

SISTEMA DE MONITORAMENTO E REABILITAÇÃO MOTORA COM MÃO ROBÓTICA ASSISTIDA POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

MOTOR MONITORING AND REHABILITATION SYSTEM WITH A ROBOTIC HAND ASSISTED BY ARTIFICIAL INTELLIGENCE.

Bruno de Maria Serra¹
Enzo Dalla Pria²
Rodrigo Vilela da Rocha³

Resumo

Foi desenvolvida uma mão robótica de baixo custo capaz de mensurar a amplitude de movimento, junto a um sistema integrado que reconhecer movimentos humanos por rastreamento visual e assim reproduzi-los mecanicamente, com maior eficiência e simplicidade nas avaliações clínicas. É uma pesquisa aplicada, que utiliza webcam, Python (OpenCV, MediaPipe), identifica os pontos-chave da mão e calcula os ângulos articulares, dados processados e enviados ao Arduino, controla servomotores da estrutura impressa 3D. Testes mostraram estabilidade na reprodução dos movimentos pela mão robótica, permitiu identificar os graus de flexão e extensão dos dedos, e armazenar os dados evolutivo e auxiliar na de reabilitação motora pelo monitoramento da amplitude de movimento. Conclui-se que o sistema é acessível, e não invasiva para o monitoramento clínico e reabilitação motora.

Palavras-chave: Inteligência Artificial, Visão computacional, Reabilitação motora, Mão robótica e Impressão 3D.

Abstract

This work presents a low-cost robotic hand to measure range of motion. The objective was to create an integrated system to recognize human movements through visual tracking and reproduce them mechanically, aiming for efficiency and simplicity in clinical evaluations. This applied research uses a webcam and routines in *Python (OpenCV/MediaPipe)* to identify key points of the hand and calculate joint angles. The processed data are sent to an Arduino board for the proportional control of servomotors in a 3D printed structure. Experimental tests demonstrated stability in the automatic reproduction of movements, allowing the quantification of degrees of flexion and extension of the fingers, in addition to storing the patients' history. It is concluded that the system constitutes an affordable, non-invasive

^{1*} Aluno do curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, da Faculdade de Presidente Prudente. Email: brunoserra_99@hotmail.com

^{2**} Aluno do curso de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, da Faculdade de Presidente Prudente. Email: enzodalla2@gmail.com

^{3***} Breve currículo do orientador: Professor orientador Me. em Ciências da Computação, da Faculdade de Presidente Prudente. E-mail: rodrigo.rocha02@cps.sp.gov.br

alternative for clinical monitoring and motor rehabilitation.

Keywords: *Artificial Intelligence, Computer vision, Motor rehabilitation, Robotic hand, 3D printing.*

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia tem evoluído rapidamente nos últimos anos, trazendo benefícios para diversas áreas, especialmente para a Internet das Coisas (IoT), um termo que se refere a interconexão digital entre a internet e objetos cotidianos, produzindo uma interação contínua entre objetos automatizados. Sendo assim a IoT possibilita novas aplicações tanto acadêmicas, quanto em indústrias de pequeno porte, podendo beneficiar automações de ambiente ou áreas da saúde (SANTOS et al., 2016).

No contexto acadêmico esta área vem sendo usada de diversas maneiras aprimorando pesquisas, gestão de recursos, e inovando a educação. Trazendo o estudante o mais próximo do contato com a tecnologia. Segundo Silva, Lemos e Rufino (2020), essa tecnologia aproxima os estudantes da internet e potencializa seus estudos melhorando a experiência educacional.

E esse contexto vem impulsionando o desenvolvimento de sistemas automatizados, cada vez mais integrados com áreas como eletrônica, mecânica, computação entre outras. Um campo que vem se destacando muito é a área da robótica com aplicações que englobam áreas multidisciplinares e aplicações industriais, assistência pessoal e até mesmo na área médica.

A robótica é uma área que se beneficia de estudos interdisciplinares como engenharia, mecânica, elétrica e eletrônica, ciência da computação e ciências cognitivas da biologia entre outras (NIKU, 2013 apud MARTINS et al., 2024).

Entre os inúmeros dispositivos, as mãos robóticas representam um desafio para a engenharia, devido à complexidade estrutural e os movimentos precisos e coordenados que necessitam copiar a biomecânica humana. Realizando manipulações como pegar objetos com agilidade, firmeza, e amplitude sem deixar escapar e/ou esmagar, sendo o mais próximo da realidade (ROMANO et al., 2011 apud MARTINS et al., 2024).

Logo, neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de uma mão robótica e funcional com componentes acessíveis e tecnologia moderna como a impressão 3D, motores elétricos, e sistemas embarcados baseado em microcontroladores. A estrutura da mão foi fabricada, com a modelagem tridimensional, em um esqueleto leve e customizado de baixo custo.

Para o controle dos movimentos a interação entre protótipo 3D e motores, utiliza-se a

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

plataforma Arduino, que é amplamente reconhecida por sua simplicidade e flexibilidade, tendo uma grande comunidade e suporte. Por meio de código fonte em C e C++ e Python, serão fornecidos os comandos para atuação dos servos motores e a realização dos movimentos sendo responsável por abrir e fechar os dedos da mão.

