuação do capacitor.

Figura 6 - Medidas do osciloscópio a fim de revelar a relação entre a tensão incidente sobre o *trimpot* e o *duty cycle* do PWM. O *trimpot* foi conectado ao canal um e o transistor associado à bomba, o canal dois.



Fonte: autoria própria.

Por fim, gravou-se um breve vídeo¹ exemplificando o funcionamento quando conectado à alimentação e à luva pneumática.

4. DISCUSSÃO

O circuito apresentou o funcionamento esperado, promovendo o fechamento da luva e possibilitando o seu uso para a reabilitação de pessoas que perderam ou tiveram redução da mobilidade das mãos em decorrência de AVC.

No entanto, há restrições na estrutura eletrônica que dificultam a acessibilidade do projeto ao público em geral. A necessidade de utilizar duas fontes distintas de 12 e de 3,3 V, bem como de realizar muitas voltas nos *trimpots* para obter uma variação relevante na força impressa pela luva torna disfuncional o uso do equipamento em ambientes que não possuam estrutura específica.

Em relação aos produtos existentes na área, este estudo desenvolveu um circuito que permite uma forma de geração de força e de transmissão de movimento comumente utilizada, tal qual na luva PneuGlove (FARDIPOUR; HADADI, 2022), com a diferença de que o controle é realizado a partir do uso de PWM definido pela tensão dos *trimpots*, algo não encontrado nos estudos vigentes.

Além disso, um diferencial do projeto associa-se à apresentação detalhada do esquemático eletrônico utilizado para o funcionamento da luva, algo que não é encontrado nos estudos vigentes. Esses enfatizam a aplicabilidade das luvas, tais quais as pesquisas desenvolvidas por CHENG, N. et al. 2020 e ULLAH, M. M. et al. 2019, ou seus aspectos gerais de disponibilidade e estrutura, como as revisões de CAEIRO-RODRÍGUEZ, M. et al., 2021 e LIU, Chang et al., 2022.

5. CONCLUSÕES

Considerando-se os objetivos iniciais de desenvolver o *hardware* de controle para uma luva robótica pneumática a fim de auxiliar nos tratamentos pós-AVC e os resultados de funcionamento obtidos, pode-se afirmar que o trabalho desenvolvido foi satisfatório.

A capacidade de produzir força para o fechamento da mão do usuário, seja de forma completa ou para dedos individuais, com a possibilidade de controlar a intensidade da pressão pneumática imposta via PWM, permitem o uso do dispositivo para um grande espectro de pacientes, adequando a terapia às demandas específicas e contribuindo para as possibilidades de tratamentos pós-AVC.

Entretanto, problemas como a necessidade de fontes distintas de tensão e de realização de muitas voltas nos *trimpots* para alterar os valores do PWM estão presentes no hardware desenvolvido. Ademais, percebeu-se uma ligeira limitação na tensão máxima atingida pela bomba ao ser ativada, ocorrência que pode ser associada ao processo de carga dos capacitores acoplados. Ainda, a capacidade de efetuar força apenas para o fechamento da luva limita o escopo de atuação provido pelo circuito.

Dessa forma, trabalhos futuros podem explorar a aplicação de um regulador *step down* para tornar possível o uso de apenas uma fonte de tensão; a associação da pressão imposta na luva à leitura de sensores capazes de captar variações angulares, como acelerômetros, dispensando os *trimpots*; a exclusão dos capacitores, seguida da elevação da frequência do PWM para um valor superior a 10 Hz; a possibilidade de realizar força para os movimentos de abertura e de fechamento da mão ao invés de apenas o último e o uso direto do MCU ao invés da placa *bluepill* para reduzir o espaço necessário para a placa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) que, via o laboratório de Engenharia Biomédica Bioteca, tornou possível a elaboração desse

trabalho. Agradeço a todos os integrantes do laboratório que participaram do desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BENSENOR, Isabela M. et al. Prevalence of stroke and associated disability in Brazil: National Health Survey - 2013. *Arquivos de Neuro-Psiquiatria*, v. 73, n. 9, p. 746–750, set. 2015. ISSN 0004-282X. DOI: 10.1590/0004-282X20150115. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-282X2015000900746&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 26 mar. 2025.

CAEIRO-RODRÍGUEZ, M. et al. A Systematic Review of Commercial Smart Gloves: Current Status and Applications. *Sensors*, v. 21, n. 8, p. 2667, 10 abr. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2667>>. Acesso em: 1 nov. 2024 .

CHENG, N. et al. Brain-Computer Interface-Based Soft Robotic Glove Rehabilitation for Stroke. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, v. 67, n. 12, p. 3339–3351, dez. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9055030>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

FARDIPOUR, Shima; HADADI, Mohammad. Investigation of therapeutic effects of wearable robotic gloves on improving hand function in stroke patients: A systematic review. *Current Journal of Neurology*, v. 21, n. 2, p. 125–132, abr. 2022. ISSN 2717-011X. DOI: 10.18502/cjn.v21i2.10496. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9860207/>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

FEIGIN, Valery L et al. World Stroke Organization (WSO): Global Stroke Fact Sheet 2022. *International Journal of Stroke*, v. 17, n. 1, p. 18–29, jan. 2022. ISSN 1747-4930, 1747-4949. DOI: 10.1177/17474930211065917. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/17474930211065917>>. Acesso em: 26 mar. 2025.

HAVICTEN. Rehabilitation robot glove. 2023. Disponível em: <<https://m.media-amazon.com/images/I/C1t1sYuZ1rL.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2025.

KO, Ming-Jian et al. The Application of Soft Robotic Gloves in Stroke Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Brain Sciences*, v. 13, n. 6, p. 900, jun. 2023. Number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2076-3425. DOI: 10.3390/brainsci13060900. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3425/13/6/900>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

LIU, Chang et al. Current State of Robotics in Hand Rehabilitation after Stroke: A Systematic Review. *Applied Sciences*, v. 12, n. 9, p. 4540, jan. 2022. Number: 9 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. ISSN 2076-3417. DOI: 10.3390/app12094540. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/12/9/4540>>. Acesso em: 20 ago. 2024.

ULLAH, M. M. et al. A Soft Robotic Glove for Assistance and Rehabilitation of Stroke Affected Patients. 2019 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT). *Anais...* Em: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRONTIERS OF INFORMATION TECHNOLOGY (FIT). dez. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/ABSTRACT/document/8991624>>. Acesso em: 20 ago. 2024.