



AUTORES

Anna Júlia Braga Faria

Arthur Martins Borges

Cleber Santos de Jesus

Jhennifer Cristina da Silva Rosa

ORIENTADOR

Prof. Daniel de Oliveira

INSTITUIÇÃO

Faculdade Engenheiro Salvador Arena

BRAÇO ROBÓTICO COM 2 GRAUS DE LIBERDADE PARA PINTURAS

São Bernardo do Campo

2025

1. RESUMO

O presente projeto tem como objetivo desenvolver um braço robótico de comprimento ajustável com dois graus de liberdade, equipado com um suporte de caneta em seu terminal, destinado a realizar pinturas em objetos no formato quadrado e/ou retangulares. A metodologia escolhida adota modelagem e dimensionamento elétrico - responsáveis pela estrutura de hardware do projeto - até a programação e o processamento de sinais - que compõe o software. Assim, a proposta baseia-se e integra conceitos de automação, de programação, de mecânica, e de cinemática, aplicando-os em um sistema capaz de receber dimensões e coordenadas por meio de interfaces digitais. Dessa forma, busca-se a potencialidade de desenvolvimento da robótica a partir do ambiente educacional e dos materiais sob acesso dos discentes.

Palavras-chave: Braço robótico. Modelagem. Programação. Ambiente acadêmico.

2. INTRODUÇÃO

Durante meados da década de 50 - a Terceira Revolução Industrial -, quando George Devol criou e introduziu os primeiros braços robóticos no ambiente automobilístico, houve grande mudança no setor. (Zaman, 2023)

Os braços robóticos são extremamente úteis no ambiente industrial, já que com maior precisão, são capazes de replicar passos com mais exatidão e em maior velocidade em relação a operações manuais. Sua área de atuação é bastante ampla, tendo exemplos como soldadura, montagem de automóveis, paletização, embalagem, pinturas, entre outros (Trindade, 2021)

Ademais, após compreender a importância do braço robótico na indústria, sua ideia foi projetada no ambiente acadêmico, de forma tal a ser desenvolvido um exemplar constituído por dois eixos articulados que permitem a movimentação de uma caneta em um plano bidimensional.

Diante do exposto, este projeto tem como objetivo principal desenvolver um braço robótico com dois graus de liberdade, capaz de realizar desenhos bidimensionais com precisão, utilizando componentes de fácil acesso do estudante com interesse em robótica. O projeto busca integrar conhecimentos de mecânica, eletrônica e programação em um sistema interativo e funcional.

O braço projetado conta com dois eixos articulados, permitindo a movimentação de uma

caneta em um plano 2D. Na extremidade do braço superior, há um suporte adaptado para fixação de diferentes tipos de canetas, possibilitando a reprodução de formas geométricas quadradas e retangulares a fim de preencher uma determinada área indicada pelo operador. O sistema inclui um display para a inserção das dimensões do objeto a ser pintado e uma tela sensível ao toque (touchscreen) que permite ao usuário realizar configurações, como alteração na velocidade de pintura e definição do tamanho atual dos braços. As coordenadas captadas pela tela são processadas e transformadas em comandos que armazenam os dados em formato de variáveis, que por sua vez são aplicadas diretamente aos cálculos utilizados nos processos que orientam o movimento do braço sobre uma superfície física.

Logo, o trabalho busca não apenas demonstrar os princípios de funcionamento de um braço robótico, mas também incentivar o aprendizado prático no ambiente educacional, tornando o ensino de robótica mais palpável aos estudantes.

3. OBJETIVOS

Desenvolver um braço robótico com dois graus de liberdade, capaz de realizar pinturas precisas em superfícies planas, utilizando componentes de fácil acesso e integrando conhecimentos de mecânica, eletrônica e programação em um sistema funcional. Avaliar o desempenho do sistema na execução de desenhos quadrados e retangulares, observando precisão e fluidez dos movimentos. Implementar o controle eletrônico do braço, integrando microcontroladores, motores de passo e sensores de posição, com permissão para modificações didáticas no comprimento do braço para estudo de cinemática de movimento e compreensão de conceitos de vetores e trajetórias.

