



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FRANCISCO ARLEN GOMES DA ROCHA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MECANISMO AGRÍCOLA DE TRAÇÃO POR
ESTEIRAS**

FORTALEZA
2025

FRANCISCO ARLEN GOMES DA ROCHA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MECANISMO AGRÍCOLA DE TRAÇÃO POR
ESTEIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Agronomia do Centro de ciências agrárias da Universidade Federal do Ceará, como requisito para à obtenção do título de bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R573p Rocha, Francisco Arlen Gomes da.
Projeto e construção de um mecanismo agrícola de tração por esteiras / Francisco Arlen Gomes da Rocha. –
2025.
53 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências
Agrárias, Curso de Agronomia, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro.

1. Automação agrícola. 2. Tração mecanizada. 3. Eletrônica embarcada. I. Título.

CDD 630

FRANCISCO ARLEN GOMES DA ROCHA

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MECANISMO AGRÍCOLA DE TRAÇÃO POR
ESTEIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Agronomia do
Centro de ciências agrárias da Universidade
Federal do Ceará, como requisito para à
obtenção do título de bacharel em Agronomia.

Aprovada em: 25/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro (Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Viviane Castro Dos Santos

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Mestra Mayara Rodrigues Uchôa

Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR)

A Deus.

Aos meus pais, Eliene e Alan

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder o dom da vida, pela força nas horas de desafio e pela luz nos momentos de dúvida.

À minha base, meus pais, Francisca Eliene e Francisco Alan, que, com imenso esforço e dedicação, abriram caminhos para que este sonho se tornasse possível. Todo o sacrifício e apoio oferecidos foram fundamentais.

A Rosany Nojosa, minha companheira e amiga, agradeço profundamente pela paciência, carinho e compreensão em meio às exigências dessa caminhada. Saber que posso contar com você não só nos momentos leves, mas especialmente quando a vida exige demais é um presente que carrego no peito.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro, deixo meu sincero reconhecimento pela orientação cuidadosa, pela confiança no meu trabalho e pelas observações que tanto contribuíram para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também aos professores da banca examinadora, pelas valiosas contribuições e por dedicarem seu tempo para avaliar e enriquecer este trabalho.

Estendo minha gratidão a todos os docentes que participaram da minha formação acadêmica. Cada aula, conselho e desafio foram parte importante da minha trajetória.

Ao José Arlison, meu irmão de caminhada, agradeço por estar comigo em todas as fases, nas dúvidas, nas ideias malucas, nas brincadeiras e nos silêncios também. É um privilégio dividir contigo cada passo dessa jornada e uma honra poder chamar de irmão alguém com quem compartilho não só os desafios, mas também os sonhos.

Agradeço aos meus amigos Adson de Souza, Jailson Jeferson, Joyce Duarte, Marcos Ferreira e Orleans Cardoso por acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que eu mesmo duvidei. Sou imensamente grato por ter amigos tão presentes e inspiradores ao meu lado.

Aos meus amigos universitários, Francisco Walisson, Gabriel José, Jonatas Coelho e Leonardo pelo apoio, incentivo e ajuda. Fizeram toda a diferença.

Aos meus colegas de laboratório, Guilherme e João, muito obrigado pela ajuda significativa no desenvolvimento deste projeto.

Por fim, agradeço aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, assim como à equipe da Coordenação, pela prontidão e suporte diário.

A cada um que, de alguma forma, fez parte dessa jornada, deixo aqui minha mais sincera gratidão.

“A engenharia é a aplicação criativa de princípios científicos para projetar soluções que atendam às necessidades humanas.”
(PETROSKI, 1992, p. 5)”

RESUMO

Com a crescente demanda por soluções eficientes no campo, a automação agrícola tem se tornado essencial para aumentar a produtividade e reduzir a dependência da mão de obra. Entre os principais desafios técnicos enfrentados nesse processo, destaca-se o sistema de tração, especialmente em terrenos irregulares ou com baixa coesão. Mecanismos de tração por esteiras têm se mostrado vantajosos por proporcionarem maior estabilidade, tração e menor compactação do solo. Diante desse cenário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um mecanismo de tração por esteiras voltado para aplicações agrícolas, acessível, de fácil replicação e viabilidade de aplicação em sistemas automatizados. O projeto foi desenvolvido em três etapas: (1) projeto informacional, com levantamento de requisitos técnicos e funcionais; (2) projeto conceitual, com geração e análise de alternativas; e (3) projeto detalhado, com modelagem tridimensional, seleção de materiais e definição dos processos de fabricação e montagem. O mecanismo construído apresenta chassi em aço carbono, componentes estruturais impressos em PLA, sistema de transmissão acionado por motor de passo e controle eletrônico com microcontrolador Arduino. A operação é realizada via dispositivo móvel, com comandos *G-code*, através do *software Universal G-code Sender (UGS)*. O mecanismo obteve velocidade máxima de deslocamento de $0,172 \text{ m/s}^{-1}$.

Palavras-chaves: automação agrícola; impressão 3D; tração mecanizada; eletrônica embarcada.

ABSTRACT

With the increasing demand for efficient solutions in agriculture, automation has become essential to enhance productivity and reduce labor dependency. Among the main technical challenges in this process, the traction system stands out, especially on uneven or low-cohesion terrains. Track-based traction mechanisms have proven advantageous by providing greater stability, traction, and reduced soil compaction. Given this scenario, this work presents the development of a track-based traction mechanism for agricultural applications, designed to be affordable, easily replicable, and suitable for automated systems. The project was developed in three stages: (1) informational design, involving technical and functional requirements; (2) conceptual design, with the generation and analysis of alternatives; and (3) detailed design, including 3D modeling, material selection, and manufacturing and assembly processes. The constructed mechanism features a carbon steel chassis, PLA-printed structural components, a stepper motor-driven transmission system, and electronic control via an Arduino microcontroller. Operation is conducted through a mobile device using G-code commands via Universal G-code Sender (UGS) software. The mechanism achieved a maximum displacement speed of 0.172 m/s.

Keywords: agricultural automation; 3D printing; mechanized traction; embedded electronics.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 1 | – Mecanismo de esteira..... | 21 |
| Figura 2 | – Placa Arduino..... | 23 |
| Figura 3 | – Equipamentos utilizados, esmerilhadeira (À esquerda) e furadeira (À direita) | 28 |
| Figura 4 | – Impressora 3D utilizada para construção de componentes..... | 28 |
| Figura 5 | – Perfis de alumínio em formato “U” utilizado para a construção da esteira. | 29 |
| Figura 6 | – Motor de passo NEMA 23..... | 30 |
| Figura 7 | – A :Coroa dentada (32 dentes), B: Corrente metálica, C: Eixo inox D: Mancal..... | 30 |
| Figura 8 | – Microcontrolador Arduino (À esquerda) e Shield (À direita) | 31 |
| Figura 9 | – Drive DM556..... | 31 |
| Figura 10 | – Bateria de íons de lítio 48V (MOXCELL) utilizada para alimentação do sistema..... | 32 |
| Figura 11 | – Universl G-code sender versão 2.1.13..... | 32 |
| Figura 12 | – Vista explodida de uma esteira..... | 38 |
| Figura 13 | – Vista do mecanismo montado..... | 38 |
| Figura 14 | – Processo de montagem do chassi..... | 39 |
| Figura 15 | – Fabricação de componentes por impressão em 3D..... | 40 |
| Figura 16 | – Eixo do motor com acoplamento e engrenagem sem fim. (À esquerda), eixo montado ao sistema sob guias e limitadores (À direita) | 41 |
| Figura 17 | – Eixo com componente quadrado..... | 41 |
| Figura 18 | – Sistema de transmissão lubrificado com graxa..... | 42 |
| Figura 19 | – Correntes e coroas montados..... | 42 |
| Figura 20 | – Furações dos perfis de alumínio | 43 |
| Figura 21 | – Montagem da estrutura da esteira..... | 44 |
| Figura 22 | – Montagem dos tensionadores..... | 44 |
| Figura 23 | – Interface do software UGS..... | 45 |
| Figura 24 | – QR Code permitindo acesso ao dispositivo móvel..... | 46 |
| Figura 25 | – 1; Notebook, 2; Arduino + Shield, 3; Driver, 4; Motor de passo, 5; Bateria 48V..... | 47 |

| | | |
|-----------|---|---|
| Figura 26 | – | Configuração utilizada no UGS..... |
| Figura 27 | – | Mecanismo montado..... |
| Figura 28 | – | Imagens do vídeo de deslocamento de um lado da esteira..... |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|----------|--|----|
| Quadro 1 | – Matriz morfológica contendo as soluções e subfunções do mecanismo..... | 35 |
|----------|--|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Configuração utilizada no software de impressão..... | 29 |
| Tabela 2 – Lista de requisitos estabelecida para orientar o desenvolvimento, e os parâmetros técnicos envolvidos..... | 34 |
| Tabela 3 – Critérios utilizados nesse processo de avaliação e seus respectivos pesos.. | 36 |
| Tabela 4 – Solução selecionada no projeto conceitual..... | 37 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| 3D | Três Dimensões |
| CAD | Computer-Aided Design (Desenho Assistido por Computador) |
| CNC | Comando Numérico Computadorizado |
| DM | Driver de Motor |
| ESP32 | Placa de Microcontrolador com conectividade Wi-Fi e Bluetooth |
| G-code | Código de Comando para Controle de Máquinas CNC |
| IA | Inteligência Artificial |
| IoT | Internet das Coisas |
| PLA | Ácido Polilático (Polímero utilizado na Impressão 3D) |
| LAGRO | Laboratório de Robótica e Automação Agrícola |
| PRH | Programa de Recursos Humanos |
| RPM | Rotações Por Minuto |
| UFC | Universidade Federal do Ceará |
| UGS | Universal G-code Sender (Software para envio de comandos G-code) |
| USB | Universal Serial Bus |
| VAA | Veículos autônomos agrícolas |
| Wi-Fi | Wireless Fidelity (Rede de comunicação sem fio) |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 2 | OBJETIVOS | 17 |
| 2.1 | Objetivos Geral | 17 |
| 2.2 | Objetivos Específicos | 17 |
| 3 | REVISÃO DE LITERATURA | 18 |
| 3.1 | Automação agrícola e eletrônica embarcada | 19 |
| 3.2 | Mecanismo Tracionado por Esteiras | 20 |
| 3.3 | Atuadores | 21 |
| 3.4 | Microcontrolador Arduino | 22 |
| 3.5 | Impressão 3D | 23 |
| 3.6 | Comando Numérico Computadorizado (CNC) e código g | 24 |
| 3.6.1 | <i>Linguagem G e o Controle por Código</i> | 25 |
| 4 | MATERIAL E MÉTODOS | 26 |
| 4.1 | Planejamento e esclarecimento da tarefa | 26 |
| 4.1.1 | <i>Projeto Conceitual</i> | 26 |
| 4.1.2 | <i>Projeto detalhado</i> | 27 |
| 5 | Matérias utilizados para a construção e montagem | 27 |
| 5.1 | Processamento de corte e furação | 27 |
| 5.1.1 | <i>Produção de Componentes por Impressão 3D</i> | 28 |
| 5.2 | Estrutura da esteira e acionamento | 29 |
| 5.3 | Sistema de transmissão | 30 |
| 5.4 | Sistema de automatização, alimentação e comunicação | 31 |
| 5.5 | Avaliação do mecanismo | 33 |
| 5.5.1 | <i>Velocidade máxima de deslocamento</i> | 33 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 34 |
| 6.1 | Projeto informacional | 34 |
| 6.2 | Projeto conceitual | 35 |
| 6.3 | Projeto Detalhado | 37 |
| 6.4 | Construção e Montagem do Mecanismo | 39 |
| 6.4.1 | <i>Construção do Chassi</i> | 39 |
| 6.4.2 | <i>Peças fabricadas em impressora 3D</i> | 40 |