Desta forma com a programação em sistemas embarcados, foi possível criar rotinas e controles eficientes e adaptáveis para as necessidades do sistema. Sendo um dos grandes diferenciais do projeto será a utilização de técnicas de visão computacional, que permitiu a integração junto a todos os componentes citados, assim aptos para a realização de movimentos acionados por comandos visuais, a partir de câmeras e algoritmos de processamento de imagens, sendo possível a identificação de gestos, objetos e/ou padrões, sendo traduzidos em comandos e a geração de movimentos que será replicada pelo protótipo.

Além da visão computacional, o sistema utiliza técnicas de inteligência artificial baseadas em aprendizado de máquina para reconhecimento dos movimentos da mão humana. Esses algoritmos permitiram identificar padrões visuais em tempo real por meio de modelos previamente treinados, possibilitando maior precisão na detecção e reprodução dos movimentos pela mão robótica.

O reconhecimento de padrões e a análise de movimento são áreas importantes da inteligência artificial aplicadas à visão computacional. Técnicas descritas por Lucas e Kanade (1981) permitem detectar movimentos e acompanhar objetos em tempo real, princípio semelhante ao utilizado no reconhecimento dos dedos da mão em sistemas robóticos controlados por câmera.

A interação entre o usuário e o sistema resultou em um dispositivo mais autônomo e inteligente, capaz de interpretar movimentos da mão humana em tempo real e reproduzi-los automaticamente por meio da integração entre visão computacional e robótica.

A solução desenvolvida consiste em, um sistema capaz de capturar os movimentos e pontos-chave da mão do usuário em tempo real utilizando uma câmera, que converter essas informações em comandos digitais via algoritmos e transmiti-las a uma plataforma Arduino para reproduzir os gestos na estrutura física de forma automatizada e com o mínimo atraso possível, permitindo ainda mensurar a amplitude dos movimentos para fins evolutivos da reabilitação motora.

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema integrado com um protótipo 3D de mão robótica, com finalidade acadêmica e experimental,

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

voltado ao estudo de sistemas embarcados, automação, visão computacional e reabilitação motora.

O projeto buscou promover a integração de algoritmos predefinidos e automação baseada em visão computacional em uma solução de baixo custo, tornando o sistema capaz de reconhecer os movimentos da mão humana, reproduzi-los de forma automática através de uma placa Arduino e mensurar a amplitude dos movimentos para fins evolutivos, com o armazenamento automático desses dados em arquivo de formato .csv.

Assim por meio das informações em movimentos detectados em tempo real são convertidos em comandos, permitindo o controle autônomo da mão robótica para a reprodução dos gestos com o mínimo atraso possível.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Biomecânica da mão humana

A mão humana é responsável por diversas atividades realizadas no cotidiano, sendo considerada uma estrutura complexa devido à grande capacidade de coordenação motora, precisão e produção de força. Segundo Andrade (2010), os movimentos da mão envolvem diferentes mecanismos de controle muscular e articular, permitindo ações como preensão, pinça e manipulação de objetos.

A biomecânica da mão está relacionada ao funcionamento integrado entre músculos, tendões, articulações e dedos, possibilitando movimentos de flexão, extensão e controle de força. Estudos demonstram que a posição do punho e dos dedos influencia diretamente na capacidade de preensão e precisão dos movimentos realizados (ANDRADE, 2010).

A preensão em pinça, realizada principalmente entre polegar e indicador, representa um dos movimentos mais importantes da mão humana, sendo amplamente utilizada em tarefas que exigem precisão e coordenação motora fina. Além disso, a capacidade de movimentação independente dos dedos permite a execução de atividades complexas e delicadas.

Na área da robótica, os princípios da biomecânica da mão humana são utilizados como referência para o desenvolvimento de mãos robóticas. Dessa forma, estruturas mecânicas associadas a servomotores e mecanismos articulados, buscam reproduzir movimentos semelhantes aos realizados naturalmente pela mão humana.

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

No presente trabalho, os conceitos biomecânicos foram aplicados no desenvolvimento de uma mão robótica impressa em 3D, capaz de reproduzir movimentos básicos dos dedos por meio do acionamento de servomotores controlados por sistemas embarcados.

2.2 Visão computacional aplicada

A visão computacional é uma área da inteligência artificial voltada ao processamento e interpretação de imagens e vídeos por sistemas computacionais. Essa tecnologia permite identificar padrões, movimentos, objetos e características visuais por meio da análise de imagens capturadas em tempo real.

Segundo Lucas e Kanade (1981), técnicas de rastreamento de movimento e registro de imagens permitem identificar deslocamentos e acompanhar objetos ao longo do fluxo do vídeo, sendo amplamente utilizadas em aplicações de visão computacional e análise de movimento.

Atualmente, a visão computacional possui aplicações em diferentes áreas, como automação industrial, reconhecimento facial, segurança, medicina e robótica. Em sistemas robóticos, essa tecnologia possibilita a interação entre máquina e ambiente por meio da interpretação de informações visuais obtidas por câmeras.

Neste projeto, a visão computacional foi utilizada para realizar o reconhecimento dos movimentos da mão humana por meio de uma webcam conectada ao computador. Para isso, foram utilizadas bibliotecas como OpenCV e MediaPipe, responsáveis pelo processamento das imagens e identificação dos pontos-chave da mão.

O sistema realiza o rastreamento dos dedos e da palma da mão em tempo real, permitindo identificar movimentos e convertê-los em comandos enviados ao Arduino para controle da mão robótica. Dessa forma, a integração entre visão computacional e sistemas embarcados possibilitou a reprodução automática dos movimentos detectados.

