



CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM ROBO CARTESIANO PARA APLICAÇÕES DIVERSAS

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2025.6307

Autores: EMANUEL CASTRO MIRANDA, GUSTAVO DE ASSIS COSTA, TIAGO ROMEIRO DE JESUS

Resumo: Este artigo apresenta o desenvolvimento de um robô cartesiano com finalidade didática, voltado ao ensino de automação, controle e visão computacional em cursos de engenharia. O projeto surgiu da necessidade de aproximar teoria e prática, diante de limitações como a ausência de equipamentos de alto custo e o difícil acesso ao campo. A estrutura do robô foi construída com materiais de baixo custo, como perfis de alumínio, peças em acrílico e componentes eletrônicos open-source. O sistema possui três eixos acionados por motores de passo, controlados por Arduino UNO e módulo CNC, além de incorporar um ESP32-CAM para captura e processamento de imagens. Embora tenha sido implementado um algoritmo básico de detecção de bordas para testes laboratoriais, o foco do projeto está na construção de uma plataforma acessível, replicável e eficaz para experimentação prática. Os resultados demonstram o potencial pedagógico do robô como ferramenta de apoio à formação em engenharia.

Palavras-chave: Agricultura 4.0, automação, robô cartesiano, visão computacional, sustentabilidade, ensino de engenharia, plataforma didática

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM ROBO CARTESIANO PARA APLICAÇÕES DIVERSAS

1 INTRODUÇÃO

A formação em Engenharia exige a articulação entre teoria e prática, sobretudo quando se trata do desenvolvimento de sistemas automatizados voltados a contextos reais. No entanto, a distância entre o ambiente acadêmico e as condições do campo, marcada pelo alto custo e complexidade dos equipamentos agrícolas, impõe desafios significativos à experimentação prática. Nesse contexto, o presente projeto apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um protótipo de robô cartesiano construído como uma plataforma experimental no Instituto Federal de Goiás – Campus Jataí.

O objetivo central foi elaborar uma estrutura funcional, acessível e replicável, capaz de servir como base para o desenvolvimento de aplicações futuras em agricultura de precisão e ensino de automação, controle e visão computacional. A plataforma foi concebida para permitir testes de algoritmos e sistemas embarcados em ambiente laboratorial, funcionando como uma maquete tecnológica que simula cenários típicos do campo. Ainda que esta etapa inicial tenha se concentrado na construção do robô e na validação de seu funcionamento por meio de algoritmos básicos de detecção de bordas e movimentação controlada, buscou-se demonstrar seu potencial como ferramenta didática e de pesquisa aplicada.

O sistema desenvolvido integra uma estrutura cartesiana de três eixos com motores de passo controlados por uma placa Arduino UNO e módulo CNC, aliados a um sistema de captura e processamento de imagens com ESP32-CAM. Utilizando a biblioteca OpenCV, foi implementado o algoritmo de Canny para detecção de bordas, permitindo a identificação morfológica de folhas em imagens capturadas. As coordenadas extraídas são transmitidas ao controlador, que executa os movimentos por meio de controle PID. A construção do protótipo, baseada em materiais acessíveis como perfis de alumínio e peças de acrílico cortadas a laser, viabilizou a montagem de uma estrutura funcional e de baixo custo.

Os resultados obtidos validam a robustez e versatilidade da plataforma como base para experimentação em projetos futuros, seja no aprimoramento de sistemas de automação para aplicação de insumos em campo, seja como instrumento pedagógico para o ensino prático de tecnologias aplicadas à engenharia agrícola.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A viabilidade econômica e agronômica de robôs para uso em agricultura de precisão vem sendo amplamente discutida em publicações científicas, uma vez que a automação oferece promissoras melhorias na produtividade agrícola e na sustentabilidade das práticas no campo. Nesse contexto da chamada Agricultura 4.0, a aplicação de ferramentas como o controle estatístico de qualidade torna-se um potencial para garantir a eficiência dos processos automatizados (Silva et al., 2020). Tecnologias como o robô cartesiano proposto neste trabalho podem contribuir significativamente para a otimização da aplicação de insumos, especialmente herbicidas, reduzindo o desperdício e promovendo o uso seletivo de produtos químicos (Zhang; Pierce, 2017). No contexto educacional, a discussão sobre a aplicabilidade dessas tecnologias em um protótipo didático é crucial para preparar futuros engenheiros para os desafios da agricultura 4.0 e trabalhos recentes têm explorado o uso de plataformas de prototipagem acessível, como Arduino e módulos de visão computacional de código aberto,

na formação de estudantes e no desenvolvimento de testes preliminares em ambiente acadêmico (Santos et al., 2022; Lima & Pereira, 2023). Esses estudos destacam como a adoção de soluções de baixo custo promove maior democratização do acesso à tecnologia, fomentando inovação e pesquisa colaborativa.