| | | |
|-------|---|----|
| 6.4.3 | <i>Montagem do Sistema de transmissão</i> | 40 |
| 6.4.4 | <i>Construção da esteira</i> | 43 |
| 6.4.5 | <i>Tensionador de corrente</i> | 44 |
| 6.4.6 | <i>Sistema de controle e Montagem do Sistema Eletrônico</i> | 45 |
| 6.4.7 | <i>Funcionamento com comandos G</i> | 47 |
| 6.4.8 | <i>Resultado da montagem e construção</i> | 49 |
| 6.5 | <i>Avaliação do mecanismo</i> | 50 |
| 6.5.1 | <i>Velocidade máxima de deslocamento</i> | 50 |
| 7 | CONCLUSÃO | 51 |
| 8 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 52 |
| | REFERÊNCIAS | 53 |

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades mais antigas e fundamentais para a sobrevivência humana (Mialhe, 1974). Com o passar dos séculos, e especialmente nas últimas décadas, o setor agrícola passou por transformações profundas impulsionadas pelos avanços tecnológicos. Ferramentas e máquinas antes inexistentes tornaram-se indispensáveis. O trator, por exemplo, consolidou-se como um dos principais equipamentos da agricultura moderna, sendo amplamente utilizado em diversas etapas do processo produtivo (Santos *et al.*, 2014). Paralelamente, a crescente demanda por alimentos e a pressão por uma produção mais eficiente e sustentável fomentaram o desenvolvimento de tecnologias emergentes, como a robótica, a automação, a inteligência artificial (IA) e a Internet das Coisas (IoT).

Essas inovações integram o que se convencionou chamar de agricultura de precisão, cuja proposta é otimizar o uso dos recursos naturais, minimizar perdas e maximizar a produtividade. Robôs autônomos, por exemplo, vêm sendo projetados para executar atividades como semeadura, colheita, pulverização, monitoramento e manejo de culturas, com maior eficiência e menor dependência de mão de obra humana. Além disso, sistemas automatizados possibilitam a coleta e a análise de dados em tempo real, promovendo uma gestão mais estratégica e embasada das lavouras.

Contudo, o ambiente agrícola impõe desafios significativos à adoção dessas tecnologias, principalmente no que se refere à mobilidade de máquinas em terrenos com características adversas. Solos irregulares, presença de obstáculos naturais, inclinações e variações de umidade exigem sistemas de tração robustos e adaptáveis. Nesse cenário, mecanismos baseados em esteiras têm se mostrado mais eficazes do que os sistemas tradicionais com pneus, oferecendo maior tração, estabilidade e menor compactação do solo.

Além dos desafios técnicos, há também questões relacionadas ao custo e à acessibilidade dessas soluções, especialmente no contexto da agricultura familiar e de pequenas propriedades. Diante disso, o desenvolvimento de equipamentos alternativos, adaptados à realidade do campo brasileiro, torna-se não apenas desejável, mas necessário.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Geral

Projetar, construir e avaliar um mecanismo de tração do tipo esteira destinado a aplicações agrícolas.

2.2 Objetivos Específicos

Desenvolvimento do projeto Informativo, Projeto Conceitual e o Projeto Detalhado;

Construção e montagem do mecanismo de tracionado por esteira;

Manufaturar as peças necessárias utilizando impressão 3D;

Verificação da comunicação entre o mecanismo e um dispositivo móvel;

Determinação da velocidade máxima de deslocamento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A agricultura é de suma importância para a economia mundial, sendo a base da alimentação humana e fornecendo matéria-prima à agroindústria, à indústria química e à indústria alimentícia (Fernandes *et al.*, 2008). No entanto, a produção agrícola está diretamente condicionada às variações climáticas e às fases de desenvolvimento das culturas, sendo organizada em operações agrícolas sucessivas, como preparo do solo, plantio, tratos culturais e colheita (Pacheco, 2000). De acordo com Klaver (2013), a mecanização agrícola está presente em todas essas etapas, promovendo ganhos de produtividade e eficiência.

Inicialmente, essas operações eram realizadas predominantemente de forma manual, sendo viáveis apenas em pequenas propriedades voltadas à subsistência. Com o crescimento populacional e a redução da mão de obra rural, especialmente nas regiões urbanizadas, a mecanização passou a ser essencial para garantir o aumento da produção de alimentos (Garcia, 1998). Segundo Balastreire (1990), a mecanização consiste no uso de máquinas para substituir ou complementar o trabalho humano ou animal, devendo ser implementada de forma técnica e economicamente organizada para garantir o melhor rendimento com menor custo e esforço.

No Brasil, esse processo de modernização agrícola ganhou força a partir da década de 1950, com a importação de tecnologias e, posteriormente, com a produção interna de tratores e implementos agrícolas (Teixeira, 2005). A expansão de novas fronteiras agrícolas e o crescimento da produção de grãos intensificaram o uso de máquinas, impactando diretamente o setor econômico e tornando a mecanização um dos principais fatores de produção, superado apenas pela posse da terra (Salvador *et al.*, 2009; Milan, 2004).

Nas últimas décadas, a crescente demanda por alimentos e a necessidade de sustentabilidade têm impulsionado a adoção de tecnologias mais avançadas no campo. A robótica agrícola, segundo Hackenhaar *et al.* (2015), tem se destacado como uma das inovações mais promissoras, com o desenvolvimento de veículos autônomos agrícolas (VAA) capazes de realizar operações como semeadura, pulverização, colheita e monitoramento ambiental com mínima intervenção humana.

Esses veículos, baseados em sensores, câmeras, microcontroladores e softwares embarcados, representam um salto significativo na agricultura de precisão. Segundo Roshanianfard *et al.* (2020) e Alberto-Rodríguez *et al.* (2020), os VAA proporcionam maior produtividade, redução de custos e maior segurança operacional, ao mesmo tempo em que reduzem os erros humanos. A robótica agrícola, portanto, passa a integrar *hardware* e *software* inteligentes que ampliam a eficiência do processo produtivo.

Contudo, como alertam Van der Burg *et al.* (2019), é essencial que a adoção dessas tecnologias considere questões éticas e sociais, como o acesso equitativo às inovações, a gestão dos dados coletados em campo e a adequação às diferentes realidades da agricultura, principalmente da agricultura familiar.

3.1 Automação agrícola e eletrônica embarcada

A automação agrícola tem se consolidado como um pilar fundamental para a modernização e sustentabilidade do setor agropecuário. A inovação tecnológica é hoje um dos principais motores do desenvolvimento econômico e do aumento da produtividade no campo. Segundo Bassoi *et al.* (2019), a capacidade de inovar se tornou decisiva para garantir a competitividade no mercado global, sendo particularmente relevante na agricultura, onde novas tecnologias têm possibilitado ganhos significativos com sustentabilidade.

A automação no meio rural já é uma realidade concreta, abrangendo todas as etapas dos sistemas produtivos, como preparo do solo, plantio, colheita, tratos culturais e processamento. Seu principal objetivo é aumentar a produtividade, otimizar o uso do tempo, insumos e capital, reduzir perdas, melhorar a qualidade dos produtos e proporcionar melhores condições de trabalho no campo (Bassoi *et al.*, 2019). Apesar dos avanços, a agricultura familiar ainda absorve pouco dessas tecnologias, o que representa uma lacuna importante a ser superada (EMBRAPA, 2018).

Nesse cenário, a automação de máquinas e implementos agrícolas tem avançado significativamente. De acordo com Sousa, Lopes e Inamasu (2014), a adoção da eletrônica embarcada composta por sensores, atuadores, microcontroladores e sistemas de comunicação permite que as operações agrícolas sejam monitoradas e controladas em tempo real. Isso inclui o controle de implementos durante o plantio, pulverização, adubação e colheita, resultando em maior precisão e menor desperdício de insumos.

A agricultura de precisão, conforme definido pela Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP), é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial e temporal da unidade produtiva. Seu objetivo é maximizar o retorno econômico, garantir a sustentabilidade e reduzir os impactos ambientais. Para isso, a adoção de tecnologias digitais e automação é indispensável (Steinberger *et al.*, 2009).

3.2 Mecanismo Tractionado por Esteiras

A escolha do sistema de tração em mecanismos móveis está diretamente relacionada ao ambiente em que o equipamento irá operar. De acordo com Siegart, Nourbakhsh e Scaramuzza (2011), mecanismos terrestres podem empregar rodas ou esteiras, sendo que os modelos com rodas apresentam construção mais simples e baixo custo, porém são menos eficazes em terrenos com baixa aderência. Em contrapartida, os sistemas de tração por esteiras proporcionam maior contato com o solo, oferecendo melhor tração e estabilidade, especialmente em superfícies irregulares, lamacentas ou arenosas, como as encontradas em áreas agrícolas. Apesar das desvantagens mecânicas, como maior complexidade construtiva e atrito lateral, as esteiras têm se mostrado uma alternativa eficaz para ambientes desafiadores.

Complementando essa visão, Mourya *et al.* (2020) destacam que as esteiras apresentam menor índice de escorregamento em comparação aos pneus, mantendo desempenho estável mesmo em terrenos irregulares. Embora demandem maior torque e consumo energético, sua aderência superior compensa essas desvantagens, especialmente em aplicações que exigem tração constante e controle preciso.

Além disso, estudos específicos com tratores agrícolas reforçam as vantagens dos sistemas de esteiras em aplicações agrícolas. Segundo Packter (1990), tratores de esteiras são preferíveis para operações que exigem esforços acima de 3.000 kg e velocidades inferiores a 8 km/h, devido à sua maior eficiência de tração, robustez e adaptabilidade ao terreno. Esses tratores são projetados para suportar longos períodos de trabalho, podendo atingir até 20.000 horas de vida útil, e oferecem menor compactação do solo um fator importante para a sustentabilidade agrícola. (Zoz e Grisso, 2003) demonstraram que esteiras de diferentes larguras apresentaram eficiência de tração superior a 70%, independentemente da superfície avaliada, reforçando sua vantagem sobre rodas em termos de desempenho.