Além disso, objetiva-se proporcionar uma interface de interação intuitiva para o usuário utilizando display touchscreen, permitindo ajustes em tempo real de velocidade, avanço do terminal e dimensões da área de pintura. O projeto busca também estimular a experimentação prática, possibilitando a análise do impacto de diferentes configurações mecânicas e eletrônicas sobre o comportamento do sistema. Por fim, pretende-se demonstrar a viabilidade de construção de um protótipo educacional, que sirva como ferramenta de ensino de robótica, programação e integração de sistemas multidisciplinares, promovendo o aprendizado ativo e a aplicação prática de conceitos teóricos.

4. METODOLOGIA

Considerando que o desenvolvimento deste projeto foi estruturado em etapas concomitantes, para fins de sucessão lógica, ele pode ser dividido em parte software e parte hardware.

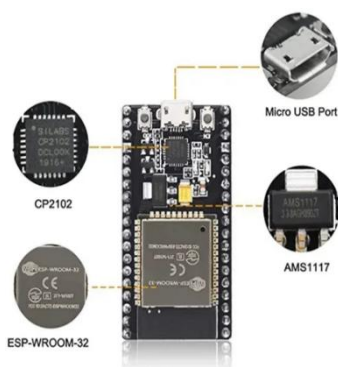
A princípio, para a movimentação dos braços, foram escolhidos micro servos MG90S devido a opção de controle por ângulo. Uma placa ESP32 para realização de controle, além da possibilidade de comunicação wireless para interação com aplicativo dedicado desenvolvido na engine Unity3D. Um PowerBank de 5V com capacidade para 30.000mA. Um display TFT LCD touchscreen resistivo com dimensões de 2.8 polegadas, tendo como principal funcionalidade ser a interface que facilite a alteração do endereço IP, para comunicação entre o ESP32 e o aplicativo dedicado utilizando protocolo WebSockets. O aplicativo desenvolvido na Unity3D é compatível com o sistema operacional Android, este aplicativo recebe os valores de entrada do usuário, tais como as dimensões da área a ser pintada (comprimento e altura) e valores de configurações: comprimento do braço, comprimento do anti-braço, velocidade de operação e avanço do terminal. Os dados são enviados ao ESP32 para controlar os servos a fim de realizar os movimentos.

Figura 1: MICRO SERVO MG90S



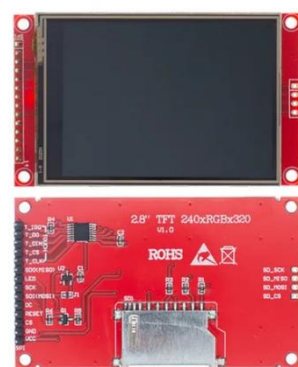
https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_878403-MLB80195152944_112024-O-micro-servo-motor-mg90s-metal-mg90-automaco-nfe-no-full.webp

Figura 2: ESP32



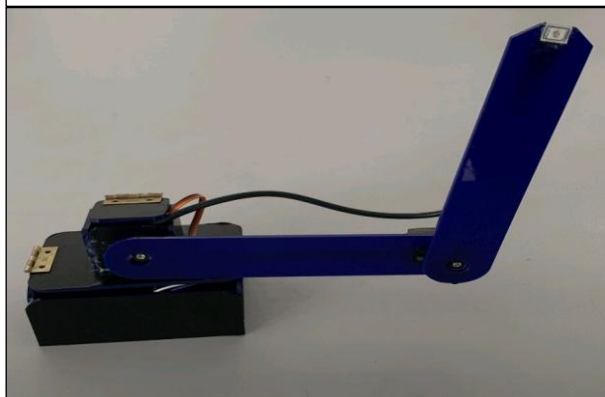
https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_638284-MLA82663979295_022025-O.webp

Figura 3: DISPLAY TFT LCD 2.8"



https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_745578-MLB75617610659_042024-O.webp