O uso de robôs autônomos na agricultura pode reduzir em até 90% o uso de herbicidas em áreas controladas por reconhecimento automático de plantas daninhas, resultando em uma economia direta nos custos operacionais (Slaughter et al., 2008). Essa abordagem também se alinha com as práticas sustentáveis, uma vez que a aplicação precisa de produtos químicos reduz a contaminação do solo e da água, além de minimizar o impacto sobre a biodiversidade (Pedersen; Lundgaard, 2020) alinhando-se com os objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (ONU, 2025). A exploração dessas vantagens no ambiente acadêmico, através da construção de protótipos, permite aos estudantes compreenderem os benefícios e desafios da sustentabilidade na engenharia.

Diante desses desafios, a literatura recente aponta para o potencial de plataformas de prototipagem baseadas em hardware livre, que oferecem possibilidades de customização e escalabilidade, acelerando a implementação de soluções inovadoras em ambientes acadêmicos e pequenos produtores (Ferreira et al., 2023). O custo de aquisição, instalação e manutenção de robôs agrícolas pode ser alto, o que pode limitar sua adoção por pequenos e médios produtores (Duckett; Pearson, 2018). Além disso, fatores como a necessidade de infraestrutura tecnológica adequada e a capacitação técnica para operar e manter essas máquinas podem representar desafios adicionais (Bechar; Edan, 2016). É exatamente nesse ponto que o desenvolvimento de protótipos acessíveis se torna uma ferramenta valiosa no ambiente universitário, permitindo a exploração de conceitos avançados sem o alto custo associado a sistemas comerciais, facilitando a formação de mão de obra qualificada.

Apesar dessas desvantagens, o retorno sobre o investimento pode ser favorável a longo prazo, especialmente em regiões como o sudoeste goiano, onde há alta demanda por controle de ervas daninhas e uso intensivo de insumos agrícolas (Silva et al., 2022; Melo et al., 2021; Costa & Santos, 2020). A aplicação seletiva de herbicidas não apenas reduz custos com produtos químicos, mas também aumenta a eficiência operacional e a produtividade das lavouras, o que, de acordo com Pedersen et al. (2020), pode resultar em um aumento de até 15% na produção agrícola. Ao estudar e replicar esses sistemas em um ambiente acadêmico, os estudantes desenvolvem uma compreensão aprofundada dos benefícios de longo prazo e do impacto econômico da automação.

Portanto, as vantagens agrônômicas, como o aumento da sustentabilidade e a preservação da saúde das culturas, aliadas aos benefícios econômicos em termos de redução de insumos e aumento de produtividade, tornam a utilização de robôs cartesianos uma solução promissora para a agricultura de precisão. No entanto, sua viabilidade dependerá de estratégias que mitiguem os custos iniciais e promovam o acesso à tecnologia por um maior número de agricultores. O desenvolvimento de plataformas didáticas como o robô proposto consolida um passo crucial para a democratização do acesso a essa tecnologia, capacitando a próxima geração de engenheiros a inovar e implementar soluções sustentáveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se em princípios de acessibilidade tecnológica e reaproveitamento de soluções consolidadas. Optou-se por priorizar o uso de ferramentas e plataformas de código aberto, tanto por sua viabilidade técnica quanto pela contribuição ao desenvolvimento colaborativo de tecnologias aplicadas. Projetos com essa abordagem, como o *Farmbot*, serviram como base conceitual e auxiliaram na definição dos parâmetros iniciais. O desenvolvimento visou garantir uma estrutura robusta, com foco em

baixo custo e facilidade de replicação, mantendo compatibilidade com ambientes acadêmicos e experimentais. Essa estratégia metodológica favorece a difusão do conhecimento e estimula a continuidade do aprimoramento por diferentes grupos de pesquisa.

3.1 ESP32-CAM

A metodologia adotada neste trabalho fundamenta-se em princípios de acessibilidade tecnológica e reaproveitamento de soluções consolidadas. Optou-se por priorizar o uso de ferramentas e plataformas de código aberto, tanto por sua viabilidade técnica quanto pela contribuição ao desenvolvimento colaborativo de tecnologias aplicadas. Projetos com essa abordagem, como o *Farmbot*, serviram como base conceitual e auxiliaram na definição dos parâmetros iniciais. O desenvolvimento visou garantir uma estrutura robusta, com foco em baixo custo e facilidade de replicação, mantendo compatibilidade com ambientes acadêmicos e experimentais. Essa estratégia metodológica favorece a difusão do conhecimento e estimula a continuidade do aprimoramento por diferentes grupos de pesquisa.

O ESP32-CAM é um microcontrolador amplamente utilizado em projetos de Internet das Coisas (IoT) que requerem captura e transmissão de imagens. Através da combinação das capacidades do chip ESP32 com uma câmera de baixa potência, o *hardware* se mostrou ideal para projetos que envolvem monitoramento remoto e visão computacional. O ESP32-CAM suporta redes Wi-Fi e pode ser facilmente integrado a servidores para enviar imagens ou dados processados. Sua arquitetura dual-core e compatibilidade com bibliotecas do OpenCV, o torna capaz de realizar processamento básico de imagens diretamente no dispositivo, como compressão e captura contínua. Além disso, sua interface com periféricos e pinos GPIO expande sua aplicabilidade em sistemas embarcados (Lee; Kim; Choi, 2019).