A estrutura básica de um sistema de tração por esteiras é composta por rodas motrizes, roletes de apoio, esteira tensionada por mola ou cilindros hidráulicos, e mecanismos de direção baseados na variação de velocidade entre os lados. No caso de tratores, essas esteiras podem ser metálicas ou de borracha reforçada com cabos de aço, oferecendo durabilidade e versatilidade. Tais características inspiraram a adoção de esteiras em robôs agrícolas de pequeno porte, que se beneficia do alto grau de aderência e tração mesmo em terrenos com baixa compactação ou aderência.

Figura 1 – Mecanismo de esteira



Fonte: wikipedia

3.3 Atuadores

Os atuadores são dispositivos responsáveis por converter energia de uma forma para outra, geralmente transformando energia elétrica em movimento mecânico. Eles desempenham papel essencial em sistemas automatizados, como mecanismos móveis e veículos autônomos, ao permitirem a execução de tarefas como locomoção, movimentação de componentes e acionamento de ferramentas (Chamorro; González, 2019).

Os atuadores podem ser classificados com base na fonte de energia utilizada: pneumáticos, hidráulicos ou elétricos. Na automação agrícola e robótica móvel, os atuadores elétricos se destacam devido à sua facilidade de controle, precisão e integração com sistemas microcontrolados, como o Arduino e ESP32.

Segundo Bhuyan (2010), a escolha adequada de um atuador em um projeto depende de fatores como:

- Tipo de energia manipulada (elétrica, hidráulica ou pneumática);
- Nível de confiabilidade exigido;
- Tipo e intensidade da força necessária (torque ou força linear);
- Estratégia de controle (como PID, PWM ou on/off);
- Custo e facilidade de manutenção.

Entre os atuadores elétricos, destacam-se os motores elétricos, como os motores de corrente contínua (DC), servomotores e motores de passo. Conforme El-Refaie (2013), aplicações de tração como tratores e robôs exigem motores com elevada densidade de potência, boa eficiência energética e baixo custo.

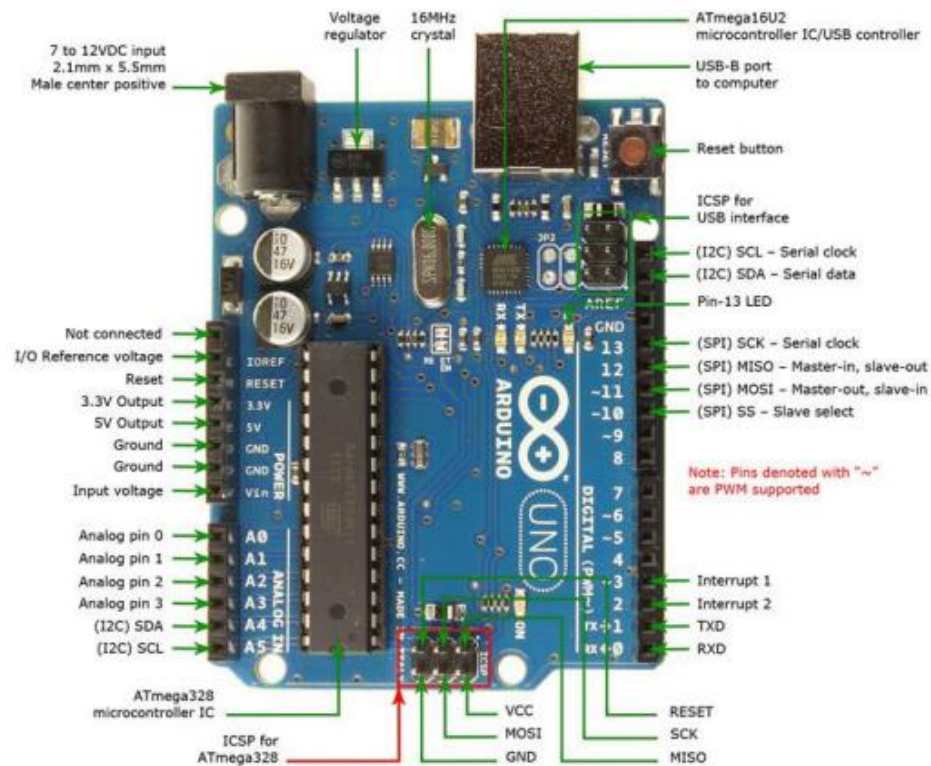
Motores de passo, especificamente, são ideais para aplicações que exigem movimentações angulares definidas e controle preciso sem a necessidade de feedback por sensores, o que reduz a complexidade do sistema.

3.4 Microcontrolador Arduino

Os microcontroladores constituem a base do controle de sistemas embarcados, permitindo a automação de dispositivos com simplicidade e baixo custo. Segundo Kerschbaumer (2018, p. 10), “microcontroladores são circuitos integrados que possuem em seu interior todos os componentes necessários ao seu funcionamento, dependendo unicamente da fonte de alimentação externa. Pode-se dizer que os microcontroladores são computadores de um único chip.” Essa arquitetura compacta torna os microcontroladores ideais para aplicações em ambientes como a agricultura de precisão, onde é necessário controlar motores, ler sensores e processar comandos de forma autônoma e eficiente.

O Arduino Uno é uma plataforma de hardware livre que alia simplicidade e capacidade adaptativa, características fundamentais em sistemas embarcados para automação agrícola. Segundo Ismailov *et al.* (2022) apontam que o Arduino, ao combinar microcontrolador AVR, interface USB e ambiente de desenvolvimento *open-source* (IDE), permite a integração rápida com sensores e módulos de comunicação, como Wi-Fi. Isso o torna ideal para projetos que exigem interação com o ambiente, coleta de dados e controle remoto.

Figura 2 – Placa Arduino.



Fonte: Study of arduino microcontroller board

3.5 Impressão 3D

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem se consolidado como uma tecnologia estratégica para o desenvolvimento de protótipos, especialmente em projetos de engenharia que demandam flexibilidade no design e redução de custos com usinagem convencional. Segundo Volpato (2021), a impressão 3D permite a criação de objetos tridimensionais por meio do acúmulo de camadas sucessivas de material, processo que confere liberdade geométrica e agilidade no desenvolvimento de peças técnicas e funcionais.

O processo de fabricação inicia-se com a modelagem da peça em um software de desenho tridimensional. O modelo digital é então exportado para um programa de fatiamento (slicer), como o Ultimaker Cura, que converte a geometria 3D, determinando parâmetros como temperatura, velocidade de extrusão e preenchimento interno. Essa modelagem pode ser transferida para a impressora 3D por meio de um cartão SD, pen drive ou conexão via rede,

possibilitando a execução da impressão camada por camada (WISHBOX, 2020).

Neste trabalho, foi adotada a tecnologia de manufatura aditiva do tipo Fused Deposition Modeling (FDM), na qual o material de impressão neste caso, o filamento de ácido polilático (PLA) é aquecido e extrudado por um bico em movimento, formando a peça sobre uma mesa de impressão. O processo ocorre ao longo dos eixos X, Y e Z, permitindo a construção de geometrias tridimensionais com alta precisão dimensional (WISHBOX, 2020).

O PLA foi escolhido como material de impressão pelas suas propriedades físico-químicas favoráveis à prototipagem. De acordo com Besko, Bilyk e Sieben (2017), o PLA é um polímero termoplástico, semicristalino ou amorfo, derivado de fontes renováveis como milho, cana-de-açúcar e batata. É biodegradável, atóxico, apresenta baixo custo e facilidade de impressão, mesmo em impressoras de entrada que não possuem mesa aquecida.

Entretanto, apesar de sua popularidade, o PLA possui limitações. O material é relativamente quebradiço e sensível ao calor, apresentando reações indesejadas a temperaturas superiores a 60 °C. Além disso, possui tendência à absorção de umidade, o que pode afetar a qualidade da extrusão e causar entupimentos no bico da impressora (Besko; Bilyk; Sieben, 2017).

3.6 Comando Numérico Computadorizado (CNC) e código g.

Com o avanço da globalização e a crescente competitividade industrial, as empresas passaram a buscar inovações não apenas em produtos, mas principalmente em processos produtivos. A introdução de máquinas com Comando Numérico Computadorizado (CNC) é uma resposta à necessidade de maior eficiência, redução de custos e flexibilidade de produção em ambientes industriais (Gonçalves, 1991). Esse tipo de máquina substitui comandos manuais por instruções digitais precisas, permitindo que operações complexas sejam executadas automaticamente por meio de códigos programados.

De acordo com Barcelos e Cerqueira (2014), o CNC surgiu no final do século XX como uma evolução do controle numérico tradicional, substituindo o controle via hardware por sistemas de software integrados. Existem diferentes arquiteturas:

- CNC Direto, com um computador central controlando várias máquinas;
- CNC Computadorizado, com processador independente por máquina;
- Controle Numérico Distribuído (CND), que une flexibilidade e robustez.

Esses sistemas permitem a automação de processos com grande precisão e produtividade, reduzindo falhas humanas e otimizando o tempo de produção. Como destacam

Marcicano (2001) e Rubio (1992), as máquinas CNC modernas permitem a programação local ou remota, simulação de processos, salvamento de programas em memória e ajustes rápidos durante a operação.

Segundo Tanaka (2009), entre as principais vantagens das máquinas CNC, destacam-se:

- Redução do tempo de preparação e ajuste da máquina;
- Maior versatilidade, mesmo para pequenos lotes;
- Facilidade para correção de medidas durante a operação;
- Programação otimizada para uso contínuo e condições ideais de corte.

No entanto, Pazos (2002 apud Souza, 2018) aponta algumas desvantagens como o alto custo inicial, maior tempo de treinamento e programação, além da manutenção especializada.

3.6.1 Linguagem G e o Controle por Código

O programa CN representa a comunicação entre operador e máquina por meio de letras de endereçamento seguidas de valores numéricos, formando sentenças que instruem a máquina sobre quais ações executar. Essa linguagem é conhecida como G-code e tornou-se padrão entre fabricantes de comandos CNC, mantendo uma base universal, mesmo com variações de recursos entre diferentes marcas (Silva, 2010).

Estrutura básica de um programa G-code:

- Blocos de dados (sentenças): formados por letras e números (ex.: G01 X50 Y30);
- Letras de endereçamento: representam comandos ou variáveis (ex.: G, X, Z, F);
- Palavras: letra + valor (ex.: G00, X20, Z-5).

Exemplos comuns de comandos FANUC:

- G00 – Movimento rápido
- G01 – Interpolação linear
- G02 / G03 – Movimento circular horário / anti-horário
- G20 / G21 – Unidade em polegada / milímetro
- G90 / G91 – Sistema de coordenadas absoluto / incremental
- G94 / G95 – Avanço por minuto / por rotação

4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Robótica e Automação Agrícola (LAGRO), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus do Pici, localizado no município de Fortaleza - CE. O experimento foi estruturado em duas etapas: desenvolvimento do mecanismo (projeto e construção) e avaliação preliminar de seu funcionamento em ambiente controlado.

