

# Desenvolvimento e Validação de um Robô Agrícola no Manejo de Plantas Invasoras na Olericultura

PAIVA, Maria Luisa Dias  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
maria.p08@outlook.com

REIS, Douglas Lucas dos  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, Santa Catarina, Brasil  
douglas.reis@ifsc.edu.br

**Resumo** — Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo de robô agrícola móvel com tração nas quatro rodas, especificamente projetado para automatizar a capina em pequenas propriedades de olericultura. O problema central é a alta dependência de mão de obra e a inadequação ergonômica da capina manual. O projeto seguiu uma metodologia de oito etapas: (1) Avaliação e Definição de Requisitos; (2) Dimensionamento e Modelagem Mecânica; (3) Seleção e Desenvolvimento do Sistema Embarcado; (4) Fabricação e Montagem da Estrutura; (5) Instalação Elétrica e Montagem do Painel; (6) Integração Mecatrônica e Testes Funcionais; (7) Testes em Ambientes Controlados; (8) Testes em Campo. O sistema de controle utilizou um microcontrolador ESP32 para gerenciar a movimentação do robô via PWM (Modulação por Largura de Pulso), acionando motores de Corrente Contínua (CC) através de drivers BTS7960. Os resultados dos testes validaram a movimentação do protótipo e sua capacidade operacional. Os ensaios de desempenho, incluindo velocidade de capina e autonomia de tempo de trabalho, demonstraram que o robô oferece uma solução eficiente para aumentar a produtividade e promover a Agricultura de Precisão (AP) no contexto da agricultura familiar brasileira.

**Palavras-Chaves** — Robô agrícola, Olericultura, Capina Agrícola, Agricultura de Precisão, Sistema Embarcado

## I. INTRODUÇÃO

A automação tem se tornado cada vez mais relevante na agricultura, impulsionada pela necessidade crescente de produzir alimento e energia devido ao aumento populacional. Este movimento se alinha à chamada Agricultura 4.0, a qual desempenha um papel fundamental no crescimento da produtividade agrícola, visto que o principal fator para se adequar ao aumento do consumo seja a produtividade, e não a ampliação da área cultivada [10].

O desenvolvimento de soluções tecnológicas direcionadas aos pequenos produtores é crucial, pois a agricultura familiar possui 67% das ocupações rurais do país, sendo composta por 3,9 milhões de estabelecimentos [3]. Para que um agricultor seja considerado familiar, ele precisa cumprir os critérios estabelecidos pela Lei nº 11.326/2006, regulamentadas posteriormente pelo Decreto nº 9.064/2017, os quais são:

- I – Posse de área de até quatro módulos fiscais;
- II – Utilização de, no mínimo, 50% de mão de obra familiar no processo produtivo e de geração de renda;
- III – Obtenção de pelo menos metade da renda familiar a partir das atividades do estabelecimento;
- IV – Gestão estritamente familiar do empreendimento; [6]

A olericultura, que é o cultivo de hortaliças, no Brasil, é composta em sua maioria pela agricultura familiar, possuindo 800 mil hectares [4], e destaca-se no seu Valor Bruto da

Produção (VBP), da qual em 2022, a análise do VBP referente a três hortaliças - batata (R\$13,2 bilhões), tomate (R\$11,7 bilhões) e cebola (R\$4,9 bilhões) - demonstrou sua relevância. Ao somar os seus VBP, o valor totalizou R\$29,8 bilhões, superior ao registrado por cultivos como arroz e feijão, e representando quase a metade do VBP do café [9]. Esses dados demonstram a importância do setor familiar e da olericultura no Brasil.

Contudo, a despeito de sua relevância, este setor ainda enfrenta desafios operacionais significativos relacionados ao trabalho manual intenso e repetitivo exigido pelo manejo cultural, dentre os quais se destacam problemas de saúde decorrentes da falta de ergonomia, a baixa produtividade em função da elevada demanda de tempo e a crescente escassez de mão de obra em determinadas regiões [1].

O controle de plantas daninhas é um manejo cultural essencial para a produção agrícola, já que elas exercem interferências negativas diretas ou indiretas sobre as culturas agrícolas, podendo reduzir a produtividade ou a qualidade delas. Dessa forma, os tipos de controles são caracterizados em preventivo, cultural, mecânico, físico, biológico e químico. O controle mecânico continua sendo muito utilizado em pequenas propriedades, principalmente o manual, que necessita apenas de um operador para remover as plantas utilizando ferramentas como a enxada. Apesar da facilidade de recursos necessários para executar a tarefa, ela exige muito tempo: estima-se que um trabalhador leva entre 7 e 12 dias para realizar o controle de plantas daninhas em um hectare [2].

Nesse contexto, o uso de máquinas e ferramentas agrícolas automatizadas voltadas ao pequeno agricultor possibilita a otimização de suas atividades. Um dos principais campos responsáveis por esse avanço é a robótica móvel, que oferece plataformas capazes de operar de forma contínua e autônoma [6]. No estado da arte, destacam-se os robôs de propósito geral e modulares, como o SAVAGE [12] e o *The Amiga* [5], projetados para se adaptarem a diferentes tarefas no campo por meio da troca de implementos. Essa versatilidade e modularidade são fundamentais para a viabilidade econômica dessas soluções, por permitir que uma única plataforma execute desde operações de transporte até tarefas complexas de manejo agrícola, como a capina mecânica autônoma, reduzindo significativamente a dependência de intervenção humana em atividades exaustivas.

Entretanto, os custos envolvidos na aquisição desses equipamentos, frequentemente importados e tecnologicamente avançados, criam um desnível para o pequeno produtor, cuja extensão territorial e produção reduzida não justificam o elevado investimento [10]. A escassez de equipamentos automatizados e acessíveis,

direcionados ao pequeno agricultor, gera uma disparidade tecnológica entre as propriedades rurais, perpetuando o uso de técnicas manuais.

Diante desse panorama, o desenvolvimento de um robô agrícola móvel apresenta-se como uma solução tecnológica adequada, visando mitigar a escassez de mão de obra e trazer eficiência e praticidade ao cultivo.

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de um protótipo automatizado para o manejo de plantas daninhas em olericulturas, voltado a pequenas propriedades com produção comercial. A principal contribuição do projeto consiste na aplicação integrada de técnicas de Agricultura de Precisão (AP) e Engenharia Mecatrônica visando aprimorar a eficiência operacional. Para isso, foi analisado o cenário de atuação, formulada uma hipótese de melhoria e, posteriormente, coletados dados experimentais para avaliação dos resultados obtidos. Dessa forma, a inovação tecnológica foi combinada com a demanda crescente por automação no campo.