3.2 Arduino

O Arduino é uma plataforma de hardware *open-source* amplamente utilizada no desenvolvimento de sistemas embarcados e robótica. Avanços recentes demonstram seu papel crucial em sistemas de agricultura de precisão (Sharma; Patil, 2018). Seu sucesso se deve à simplicidade de uso e à vasta comunidade de desenvolvedores que fornecem bibliotecas e exemplos de códigos. Essa característica o torna uma ferramenta didática excepcional, pois facilita o aprendizado de programação e eletrônica para estudantes de diversas áreas da engenharia. Modelos como o Arduino UNO permitem o controle preciso de motores, sensores e outros atuadores, tornando-o essencial em projetos de automação (Monk, 2017). O Arduino oferece uma interface de comunicação simples com sensores e atuadores através de pinos de entrada e saída digitais e analógicos, além de suportar a comunicação serial com outros dispositivos, como computadores ou microcontroladores, permitindo a integração de sistemas robóticos complexos. Nesse contexto, um Arduino UNO foi utilizado juntamente com um módulo CNC, para o controle digital dos motores de passo, além da implementação de um algoritmo mais avançado de controle para garantia da precisão dos movimentos do robô ao alvo desejado. Essa aplicação prática do Arduino no controle de um robô cartesiano serve como um excelente laboratório para o ensino de controle de sistemas e robótica.

3.3 Configuração e Topologia Proposta

A configuração do módulo CNC Shield foi realizada utilizando o Arduino UNO como base de controle para os motores de passo NEMA 17, em conjunto com os drivers A4988. A pinagem do CNC Shield foi conectada da seguinte forma:

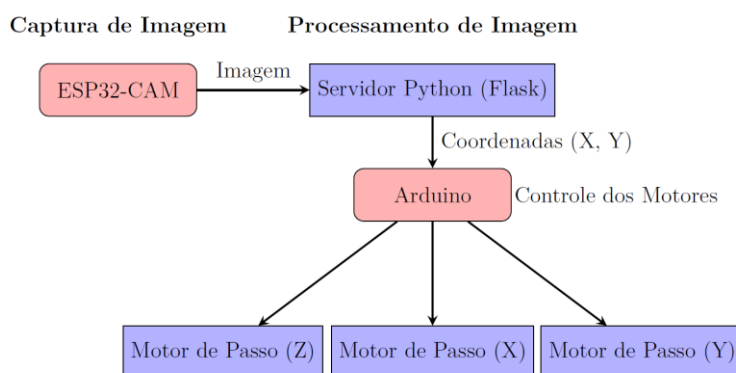
- Pinos de controle de passos e direção dos motores de passo: conectados aos pinos D2 a D5 do Arduino UNO (X, Y, Z, e Eixos A/B, se necessário).

- Pinos de alimentação: VCC e GND conectados diretamente à fonte de alimentação de 24V.
- Pinos de controle de habilitação, direção e pulso (EN, DIR, STEP): conectados ao driver A4988.

A regulação da tensão nos drivers A4988 foi feita através do ajuste do potenciômetro, utilizando um multímetro para medir a tensão de referência. Esse ajuste garantiu que a corrente fornecida aos motores NEMA 17 fosse adequada, evitando sobrecarga e mantendo a integridade do sistema. Além disso, os *microsteps* foram configurados para 1/16 de passo, ajustando os pinos MS1, MS2, e MS3 do *CNC Shield* conforme a tabela de configuração dos *drivers* A4988. Essa configuração garantiu precisão nos movimentos, otimizando o desempenho nos eixos X, Y e Z. A alimentação dos motores foi fornecida por uma fonte chaveada de 24V (DC), compatível com o A4988, garantindo que o sistema funcionasse de forma estável.

O sistema proposto para o projeto segue a seguinte topologia, conforme ilustrado na Figura 1: o ESP32-CAM atua como o dispositivo responsável pela captura de imagens da área sob o robô. Após a captura, essas imagens são processadas usando o algoritmo de detecção de bordas de Canny em um servidor Flask, permitindo a identificação da posição do objeto ou planta que deve ser tratada. As coordenadas obtidas são então transmitidas ao Arduino, que é o controlador principal dos motores de passo do robô. O Arduino recebe as coordenadas via comunicação serial e movimenta os eixos X, Y e Z do robô através do módulo CNC para aplicar o herbicida diretamente sobre a planta daninha.

Figura 1 – Topologia do sistema robótico proposto.