O desenvolvimento do mecanismo seguiu a metodologia sistemática de projeto proposta por Pahl *et al.* (2005), na qual se divide em três fases: projeto informacional, projeto conceitual e projeto detalhado.

4.1 Planejamento e esclarecimento da tarefa

Primeiramente, foi realizado o planejamento e o esclarecimento da tarefa, conforme orienta a metodologia de Pahl *et al.* (2005). Nesta etapa o foco foi a coleta e análise das informações necessárias para a definição precisa do sistema por esteiras, considerando os requisitos funcionais, técnicos, operacionais e econômicos do mecanismo a ser desenvolvido.

Durante essa fase, foram levantadas as principais demandas do sistema, levando-se em consideração o ambiente agrícola, o tipo de preparo do solo, os recursos tecnológicos disponíveis e as limitações impostas pelos componentes mecânicos e eletrônicos utilizados.

Como resultado desse processo, elaborou-se uma lista de requisitos informativos que orientará todas as etapas subsequentes do projeto. Tais requisitos foram definidos com base em parâmetros técnicos e práticos, alinhados às necessidades do projeto e aos critérios de desempenho esperados.

4.1.1 Projeto Conceitual

Com base nos requisitos previamente definidos para o mecanismo, foi possível identificar sua função, entendida como a correlação entre variáveis de entrada e saída, sem se prender, neste estágio, a uma solução específica. Essa abordagem favoreceu a construção de um diagrama de blocos que representa a conversão de energia, materiais e sinais dentro do sistema. Tal representação serviu como ponto de partida para explorar e nortear as possíveis alternativas conceituais.

A partir dessa função global, diferentes propostas de solução foram elaboradas, todas

cuidadosamente alinhadas às exigências estabelecidas na lista de requisitos. Alternativas que não cumpriam esses critérios foram descartadas logo nas etapas iniciais. Já as opções viáveis passaram por uma análise comparativa, orientada por parâmetros técnicos e funcionais. Ao final, escolheu-se aquela configuração que apresentou desempenho mais consistente e equilibrado frente aos critérios definidos.

Para estruturar essas alternativas, adotou-se o método da matriz morfológica. Trata-se de uma ferramenta em forma de tabela, na qual são organizadas as principais funções que o produto deve executar. Em cada linha, são dispostas nas colunas correspondentes diferentes soluções possíveis para cada função.

Através da simples reorganização das linhas e colunas da matriz morfológica, foi possível gerar um número expressivo de soluções potenciais para o problema em questão.

4.1.2 Projeto detalhado

Esta fase do projeto corresponde à etapa de detalhamento do sistema, na qual foram estabelecidas informações precisas quanto à forma final do mecanismo, seus componentes estruturais, dimensões, acabamentos, materiais utilizados e viabilidade de fabricação. O detalhamento resultou na consolidação da tecnologia de produção adotada para o mecanismo, especialmente no que se refere à construção da estrutura, chassi, à fabricação de componentes impressos em PLA e à montagem dos elementos mecânicos e eletrônicos. Toda a documentação técnica foi organizada para orientar o processo construtivo, incluindo desenhos das peças, vistas explodidas de subconjuntos e o esquema geral da montagem, além das respectivas listas de materiais.

5 Matérias utilizados para a construção e montagem

5.1 Processamento de corte e furação

Para a construção do chassi foi utilizado perfil retangular de aço carbono 1020, com dimensões de 60mm x 40mm O processo de corte das peças foi realizado com uma esmerilhadeira angular de 4.1/2" (115 mm), potência de 650W, da marca SKIL. Já para a realização das perfurações foi utilizado uma furadeira da marca SKIL 550W.

Figura 3 – Equipamentos utilizados, esmerilhadeira (À esquerda) e furadeira (À direita).

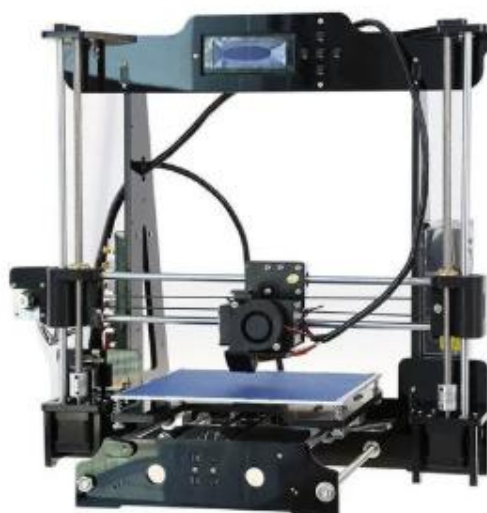


Fonte: Amazon.

5.1.1 Produção de Componentes por Impressão 3D

As peças que compõem o sistema de transmissão, bem como outros componentes estruturais do mecanismo, foram fabricadas por uma impressora 3D da marca *Tronxy*, modelo P902. O material selecionado para a confecção das peças foi o ácido poliláctico (PLA), um polímero termoplástico biodegradável.

Figura 4 – Impressora 3D utilizada para construção de componentes.



Fonte: Mercado livre

Para viabilizar o processo de fabricação das peças, utilizou-se o software *Repetier-Host*, responsável pela conversão dos modelos tridimensionais, inicialmente desenvolvidos na plataforma *Autodesk Inventor*.

No *Repetier-Host*, foram definidos os principais parâmetros do processo de impressão, tais como a temperatura de extrusão, a densidade de preenchimento, a velocidade de impressão e entre outros, como mostrado na tabela abaixo.

Tabela 1 – Configuração utilizada no software de impressão

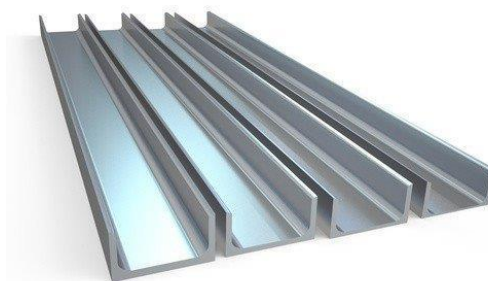
| Parâmetro | Valor atribuído |
|--|-----------------|
| Material | PLA |
| Temperatura do bico extrusor | 210°C |
| Temperatura da mesa aquecida | 60 °C |
| Largura de extrusão | 0,3mm |
| Altura da camada (<i>layer height</i>) | 0,4mm |
| Velocidade de impressão | 45 mm/s |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

5.2 Estrutura da esteira e acionamento

A parte da esteira que entra em contato com o terreno foi construída com perfis de alumínio em formato de "U", cortados em tamanhos de 10 cm, os quais são fixadas e dispostos ao longo das correntes.

Figura 5 – Perfis de alumínio em formato “U” utilizado para a construção da esteira.



Fonte: Amazon.

O sistema de tração do mecanismo foi concebido com base em duas esteiras independentes, acionadas por motores de passo NEMA 23, com torque de 28 kgf·cm. Portando foi utilizado dois motores de passos para todo o mecanismo.

Figura 6 – Motor de passo NEMA 23



Fonte: Amazon.

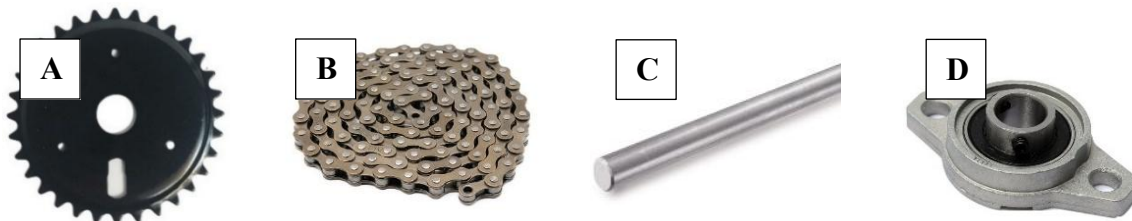
5.3 Sistema de transmissão

O motor de passo é conectado a um eixo intermediário por meio de um acoplador flexível, esse eixo transmite rotação a um conjunto de engrenagem sem fim (impressa em PLA), que está em contato com uma engrenagem helicoidal perpendicular conectada a um eixo secundário.

Este eixo secundário é de aço inoxidável e atravessa dois mancais de apoio com rolamentos, fixados nas laterais externas do perfil de aço carbono. Nas extremidades desse eixo estão acopladas coroas dentadas (32 dentes), responsáveis pela movimentação da corrente da esteira.

Essas coroas, ao entrarem em movimento, promovem o acionamento de outras duas coroas dispostas na extremidade oposta do sistema. Ambas estão interligadas por uma corrente metálica, que, ao se movimentar, aciona a estrutura da esteira, permitindo o deslocamento do mecanismo no solo.

Figura 7 – A :Coroa dentada (32 dentes), B: Corrente metálica, C: Eixo inox D: Mancal



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

5.4 Sistema de automatização, alimentação e comunicação

Os motores de passo foram controlados por uma placa Arduino Uno, em conjunto com um CNC Shield V3, que possui capacidade para operar até quatro motores de passo de forma independente. O controle da posição dos eixos dos motores ocorre por meio de drivers, que são responsáveis por converter os sinais de pulso enviados pelo controlador, em movimento rotacional preciso dos motores.

Figura 8 – Microcontrolador Arduino (À esquerda) e Shield (À direita).



Fonte: Amazon .

O driver utilizado para o controle dos motores de passo foi o modelo DM556, configurado para operar com corrente de 3,2 A e tensão de alimentação entre 20 e 50 V. A resolução do controle foi ajustada para 1600 pulsos por rotação.

Figura 9 – Drive DM556.



Fonte: Amazon.

Para suprir a demanda de tensão exigida, foram utilizadas duas baterias portáteis de

íons de lítio da marca MOXCELL. Cada unidade possui tensão nominal de 48V, capacidade de 8 A e peso aproximado de 540 gramas, proporcionando boa autonomia e leveza. Essas baterias foram responsáveis por alimentar os drivers DM556 que controlam os motores de passo utilizados no acionamento da esteira. Ao fornecerem a tensão necessária, garantiram o torque adequado para o deslocamento do mecanismo.

Figura 10 – Bateria de íons de lítio 48V (MOXCELL) utilizada para alimentação do sistema.

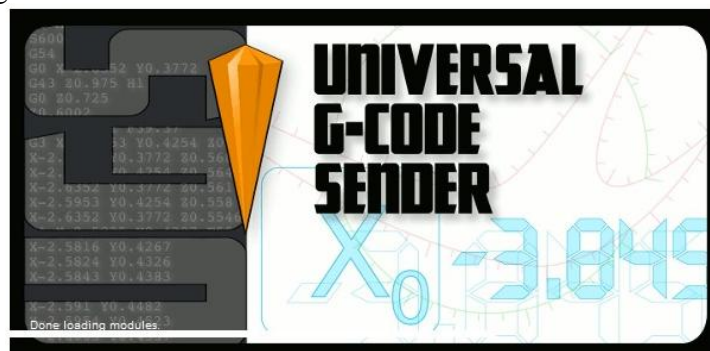


Fonte: Amazon

Na placa Arduino, foi instalado o *firmware GRBL*, responsável por interpretar os comandos escritos em *G-code*, linguagem padrão utilizada em sistemas de Controle Numérico Computadorizado (CNC). Para estabelecer a comunicação com a placa, foi utilizado um computador portátil do modelo *Netbook Acer Emachines EM250*, conectado à rede local por meio de Wi-Fi.