O artigo está organizado da seguinte forma: A Seção II detalha a Metodologia de desenvolvimento e validação. A Seção III descreve o Desenvolvimento Mecânico e do Sistema Embarcado, incluindo a lógica de controle via Modulação por Largura de Pulso (PWM), empregada para controlar individualmente os motores. A Seção IV apresenta os Resultados e Discussão obtidos nos testes de desempenho. Por fim, a Seção V apresenta as Conclusões do trabalho e as sugestões para Trabalhos Futuros.

## II. METODOLOGIA

A metodologia deste projeto foi dividida em oito fases, representadas de forma sequencial na Figura 1, com o objetivo de garantir o desenvolvimento de um protótipo mecatrônico funcional.

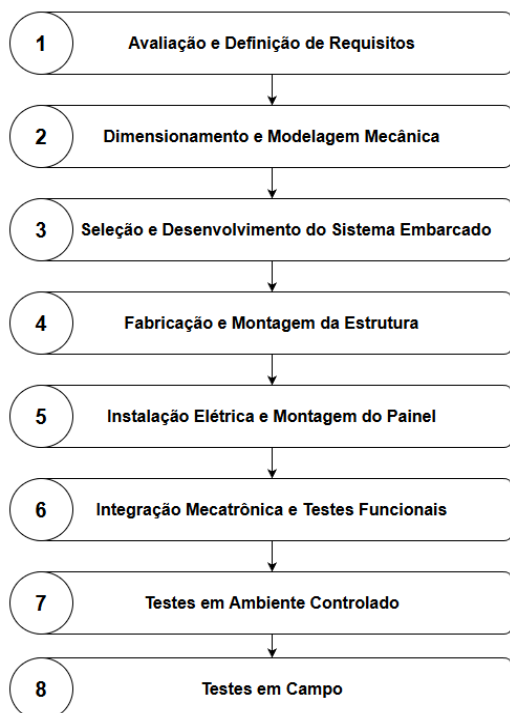


Fig. 1. Fluxograma da Metodologia.

### 1. Avaliação e Definição de Requisitos

O primeiro passo foi a revisão da literatura sobre olericultura, manejo de plantas daninhas e tecnologias habilitadoras, como a robótica móvel. Além disso, realizou-se uma pesquisa sobre projetos comerciais e acadêmicos desenvolvidos no meio agrícola para o controle de plantas daninhas. O objetivo nesta etapa foi definir os principais critérios do robô, como suas dimensões, sua estrutura e as ferramentas de controle a serem utilizadas, e o seu modo de movimentação.

### 2. Dimensionamento e Modelagem Mecânica

Foram determinados as configurações ideais, os materiais utilizados e o design do robô. A modelagem 3D foi realizada no *software* SolidWorks. Essa etapa teve como objetivo otimizar o processo de fabricação, e possibilitar a visualização detalhada do sistema.

### 3. Seleção e Desenvolvimento do Sistema Embarcado

Foram selecionados os componentes eletrônicos utilizados e elaborado o esquema elétrico implementado na estrutura do robô. Optou-se pela utilização de módulos eletrônicos comerciais, a fim de otimizar a instalação e o desenvolvimento do protótipo.

O *software* embarcado também foi desenvolvido, sendo responsável pela lógica de controle dos atuadores/motores e pela movimentação do robô conforme os comandos do usuário.

### 4. Fabricação e Montagem da Estrutura

A construção da estrutura mecânica (chassi) e dos componentes de acoplamento (suporte da ferramenta de capina) foi realizada com base na modelagem 3D previamente desenvolvida, utilizando o Laboratório de Automação da Manufatura (B03) do IFSC – Campus Criciúma, bem como suas ferramentas de usinagem e montagem.

Também foi necessário modificar algumas peças adquiridas comercialmente, como os tubos utilizados como eixos das rodas e as engrenagens, para garantir a montagem correta do sistema.

Após a finalização do processo de fabricação, realizou-se a montagem das peças mecânicas comerciais no chassi.

### 5. Instalação Elétrica e Montagem do Painel

A montagem do painel elétrico foi realizada de acordo com o esquema elétrico desenvolvido, com testes de tensão e conectividade sendo executados ao longo de todo o processo. Também foram adotados padrões de cores para facilitar a organização e futuras manutenções.

A instalação elétrica dos motores e do controle (*joystick*) teve como principal objetivo garantir a modularidade do sistema, permitindo o fácil desacoplamento por meio de conectores no painel elétrico.

### 6. Integração Mecatrônica e Testes Funcionais

Após a conclusão das etapas anteriores, foi realizada a integração de todos os sistemas, com a instalação da bateria, do painel elétrico e dos motores no chassi. Foram executados testes básicos de funcionamento com o robô em vazio, a fim de ajustar sua movimentação e corrigir possíveis falhas de instalação.

## 7. Testes em Ambiente Controlado

Antes da execução dos testes, elaborou-se um plano de experimento, descrevendo: objetivo, fatores e as variáveis de resposta e metodologia experimental.

Essa preparação facilitou a execução das etapas de testes. Além disso, os experimentos foram divididos entre aqueles realizados em laboratório e os realizados em campo.

Os testes em ambiente controlado foram conduzidos no terreno do Campus Criciúma, com o objetivo de avaliar os parâmetros operacionais do robô, como autonomia com e sem carga, carga máxima suportada e velocidade sem carga.

## 8. Teste em Campo

Em parceria com a Epagri, foram realizados os testes em campo com um produtor comercial situado em Içara – SC.

Assim, foram conduzidos testes para validar o protótipo em um ambiente real. Buscou-se avaliar a capacidade do robô de se deslocar em terrenos irregulares, executar a capina e verificar a eficiência e velocidade de operação.

### III. DESENVOLVIMENTO

Esta seção apresenta a implementação do protótipo funcional destinado a capina automatizada. Ao longo do texto, o equipamento é referido como robô, máquina ou protótipo, usados de forma equivalente. Descrevem-se aqui as etapas práticas de desenvolvimento e integração dos subsistemas.

#### 1. Avaliação e Definição de requisitos

Ao aplicar um maquinário para realizar a operação de controle de plantas daninhas é importante entender as dimensões recomendadas para os canteiros de hortaliças, pois estas influenciam nas dimensões que o robô deve possuir. A Figura 2 apresenta tais dimensões, que são: largura de 1 metro; comprimento que varia de acordo com o tamanho do espaço disponível para cultivo; altura mínima de 0,2 m e espaçamento de 0,5 m entre canteiros, para facilitar o manejo cultural [11].