Fonte: Autor

3.4 Software

Visão computacional

A visão computacional é essencial para permitir a diferenciação de plantas daninhas das culturas agrícolas. Um dos principais algoritmos utilizados nesse processo é o Algoritmo de Canny, que é eficaz na detecção de bordas, permitindo a segmentação precisa de objetos dentro de uma imagem (Canny, 1986). O Algoritmo de Canny opera através de etapas como suavização, cálculo do gradiente, supressão de não-máximos e rastreamento por histerese. Embora o algoritmo de Canny seja robusto para a detecção de bordas, outras técnicas clássicas, como a Transformada de Hough, são frequentemente empregadas para a identificação de formas geométricas específicas, como linhas e curvas, complementando a análise morfológica (Duda; Hart, 1972). Esse método é amplamente reconhecido por sua precisão em detectar bordas em diferentes condições de iluminação.

Como viável a identificação e diferenciação da morfologia presente nas folhas das plantas, este algoritmo foi implementado usando a biblioteca OpenCV, que já possui uma

implementação otimizada do Canny (`cv2.Canny()`), facilitando a aplicação sem a necessidade de programar o algoritmo do zero. O algoritmo funciona executando os seguintes passos para o processamento da imagem, como também observado na Figura 2:

- **Imagem de Entrada:** O processo inicia com a captura de uma imagem através da ESP32-CAM, que é enviada ao servidor em formato de bytes. A imagem é, então, decodificada utilizando a função `cv2.imdecode()` para um formato que o OpenCV possa processar. Essa etapa inicial é fundamental para que os estudantes compreendam o fluxo de dados em um sistema de visão.
- **Conversão para Escala de Cinza:** Para simplificar o processamento, a imagem colorida é convertida para escala de cinza utilizando `cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)`. Essa conversão é importante, pois o algoritmo de Canny trabalha melhor com uma única camada de intensidade de pixel, o que facilita a detecção de bordas com base nas variações de intensidade. A experimentação com essa etapa permite aos alunos entenderem o impacto da pré-filtragem no resultado final do processamento.
- **Aplicação do Filtro Gaussiano (Suavização):** O próximo passo é aplicar um filtro Gaussiano à imagem para reduzir o ruído. A suavização da imagem ajuda a evitar que pequenos detalhes indesejados ou variações de intensidade causadas por ruídos sejam considerados bordas. No código, utilizamos a função `cv2.GaussianBlur()` para realizar essa operação. Esta etapa é crucial para o ensino de técnicas de pré-processamento de imagens e seus efeitos na qualidade da detecção.
- **Cálculo do Gradiente de Intensidade:** O algoritmo de Canny calcula o gradiente de intensidade da imagem para identificar as regiões de transição abrupta entre claro e escuro (bordas). O gradiente é calculado utilizando as derivadas da imagem em relação aos eixos X e Y. Em termos práticos, essa operação é realizada automaticamente pela função `cv2.Canny()` do OpenCV.
- **Supressão de Não-Máximos:** Após o cálculo do gradiente, o próximo passo é a supressão de não-máximos, onde apenas as bordas mais fortes são mantidas. Pixels que não fazem parte das bordas principais são eliminados para garantir que as bordas detectadas sejam nítidas e precisas.
- **Histerese (Limites Superior e Inferior):** A detecção de bordas final é realizada utilizando dois limites de intensidade, um superior e um inferior. As bordas com gradientes mais fortes do que o limite superior são consideradas bordas definitivas, enquanto as bordas com gradientes entre os dois limites são incluídas apenas se estiverem conectadas a bordas fortes. Esta etapa é feita pelo OpenCV, e os valores dos limites podem ser ajustados diretamente no código como parâmetros da função `cv2.Canny()`. A calibração desses parâmetros oferece um aprendizado prático sobre a otimização de algoritmos.
- **Imagem com Bordas Detectadas:** O resultado final é uma imagem binária onde as bordas detectadas estão destacadas. Esta imagem é usada para identificar o contorno do objeto sob o robô, calcular o centro do objeto e enviar as coordenadas (X, Y) ao Arduino para movimentação dos eixos.

No código do nosso sistema, utilizamos a função `cv2.Canny()` da biblioteca OpenCV para executar todos os passos descritos acima. A função `cv2.Canny()` é chamada com os seguintes parâmetros: a imagem em escala de cinza resultante da conversão e dois valores de limiar (superior e inferior) que definem a histerese. Após a execução da função, obtemos uma imagem onde as bordas do objeto são realçadas, e utilizamos essa imagem para encontrar os contornos com `cv2.findContours()`, permitindo o cálculo das coordenadas centrais e o envio dessas coordenadas para o código de controle do robô. Essa abordagem modular

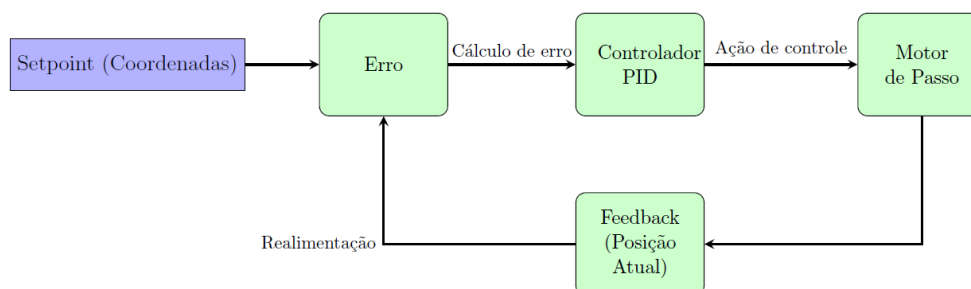
facilita o ensino de conceitos de visão computacional, permitindo que os alunos se concentrem na aplicação e otimização, e não apenas na implementação de baixo nível.

