v7.n6.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA SEMEADORA AUTÔNOMA CONTROLADA VIA WI-FI

DESIGN, CONSTRUCTION AND EVALUATION OF AN AUTONOMOUS WI-FI CONTROLLED SEEDER

PROYECTO, CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UNA SEMBRADORA AUTÓNOMA CONTROLADA VÍA WI-FI

Guilherme Martins de Sousa[1], Danilo Roberto Loureiro[2], Carlos Alberto Viliotti[3], Elivânia Maria Sousa Nascimento[4]

e768078

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i6.8078

PUBLICADO: 06/2026

RESUMO

A automação agrícola e o desenvolvimento de equipamentos inteligentes têm se destacado como alternativas promissoras para aumentar a eficiência operacional, reduzir custos e ampliar a precisão das operações mecanizadas no campo, especialmente em sistemas produtivos de pequeno porte. Nesse contexto, objetivou-se desenvolver e avaliar, em condições laboratoriais, um protótipo de semeadora autônoma de baixo custo, projetado para integrar mobilidade, conectividade e controle eletrônico ao processo de semeadura. O estudo compreendeu as etapas de desenvolvimento, manufatura e testes laboratoriais do protótipo. Foram avaliados a velocidade máxima de deslocamento, a taxa de dosagem de sementes e o consumo energético durante a operação. O protótipo atingiu velocidade máxima de deslocamento de 0,37 m s^{-1} e taxa de dosagem de até 150 sementes min^{-1}, apresentando eficiência de 100% nas condições testadas. A potência máxima requerida foi de 54,48 W, evidenciando baixo consumo energético. O sistema de controle foi baseado em microcontrolador Atmega328 associado à plataforma Arduino, permitindo operação remota por meio de rede Wi-Fi. Os resultados demonstram a viabilidade técnica do protótipo e indicam potencial de aplicação em sistemas agrícolas de pequena escala, sobretudo em propriedades que demandam soluções acessíveis e automatizadas.

PALAVRAS-CHAVE: Arduino. Automação agrícola. Eficiência energética.

ABSTRACT

Agricultural automation and the development of intelligent equipment have stood out as promising alternatives to increase operational efficiency, reduce costs, and improve the precision of mechanized field operations, especially in small-scale production systems. In this context, the objective of this study was to develop and evaluate, under laboratory conditions, a low-cost autonomous seeder prototype designed to integrate mobility, connectivity, and electronic control into the sowing process. The study comprised the stages of development, prototype manufacturing, and laboratory testing. Maximum displacement speed, seed metering rate, and energy consumption during operation were evaluated. The prototype reached a maximum displacement speed of 0.37 m s^{-1} *and a metering rate of up to 150 seeds* min^{-1}*, achieving 100% efficiency under the tested conditions. The maximum required power was 54.48 W, demonstrating low energy consumption.*

[1] Graduando em Agronomia, Universidade Federal do Ceará (UFC).
[2] Doutor em Engenharia Agrícola (UFV), Docente no Departamento de Engenharia Agrícola (UFC).
[3] Doutor em Engenharia Agrícola (UFV), Docente no Departamento de Engenharia Agrícola (UFC).
[4] Doutora em Engenharia Agrícola (UFC), Docente do Curso de Agronomia (UEMG).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

The control system was based on an Atmega328 microcontroller associated with the Arduino platform, allowing remote operation through a Wi-Fi network. The results demonstrate the technical feasibility of the prototype and indicate potential application in small-scale agricultural systems, especially on farms that require accessible and automated solutions.

KEYWORDS: *Arduino. Agricultural automation. Energy efficiency.*

RESUMEN
La automatización agrícola y el desarrollo de equipos inteligentes se han destacado como alternativas prometedoras para aumentar la eficiencia operativa, reducir costos y ampliar la precisión de las operaciones mecanizadas en el campo, especialmente en sistemas productivos de pequeña escala. En este contexto, el objetivo fue desarrollar y evaluar, en condiciones de laboratorio, un prototipo de sembradora autónoma de bajo costo, diseñado para integrar movilidad, conectividad y control electrónico al proceso de siembra. El estudio comprendió las etapas de desarrollo, manufactura del prototipo y pruebas de laboratorio del mismo. Se evaluaron la velocidad máxima de desplazamiento, la tasa de dosificación de semillas y el consumo energético durante la operación. El prototipo alcanzó una velocidad máxima de desplazamiento de 0,37 m s^{-1} y una tasa de dosificación de hasta 150 semillas min^{-1}, obteniendo una eficiencia del 100% en las condiciones evaluadas. La potencia máxima requerida fue de 54,48 W, evidenciando un bajo consumo energético. El sistema de control se basó en un microcontrolador Atmega328 asociado a la plataforma Arduino, permitiendo la operación remota mediante red Wi-Fi. Los resultados demuestran la viabilidad técnica del prototipo e indican potencial de aplicación en sistemas agrícolas de pequeña escala, especialmente en propiedades que demandan soluciones accesibles y automatizadas.