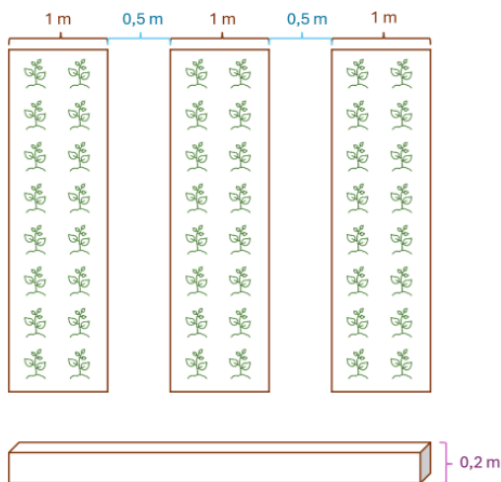


Fig. 2. Dimensões de um canteiro para hortaliças.

Outro aspecto importante a ser considerado é a disposição do cultivo, em que cada canteiro é composto por um determinado número de fileiras, existindo entre cada fileira um espaçamento por onde a ferramenta mecânica de capina deve passar, sem danificar a cultura.

Para realizar a capina, foi selecionada a enxada Madalena [8] (Fig. 3). Essa escolha justifica-se pelo seu mecanismo de funcionamento baseado na tração e arrasto sobre o solo,

diferindo das configurações de trabalho das ferramentas tradicionais.



Fig. 3. Enxada Madalena [7].

Adicionalmente, analisou-se a estrutura e a funcionalidade de robôs agrícolas existentes, como o “The Amiga” da Farming [5] e modelos acadêmicos como o SAVAGE [12] visando à modularidade e à adaptabilidade a pequenas propriedades, bem como à robustez da solução, necessária para a locomoção em terrenos irregulares.

A partir dessas definições, foram estabelecidos os seguintes requisitos:

- Estrutura modular;
- Tração 4x4;
- Dimensões adequadas para um canteiro padrão;

#### 2. Dimensionamento e Modelagem Mecânica

Após a definição dos requisitos do protótipo, foram desenvolvidos os modelos em 3 dimensões (3D) de todas as peças e componentes mecânicos. A seguir, são apresentadas as peças modeladas.

##### A. Estrutura principal

Para as estruturas do robô, foram utilizadas vigas em U, com dimensões de  $76,20 \times 38,05 \times 6,55$  mm, tendo como objetivo obter uma máquina robusta.

Outro ponto importante foi o desenvolvimento através de módulos, sendo que a máquina foi dividida em dois módulos: o módulo central — que constitui a base principal, no formato retangular, com dimensões de  $1700 \times 800$  mm (marrom) — e o segundo módulo (verde), composto pelos pés, onde as rodas foram acopladas. A conexão entre os dois módulos foi projetada para ser fixada com parafusos, permitindo a alteração de posição, ambos construídos com as vigas U.

A Figura 4 apresenta os dois módulos já acoplados, bem como alguns componentes comerciais, como rodas pneumáticas de 350 mm de diâmetro (aro 8”), mancais de flange ovalado (série UCFL) e motores de corrente contínua de 12 V com caixa de redução. A definição desses itens foi determinante para o dimensionamento final que resultou em  $1700 \times 950 \times 670$  mm.

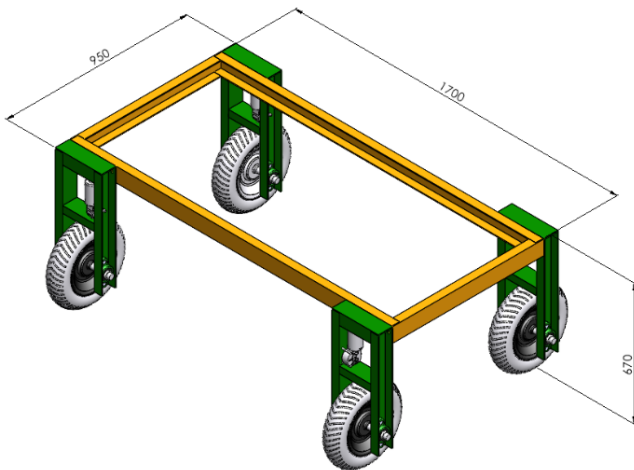


Fig. 4. Modelo 3D da estrutura do robô e suas dimensões

### B. Sistema de Transmissão

O sistema de transmissão, responsável por enviar o torque do motor às rodas de forma de modo a permitir o controle individual das quatro rodas, foi desenvolvido utilizando engrenagens e correntes. Nesse sistema, uma engrenagem foi acoplada ao motor e outra ao eixo da roda.

Para que o eixo movimentasse a roda, foi desenvolvido um suporte para realizar a conexão entre ambos, utilizando como base três parafusos M12 soldados a um eixo. Os parafusos laterais são encaixados nos furos da roda e fixados com porcas, enquanto o parafuso central atravessa um furo feito no eixo da roda, como pode ser observado na Figura 5.

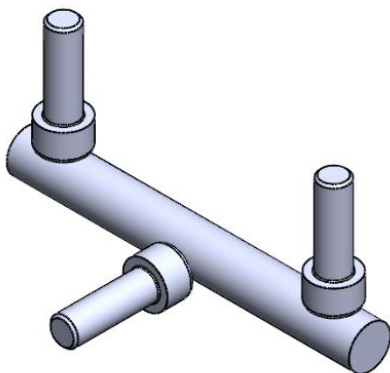


Fig. 5. Suporte de conexão entre o eixo e a roda

### C. Sistema para Realizar a Capina

Para acoplar a enxada à estrutura, foi necessário desenvolver um suporte que permitisse sua remoção e reposicionamento, alterando a altura, ângulo e distância da enxada até a base do robô. Por esse motivo, o suporte também foi projetado em duas partes: a primeira parte é acoplada ao chassi do robô por meio de pressão (grampos), enquanto a segunda é conectada à enxada Madalena. As duas partes são unidas por uma barra roscada e fixadas na posição desejada por meio de porcas.

A peça acoplada ao chassi foi construída utilizando três cantoneiras de dimensões 76,5 x 40 x 250 mm, unidas por solda. Nas duas cantoneiras posicionadas verticalmente foram feitos seis furos, permitindo o ajuste do posicionamento da segunda peça. Seu desenho pode ser observado na Figura 6.