2.3 Reabilitação assistiva

A reabilitação assistiva utiliza recursos tecnológicos para auxiliar pacientes com limitações motoras na recuperação de movimentos e funções musculares. Sistemas robóticos aplicados à fisioterapia vêm sendo utilizados para aumentar a precisão dos exercícios, monitorar a evolução motora e auxiliar profissionais da saúde.

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

No caso de pacientes acometidos por disfunções neurológicas, como o Acidente Vascular Cerebral (AVC), a perda da motricidade fina e da capacidade de preensão palmar exige terapias repetitivas e personalizadas para estimular a neuroplasticidade. Neste cenário, o uso integrado de ferramentas inteligentes atua diretamente mapeando as necessidades mecânicas específicas para o ganho de amplitude de movimento e levando a prevenção e ou reabilitação motora (MIGUEL, 2024).

A utilização de visão computacional associada à robótica permite registrar e analisar amplitudes de movimento em tempo real, contribuindo para avaliações quantitativas do progresso do paciente. Diferente dos métodos de avaliação convencionais da goniometria, que dependem da medição manual e subjetiva do terapeuta, o processamento digital de imagens extrai coordenadas exatas das articulações dos dedos sem a necessidade de sensores vestíveis invasivos que causem desconforto ao usuário.

Esses dados angulares capturados pela câmera são interpretados por algoritmos de baseado em inteligência artificial e, sequencialmente convertidos em comandos de atuação para a plataforma Arduino.

Segundo McRoberts (2011 apud CUNHA; ROCHA, 2015), o Arduino é uma plataforma de sistemas embarcados com hardware e software de código aberto, sendo possível a criação de inúmeros projetos de controle, monitoramento, precisão entre outros, sendo necessário apenas um computador para enviar ou receber dados da placa.

A ferramenta de desenvolvimento do Arduino (IDE) utiliza linguagem de programação como C e C++, onde desenvolvedores formulam códigos com instruções para que o Arduino realize tarefas, enviando e/ou recebendo dados em I/O – input/output.

O microcontrolador processa as informações em tempo real e gerencia o torque e o posicionamento dos servomotores, replicando os movimentos de flexão e extensão na estrutura biônica. Dessa forma, dispositivos robóticos de baixo custo desenvolvidos com impressão 3D representam uma alternativa promissora para aplicações acadêmicas e terapêuticas, viabilizando ferramentas acessíveis para o monitoramento clínico e a possível recuperação funcional de pacientes.

2.4 Trabalhos correlatos

O desenvolvimento de estruturas antropomórficas integradas a sistemas embarcados para fins de tecnologia assistiva tem sido amplamente investigado no cenário nacional. Alves

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

(2018) desenvolveu um protótipo de prótese robótica de punho e mão utilizando manufatura aditiva (impressão 3D) e controle por meio da plataforma Arduino. O estudo focou na reprodução mecânica dos movimentos de preensão, utilizando cabos de nylon para simular os tendões flexores humanos acionados por servomotores.

Embora o trabalho tenha validado a viabilidade física e o baixo custo da estrutura 100% mecânica, o controle dos movimentos ainda dependia de comandos manuais via botões e potenciômetros. O presente projeto diferencia-se dessa abordagem ao automatizar completamente o acionamento dos dedos através de comandos visuais inteligentes, eliminando controles físicos analógicos.

No que tange ao processamento de imagem aplicado à saúde, Miguel (2024) investigou a aplicação de visão computacional e redes neurais no rastreamento de movimentos manuais em tecnologia assistiva.

O autor utilizou o framework MediaPipe para mapear os pontos anatômicos da mão em tempo real de forma não invasiva, eliminando a necessidade de luvas de dados ou sensores vestíveis complexos. Contudo, o foco da pesquisa concentrou-se na interface de software para fins de diagnóstico e análise computacional, sem transpor esses dados para um dispositivo físico externo.

Este trabalho avança em relação às aplicações de mapeamento de movimentos propostas por Miguel (2024) e às mecânicas de atuadores embarcados desenvolvidos por Alves (2018). A inovação consiste em criar um sistema de ciclo fechado, onde o rastreamento nativo por visão computacional é traduzido em strings de comando via comunicação serial, gerando a movimentação física real do protótipo robótico.

3. METODOLOGIA

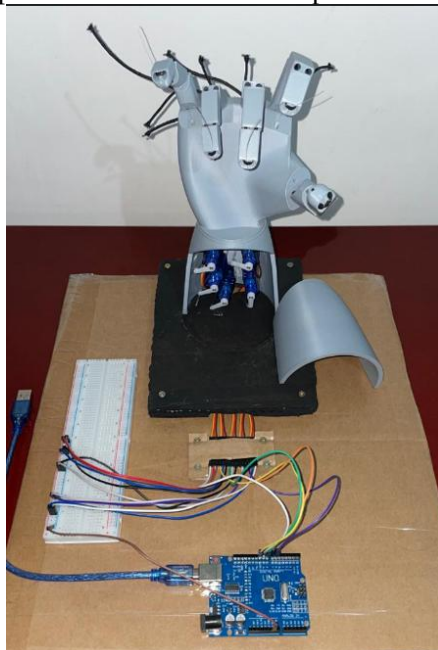
3.1 Arquitetura do Sistema e Materiais Utilizados

A construção do sistema integrado baseou-se na articulação entre uma estrutura mecânica antropomórfica, componentes eletrônicos de processamento e controle, e uma camada de software dedicada à visão computacional. A estrutura física da mão robótica foi confeccionada por meio de manufatura aditiva (impressão 3D) para simular o esqueleto humano, utilizando um sistema de fios e elásticos que atuam como tendões artificiais responsáveis pela flexão e extensão dos dedos. Para a automação desse mecanismo, foram empregados cinco servomotores independentes conectados à estrutura, uma placa micro

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

controladora Arduino Uno, cabos e jumpers de conexão, além de uma fonte de alimentação externa para suprir a demanda de corrente dos atuadores, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Protótipo físico da estrutura antropomórfica em impressão 3D.