Controle Proporcional, Integral e Derivativo

Para um controle preciso dos eixos do robô até o alvo desejado, buscou-se o uso de um PID (Proporcional-Integral-Derivativo). O controlador PID é um pilar da engenharia de controle moderna, combinando as ações proporcional, integral e derivativa para ajustar a saída de um sistema, permitindo uma resposta eficaz a variações e minimizando o erro de forma dinâmica (Ogata, 2010; Franklin; Powell; Emami-Naeni, 2010). No ambiente acadêmico, o estudo do controle PID é fundamental para a formação em automação e robótica, e sua aplicação prática no robô cartesiano proporciona uma compreensão aprofundada de seus princípios.

Neste contexto, o PID foi usado para garantir precisão e estabilidade do movimento até o alvo desejado. O PID ajusta os motores de passo do robô de forma eficiente, controlando a velocidade e a posição de cada eixo (X, Y e Z), garantindo que o robô se mova suavemente até as coordenadas fornecidas pelo ESP32-CAM, ajustando os movimentos dos motores de passo de acordo com os erros detectados em tempo real. O erro é calculado como a diferença entre a posição atual do robô e a posição desejada. O controlador PID então corrige esse erro em três níveis: a ação proporcional corrige o erro atual, a integral ajusta erros passados acumulados e a derivativa previne erros futuros, melhorando a estabilidade do sistema (Figura 2). A implementação e ajuste do controlador PID neste protótipo servem como um laboratório prático para que os estudantes possam experimentar e otimizar parâmetros de controle, visualizando o impacto de cada componente na resposta do sistema.

Figura 2 – Diagrama do Controlador PID e motores de passo.



Fonte: Autor

4. DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA PROTOTÍPICA E MONTAGEM

A fase de construção da plataforma robótica cartesiana representa o cerne deste projeto, sendo concebida como uma base sólida para futuras investigações e aplicações educacionais. O processo envolveu não apenas a montagem de componentes, mas uma análise crítica de materiais e a adaptação de projetos existentes, enfatizando o aprendizado prático e a viabilidade em ambiente acadêmico.

4.1 Análise e seleção de materiais para construção

A escolha dos materiais foi um passo crucial, visando assegurar que o robô pudesse realizar movimentos com precisão e estabilidade, essenciais para a exatidão em futuras medições e testes de algoritmos. No ambiente acadêmico, essa etapa permitiu aos estudantes a avaliação de custos-benefícios e a busca por alternativas acessíveis que mantivessem a

integridade estrutural. Inicialmente, explorou-se o uso de perfis de alumínio CNC, amplamente empregados em estruturas cartesianas como impressoras 3D e máquinas de corte CNC. Contudo, testes preliminares evidenciaram que a rigidez desses perfis, isoladamente, não era suficiente para suportar os movimentos precisos exigidos, resultando em vibrações e instabilidade. Essa observação crítica foi um aprendizado fundamental, demonstrando a importância da experimentação e validação no processo de engenharia.

Para superar essa limitação e evitar o desenvolvimento de peças do zero, o que demandaria mais tempo e recursos, optou-se pela adaptação do projeto Mini *FarmBot*, baseado na plataforma open-source *FarmBot*, disponível na plataforma OnShape (ONSHAPE, 2025). Essa decisão estratégica não apenas otimizou o tempo de desenvolvimento, mas também introduziu os estudantes ao conceito de *open-source* hardware e à importância da reutilização de projetos existentes na engenharia. O projeto forneceu uma base robusta para a fabricação de peças de acrílico de 15 mm, cortadas a laser, que foram integradas aos perfis de alumínio. Essa combinação de materiais e técnicas de fabricação solucionou as vibrações observadas, aumentando significativamente a estabilidade estrutural do robô, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Montagem da estrutura combinando perfis de alumínio e peças em acrílico.



Fonte: Autor

4.2 Integração do Hardware e movimentação

A integração dos componentes de hardware foi a etapa final da construção do protótipo, consolidando os conceitos de eletrônica, mecânica e programação. Para a movimentação nos eixos, foram utilizadas roldanas comumente empregadas em máquinas CNC, que permitiram o deslocamento suave ao longo dos trilhos de alumínio. Para o movimento vertical do eixo Z, crucial para o posicionamento preciso do robô sobre o alvo, empregou-se um fuso trapezoidal. Essa escolha detalhada dos mecanismos de movimento exemplifica a engenharia de precisão que pode ser explorada didaticamente.