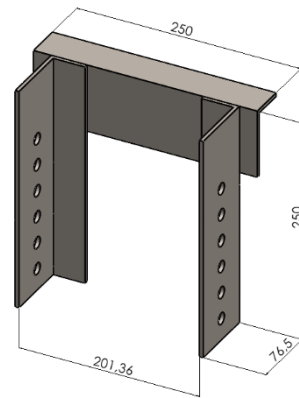


Fig. 6. Módulo 1 do suporte da enxada Madalena

A segunda peça (Figura 7), confeccionada em tubos de PVC com 20 mm de diâmetro, constitui uma estrutura de guia projetada para assegurar a linearidade do movimento e mitigar oscilações laterais. O conjunto é formado por duas hastes paralelas principais (A), contendo treze furos equidistantes ao longo de sua extensão para permitir ajustes de altura. A rigidez estrutural é garantida por dois elementos de conexão transversal: uma travessa intermediária (B) e uma travessa inferior (C). A partir do centro da base (C), estende-se um eixo único (D), dotado de furos de fixação, que serve como interface de acoplamento para a enxada Madalena.

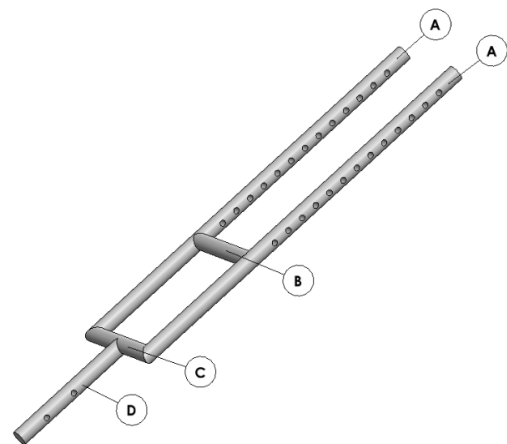


Fig. 7. Módulo 2 do suporte da enxada Madalena

As duas estruturas montadas podem ser visualizadas na Figura 8, já com a barra roscada conectando-as.

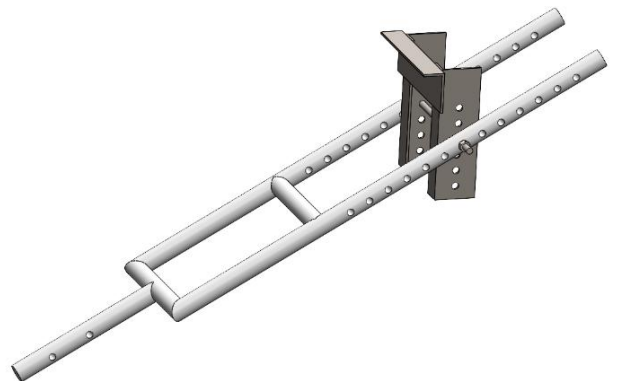


Fig. 8. Suporte para a enxada Madalena

### 3. Seleção e Desenvolvimento do Sistema Embarcado

Finalizados o desenvolvimento 3D das peças mecânicas, iniciou-se o desenvolvimento dos esquemas elétricos e do sistema embarcado.

#### A. Hardware Embarcado

O *hardware* do sistema embarcado, mostrado na Figura 9, foi composto por três partes: (1) Sistema de Alimentação; (2) Sistema de Controle; e (3) Sistema de Potência.

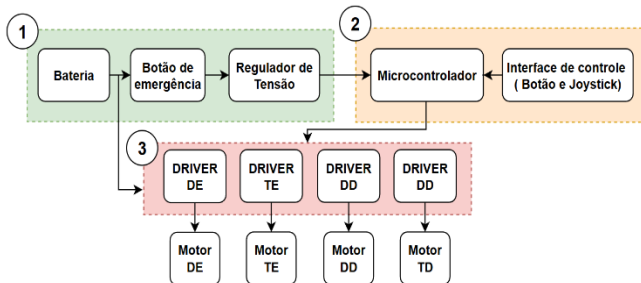


Fig. 9. Diagrama do projeto eletrônico (DE: Dianteiro Esquerdo; TE: Traseiro Esquerdo; DD: Dianteiro Direito; TD: Traseiro Direito).

O Sistema de Alimentação (1) fornece a tensão necessária para os *drivers* e para o microcontrolador, utilizando um regulador de tensão anterior a este. Como medida de proteção, foi adicionado um botão de emergência entre a bateria e o regulador de tensão, possibilitando o corte imediato da alimentação do microcontrolador.

O Sistema de Controle tem como função receber os comandos de entrada por meio das interfaces com o usuário, como o botão de acionamento e o *joystick* (Figura 10), que ao movimentá-lo o usuário define a direção desejada de movimento do robô conforme o acionamento dos fins de curso presente no mesmo.

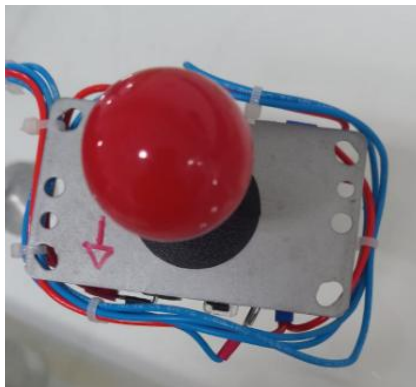


Fig. 10. *Joystick*

Esse sistema é responsável pelo envio de sinais de comando para cada driver. A velocidade de cada motor é ajustada em função da tensão média aplicada ao mesmo, controle realizado com o emprego de PWM. Definida a arquitetura geral, foi realizada a seleção dos componentes.

O microcontrolador ESP32 foi escolhido, primordialmente, devido à sua conectividade Wi-Fi nativa e à versatilidade em protocolos de comunicação. Tais características são estratégicas para viabilizar a aplicação de tecnologias de monitoramento remoto e IoT em trabalhos futuros. Para garantir o suprimento energético deste sistema de controle e dos atuadores, adotou-se uma bateria VRLA selada de 12V e 40Ah (marca SecPower, 11,4 kg). Essa fonte

alimenta também os motores CC empregados foram de 12V e 35W de potência, testes anteriores indicaram que o torque dos motores seria suficiente para a movimentação do robô.

O *driver* BTS7960 foi utilizado para o controle dos motores, selecionado por sua capacidade de suportar até 43 A (conforme o datasheet). Essa especificação adequa-se às necessidades dos motores, que podem atingir picos de 27 A cada. Por fim, definiu-se o módulo LM2596 para a regulação da tensão de alimentação.

#### B. Software Embarcado

O *software* foi desenvolvido na IDE Arduino, com foco na integração entre os comandos de entrada e a atuação dos motores. A lógica de controle foi estruturada por meio de funções correspondentes a cada tipo de movimentação do robô (frente, ré, esquerda e direita), acionadas conforme os sinais enviados pelos fins de curso do *joystick* ao ESP32.