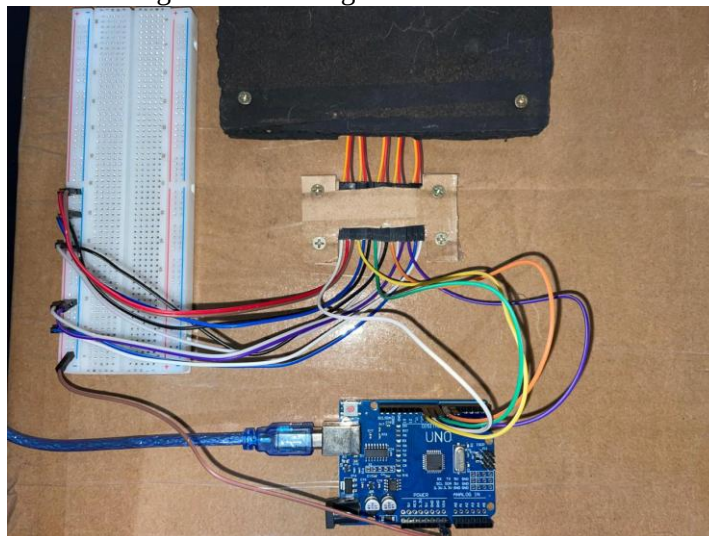


Fonte: Elaborados pelos autores (2026).

A captura dos movimentos biológicos foi realizada por meio de uma webcam acoplada a um computador.

O gerenciamento do hardware e a execução das tarefas lógicas centralizaram-se no microcontrolador da plataforma Arduino. A CPU integrada administra as funções da placa utilizando a memória RAM para manipulação temporária das variáveis em tempo de execução e a memória não volátil (ROM) para o armazenamento definitivo do firmware. A comunicação física e lógica do ecossistema é estabelecida por interfaces específicas da placa: o plug USB e o conversor serial/USB associado realizam a interface de dados e programação com o computador; os pinos de alimentação distribuem tensões reguladas de 5V, 3.3V e referências de aterramento (GND) para os componentes externos; e as portas de entrada e saída (I/O) controlam os sinais do sistema, dividindo-se entre pinos digitais para acionamento binário e pinos analógicos para a leitura de grandezas variáveis, a Figura 2 da apresenta as estruturas citadas acima.

Figura 2 – A Pinagem do Arduino Uno



Fonte: Elaborados pelos autores (2026).

No escopo do desenvolvimento de software, a programação e a calibração do microcontrolador foram realizadas por meio da IDE do Arduino, ambiente no qual as instruções de controle foram desenvolvidas em linguagem baseada em C/C++. Paralelamente, o processamento de alto nível e a extração cinemática ocorreram no computador por meio da linguagem Python. Essa arquitetura lógica utilizou de forma integrada as bibliotecas OpenCV, voltada à manipulação digital dos fluxos de vídeo capturados pela câmera; MediaPipe, responsável pelo rastreamento inteligente dos pontos articulares da mão; e Pyfirmata2, encarregada de estabelecer o protocolo de comunicação serial direta e em tempo real entre o script Python e a placa microcontroladora.

3.2 Montagem Mecânica e Integração do Hardware

A primeira etapa consistiu na montagem da estrutura antropomórfica da mão robótica a partir do kit impresso em 3D, realizando o acoplamento mecânico dos dedos aos respectivos servomotores de forma a viabilizar a independência cinemática de cada falange. Sequencialmente, procedeu-se à integração eletrônica do sistema, interconectando as linhas de sinal dos cinco servomotores às portas digitais da placa micro controladora Arduino Uno. Para mitigar ruídos e garantir a estabilidade operacional dos atuadores sob carga, utilizou-se uma fonte de alimentação externa dedicada para suprir a demanda de corrente dos motores. O controle posicional preciso foi estabelecido por meio do envio de sinais baseados em Modulação por Largura de Pulso (PWM), gerenciados pelo microcontrolador a partir do processamento das variáveis lógicas de entrada. Programação do microcontrolador:

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

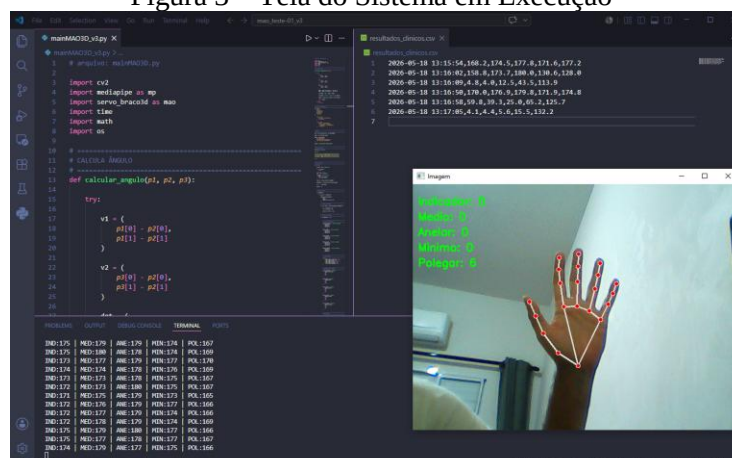
Foi desenvolvido um código na plataforma Arduino IDE para controlar os movimentos da mão. O programa permite acionar individualmente cada dedo ou executar movimentos combinados, como abrir e fechar a mão. Os valores de posição dos servos foram ajustados conforme testes práticos, garantindo movimentos suaves e coordenados.