Figura 4: PRIMEIRO PROTÓTIPO



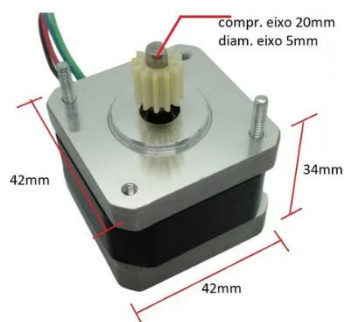
Fonte: Autoria Própria (2025)

Durante a fase de implementação, foi observado que os micro servos MG90S demonstraram em prática uma resolução de aproximadamente 1.5° , resultando em perdas na fluidez durante o movimento, por esta razão optou-se pela troca dos servos nos eixos principais: base e junção dos braços, por um motor de passo modelo NEMA 17, com resolução de aproximadamente 0.06° com auxílio de um driver. Esta modificação resultou em um efeito cascata de alterações no projeto.

Ao observar a capacidade e recursos obtidos com o uso do display touchscreen, percebeu-se que seria um desperdício de recursos se usado apenas para alteração de IP, logo, optou-se por substituir todas as interações do aplicativo pelo display: dimensões de pintura e configurações. Consequentemente, removendo o aplicativo como ferramenta de controle, passando a utilizá-lo apenas como ferramenta para testes de simulações virtuais de movimento.

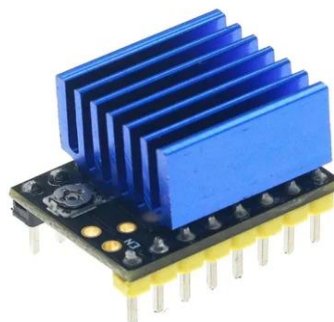
Como dito anteriormente, para o uso do motor de passo NEMA 17 integrado ao ESP32, foi necessário realizar uma série de adaptações, como incluir no projeto um driver TMC2209, responsável por receber o controle do ESP32 e controlar o motor. Devido as alimentações do motor e driver serem 24V, foi necessário trocar o Power Bank por uma fonte de 24V 5A e incluir um regulador de tensão LM2596 para reduzir a tensão e alimentar o restante do circuito com 5V. O motor não possui um feedback de posição, desta forma não havia como identificar a posição do eixo no quadrante de 360° e para resolver isto foi necessário incluir um Encoder AS5600, responsável por gerar uma posição virtual para o eixo do motor, o que reduziu a resolução para aproximadamente 0.09° .

Figura 5: MOTOR DE PASSO NEMA 17



https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_967846-MLB77329477683_062024-O.webp

Figura 6: DRIVER TMC2209



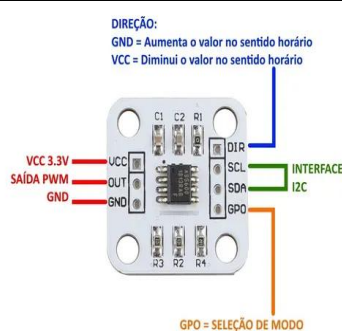
https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_690298-MLB77147299196_062024-O.webp

Figura 7: REGULADOR LM2596



https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_622862-MLB54057505011_022023-O-regulador-de-tenso-ajustavel-lm2596-step-down-3a-qualidade.webp

Figura 8: ENCODER AS5600

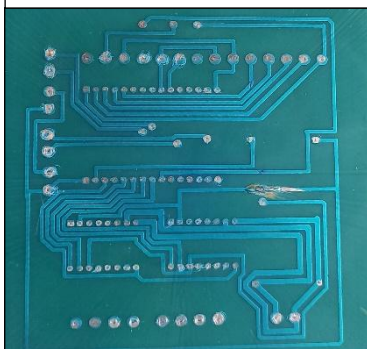


https://http2.mlstatic.com/D_NQ_NP_668715-MLU77795951676_072024-O.webp

O circuito principal foi elaborado em uma placa de circuito impresso (PCI), onde o circuito contendo a conexão dos componentes foi projetado no software Proteus 8.1, em seguida foi transpassado para uma placa de fenolite cobreada 10x10cm através de um método caseiro utilizando tinta fotossensível. Após a corrosão da placa com uma solução de percloroeto de ferro, a tinta fotossensível foi novamente utilizada, desta vez para finalizar o acabamento da placa.