Embora o microcontrolador ESP32 permita a geração de sinais PWM com resoluções superiores, optou-se pela configuração de 8 bits (escala de 0 a 255). Essa resolução mostrou-se suficiente para garantir a granularidade necessária ao controle de velocidade e à calibração individual dos motores, compensando as diferenças mecânicas do sistema.

O controle direcional foi implementado através de um sistema diferencial de velocidades. Para realizar curvas, aplica-se um ciclo de trabalho (PWM) superior nas rodas do lado externo à curva e inferior nas rodas do lado interno. Essa estratégia foi adotada em detrimento da inversão de rotação (giro no próprio eixo) para minimizar o arrasto lateral excessivo das rodas no solo, garantindo uma manobra mais suave e eficiente.

### 4. Fabricação e Montagem da Estrutura

Encerrada a elaboração dos modelos 3D e do projeto elétrico, iniciou-se a implementação prática dos sistemas, começando pela construção da estrutura mecânica conforme o modelo tridimensional.

#### A. Manufatura e Acabamento da estrutura

A estrutura mecânica foi construída utilizando os materiais previamente adquiridos. As vigas em U destinadas ao chassi e ao módulo dos pés passaram inicialmente pelos processos de corte e esquadrejamento, garantindo o alinhamento adequado para a montagem. Em seguida, os módulos foram unidos por soldagem.

Para as vigas que compõem o módulo dos pés, etapas adicionais foram realizadas, incluindo a furação para a fixação dos mancais e para o acoplamento do motor. A Figura 11 apresenta algumas etapas representativas desse processo: (a) vigas cortadas e preparadas; (b) viga lateral do módulo dos pés, já esquadrejada, polida e com os furos para o motor e mancais; (c) vigas superiores e centrais ajustadas, cortadas e polidas, prontas para a soldagem.

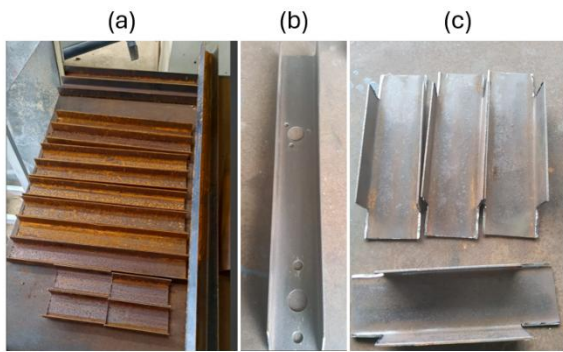


Fig. 11. Etapas de preparação das vigas em U para montagem do chassi e do módulo dos pés.

Após a soldagem, realizaram-se os acabamentos necessários, incluindo o desbaste das soldas para uniformização, a remoção de cantos vivos e a aplicação de uma base anticorrosiva na estrutura, a fim de garantir a durabilidade e a resistência do robô frente às intempéries e ao ambiente corrosivo do campo.

#### B. Ajuste das Peças Comerciais

Para viabilizar a montagem do sistema, foi necessário realizar ajustes em algumas peças comerciais.

Os eixos foram cortados, torneados e faceados, e as engrenagens — tanto as acopladas aos motores quanto as dos eixos — receberam furos e roscas para fixação adequada. Além disso, foi executado um desbaste no eixo do motor para permitir o acoplamento correto das engrenagens.

#### C. Fabricação do Suporte da Enxada

A ferramenta de acoplamento da enxada Madalena passou por processo de soldagem em suas duas partes (o acoplado ao chassi e o da enxada), além da realização dos furos M12 responsáveis por permitir os ajustes de posicionamento entre as partes.

#### D. Montagem da Estrutura Principal

Após a conclusão dos processos de manufatura, foi feita a montagem geral do sistema, inicialmente apenas com o chassi e seus componentes principais — roda, eixo, mancal, motor e engrenagem — conforme ilustrado na Figura 12.



Fig. 12. Estrutura final montada

### 5. Instalação Elétrica e Montagem do Painel

Após a finalização da construção mecânica, iniciou-se a montagem elétrica. A montagem do painel elétrico (Apêndice A) seguiu o projeto esquemático como visto na Figura 13.

Fig. 12. Esquemático Elétrico do projeto



Fig. 13. Painel elétrico montado

Na instalação elétrica, utilizaram-se conectores do tipo Mike GX12 para os motores e o *joystick* para evitar danos durante a operação, os cabos foram fixados à carcaça do robô, prevenindo movimentações excessivas ou desconexões acidentais.

### 6. Integração Mecatrônica e Testes Funcionais

Com a montagem mecânica e elétrica finalizadas, realizou-se a integração completa dos sistemas, resultando em um protótipo funcional de um robô agrícola

Os testes iniciais de funcionamento tiveram como objetivo ajustar e calibrar a movimentação do robô, além de corrigir possíveis falhas na instalação elétrica. Para a execução dos testes de funcionamento do robô, ele foi posicionado sobre uma bancada, e através do controle/*joystick* foi realizada a movimentação das rodas, conforme mostrado na Figura 14.



Fig. 14. Robô em estado de testes

#### A. Testes e aquisição de dados

Com o objetivo de avaliar o desempenho do protótipo, foram realizados testes em ambiente controlado e em campo,

abrangendo autonomia, capacidade de carga, velocidade e eficiência operacional.

O primeiro ensaio consistiu na autonomia sem carga, no qual o robô foi mantido em movimento contínuo, registrando-se tensão e corrente da bateria a cada dez minutos, em terrenos regular e irregular, para analisar a influência do solo no consumo energético.

Na sequência, foi executado o teste de carga máxima suportada, adicionando-se pesos gradualmente em incrementos de 20 kg, distribuídos sobre o chassi. Para cada carga, mediram-se correntes nominal e de pico, identificando o ponto em que o robô apresentava dificuldade de locomoção.

Com base nesse resultado, realizou-se o ensaio de autonomia com carga, aplicando aproximadamente 57% da carga máxima (150 kg). O robô foi mantido em operação contínua enquanto se registrava a tensão da bateria, permitindo avaliar a redução da autonomia sob esforço adicional.

O teste de velocidade de deslocamento foi conduzido em terreno regular, percorrendo 3 m e repetindo o procedimento três vezes para cálculo da velocidade média em movimento livre. Já o teste de velocidade da capina foi realizado em um percurso de 15 m sobre o canteiro, com a enxada acoplada, refletindo a condição prática de trabalho e permitindo comparação com o desempenho manual.