3.3 Desenvolvimento de Software e Visão Computacional:

O ecossistema de software foi desenvolvido de forma bipartida entre o firmware do microcontrolador e o algoritmo de processamento de alto nível. Na plataforma Arduino IDE, estruturou inicialmente, realizou-se a configuração da plataforma de hardware carregando o sketch padrão StandardFirmata. Esse procedimento permitiu transformar o microcontrolador em um periférico de entrada e saída controlado diretamente por comandos externos paralelamente, o sistema de visão computacional foi implementado em ambiente Python, utilizando uma webcam para a captura do fluxo de vídeo em tempo real.

O processamento dessas imagens fundamentou-se nas rotinas da biblioteca OpenCV e nos modelos de aprendizado de máquina da biblioteca MediaPipe Hands. Essa arquitetura permitiu rastrear os pontos de referência anatômicos da mão humana e extrair as coordenadas espaciais necessárias para a classificação dos gestos, aplicando os conceitos fundamentais de registro cinemático proposto por Lucas e Kanade (1981) Por fim, a biblioteca *Pyfirmata2* em Python foi a responsável por enviar em tempo real as amplitudes angulares calculadas diretamente para os pinos do Arduino. A Figura 3, apresenta a tela do protótipo em funcionamento.

Figura 3 – Tela do Sistema em Execução



Fonte: Elaborados pelos autores (2026).

3.4 Protocolo de Comunicação e Protocolo de Testes:

A integração dinâmica entre a camada de visão computacional e a resposta física do hardware foi viabilizada por meio de um canal de comunicação serial estável. Os dados angulares extraídos e calculados pelo script Python foram estruturados e transmitidos em tempo real para o buffer do Arduino Uno, que decodificou os pacotes de informação e acionou imediatamente os servomotores correspondentes. Por fim, realizaram-se testes experimentais sistemáticos para validar o desempenho global do protótipo. Essa etapa avaliou parâmetros como a precisão na reprodução dos gestos visuais, o tempo de resposta do sistema e as limitações físicas decorrentes de folgas mecânicas, fornecendo o embasamento necessário para refinamentos posteriores nos algoritmos e nos ajustes estruturais do protótipo.

3.5 Mensuração e análise da amplitude de movimento

A mensuração da amplitude de movimento (ADM) ocorreu por meio da extração automatizada dos pontos-chave da mão utilizando as bibliotecas OpenCV e MediaPipe. A partir do fluxo de vídeo capturado em tempo real pela webcam, o algoritmo realizou a modelagem digital das estruturas anatômicas do usuário. Com base nessas coordenadas espaciais, os ângulos das articulações e juntas interfalângicas foram calculados por meio de operações vetoriais, viabilizando a obtenção exata da amplitude cinemática em graus. Os dados numéricos gerados demonstraram alta sensibilidade e repetibilidade, mostrando-se capazes de discriminar variações sutis nos padrões de flexão e extensão.

Para validar a consistência dessa ferramenta, estruturou-se um ensaio experimental de bancada que simulou cenários clínicos controlados, abrangendo desde limitações motoras severas (como a rigidez articular) até a amplitude máxima de flexão palmar. Essa validação técnica caracterizou o ecossistema proposto como uma alternativa automatizada, digital e de baixo custo em detrimento da goniometria manual tradicional. O método permitiu o registro imediato e o armazenamento automatizado do progresso longitudinal em arquivos de formato .csv, gerando um histórico confiável do desempenho motor sem a necessidade de procedimentos invasivos.

A evolução cinemática foi determinada pela variação angular observada entre os registros históricos e as simulações atuais, permitindo o cálculo matemático do ganho real de mobilidade dos dedos. Além do monitoramento clínico, os valores angulares obtidos foram aplicados diretamente ao controle do protótipo robótico. A estrutura biônica reproduziu os movimentos capturados tanto em tempo real quanto de forma assíncrona por comandos

posteriores, materializando fisicamente a visualização e a comparação da evolução motora simulada para fins de tecnologia assistiva.

4. RESULTADOS

Os testes realizados demonstraram que o sistema desenvolvido foi capaz de identificar os movimentos da mão humana em tempo real e reproduzir por meio da mão robótica com um funcionamento satisfatório.

Foram verificados e anotados diferentes estado da posição da mão, que incluíram dedos estendidos (aberto), dedos semiflexionados e dedos totalmente flexionados (fechado), onde em tempo real foi verificado a posicionamento dos dedos assim como sua angulação fornecido pelo sistema, que capturou o movimento pela webcam com processamento pela visão computacional, responsável pelo rastreamento dos pontos anatômicos.