Nesse computador, foi instalado o *software Universal G-code Sender* (UGS), que permite interpretar e executar comandos em *G-code*, além de viabilizar o acesso remoto à interface de controle. Dessa forma, qualquer dispositivo móvel conectado à mesma rede pode acessar o sistema e enviar comandos ao mecanismo.

Figura 11 – *Universl G-code sender* versão 2.1.13



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

5.5 Avaliação do mecanismo

A avaliação do mecanismo teve início com a verificação da comunicação entre o protótipo e o dispositivo móvel, utilizando a rede Wi-Fi como interface. Após isso avançou-se para os ensaios em laboratório, contemplando testes experimentais, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema.

5.5.1 Velocidade máxima de deslocamento

A verificação da velocidade máxima de deslocamento do mecanismo foi realizada por meio do aumento gradual da rotação dos motores de passo que acionam o sistema de tração. Para isso, utilizou-se o *software Universal G-code Sender (UGS)*, no qual foram feitos incrementos manuais no parâmetro de avanço (F), definido em milímetros por minuto.

O conjunto de tração do robô apresenta uma relação de transmissão de 10:1, ou seja, são necessárias dez rotações completas do motor de passo para que a coroa acoplada à esteira realize uma única volta.

A velocidade de deslocamento do robô foi estimada experimentalmente por meio da análise de um vídeo registrado durante o funcionamento do protótipo em ambiente controlado. A medição considerou o deslocamento de um dos lados que a esteira percorreu em um intervalo de tempo. A partir desses dados, calculou-se a velocidade linear média real utilizando a seguinte equação:

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta T} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

V = velocidade, m/s

ΔS = Deslocamento em (m)

ΔT = Tempo(s)

A velocidade máxima obtida em laboratório será alcançada quando os motores começarem a falhar devido ao incremento de rotação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Projeto informacional

Após identificar as necessidades do mecanismo agrícola e considerar as condições técnicas e econômicas disponíveis, foram definidos os requisitos essenciais do projeto, organizados em critérios quantitativos e qualitativos para assegurar desempenho, robustez, controle e viabilidade financeira.

Tabela 2 – Lista de requisitos estabelecida para orientar o desenvolvimento, e os parâmetros técnicos envolvidos.

| Usuário: Francisco Arlen | | Para: DENA | Projeto/Produto: Mecanismo de Esteira | Identificação/ Classificação: Lista de Requisitos Pag: 01 Folha:01 |
|---|---|---|--|---|
| Modificação | N/V | Requisitos | | Exigência |
| Data da Edição: 15/06/2025 | Assinalar (N) necessidade ou (V) vontade | 1 - Geometria e Dimensões gerais do mecanismo: | | |
| | | N Comprimento: | 900mm | |
| | | N Largura: | 40mm | |
| | | N Altura: | 60mm | |
| | | 2 - Condições do terreno: | | |
| | | N Declividade longitudinal: | 0% | |
| | | N Declividade transversal: | 0% a 10% | |
| | | Tipos de preparo: | | Arado, Grade, Enxada rotativa |
| | | 3 - Requisitos de mobilidade | | |
| | | N Sistema de tração: | Esteiras laterais com acionamento independente | |
| | | V Velocidade desejada: | Ajustável | |
| | | V Capacidade de carga: | ≥ 50 kg | |
| | | 4- Robustez e desempenho: | | |
| V Resistência à umidade e poeira: | Deve operar em ambiente agrícola | | | |
| N Resistência mecânica: | Materiais resistentes ao impacto e desgaste | | | |
| 5 - Fonte de energia e controle: | | | | |
| N Fonte de energia: | Elétrica | | | |
| N Potência disponível: | 0,25 CV | | | |
| N Comunicação: | Wireless via rede Wi-Fi | | | |
| 6 - Custo estimado: | | Limite de R\$ 3500,00 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.2 Projeto conceitual

Nesta etapa, foram definidas as funções principais e subfunções que compõem o sistema. Para auxiliar na geração e organização de possíveis soluções técnicas, foi elaborada uma matriz morfológica, ferramenta que permite visualizar e combinar diferentes alternativas de solução para cada subfunção identificada.

Quadro 1 – Matriz morfológica contendo as soluções e subfunções do mecanismo.

| Soluções/sub funções | | 1 | 2 | 3 |
|----------------------|------------------------|---|--|--|
| 1 | Fonte de energia |  Bateria 48V |  Placa solar |  Gerador a gasolina |
| 2 | Unidade de Controle |  Arduino |  Raspberry Pi |  STM32 |
| 3 | Sistema de transmissão |  Polias e correias |  Conjunto Engrenagem semfim |  Engrenagem planetária |
| 4 | Tração |  Pneu |  Esteira |  Pernas articuladas |
| 5 | Atuador (motorização) |  Servomotor |  Motor de passo |  Motor DC |
| 6 | Estrutura |  Perfis de alumínio |  Perfil de aço |  Chapa metálica |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Esse método mostrado no quadro 1 proporcionou uma análise sistemática das

alternativas, facilitando a visualização de possíveis configurações viáveis para o protótipo.

Após a geração das variantes, procedeu-se com a avaliação técnica e econômica de cada uma, utilizando critérios específicos como eficiência mecânica, simplicidade de montagem, compatibilidade com o controle eletrônico, custo dos componentes e disponibilidade comercial. Para cada critério, foi atribuída uma nota ponderada, de modo a refletir sua importância relativa no contexto do projeto.

A solução com maior pontuação final foi selecionada como a mais adequada para compor o projeto conceitual.

Tabela 3 – Critérios utilizados nesse processo de avaliação e seus respectivos pesos.

| Critérios de avaliação para escolha do mecanismo | | | |
|---|-------------------------|--------------------------|-------------|
| Critérios de Avaliação | Peso do Critério | Variante Perfeita | Nota |
| Baixo custo de construção | 0,15 | 100 | 15,0 |
| Facilidade de fabricação com recursos locais | 0,10 | 100 | 10,0 |
| Eficiência no deslocamento em diferentes solos | 0,20 | 100 | 20,0 |
| Baixa compactação do solo | 0,10 | 100 | 10,0 |
| Facilidade de manutenção | 0,05 | 100 | 5,0 |
| Robustez da estrutura e resistência mecânica | 0,10 | 100 | 10,0 |
| Eficiência energética do sistema de tração | 0,10 | 100 | 10,0 |
| Modularidade e possibilidade de expansão futura | 0,05 | 100 | 5,0 |
| Utilização de componentes padronizados | 0,10 | 100 | 10,0 |
| Sustentabilidade | 0,05 | 100 | 5,0 |
| Total | 1,00 | | 100 |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A variante de solução que apresentou os melhores resultados esta apresentada na tabela abaixo

Tabela 4 – Solução selecionada no projeto conceitual.

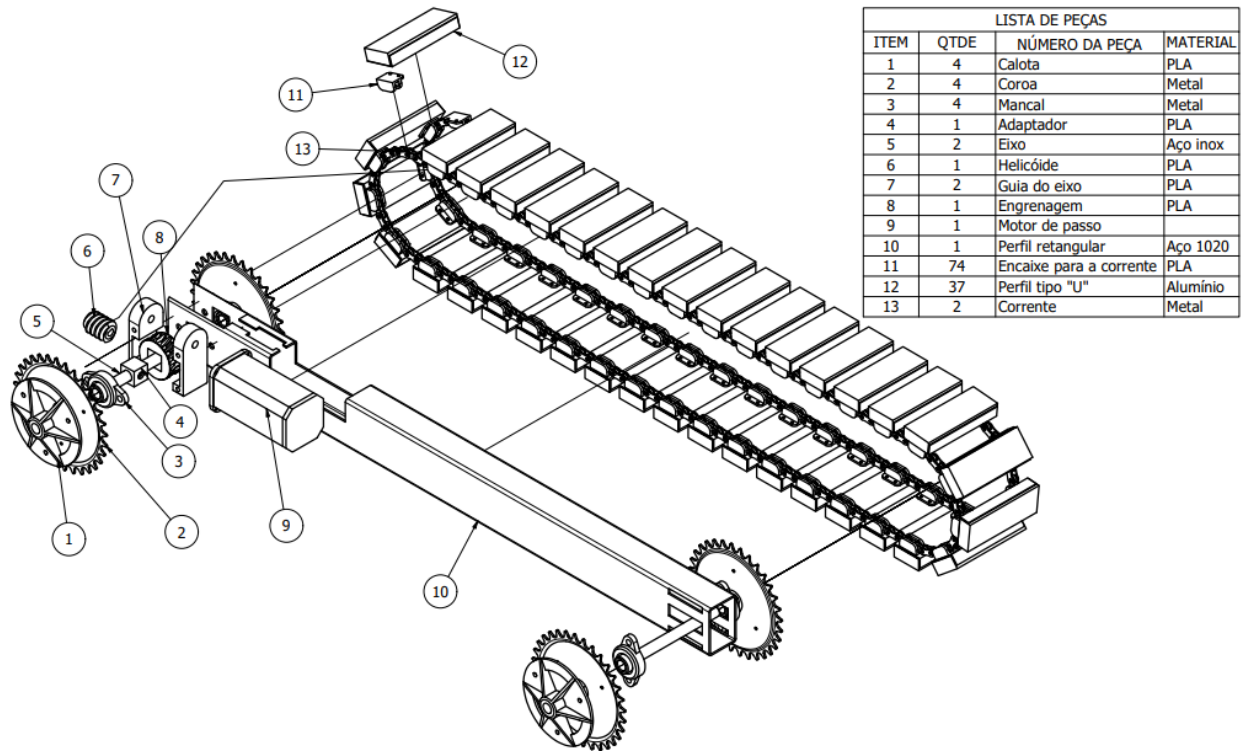
| Solução selecionada no projeto conceitual | |
|--|---------------------------|
| Subfunções | Solução Conceitual |
| Mecanismo de tração | Esteira |
| Transmissão da potência | Engrenagem sem fim |
| Conformação do chassi | Perfil retangular de aço |
| Atuador do sistema | Motor de passo |
| Controle do sistema | Arduino |
| Fonte de energia | Baterias 48V |