Para verificar a eficiência da capina, selecionou-se um canteiro de 50 m dividido em três quadrantes. Imagens foram registradas antes e após a passagem do robô, possibilitando a identificação das plantas removidas e o cálculo da eficiência percentual.

Por fim, foram avaliadas a locomoção em terreno irregular e a tentativa de cruzamento entre canteiros, verificando tração, estabilidade e robustez estrutural.

#### IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

##### 1. Robô agrícola

A consolidação das etapas de modelagem 3D, desenvolvimento eletrônico e programação embarcada resultou na construção de um protótipo mecatrônico plenamente funcional. A materialização do projeto permitiu validar a integração entre os subsistemas mecânicos e de controle, culminando em um robô agrícola capaz de operar em ambiente real de olericultura. A Figura 15 apresenta o protótipo finalizado, pronto para os testes de desempenho.



Fig. 15. Robo agrícola com a ferramenta de capina acoplada

#### 2. Testes de Desempenho e Robustez em Ambiente Controlado

##### A. Autonomia sem carga

O primeiro teste realizado após a integração completa do sistema foi o de autonomia, com o objetivo de determinar o tempo máximo de operação do protótipo sem carga. Para isso, foram definidos dois trajetos experimentais: um em terreno regular (liso) e outro em terreno com grama.

A bateria foi totalmente carregada até 13,06 V, e os instrumentos utilizados foram: multímetro Minipa ET-20428 para medição de tensão e alicate amperímetro Fluke 375 para medição de corrente. O tempo foi controlado por um cronômetro, programado para registrar leituras a cada 10 minutos.

O teste foi realizado por 150 minutos (2h30), e os resultados obtidos estão representados na Figura 16, juntamente com as funções ajustadas para a tensão em função do tempo:

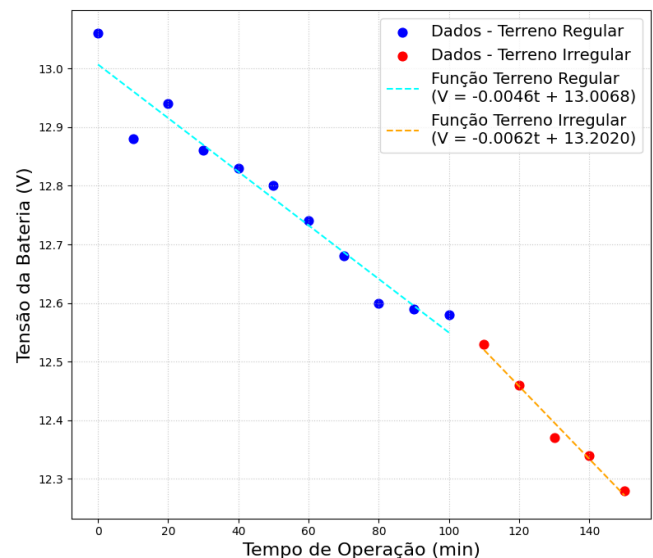


Fig. 16. Gráfico do tempo de operação versus tensão da bateria

$$V_{\text{regular}}(t) = -0,00457t + 13,0068 \quad (1)$$

$$V_{\text{irregular}}(t) = -0,00620t + 13,202 \quad (2)$$

A análise dos coeficientes angulares revela o impacto do esforço mecânico no consumo energético. Comparando-se as taxas de decaimento de tensão (0,00620 V/min contra 0,00457 V/min), conclui-se que a operação em terreno irregular resulta em uma redução de cerca de 26,3% na autonomia do equipamento em relação ao terreno regular.

Foi também calculado o consumo estimado, considerando quatro motores de 35 W e uma tensão nominal de 12V. A partir desses dados, obteve-se a função estimada de descarga da bateria (Equação 3):

$$V_{estimada}(t) = -0,01215 t + 13 \quad (3)$$

A Figura 17 compara as três funções de tensão (regular, irregular e estimada), assumindo 13 V como ponto inicial comum e 10,5 V como tensão de corte. Terreno regular: 547 minutos; Terreno irregular: 403 minutos; Valor teórico: 205 minutos.

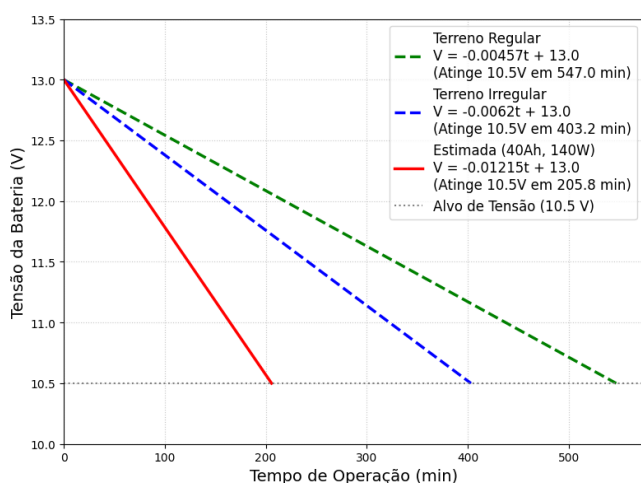


Fig. 17. Gráfico comparando as operações em diferentes terrenos com o estimado

A diferença entre o valor estimado e os valores experimentais decorre principalmente da programação do sistema em PWM individual por motor, o que reduz a potência média utilizada e prolonga a autonomia. Além disso, o modelo estimado considera operação contínua e linear, enquanto o teste real envolveu diferentes manobras (frente, ré, giros), que alteram o consumo.

### B. Carga máxima suportada

Para determinar a carga máxima suportada pelo robô, foram utilizadas anilhas de peso variando entre 1 kg e 20 kg. As medições de corrente nominal e de pico foram realizadas com um amperímetro, e o teste pode ser visto na Figura 18.

Durante o procedimento, os pesos foram distribuídos uniformemente sobre uma placa de MDF, posicionada sobre o chassi do robô.



Fig. 18. Preparação do teste de carga máxima

O teste iniciou-se com 60 kg de carga, aumentando gradualmente em incrementos de 20 kg. A Tabela 1 apresenta a relação entre o peso aplicado, a corrente nominal e a corrente de pico observada.

TABELA 1. RELAÇÃO ENTRE PESO E CORRENTE

PESO (kg)	CORRENTE DE PICO (A)	CORRENTE NOMINAL (A)
60	24,9	22,5
80	26,09	23,06
100	28,06	23,9
120	29,46	24,2
140	30,03	24,7
160	30,7	25,5
180	31,4	26,3
200	35,7	27,9
220	41,1	29,64
240	42,7	30,12
260	46,9	31,2

A carga máxima atingida foi de 260 kg, ponto em que o robô apresentou dificuldade para realizar curvas, embora ainda conseguisse se mover em linha reta. Nessa condição, foi registrada uma corrente de pico de 46 A, superior à corrente nominal da bateria (40 A), não sendo, portanto, recomendada a operação contínua nessa carga.