Desta maneira foi permitido o cálculo dos ângulos das articulações dos dedos pelos pontos chaves identificadas pelo algoritmo, assim informações foram posteriormente convertidas em comando enviado para o Arduino com acionamento proporcional dos servos motores.

Lucas e Kanade (1981) propuseram a generalização matemática para o cálculo do vetor de disparidade e deslocamento multidimensional. A Figura 4 demonstra a fórmula que foi usada para a o modelo assim a técnica calcula o deslocamento espacial (h) de pixels entre frames consecutivos da câmera utilizando o método iterativo de Newton-Raphson para verificar a movimentação de um ponto. Conceitos clássicos como esse pavimentaram o caminho para ferramentas modernas como o *framework MediaPipe*, que realiza o rastreamento atual e entrega as coordenadas espaciais (X e Y) dos pontos anatômicos da mão.

Figura 4 – Equação 1 – Cálculo do vetor de deslocamento multidimensional.

$$h \approx \left[\sum_x \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^T [G(x) - F(x)] \right] \left[\sum_x \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^T \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \right]^{-1}$$

Fonte: Lucas e Kanade (1981)

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

Após receber a localização desses pontos, o software desenvolvido em Python calcula a amplitude articular utilizando a Lei dos Cossenos como apresentado na Figura 5. O algoritmo mede a distância geométrica entre os pontos de referência nas pontas dos dedos e as coordenadas da base da mão, determinando o ângulo exato do movimento em graus.

Figura 5 – Equação 2 – Aplicação da Lei dos Cossenos para determinação do ângulo articular.

$$\cos(\theta) = \frac{a^2 + b^2 - c^2}{2 \cdot a \cdot b}$$

Fonte: Adaptado da literatura matemática clássica (2026)

Por fim, por meio de uma interpolação linear implementada no código Figura 6, o sistema converte proporcionalmente o ângulo anatômico obtido para a amplitude física operacional do servomotor, aplicando o movimento exato no protótipo.

Figura 6 – Equação 3 – Equação de interpolação linear para mapeamento dos servomotor.

$$f(x) = y_0 + (x - x_0) \cdot \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

Fonte: Adaptado da literatura matemática clássica (2026)

Foi observada boa estabilidade no reconhecimento dos movimentos, mantendo resposta contínua e sem atraso perceptível entre o movimento executado pelo usuário e a resposta realizada pela mão robótica. Os valores registrados pelo algoritmo apresentaram pequenas discrepâncias em relação à posição real da mão, possivelmente ocasionadas pela elasticidade dos cabos utilizados no acionamento dos dedos, pequenas folgas mecânicas, e variações no ajuste dos elásticos responsáveis pelo retorno dos movimentos.

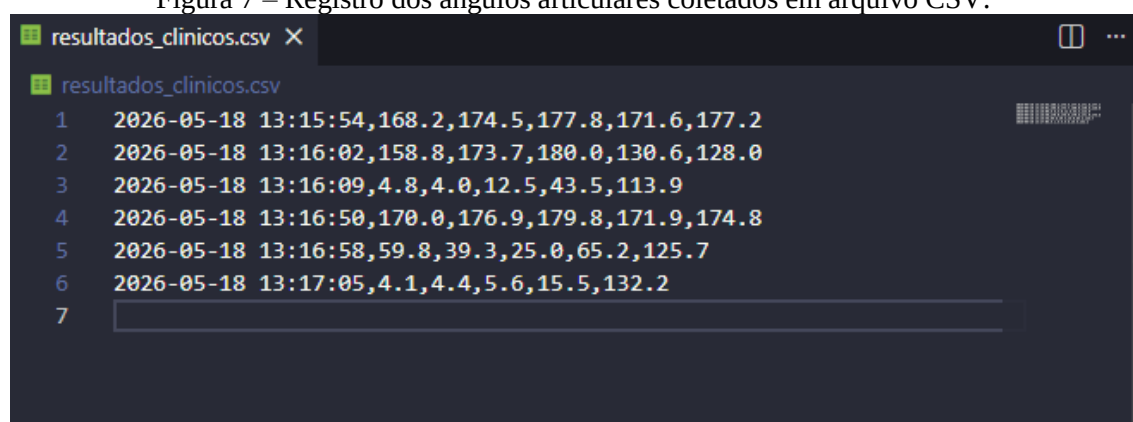
Notou-se, de forma visual, que enquanto o sistema de visão computacional extrai com precisão ângulos próximos a 90° de flexão na mão humana, o protótipo físico apresenta uma limitação de amplitude. Essa diferença ocorre porque a precisão e o torque dos servomotores comerciais de baixo custo, somados à flexibilidade das linhas que simulam os tendões, não conseguem replicar com exatidão milimétrica a biomecânica humana.

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

O sistema demonstrou satisfatoriamente a capacidade de mensurar a amplitude de movimento, e a identificação dos graus de flexão e extensão dos dedos.

Além do controle robótico, os dados foram salvos em arquivo .csv para acompanhamento, conforme apresenta a figura 7, os dados evolutivos dos movimentos realizados. Os registros contêm informações como: Data/Hora, Indicador, Médio, anelar, mínimo e Polegar, permite a análise quantitativa, da amplitude de movimento, e/ou à evolução dos movimentos ao longo do tempo mantendo o registro em arquivo.

Figura 7 – Registro dos ângulos articulares coletados em arquivo CSV.