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.3 Projeto Detalhado

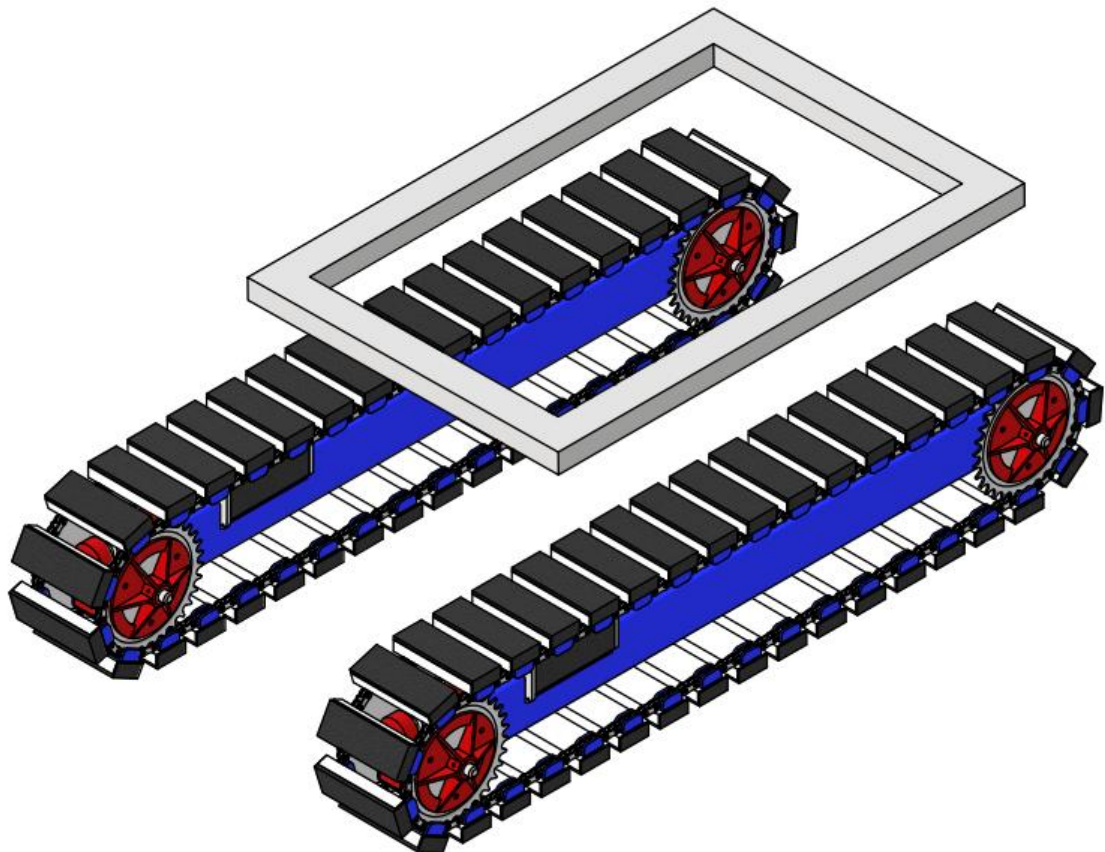
Com a utilização do software Autodesk Inventor, foi possível projetar as peças que compõem o mecanismo, criar montagens e gerar representações gráficas, como as apresentadas nas figuras a seguir. Para fins didáticos e de melhor visualização dos componentes, foi realizada a vista explodida de apenas um dos lados do sistema de tração por esteira. Isso se justifica pelo fato de o conjunto ser simétrico, ou seja, ambos os lados possuem estrutura, montagem e funcionamento idênticos. Além disso, foi possível plotar uma tabela com a lista de peças utilizadas, contendo a identificação, quantidade, nome e material correspondente de cada componente.

Figura 12 – Vista explodida de uma esteira



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Figura 13 – Vista do mecanismo montado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

6.4 Construção e Montagem do Mecanismo

6.4.1 Construção do Chassi

A construção do mecanismo foi realizada no Laboratório de Robótica e Automação Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC). O chassi foi confeccionado com perfil retangular de aço carbono 1020, com dimensões de 60 mm × 40 mm × 2 mm (altura × largura × espessura). Os perfis foram cortados com 80 cm de comprimento, perfurados e ajustados para acomodar os componentes do sistema, como motores de passo, mancais, eixos, entre outros.

Figura 14 – Processo de montagem do chassi.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025



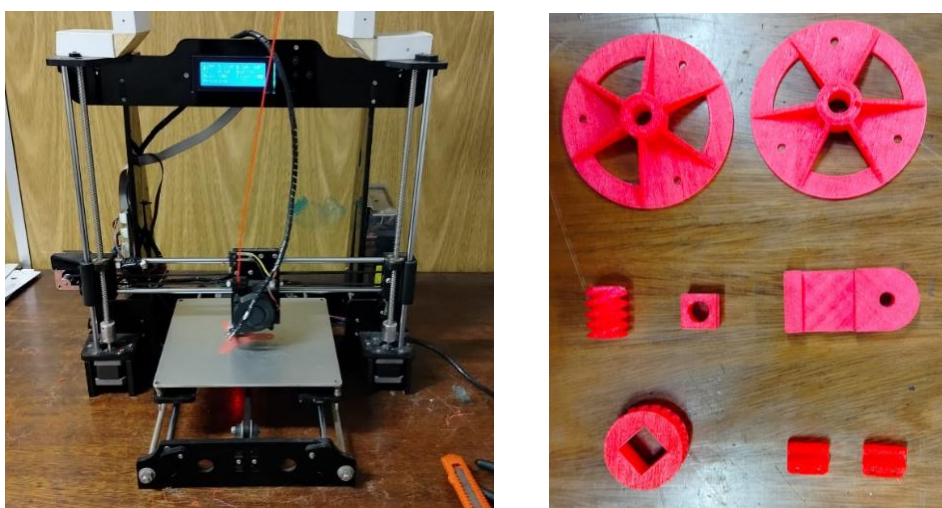
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Para a estrutura central foi utilizado um perfil de alumínio retangular com dimensões de 40 mm x 25 mm x 1 mm (altura x largura x espessura) que conecta os dois lados do sistema de esteiras e serve de base para a fixação dos componentes eletrônicos, incluindo o Arduino, drivers, baterias e notebook.

6.4.2 Peças fabricadas em impressora 3D

As peças utilizadas no sistema de transmissão e apoio da esteira foram fabricadas por meio de impressão 3D com filamento PLA. As peças impressas incluem: conjunto de engrenagem sem fim, calotas para as coroas dentadas, guias para o eixo do motor, proteção do sistema de transmissão, conectores para fixação dos perfis de alumínio na corrente, esticadores de corrente, suportes para o motor e limitadores para o helicóide.

Figura 15 – Fabricação de componentes por impressão em 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.4.3 Montagem do Sistema de transmissão

A transmissão do movimento do motor para a esteira é realizada por um sistema de engrenagem sem fim impresso em 3D. O motor de passo está acoplado a um eixo por meio de um acoplador flexível, esse eixo é conectado a uma engrenagem helicoidal (parafuso sem fim), que transmite o movimento para uma engrenagem perpendicularmente montada em um segundo eixo.

Figura 16 – Eixo do motor com acoplamento e engrenagem sem fim. (À esquerda), eixo montado ao sistema sob guias e limitadores (À direita).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Esse segundo eixo é sustentado por dois mancais com rolamentos, os quais estão instalados nas laterais do chassi, permitindo sua rotação livre e alinhada. No centro do eixo, foi inserido um adaptador quadrado, impresso em 3D, que se encaixa de forma precisa na engrenagem helicoidal. Esse adaptador é fixado ao eixo por meio de um parafuso passante, inserido em um furo central.

Por estar acoplado à engrenagem, o adaptador permite que o movimento rotacional gerado pelo motor seja transferido diretamente para o eixo. Em consequência disso, o eixo transmite esse movimento às duas coroas dentadas metálicas fixadas em suas extremidades.

Todo o conjunto foi lubrificado com graxa a fim de reduzir o atrito entre as engrenagens e prolongar a vida útil do sistema.

Figura 17 – Eixo com componente quadrado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Figura 18 – Sistema de transmissão lubrificado com graxa

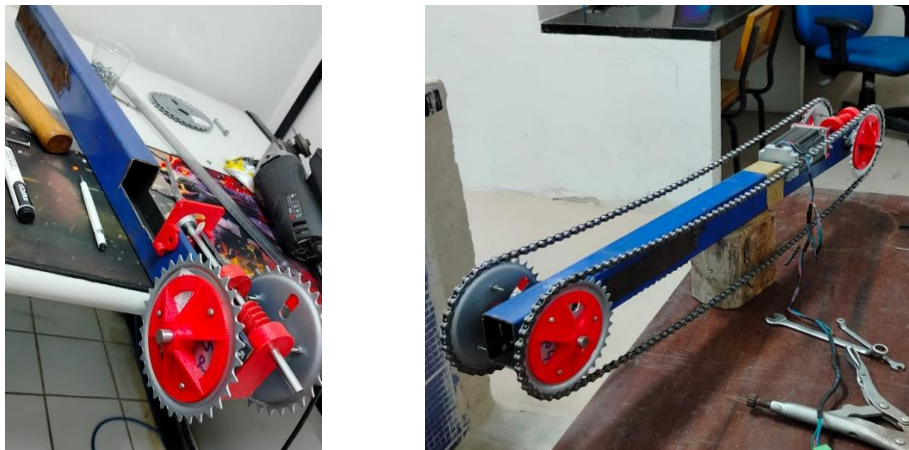


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Cada coroa dentada possui uma calota, responsável por sua centralização e fixação ao eixo e a coroa. Essas calotas, são acopladas ao eixo por meio de parafusos passantes inseridos nas extremidades e fixadas por três parafusos na coroa, garantindo que o movimento do eixo seja transferido às coroas.

As coroas dentadas, por sua vez, estão conectadas a outras duas coroas por meio de correntes metálicas. Dessa forma, ao girarem, transmitem o movimento de forma sincronizada através das correntes, promovendo o deslocamento da esteira.

Figura 19 – Correntes e coroas montados



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.4.4 Construção da esteira

Para a construção da esteira, foram utilizados perfis de alumínio com seção transversal em formato de "U". Esses perfis foram cortados com comprimento de 10 cm e, em seguida, receberam quatro furos distribuídos de forma a permitir sua fixação nas correntes metálicas.