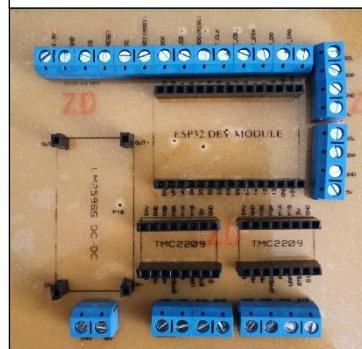
Para finalizar a placa foram soldados conectores fêmea para prototipagem dos componentes, pensando na facilitação da manutenção futura.

Figura 9: PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)



Fonte: Autoria Própria

Figura 10: PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)



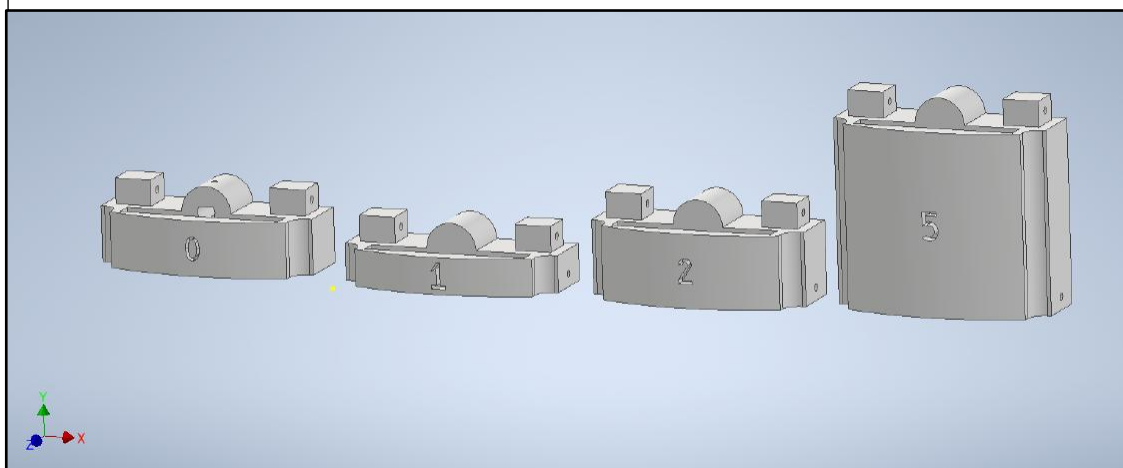
Fonte: Autoria Própria

Além das alterações eletrônicas no circuito, foi necessário adaptar toda a estrutura física imaginada originalmente para o projeto, devido a grande diferença entre os pesos dos micros servos MG90S que possuem cerca de 13g cada e os motores de passo NEMA 17 com aproximadamente 500g cada.

Dessa forma, baseado nos componentes escolhidos, foi desenvolvido o modelamento 3D do braço robótico no software “Autodesk Inventor”. A estrutura consiste em braço robótico com duas hastes de tamanhos manipuláveis de acordo com a necessidade dos estudos de cinemática relacionados ao campo vetorial.

Foram desenvolvidos três tipos de peças para designar o comprimento do braço, com medidas de 1, 2 e 5 centímetros, a fim de reproduzir tamanhos variados para cada haste. As juntas são constituídas por duas peças, uma nomeada “zerador” - que faz com que o comprimento do braço inicie a partir dos eixos dos motores -, e a outra peça foi nomeada como suporte do motor - a qual tem o eixo do motor acoplado alinhado em seu centro.