Esse resultado demonstra a robustez estrutural e mecânica do sistema, capaz de suportar mais de três vezes o seu próprio peso.

### C. Autonomia com carga

Para avaliar o tempo de operação com carga, utilizou-se aproximadamente 57% da carga máxima (cerca de 150 kg), com base nos resultados do teste anterior e no comportamento observado durante a movimentação.

O teste resultou na reta de regressão mostrada na Figura 19, descrita pela Equação 4. A bateria iniciou o teste com 12,57 V.

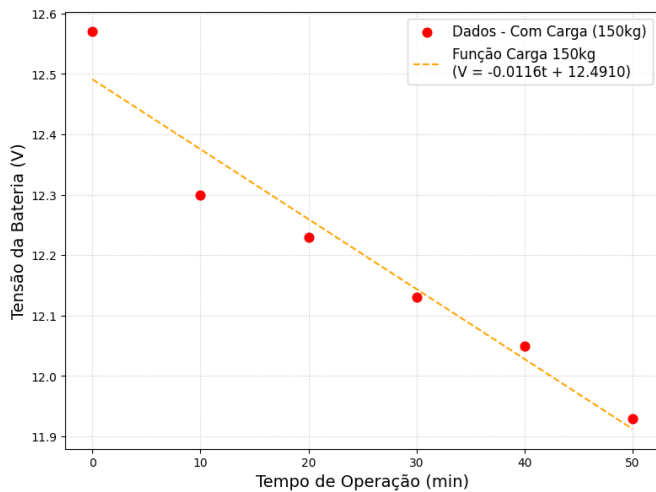


Fig. 19. Relação do tempo de operação com a tensão da bateria com carga

$$V_{\text{carga}}(t) = -0,0116 t + 12,49 \quad (4)$$

A Figura 20 apresenta a comparação entre o teste com carga (linha vermelha) e sem carga (linha azul tracejada).

Observa-se que a inclinação da curva com carga é 2,38 vezes maior, demonstrando que o aumento de peso acelera significativamente a descarga da bateria.

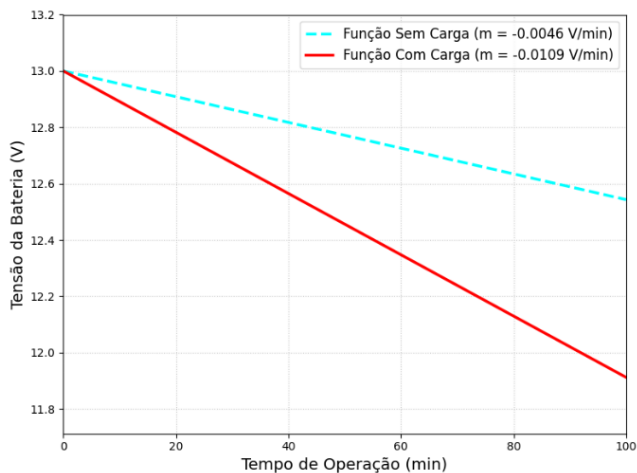


Fig. 20. Comparação entre a função sem carga e a com carga

#### D. Velocidade de operação

O teste de velocidade de deslocamento foi conduzido em terreno regular, utilizando uma trena para medição da distância (3 m) e cones de sinalização para marcar os pontos inicial e final, conforme mostrado na Figura 21.



Fig. 21. Preparação para o teste de velocidade

Foram realizadas três repetições, e a Tabela 2 apresenta os resultados obtidos, com velocidade média de 0,24 m/s.

Esse valor é considerado adequado para a aplicação proposta, uma vez que o foco do robô é a execução de tarefas agrícolas de precisão, e não a velocidade de deslocamento.

TABELA 2. TABELA DE RESULTADOS DA VELOCIDADE

RUN	DISTÂNCIA (m)	TEMPO (s)	VELOCIDADE (m/s)
1	3	13,41	0,22
2	3	12,62	0,24
3	3	12,88	0,23

Contudo, ressalta-se que essa medição foi realizada em terreno regular, sendo necessária a análise da velocidade durante a operação de capina.

### 3. Validação no Manejo de Plantas Invasoras

#### A. Locomoção no terreno irregular

Os testes em campo foram iniciados com a locomoção em estrada de terra, contendo buracos, pedras, mato, lama e entre o canteiro, como mostra a Figura 22.

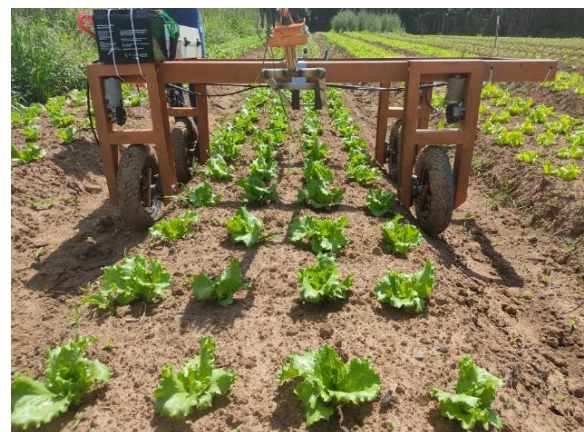


Fig. 22. Robô posicionado em um canteiro de alface

O robô apresentou boa tração nas quatro rodas e capacidade de movimentação estável, sem perda de controle, confirmando sua robustez para ambientes agrícolas irregulares.

### B. Desempenho da capina

Para avaliar a eficiência da capina, foi selecionado um canteiro de alface de 50 m, dividido em três quadrantes, cada um contendo 3 colunas e 4 linhas de plantas, resultando em 3 espaçamentos por quadrante. O processo é ilustrado na Figura 23, que destaca a região onde foi realizada a capina.



Fig. 23. Espaçamento analisado

Durante o teste, observou-se que a operação se tornou mais eficiente removendo o rotor da enxada Madalena, mantendo apenas a lâmina (Figura 24). Com esse ajuste, iniciou-se a operação de capina.



Fig. 24. Processo de capina sendo realizado

Após a execução, foram tiradas novas fotos de cada quadrante, marcando as plantas daninhas remanescentes em círculos vermelhos (Figura 25).