Figura 20 – Furações dos perfis de alumínio

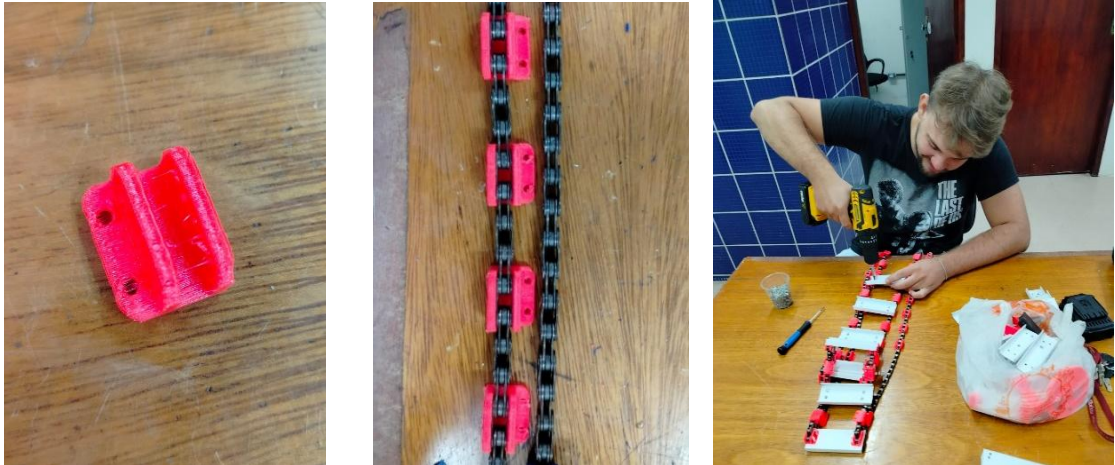


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Para possibilitar a união dos perfis com as correntes, foi necessário desenvolver uma peça de encaixe, impressa em 3D, projetada especificamente para se ajustar à largura do êmbolo da corrente. Essa peça possui dois furos que permitem a fixação por parafusos diretamente no perfil de alumínio.

Dessa forma, cada perfil foi firmemente acoplado às duas correntes laterais da esteira. A montagem segue um padrão alternado: instala-se um perfil, pula-se um êmbolo da corrente, e assim sucessivamente. No total, foram realizados 37 encaixes ao longo da corrente, promovendo a fixação entre os elementos estruturais da esteira e garantindo sua movimentação sincronizada com o sistema de tração.

Figura 21 – Montagem da estrutura da esteira.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.4.5 Tensionador de corrente

Nas extremidades opostas aos motores, foi montado um sistema de tensionamento para as correntes, composto por parafusos roscados que atuam sobre suportes impressos em 3D, os quais possuem porcas embutidas em sua parte central. Ao girar o parafuso, ele empurra os mancais do eixo traseiro e aumenta a tensão das correntes, evitando folgas e possíveis desalinhamentos.

Figura 22 – Montagem dos tensionadores.

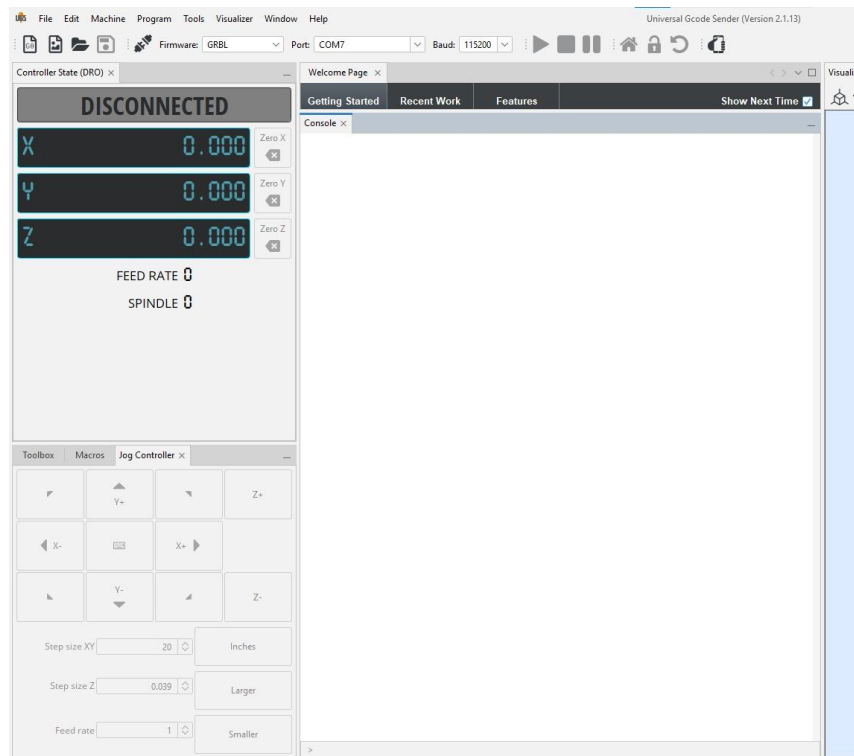


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.4.6 Sistema de controle e Montagem do Sistema Eletrônico

O controle do mecanismo é realizado por meio de um notebook utilizando o software *Universal G-code Sender (UGS)*, na versão 2.1.13. Esse software permite o envio de comandos em linguagem *G-code* para a placa microcontroladora Arduino, que atua como unidade central de controle do sistema.

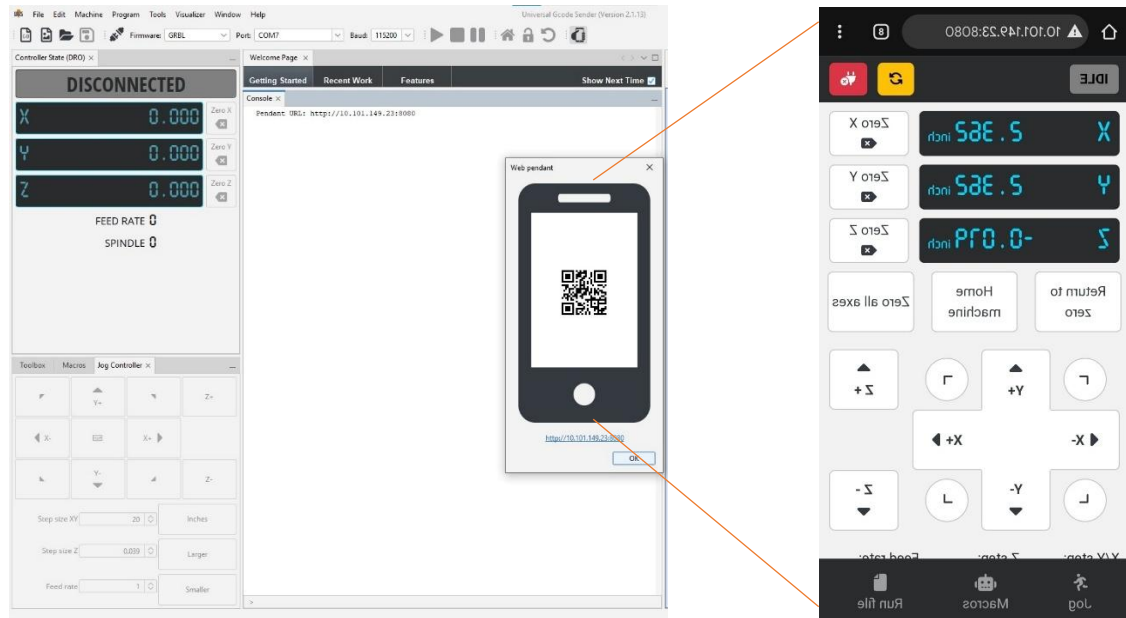
Figura 23 – Interface do software UGS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Além do controle direto via computador, o UGS oferece a funcionalidade de geração de um QR Code que possibilita o acesso remoto aos comandos através de um dispositivo móvel (como um smartphone), desde que ambos estejam conectados à mesma rede Wi-Fi.

Figura 24 – QR Code permitindo acesso ao dispositivo móvel.



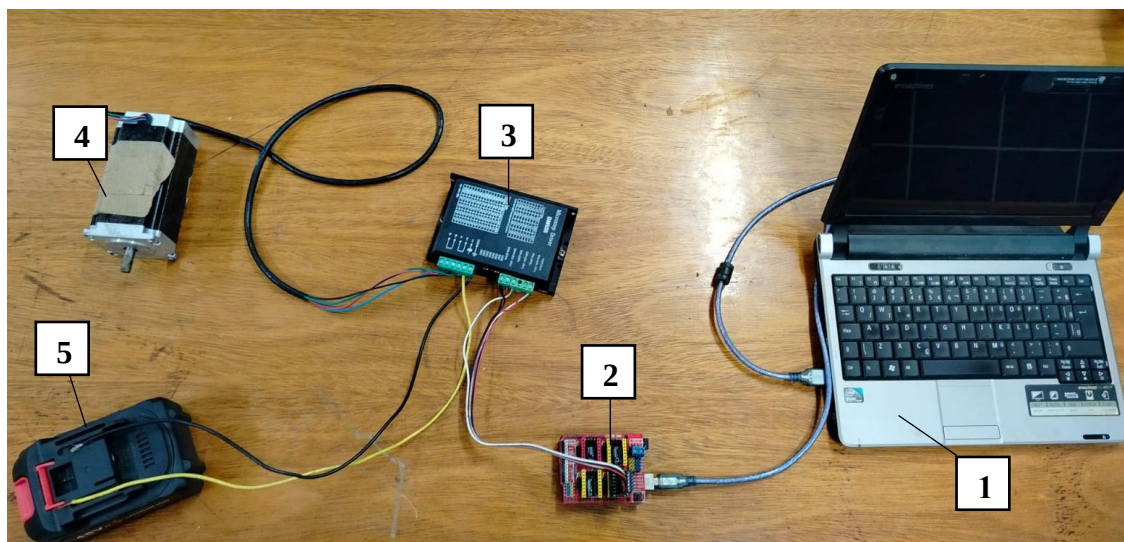
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Para que o Arduino seja capaz de interpretar corretamente os comandos recebidos, foi instalado o *firmware GRBL*, responsável por decodificar o *G-code* e gerar os sinais adequados para o acionamento dos motores de passo por meio dos drivers.

A montagem do sistema eletrônico seguiu as seguintes etapas:

1. Upload do firmware GRBL na placa Arduino, que traduz os comandos *G-code* em sinais de controle;
2. Acoplamento da placa CNC Shield V3 ao Arduino, permitindo o controle de até quatro motores de passo;
3. Utilização de adaptadores externos para ligar os sinais da Shield aos drivers DM556, responsáveis pelo controle dos motores;
4. Ligação dos motores de passo aos drivers conforme os pinos de controle especificados;
5. Alimentação dos drivers com baterias estacionárias de 48 V, conectadas diretamente aos terminais de alimentação dos drivers.

Figura 25 – 1; Notebook, 2; Arduino + Shield, 3; Driver, 4; Motor de passo, 5; Bateria 48V.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.4.7 Funcionamento com comandos G

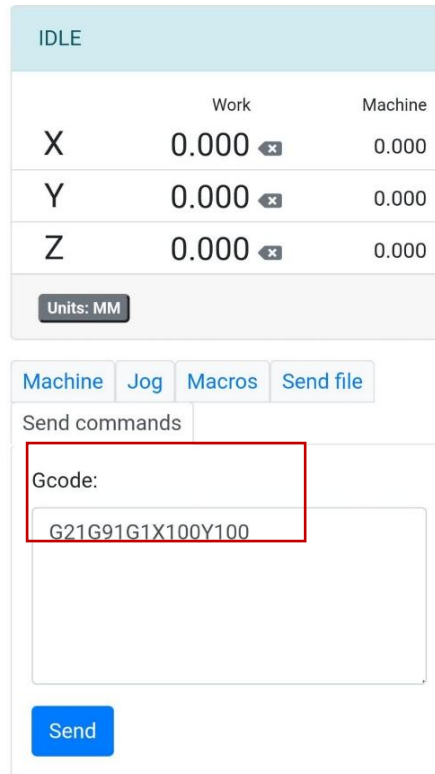
O controle de locomoção do mecanismo foi realizado por meio de comandos G. Para o funcionamento correto do sistema, foi necessário configurar alguns parâmetros básicos. Inicialmente, o comando G21 é utilizado para definir a unidade de medida em milímetros, adotando o sistema métrico. Em seguida, o comando G91 ativa o modo de coordenadas incrementais, permitindo que os movimentos sejam definidos em relação à posição atual do mecanismo. Por fim, o comando G1 é responsável pela interpolação linear, sendo empregado para realizar movimentações em linha reta com controle de velocidade.