A finalização da integração de hardware envolveu a instalação dos motores de passo e da controladora Arduino, que atua como o cérebro do sistema de movimento (Figura 6). O suporte para a câmera ESP32-CAM, por sua vez, foi projetado e impresso em 3D, demonstrando a aplicação de tecnologias de manufatura aditiva no desenvolvimento de

protótipos. Essa fase de montagem ofereceu aos estudantes uma experiência prática valiosa em montagem eletromecânica, cabeamento e testes de funcionalidade, consolidando o aprendizado sobre a interação entre os diferentes subsistemas de um robô cartesiano. A robustez da estrutura e a precisão dos movimentos alcançadas nesta fase de construção estabelecem uma base confiável para o desenvolvimento de algoritmos mais complexos e para a exploração de novas aplicações, tornando o protótipo um laboratório vivo para futuras investigações acadêmicas.

5 RESULTADOS

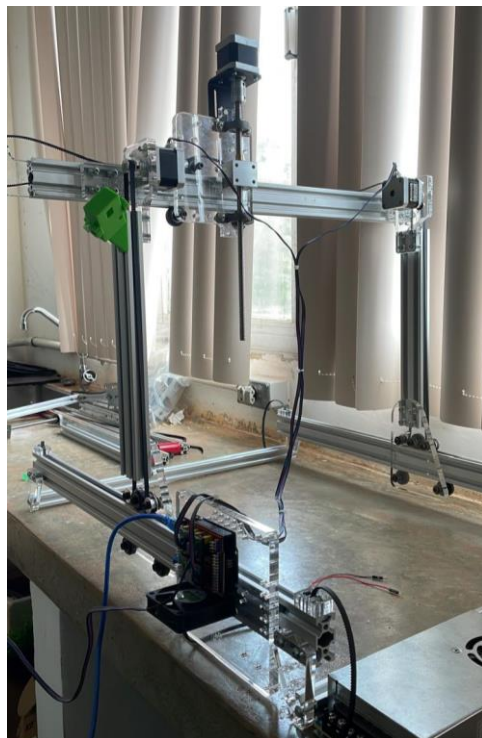
Os resultados puderam evidenciar a capacidade do sistema robótico em realizar a captura e o processamento morfológico de imagens foliares. As imagens processadas, provenientes de folhas de diferentes culturas, demonstram variações significativas nas características estruturais, revelando contornos detalhados que permitem, de fato, a diferenciação da morfologia. O processamento realizado destaca nuances de texturas e bordas das folhas que, na imagem bruta, estariam menos evidentes, sendo assim possível estabelecer comparações quantitativas entre diferentes espécimes foliares, possibilitando sua futura integração com algoritmos de diferenciação. Esses resultados validam o robô como uma plataforma funcional para os fins didáticos e de pesquisa propostos, demonstrando sua capacidade de servir como base para o desenvolvimento e teste de novas abordagens.

O desenvolvimento do robô cartesiano, inicialmente voltado à construção e avaliação prototípica, mostrou-se uma ferramenta promissora para a aplicação seletiva de herbicidas. Este primeiro projeto concentrou-se em garantir a funcionalidade básica, focada no reconhecimento de silhuetas de plantas daninhas por meio de um algoritmo simples, associado à ESP32-CAM, e sua subsequente atuação com precisão na aplicação de herbicidas. Embora o sistema tenha demonstrado viabilidade em ambiente controlado, a avaliação dos algoritmos iniciais de visão computacional, baseados principalmente na detecção de bordas via Canny, revelou uma imprecisão significativa na capacidade de diferenciar com acurácia as diversas espécies de plantas daninhas. Essa limitação aponta para a necessidade de abordagens mais sofisticadas para uma aplicação em campo com alta eficácia. Contudo, essa constatação não invalida o protótipo; pelo contrário, estabelece novos e importantes desafios para projetos futuros. Para o ambiente educacional, essa abordagem incremental é crucial, pois permite que os alunos participem de projetos de longo prazo, contribuindo em diferentes fases e aprofundando seus conhecimentos continuamente.

Portanto, é essencial que haja continuidade no projeto, concentrando-se na diferenciação mais precisa entre espécies de plantas daninhas, visando a aplicação direcionada de diferentes tipos de herbicidas. Para isso, surgem novos desafios para os próximos projetos acadêmicos, como o aprimoramento da visão computacional com algoritmos mais otimizados e complexos (e.g., técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais), capazes de identificar com maior acurácia as características morfológicas das plantas daninhas em campo. Essas abordagens avançadas, especialmente o aprendizado profundo (*deep learning*), têm demonstrado alta capacidade no reconhecimento de padrões visuais complexos (Lecun; Bengio; Hinton, 2015). E Recentemente, diversas pesquisas têm demonstrado que técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais, especialmente *deep learning*, oferecem avanços significativos na diferenciação de espécies de plantas e reconhecimento de padrões em ambientes agrícolas de campo, superando limitações de algoritmos tradicionais (Zhang et al., 2022; Oliveira & Martins, 2024). A natureza *open-source*

e replicável do projeto o torna ideal para ser expandido e aprimorado por futuras turmas e pesquisadores, transformando-o em um recurso didático dinâmico e evolutivo

Figura 4 – Integração dos hardwares e instalação da câmera ESP32-CAM em suporte impresso em 3D.