ANTES

DEPOIS



Fig. 25. Comparação dos três quadrante antes da capina e depois da capina

Foram identificadas 7 plantas daninhas antes da capina e apenas 1 após, localizada próxima à borda do percurso da lâmina. Assim, o sistema apresentou eficiência de 85% na remoção das plantas indesejadas.

### C. Velocidade da capina

O teste de velocidade da capina foi realizado em um trajeto de 15 metros, utilizando um cronômetro para marcação do tempo. O robô completou o percurso em 49,3 segundos, resultando em uma velocidade média de 0,3 m/s.

Esse valor foi superior ao obtido no teste de velocidade sem carga realizado no campus (subtítulo 4.1), principalmente porque as rodas permaneceram nas laterais do canteiro, permitindo trajetória linear e estável.

Ao comparar o desempenho do protótipo com o da capina manual, observa-se que um operador leva cerca de 40 minutos para capinar um canteiro de 50 m. O mesmo trabalho seria realizado em aproximadamente 6 minutos com uma enxada Madalena acoplada ao robô, e em 2 minutos caso fossem utilizadas três lâminas simultâneas, o que representa uma redução de 95% no tempo de trabalho, além de minimizar problemas ergonômicos.

### D. Cruzamento entre canteiros

Foi realizado um teste de cruzamento entre canteiros, mas, devido à altura de 20 cm deles, o robô não conseguiu transpor os canteiros.

Ainda assim, o teste evidenciou a resistência estrutural do equipamento, pois mesmo sob esforço contínuo o robô não capotou nem apresentou danos.

Cabe destacar que essa função não é necessária para a operação agrícola, uma vez que não se espera que o robô precise cruzar os canteiros durante sua rotina de trabalho.

## V. CONCLUSÕES E HIPÓTESES PARA TRABALHOS FUTUROS

O protótipo desenvolvido foi validado tanto em laboratório quanto em campo, apresentando resultados satisfatórios, especialmente em relação ao tempo de operação — sendo capaz de funcionar por cerca de 40 minutos com uma carga correspondente a 57% de sua capacidade máxima.

Outro aspecto relevante foi o teste em campo, que demonstrou a eficiência do sistema na execução da função de capina, atingindo 85% de remoção da vegetação indesejada. Além disso, o robô proporcionou uma redução de 95% no tempo de trabalho quando comparado ao processo manual realizado por um operador humano.

Esses resultados evidenciam o potencial do robô em contribuir para a rotina do pequeno agricultor, oferecendo melhor qualidade de vida, aumento de produtividade e maior eficiência operacional.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de outros tipos de implementos agrícolas, visto que o robô foi projetado com estrutura modular e de uso genérico, o que possibilita a adaptação de diferentes ferramentas — inclusive a utilização como robô de transporte de carga.

Recomenda-se também a realização de testes com motores de maior potência, com o intuito de aumentar a capacidade de tração, a carga máxima suportada e o desempenho em curvas fechadas.

Além disso, propõe-se o aprimoramento da estrutura mecânica, incluindo a instalação de proteções nas entradas dos eixos e nas regiões das engrenagens localizadas nas vigas em U, bem como o desenvolvimento de suportes específicos para a bateria e o painel de controle, garantindo maior segurança e durabilidade dos sistemas.

Por fim, sugere-se a realização de uma análise econômica detalhada, comparando o custo de produção e manutenção do robô com os custos da mão de obra manual e de outros equipamentos. Esse estudo é fundamental para quantificar o retorno sobre o investimento e validar financeiramente a viabilidade comercial da solução para o contexto da agricultura familiar.

## AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pelo Edital 07/2025/COPPI/CRI - Programa de Apoio à Pesquisa do Câmpus Criciúma. Agradecemos ao IFSC pelo financiamento deste projeto.

Também agradecemos a EPAGRI de Içara pelo apoio na realização dos testes deste projeto, permitindo a conexão com um agricultor local para validar o protótipo desenvolvido.

## REFERENCIAS

[1] BELLÉ, Diogo. Adoção de inovação tecnológica no cultivo de hortaliças em sistema plantio direto na agricultura familiar. masterThesis—[S.l.]: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 20 set. 2021.

[2] BIFFE, Denis Fernando; OLIVEIRA JUNIOR, Rubem Silvério (Orgs.). Fundamentos e aplicações do manejo de plantas daninhas. 1. ed. Maringá: EDUEM, 2018. p. 339–355.

[3] CONTAG. Anuário Estatístico da Agricultura Familiar – 2024 / Ano 3. Brasília: Contag, jul. 2024. Disponível em: <<https://www2.contag.org.br/documentos/pdf/184592234957-anua%CC%81rio-agricultura-2024.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2025.

[4] COSTA, Edilson et al. Produção de hortaliças para agricultura familiar. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2015.

[5] FARM-NG. farm-ng: Robotics for Sustainable Agriculture. 2025. Disponível em: <<https://farm-ng.com>>. Acesso em: 02 fev. 2025.

[6] HACKENHAAR, Neusa Maria; HACKENHAAR, Celso; ABREU, Yolanda Vieira de. Robótica na agricultura. Interações (Campo Grande), v. 16, p. 119–129, 2015.

[7] IBGE. Atlas do espaço rural brasileiro. 2. ed. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2020.

[8] KNAPIK. Enxada Madalena. Disponível em: <[https://www.knapik.com.br/produto/427-enxadamadalena?srsId%3DAfmBOorhdTPBtCcs4\\_yon6QVICqm\\_qwF403rF9Ne2cOc0K\\_WNSfINDmvC](https://www.knapik.com.br/produto/427-enxadamadalena?srsId%3DAfmBOorhdTPBtCcs4_yon6QVICqm_qwF403rF9Ne2cOc0K_WNSfINDmvC)>. Acesso em: 10 jun. 2025.

[9] NASCIMENTO, Warley Marcos. Artigo - A Cadeia Produtiva de Hortaliças e o Valor Bruto da Produção. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/noticia/78089493/artigo---a-cadeia-produtiva-de-hortaliças-e-o-valor-bruto-daproducao>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

[10] PEREIRA, Caroline Nascimento; CASTRO, César Nunes De. Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural. p. 74, 6 maio 2022.

[11] PUIATTI, Mario. Olericultura: A arte de cultivar hortaliças. Viçosa, MG: UFV, 2019. v. 40.

[12] TABILE, Rubens Andre. Desenvolvimento de uma plataforma robótica modular e multifuncional para aquisição de dados em agricultura de precisão. Tese de Doutorado—São Carlos: Universidade de São Paulo, 20

# APÊNDICES

## Apêndice A – Esquemático elétrico do robô