Após a configuração inicial, os eixos de controle são atribuídos: o eixo X representa a esteira esquerda (lado esquerdo do mecanismo), enquanto o eixo Y representa a esteira direita (lado direito). Essa correspondência permite o controle independente de cada lado do sistema de tração, viabilizando tanto deslocamentos retilíneos quanto curvas, por meio da variação na velocidade ou no sentido de rotação de cada esteira.

Para que o deslocamento em linha reta ocorra corretamente, os valores dos eixos X e Y devem ser sempre iguais, garantindo que ambas as esteiras se movimentem de forma sincronizada.

A definição da velocidade é realizada por meio do parâmetro F, presente nas sentenças de *G-code*. Esse parâmetro representa a velocidade de avanço, sendo que, quanto maior o seu valor, maior será a velocidade de locomoção do sistema.

Figura 26 – Configuração utilizada no UGS



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.4.8 Resultado da montagem e construção

A figura abaixo mostra o resultado final da montagem e construção do mecanismo.

Figura 27 – Mecanismo montado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6.5 A avaliação do mecanismo

Durante os ensaios laboratoriais, foi identificada uma falha mecânica em um dos lados do sistema de esteiras, onde a corrente apresentava instabilidade e se desprendia constantemente. Esse problema impossibilitou a realização dos ensaios com ambos os lados funcionando simultaneamente.

Contudo, como os dois lados do mecanismo foram projetados de forma simétrica e idêntica em termos de componentes e montagem, optou-se por realizar o de deslocamento utilizando apenas o lado funcional.

6.5.1 Velocidade máxima de deslocamento

A velocidade de deslocamento do mecanismo foi estimada por meio da análise de um vídeo registrado durante o funcionamento do protótipo em ambiente controlado. A medição foi realizada com base no deslocamento linear de um dos lados da esteira, que percorreu uma distância de 0,86 metros em um intervalo de 5 segundos. A partir desse registro, foi possível calcular a velocidade média de deslocamento, que corresponde a $0,172 \text{ m/s}^{-1}$. Com esse valor, e levando em consideração uma autonomia de 20 minutos das baterias com operação contínua, estima-se que o mecanismo seria capaz de percorrer aproximadamente 206,4 metros.

Figura 28 – Imagens do vídeo de deslocamento de um lado da esteira



7 CONCLUSÃO

Com base na metodologia adotada, foi possível projetar e construir um mecanismo de tração por esteiras voltado à aplicação agrícola, estruturado em três etapas: projeto informacional, projeto conceitual e projeto detalhado que deu forma ao mecanismo e definiu os processos de construção e montagem.

Diversas peças do sistema, como conectores e componentes de transmissão, foram produzidas com sucesso por impressão 3D, o que demonstrou a eficiência dessa tecnologia na prototipagem de sistemas mecânicos personalizados.

A comunicação entre o microcontrolador e o dispositivo móvel foi testada com sucesso via rede Wi-Fi, possibilitando o envio de comandos de controle ao sistema.

Os testes laboratoriais foram realizados parcialmente devido a falhas mecânicas em um dos lados da esteira. No entanto um lado da esteira apresentou velocidade máxima de deslocamento de $0,172 \text{ m/s}^{-1}$.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações enfrentadas durante o desenvolvimento e os testes, algumas melhorias e expansões são propostas para trabalhos futuros:

Substituição dos motores de passo por motores de maior potência, a fim de possibilitar uma tração mais exigentes em campo, com maior eficiência.

Substituição do notebook por uma placa microcontroladora com conectividade à internet, como o ESP32, para tornar o sistema mais compacto, portátil e independente, permitindo controle remoto e coleta de dados via rede.

Elevação da estrutura central do chassi em relação ao solo, permitindo maior distância do conjunto em relação ao terreno, o que facilita a navegação sobre obstáculos e evita o acúmulo de resíduos sob a estrutura.

REFERÊNCIAS

- ALBERTO-RODRÍGUEZ et al. Review of control on agricultural robot tractors. **International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics**, v. 11, n. 3, p. 9-20, set./dez. 2020.
- ARAÚJO, Emanuel. **A construção do livro: princípios da técnica de editoração**. 2. ed. Rio de Janeiro: Lexikon, 2021.
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas Agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 307 p.
- BARCELOS, S. M.; CERQUEIRA, S. A. A. G. Algoritmos genéticos na otimização da sequência de operações em máquinas CNC: um estudo do desempenho de operadores. **Blucher Mechanical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 4768-4781, 2012.
- BASSOI, Luiz Henrique et al. Agricultura de precisão e agricultura digital. **TECCOGS - Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, São Paulo, n. 20, p. 17-36, jul./dez. 2019.
- BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão, Tecnologia e Inovação**, v. 1, n. 3, p. 9-18, 2017.
- BHUYAN, M. **Intelligent Instrumentation: Principles and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- BRUZZONE, L.; NODEHI, S. E.; FANGHELLA, P. Sistemas de locomoção rastreados para robôs móveis terrestres: uma revisão. **Machines**, v. 10, n. 8, p. 648, 2022. <https://doi.org/10.3390/machines10080648>.
- CHAMORRO, A. M. M.; GONZÁLEZ, D. A. R. **Implementación de un robot de navegación autónoma terrestre para evasión de obstáculos usando el dispositivo Pixhawk**. Quito: Universidad de las Américas, 2019.
- DE SOUSA, Rafael Vieira; LOPES, Wellington Carlos; INAMASU, Ricardo Yassushi. **Automação de máquinas e implementos agrícolas: eletrônica embarcada, robótica e sistema de gestão de informação**. 2017.
- EL-REFAIE, A. M. Motors/generators for traction/propulsion applications: A review. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, v. 8, n. 1, p. 90-99, 2013.
- EMBRAPA. **Visão 2030: O Futuro da Agricultura Brasileira**. Brasília: Embrapa, 2018.
- FERNANDES, H. C.; SILVEIRA, J. C. M. da; RINALDI, P. C. N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1582-1587, set./out. 2008.
- GARCIA, R. F. **Otimização do projeto de componentes de uma colhedora de forragem**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

- GONCALVES, E. L. Z. **Histórico do Comando Numérico**. Seminário sobre Comando.
- HACKENHAAR, N. M.; HACKENHAAR, C.; ABREU, Y. V. de. Robótica na agricultura. **Interações**, Campo Grande, v. 16, n. 1, p. 119-129, 2015.
- ISMAILOV, Alisher Shakirovich et al. Estudo de placa microcontroladora Arduino. **Ciência e Educação**, v. 3, n. 3, p. 172-179, 2022.
- KLAVER, P. R. C. **Programa computacional para otimização da lastragem de tratores agrícolas**. 2013. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.
- LI, J. et al. Research and Application of a Coupled Wheel-Track Off-Road Robot Based on Separate Track Structure. **Sensors**, v. 23, n. 1, p. 219, 2023.
- MARCICANO, João Paulo. **Introdução ao controle numérico**. 2001. Apostila (Professor) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- MIALHE, Luiz Geraldo. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301 p. (Ceres; 11).
- MILAN, M. **Gestão sistêmica e planejamento de máquinas agrícolas**. 2004. Tese (Livre Docência em Mecânica e Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.
- MOURYA, R. et al. Development of Online Adaptive Traction Control for Electric Robotic Tractors. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 177, p. 105708, 2020.
- PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K-H. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005. 411 p.
- PACHECO, E. P. **Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2000. 21 p. (Embrapa Acre. Documentos, 58).
- ROSHANIANFARD, A. et al. A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University). **Journal of Terramechanics**, v. 91, p. 155-183, 2020.
- RUBIO, J. C. **Controladora flexível multi-eixo para acionamentos fracionários de alta dinâmica**. 1992. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992.
- SALVADOR, N.; MION, R. L.; BENEZ, S. H. Consumo de combustível em diferentes sistemas de preparo periódico realizados antes e depois da operação de subsolagem. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 3, p. 870-874, 2009.
- SANTOS, Alexsandro José Virgínio dos et al. **Análise e controle de um veículo robótico tracionado por esteiras**. 2015.
- SEIDL, A. et al. Development and Experimental Validation of an Agricultural Robotic Platform

with High Traction and Low Compaction. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 37, n. 4, p. 625-633, 2021.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to Autonomous Mobile Robots**. 2. ed. Cambridge: MIT Press, 2011.

SILVA, Sidnei Domingues da. **CNC: programação de comandos numéricos computadorizados - Torneamento**. 8. ed. São Paulo: Érica, 2010. 308 p.

SIVARAO, T. J. S. et al. Review of Automated Machines towards Devising A New Approach in Developing Semi-Automated Grass Cutter. **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering**, v. 10, n. 4, p. 1-5, 2010.

SOUZA, C. E. D. de. Vantagens e desvantagens do controle numérico computadorizado (CNC). **Universidade de Uberaba**, São Paulo, v. 4, n. 4, dez. 2018. Disponível em: <http://dspace.uniube.br:8080/jspui/handle/123456789/514>.

STEINBERGER, G.; ROTHMUND, M.; AUERNHAMMER, H. Mobile farm equipment as a data source in an agricultural service architecture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 65, n. 2, p. 238-246, 2009. DOI: 10.1016/j.compag.2008.10.005.

TANAKA, Marcelo Costa. **Avaliação de um Dispositivo utilizado em Máquina de Medir por Coordenadas**. 2009. Monografia (Programa de Recursos Humanos – PRH 14/ANP) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

TEIXEIRA, J. C. Modernização da agricultura no Brasil: impactos econômicos, sociais e ambientais. **Revista Eletrônica da Associação dos Geógrafos Brasileiros**, Três Lagoas, v. 2, n. 2, p. 21-42, 2005.

VAN DER BURG, S.; BOGAARDT, M. J.; WOLFERT, S. Ethics of smart farming: Current questions and directions for responsible innovation towards the future. **NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90, p. 100289, 2019.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2021.

WISHBOX. **Como funciona uma impressora 3D? Conheça todos os tipos**. 2020. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/como-funciona-uma-impressora-3d-conheca-todos-os-tipos>.