Fonte: Autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do protótipo de robô cartesiano aplicado à agricultura de precisão demonstrou ser uma ferramenta promissora não apenas para o avanço tecnológico no setor agrícola, mas, sobretudo, para aprimorar a formação em Engenharia. A construção e avaliação deste sistema em ambiente laboratorial proporcionaram aos estudantes um contato direto com desafios práticos de automação, controle e visão computacional, superando as barreiras de acesso a maquinários agrícolas complexos e caros. A fase de construção, a adaptação de projetos open-source e a integração dos componentes revelou-se um pilar fundamental para o aprendizado prático e a compreensão aprofundada dos princípios de engenharia. A utilização de componentes acessíveis como o ESP32-CAM e o Arduino, aliados a bibliotecas *open-source* como o OpenCV, valida a proposta de uma plataforma didática de baixo custo e alta replicabilidade.

Os resultados alcançados na detecção de bordas e no controle de movimentos precisos evidenciam a capacidade do protótipo em simular cenários reais da agricultura de precisão, oferecendo um ambiente seguro para experimentação e aprendizado. Embora o robô tenha sido validado como uma plataforma eficaz para os fins didáticos e de pesquisa, os algoritmos de visão computacional implementados inicialmente, focados na detecção de silhuetas, mostraram-se imprecisos para a distinção detalhada entre diferentes espécies de plantas daninhas. Essa imprecisão, no entanto, não invalida o trabalho; pelo contrário, destaca a necessidade e abre caminho para investigações futuras, focadas no desenvolvimento e teste de algoritmos mais avançados de visão computacional, como técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais, para aprimorar a capacidade de identificação e classificação, pois, um dos principais desafios para a aplicação em campo de sistemas automatizados de

reconhecimento vegetal é a alta variabilidade morfológica e as condições ambientais. A diferenciação precisa entre espécies de plantas daninhas e culturas, bem como a classificação de múltiplas espécies em diferentes fases de crescimento, ainda representa um obstáculo técnico considerável. Nesse contexto, soluções baseadas em aprendizado de máquina, especialmente *deep learning*, têm demonstrado potencial para transformar esses sistemas, oferecendo maior precisão, robustez e adaptação a diferentes condições ambientais e morfológicas. Estudos recentes destacam que algoritmos de redes neurais convolucionais (CNNs) podem aprender a reconhecer padrões visuais complexos de forma eficiente, reduzindo significativamente as limitações das abordagens tradicionais baseadas em processamento de imagens clássico (Zhang et al., 2022; Oliveira & Martins, 2024). Assim, a incorporação de inteligência artificial nos sistemas de visão computacional tem o potencial de elevar a precisão e efetividade do reconhecimento de plantas daninhas, promovendo uma agricultura de precisão mais inteligente e sustentável.

Este projeto serve como um modelo educacional eficaz, permitindo que os futuros alunos apliquem conhecimentos teóricos em um contexto prático, desenvolvendo competências essenciais para a inovação e a sustentabilidade. A robustez da base construída neste trabalho permite que ele sirva como ponto de partida para investigações mais complexas, como a implementação de algoritmos de aprendizado de máquina mais avançados e a exploração de novas aplicações no campo. A disponibilização do código-fonte e do projeto mecânico reforça o compromisso com a educação *open-source*, incentivando a continuidade e o aprimoramento do sistema por novas gerações de pesquisadores e estudantes, contribuindo significativamente para o avanço da educação em engenharia e para a formação de profissionais aptos a enfrentar os desafios da agricultura 4.0.

Por fim, este projeto também contribui para o alcance de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especialmente os relacionados à Educação de Qualidade (ODS 4), Indústria, Inovação e Infraestrutura (ODS 9), e Produção e Consumo Responsáveis (ODS 12), promovendo uma formação técnica acessível e inovadora que potencializa o uso de tecnologias sustentáveis na agricultura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) – Campus Jataí, pelo apoio institucional, a infraestrutura e a bolsa vigente. Agradecem, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação científica (PIBITI) concedida anteriormente.

REFERÊNCIAS

BECHAR, A.; EDAN, C. V. **Human–robot collaboration in agriculture: suitability of adaptation in processes**. Biosystems Engineering, v. 149, p. 94-112, 2016.

CANNY, J. **A computational approach to edge detection**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.

COSTA, A. V.; SANTOS, R. **Agricultura de precisão e manejo de plantas daninhas no cerrado goiano**. Revista de Agricultura Sustentável, v. 8, n. 1, p. 112-130, 2020.