Figura 11 – PEÇAS DO BRAÇO DE 0 (“ZERADOR”), 1, 2 e 5 CENTÍMETROS, RESPECTIVAMENTE



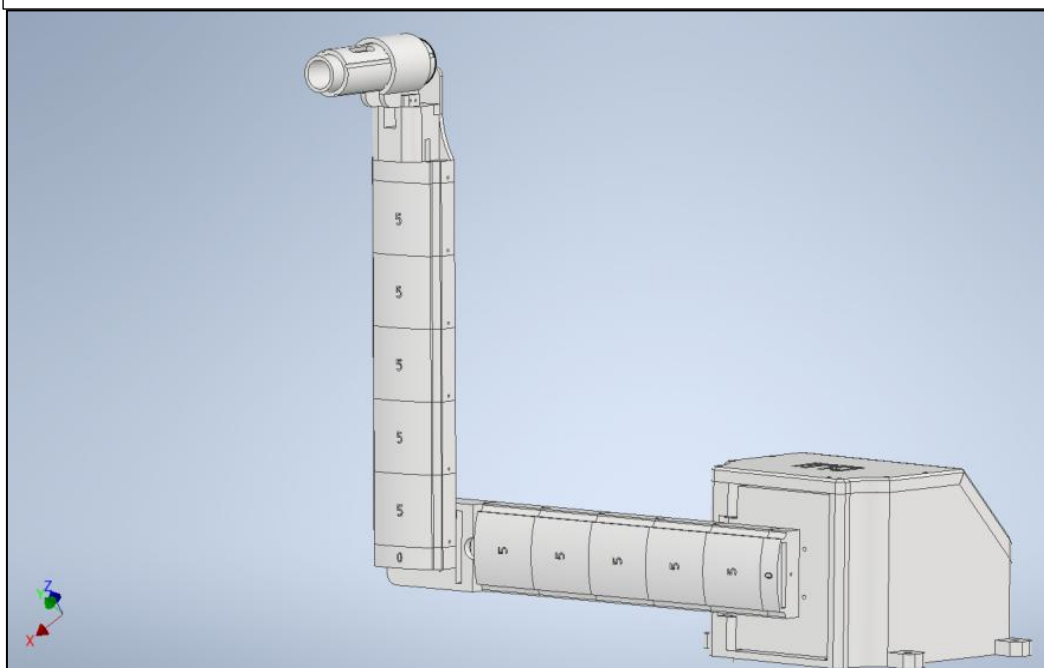
Fonte: Autoria Própria (2025)

Na extremidade superior da segunda haste, foi projetado o suporte para a caneta que realiza as marcações do desenho, ele tem a função de segurar a caneta com um sistema de movimentação a partir de um servo-motor que levará a caneta a superfície de pintura, o suporte conta com um sistema mecânico de dois tubos de fundo fechado acoplados, que estarão pressionados entre si por uma mola, a qual permitirá maior precisão e contato da caneta com a superfície de pintura.

Os motores utilizados têm a função de realizar movimentos precisos e de passos controlados, que são assistidos por um encoder que alimenta o software com uma posição virtual do eixo do motor.

A base foi construída para suportar o braço robótico, a placa eletrônica e o display, além de um contrapeso em sua parte inferior, para que o robô não precise ser fixado em algum apoio para seu funcionamento.

Figura 12 – MONTAGEM DO BRAÇO ROBÓTICO



Fonte: Autoria Própria (2025)

5. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do projeto ocorreu de maneira gradual e iterativa, envolvendo etapas de planejamento, implementação, testes e ajustes. Inicialmente, foram definidos os objetivos do braço robótico, contemplando a execução de desenhos bidimensionais, utilizando componentes acessíveis para fins educacionais. A primeira fase concentrou-se na escolha dos materiais e componentes, priorizando micro servos MG90S pela facilidade de controle por ângulo, um microcontrolador ESP32 para gerenciamento eletrônico e comunicação wireless, além de um display TFT LCD touchscreen de 2,8 polegadas como interface de usuário.