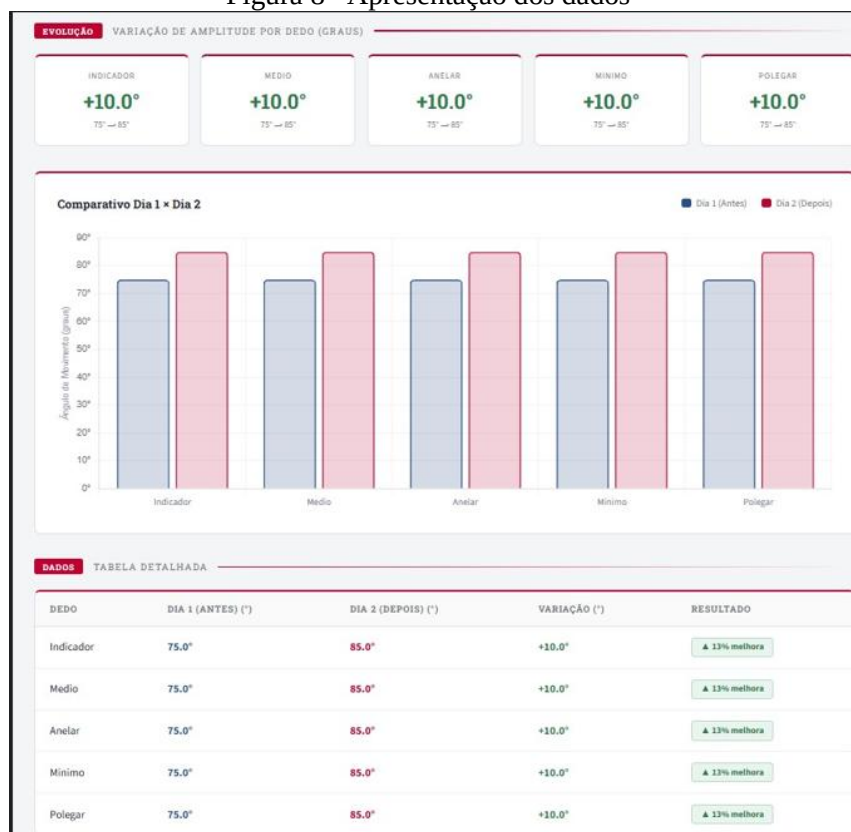
	2026-05-18	13:15:54	168.2	174.5	177.8	171.6	177.2
1	2026-05-18	13:16:02	158.8	173.7	180.0	130.6	128.0
2	2026-05-18	13:16:09	4.8	4.0	12.5	43.5	113.9
3	2026-05-18	13:16:50	170.0	176.9	179.8	171.9	174.8
4	2026-05-18	13:16:58	59.8	39.3	25.0	65.2	125.7
5	2026-05-18	13:17:05	4.1	4.4	5.6	15.5	132.2
6							
7							

Fonte: Elaborados pelos autores (2026).

E por fim os resultados obtidos indicaram com sucesso que a integração entre visão computacional, sistema embarcado, robótica e inteligência artificial é viável e funcional para aplicações acadêmicas e para monitoramento e acompanhamento de possíveis tratamentos para manutenção e/ou melhora da amplitude de movimento da articulação dos dedos.

Como perspectiva de trabalho futuro, propõe-se uma interface interativa para a apresentação de resultados e estatísticas obtidos a partir dos dados armazenados, como exemplo a figura 8. Tal recurso visa subsidiar o profissional responsável pela avaliação clínica, podendo também ser disponibilizado ao paciente.

Figura 8 –Apresentação dos dados



Fonte: Elaborados pelos autores (2026).

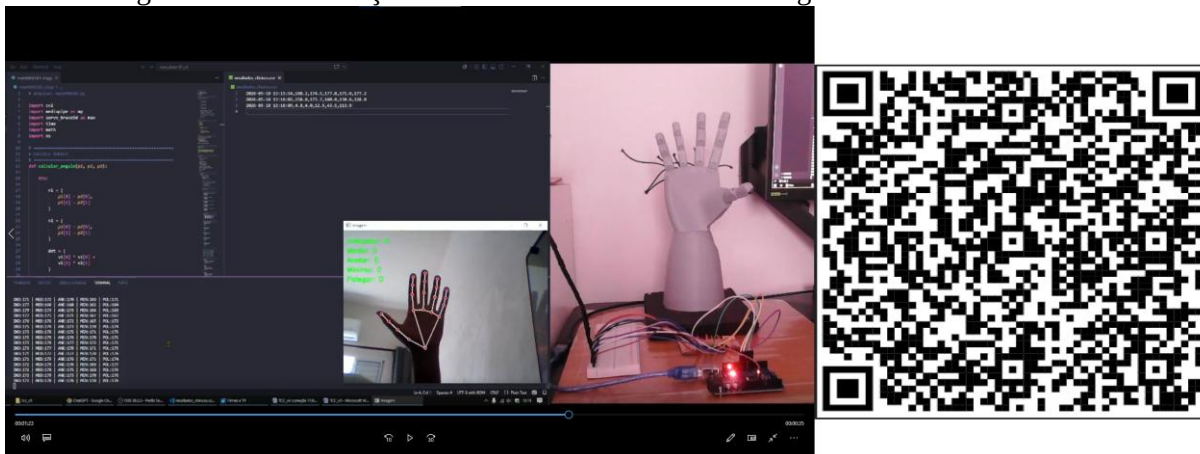
Os resultados obtidos demonstraram a interação do sistema com a inteligência artificial por meio da biblioteca MediaPipe que utiliza da visão computacional por meio de técnicas com learning e deep learning para detecção e rastreamento dos pontos chave da mão em tempo real (LUCAS; KANADE, 1981). A MediaPipe Hands com modelo de redes neurais treinados para reconhecer e rastrear os *landmarks* da mão, que permite a extração automática dos pontos chaves e o cálculo dos ângulos dos dedos.