DUCKETT, T.; PEARSON, S. **Agricultural robotics: the future of farming**. IEEE Robotics & Automation Magazine, v. 25, p. 22-31, 2018.

DUDA, R. O.; HART, P. E. **Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures**. Communications of the ACM, v. 15, n. 1, p. 11-15, 1972.

FERREIRA, J. et al. **Plataformas open-source na agricultura de precisão: uma revisão**. Revista de Engenharia Agrícola, v. 45, n. 1, p. 45-55, 2023.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Feedback control of dynamic systems**. 6. ed. Boston: Pearson, 2010.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. **Deep learning**. Nature, v. 521, n. 7553, p. 436-444, 2015.

LEE, S.; KIM, T.; CHOI, J. **IoT-based remote monitoring system using ESP32 and MQTT protocol**. Sensors Journal, 2019.

LIMA, A. F.; PEREIRA, R. C. **Prototipagem acessível em automação agrícola para formação técnica**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 2023. Proceedings of COBENGE 2023.

MELO, C. A. et al. **Controle de plantas daninhas na agricultura de precisão: alternativas e perspectivas para o sudoeste goiano**. Revista Brasileira de Manejo e Conservação do Solo, v. 22, n. 3, p. 456-468, 2021.

MONK, S. **Programming Arduino: getting started with sketches**. McGraw-Hill Education, 2017.

OGATA, K. **Modern control engineering**. 5. ed. Prentice Hall, 2010.

OLIVEIRA, M. T.; MARTINS, P. **Aplicações de redes neurais na diferenciação de plantas daninhas: avanços recentes**. Agricultural Systems, v. 192, p. 103298, 2024.

ONSHAPE. **Onshape**. Disponível em: <https://www.onshape.com/>. Acesso em: 15 out. 2024.

ONU (Organização das Nações Unidas). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 01 jun. 2025.

PEDERSEN, J. F.; LUNDGAARD, J. **Sustainable farming through robotic weed control: an economic perspective**. Journal of Agricultural Economics, v. 11, p. 251-269, 2020.

SANTOS, P. R. et al. **Ensino de Robótica Agrícola com Plataformas de Código Aberto**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 26, n. 4, p. 300-310, 2022.

SHARMA, M.; PATIL, C. **Recent advancements in Arduino-based precision agriculture systems**. Springer, 2018.

SILVA, R. P. et al. **Impacto do uso de herbicidas na agricultura de precisão no sudoeste de Goiás**. Revista Agropecuária Científica no Sudoeste de Goiás, v. 15, n. 2, p. 89-105, 2022.

SILVA, R. P. da et al. **Potential of using statistical quality control in agriculture 4.0**. Revista Ciência Agronômica, 2020.

SLAUGHTER, D.; HANSEN, G. R.; GILES, S. C. **Robotic weed control systems for precision agriculture**. Precision Agriculture, v. 9, p. 85-101, 2008.

ZHANG, Q. et al. **Deep learning for plant tissue recognition in precision agriculture**. Computers and Electronics in Agriculture, v. 195, 106783, 2022.

ZHANG, Q.; PIERCE, F. J. **Agricultural automation: fundamentals and practices**. Automation in Agriculture, v. 29, p. 1-25, 2017.

CONSTRUCTION AND PROTOTYPICAL EVALUATION OF A CARTESIAN ROBOT APPLIED TO AGRICULTURE 4.0

Abstract: *Engineering education demands a strong articulation between theory and practice, especially concerning the development of automated systems applied to real contexts. However, the gap between the academic environment and the reality of the field, marked by the high cost and complexity of agricultural machinery, imposes significant challenges to the practical implementation of technological solutions. In this scenario, this article presents the construction and prototypical evaluation, in a laboratory setting, of a Cartesian robot developed as a didactic platform at the Instituto Federal de Goiás – Campus Jataí. The proposal aims to provide an accessible means for experimenting with concepts of automation, control, and computational vision, simulating typical precision agriculture scenarios without the need for direct access to the agricultural environment. The developed system integrates a three-axis Cartesian structure with stepper motors controlled by an Arduino UNO board and a CNC module, coupled with an image capture and processing system based on the ESP32-CAM. Using the OpenCV library, the Canny edge detection algorithm was implemented, enabling the morphological recognition of leaves in captured images. The identified coordinates are transmitted to the controller, which precisely moves the robot with PID control support. The construction of the prototype, based on accessible materials such as aluminum profiles and laser-cut acrylic parts, allowed for obtaining a functional and replicable structure. The results obtained validate the robot's potential as a teaching tool, enabling students to practically exercise essential technical competencies for contemporary engineering. Initial computational vision algorithms, while functional for silhouette detection, showed imprecision in differentiating between plant species, opening new challenges for future academic projects focusing on more advanced algorithms.*

Keywords: Agriculture 4.0, automation, Cartesian robot, computational vision, sustainability, engineering education, didactic platform.