Com a escolha inicial dos componentes, procedeu-se à modelagem mecânica do braço robótico utilizando o software Autodesk Inventor. Foram projetadas hastes de tamanhos variáveis (1, 2 e 5 cm), e juntas padronizadas. Simultaneamente, foi desenvolvido o software de controle, permitindo que o ESP32 recebesse coordenadas e parâmetros de desenho, inicialmente via aplicativo.

Durante os primeiros testes, foi observada uma limitação na precisão e fluidez do movimento, causada pela resolução dos micro servos MG90S (aproximadamente 1,5°). Para

resolver este problema, os motores foram substituídos por motores de passo NEMA 17, com resolução de $0,06^\circ$ por passo, controlados pelo driver TMC2209. Essa mudança exigiu adaptações no fornecimento de energia, substituindo o Power Bank 5V por uma fonte de 24V 5A, com regulador LM2596 para alimentar o restante do circuito com 5V, e a inclusão de um encoder AS5600 para feedback de posição do motor, garantindo maior precisão.

O circuito eletrônico principal foi projetado em software de simulação (Proteus 8.1) e posteriormente transferido para uma placa de circuito impresso caseira, facilitando a manutenção e substituição de componentes. Durante essa fase, o display touchscreen passou a ser utilizado como principal interface de controle, permitindo ajustes de velocidade, comprimento das hastes e dimensões da área de pintura, enquanto o aplicativo Unity3D passou a ser utilizado apenas para simulações virtuais.

O desenvolvimento foi marcado por ciclos de testes e ajustes, com observações contínuas sobre precisão, repetibilidade e facilidade de manutenção. A modularidade do projeto, tanto na parte mecânica quanto eletrônica, permitiu realizar alterações rápidas e avaliar diferentes configurações de movimento, reforçando o caráter educacional e experimental do braço robótico.

Ao final, o sistema se mostrou funcional, integrando de forma eficiente hardware e software, com capacidade de realizar desenhos bidimensionais precisos, além de possibilitar estudos práticos de cinemática, controle de motores e interação com interfaces digitais, consolidando a aplicação de conceitos teóricos de forma prática.

6. RESULTADOS PRELIMINARES

O projeto resultou em um sistema funcional capaz de realizar pinturas em uma superfície física de acordo com uma área digitalmente pré-configurada. A integração entre hardware e software possibilitou um fluxo contínuo entre os cálculos realizados pelo microcontrolador e sua execução mecânica, proporcionando uma aplicação prática dos conceitos estudados.

Este tipo de tecnologia pode ser ampliado para áreas como ensino de robótica, prototipagem e artes digitais.

Destacando a seção didática do projeto, a possibilidade de modificações nos comprimentos dos braços, permite acompanhar de forma interativa o estudo da cinemática,

auxiliando no desenvolvimento das capacidades an ticas através das observa es obtidas em relação ao comportamento do robô ao se alterar de diferentes formas a proporcionalidade do comprimento dos braços.

Do ponto de vista da manutenção, o robô apresenta grande facilidade para realização de trocas de peças, desde a placa de circuito impresso, até seus componentes mecânicos, tanto devido a forma de prototipagem escolhida para o circuito, que conta com conectores que facilitam a remoção de cada componente, como a padronização de suas partes mecânicas e tamanhos, considerados relativamente pequenos, podendo as partes desmontáveis dos braços até mesmo caber em bolsos, facilitando também o transporte.

A tecnologia desenvolvida não apenas valida o potencial de construir sistemas complexos com recursos disponíveis no ambiente acad mico, mas também abre portas para sua expansão em áreas como ensino, prototipagem, arte digital e programação, podendo evoluir de um robô que realiza pinturas precisas, para um robô capaz de replicar desenhos com precisão para assinaturas personalizadas e armazenadas em pequenos bancos de dados, visto que para o microcontrolador, no sentido figurado, a imagem é um simples conjunto contendo várias coordenadas.

7. FONTES CONSULTADAS

TRINDADE, David. **A importância do robô colaborativo na indústria**. 2021. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2021.

ZAMAN, U. et al. **Handbook of Manufacturing Systems and Design**. Boca Raton: CRC Press, 2023.