Sendo assim, foi possível realizar a identificação do movimento executados e a mensurar os graus de flexão e extensão dos dedos e o armazenamento desses dados em arquivos para possível monitoramento e/ou análise quantitativa dos dados registrados ao longo do tempo.

A Figura 9 apresenta um QR Code e o respectivo link de acesso ao vídeo de demonstração do protótipo em funcionamento.

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

Figura 9 – Demonstração em vídeo do funcionamento integrado do sistema robótico.



Fonte: Elaborados pelos autores (2026).

Disponível em:

< https://drive.google.com/drive/folders/1ED0TGgu4JGmh_NEgoXon7rvrLB16g-um?usp=drive_link>.

Acesso em: 20 mai. 2026.

5. CONCLUSÃO

A integração entre OpenCV, MediaPipe, Python e Arduino mostrou-se eficiente para o rastreamento dos movimentos em tempo real e o controle proporcional dos servomotores responsáveis pelo movimento da mão robótica.

Os testes demonstraram que o sistema foi capaz de reproduzir os movimentos dos dedos com estabilidade e um baixo custo de implementação. Os resultados obtidos ficaram muito próximos da realidade e vivenciando o potencial para utilização no ambiente de reabilitação e/ou aplicações acadêmicas.

Dessa forma, o sistema consolida-se como uma ferramenta viável para que fisioterapeutas realizem avaliações cinemáticas quantitativas, permitindo monitorar o ganho real de mobilidade de forma digital, acessível e sem a necessidade de sensores desconfortáveis ou vestíveis para o paciente.

Mesmo apresentando pequena discrepância nas medições principalmente pela limitação das estruturas compostas e características da mecânica do protótipo, os resultados são satisfatórios para a proposta de projeto.

Como trabalhos futuros recomenda-se a substituição dos servomotores por modelos de maior precisão e torque, além de utilizar cabos de aço flexíveis ou fios de alta resistência, como linhas de pesca de multifilamento, visando eliminar a folga mecânica no retorno dos dedos. Também o desenvolvimento de um algoritmo de compensação matemática no código em Python para corrigir e aproximar a diferença entre o ângulo lido pela câmera e o ângulo

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

enviado ao servo.

E recomenda-se a aplicação do sistema em um ambiente de fisioterapia real, para que em testes clínicos, com o objetivo de coletar o feedback de profissionais da saúde e testar a usabilidade da aplicação com voluntários.

O sistema apresenta potencial para auxiliar profissionais da saúde no acompanhamento de possíveis tratamentos fisioterapêuticos, oferecendo uma ferramenta digital capaz de registrar, analisar e acompanhar a evolução dos movimentos ao longo do tempo.

Por fim, conclui-se que projetos com a integração entre visão computacional, inteligência artificial, sistemas embarcados e robótica, são uma alternativa promissora, acessível e funcional para aplicações acadêmicas, possibilitando a aplicações na área da reabilitação motora.

REFERÊNCIAS

ALVES, Frederyk Antunnes de Sousa. **Protótipo de prótese robótica de punho e mão utilizando arduíno**. 2018. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharel em Sistemas de Informação) – Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, 2018.

ANDRADE, Vanessa Luzia Barros de. **O controle de preensão em pinça em adultos jovens: efeito da posição do punho**. 2010. 39 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Educação Física) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

CUNHA, Kianne Crystie Bezerra da; ROCHA, Rodrigo Vilela da. Automação no processo de irrigação na Agricultura Familiar com plataforma Arduíno. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, v. 1, n. 2, p. 62–74, 2015.

LUCAS, Bruce D.; KANADE, Takeo. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In: **Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)**. Vancouver, Canadá: [s. n.], v. 2, p. 674-679, 1981.

MARTINS, Amanda F. N. *et al.* **Visão Computacional e Controle de Força em Garras Robóticas: Uma Abordagem Integrada**. In: ESCOLA REGIONAL DE INFORMÁTICA DO ESPÍRITO SANTO (ERI-ES), 9., 2024, Vitória. Anais (...). Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2024. p. 181-184. Disponível em: sbc.org.br. Acesso em: 15 maio 2026.

MIGUEL, Gabriel Rissatti. **Uma combinação da Visão Computacional e Inteligência Artificial para analisar movimentos em apoio à reabilitação de pacientes pós Acidente**

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PRESIDENTE PRUDENTE

Vascular Cerebral. 2024. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Bauru, 2024.

SANTOS, B. P. *et al.* **Internet das Coisas:** da teoria à prática. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC), 34., 2016, Salvador. **Minicursos (...).** Salvador: UFBA, 2016. p. 162-211. Disponível em: ufmg.br. Acesso em: 30 abr. 2026.

SILVA, L. G. P.; LEMOS, T. O.; RUFINO, H. L. P. O impacto da Internet das Coisas na educação: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e710997770, 2020. Disponível em: rsdjournal.org. Acesso em: 15 maio 2026.