PALABRAS CLAVE*: Arduino. Automatización agrícola. Eficiencia energética.*

1. INTRODUÇÃO

A modernização da agricultura tem sido impulsionada pela incorporação de tecnologias emergentes, como robótica, tecnologia da informação e comunicação (TIC), sensores inteligentes e inteligência artificial (IA), as quais têm contribuído para o aumento da eficiência operacional e precisão das atividades no campo. Essas inovações possuem aplicações diversificadas, abrangendo desde sistemas autônomos de colheita até práticas avançadas de agricultura de precisão. O desenvolvimento de robôs agrícolas teve início na década de 1980, período marcado pelo avanço da eletrônica embarcada nas máquinas agrícolas, possibilitando os primeiros sistemas automatizados de controle e operação (Fujinaga, 2025).

A Agricultura 4.0 tem promovido a integração de tecnologias como sensores, sistemas autônomos, inteligência artificial e Internet das Coisas (IoT) no ambiente agrícola, com o objetivo de aumentar a eficiência operacional, a precisão das atividades e a sustentabilidade da produção (Bernhardt et al., 2021). Nesse contexto, a mecanização inteligente destaca-se pelo uso de máquinas e robôs capazes de executar operações agrícolas com maior autonomia e precisão. Entretanto, desafios relacionados à adaptação dessas tecnologias às condições reais de campo,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

à confiabilidade operacional e à integração entre sistemas ainda limitam sua ampla aplicação. Além disso, observa-se a carência de estudos experimentais voltados à construção física, validação operacional e avaliação do desempenho de protótipos autônomos de baixo custo aplicados à agricultura familiar e a sistemas produtivos de pequena escala, lacuna que reforça a relevância desta investigação.

Entre os equipamentos utilizados na implantação das lavouras, as semeadoras-adubadoras desempenham papel fundamental na qualidade da semeadura, pois a precisão na dosagem e na distribuição longitudinal de sementes e fertilizantes influencia diretamente o estabelecimento do estande, a uniformidade de emergência e o desenvolvimento inicial das plantas. Dessa forma, a eficiência operacional desses equipamentos é determinante para o sucesso agronômico e econômico das lavouras, contribuindo diretamente para a segurança alimentar e fortalecimento da competitividade econômica (Finch-Savage; Bassel, 2016).

Paralelamente, a manufatura aditiva, especialmente por meio da impressão 3D, tem ampliado as possibilidades de desenvolvimento de máquinas e dispositivos agrícolas de baixo custo, customizáveis e de rápida fabricação. Essa tecnologia permite a produção de peças e componentes adaptados às necessidades específicas de diferentes sistemas produtivos, além de reduzir desperdícios de material e custos de prototipagem. No contexto agrícola, sua aplicação tem se destacado na fabricação de ferramentas, sensores, invólucros eletrônicos e mecanismos de dosagem de sementes (Schné; Jasko, 2023; Padhiary et al., 2024).

Entretanto, a utilização de componentes produzidos por manufatura aditiva em máquinas agrícolas requer atenção às propriedades mecânicas dos materiais empregados, especialmente quanto à resistência à tração, impacto, fadiga e deformação térmica. Além disso, condições típicas do ambiente agrícola, como vibração contínua, exposição à radiação solar, umidade e esforços mecânicos cíclicos, podem comprometer a durabilidade e a estabilidade estrutural das peças fabricadas por impressão 3D. Dessa forma, a seleção adequada de materiais e parâmetros de fabricação torna-se fundamental para garantir desempenho operacional e confiabilidade em aplicações agrícolas.

Estudos recentes têm buscado integrar tecnologias da Agricultura 4.0 em sistemas agrícolas autônomos por meio da aplicação de navegação autônoma, visão computacional, Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e sistemas embarcados, possibilitando maior precisão operacional, monitoramento em tempo real e tomada de decisão automatizada (Araújo; Librantz, 2006; Alreshidi, 2019; Martins et al., 2021; Hasan et al., 2022). De Mattos e Walber (2022), por exemplo, desenvolveram o conceito de uma semeadora de precisão autônoma voltada a diferentes escalas de produção, evidenciando o potencial dessa tecnologia. Barros

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

(2025) investigou perigos e riscos em operações de semeadoras autônomas, propondo melhorias para a eficiência e segurança. Bai et al. (2023) abordaram aplicações de visão computacional na navegação e guiamento de veículos agrícolas autônomos, destacando sensores visuais, percepção ambiental e planejamento de rotas. Entretanto, ainda são escassos estudos experimentais envolvendo a construção física e a validação operacional de protótipos funcionais de baixo custo destinados, principalmente, a pequenos produtores.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi projetar, construir e avaliar, em condições laboratoriais, um protótipo de semeadora autônoma operável por dispositivos móveis conectados via rede Wi-Fi, priorizando baixo custo construtivo, simplicidade operacional e eficiência energética.

2. METODOLOGIA

2.1. Local do experimento

O desenvolvimento, a construção e a avaliação do protótipo foram realizados no Laboratório de Robótica Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC), localizado no município de Fortaleza, CE.

2.2. Desenvolvimento do protótipo

O desenvolvimento da semeadora autônoma foi realizado em três etapas: projeto informacional, conceitual e detalhado conforme metodologia proposta por Pahl et al. (2005). Na etapa informacional, foram definidos os requisitos funcionais, operacionais e econômicos do equipamento. Em seguida, no projeto conceitual, foram geradas e comparadas alternativas mecânicas por meio de matriz morfológica, selecionando-se a solução tecnicamente mais viável. Na fase de detalhamento realizou-se o dimensionamento estrutural, modelagem tridimensional e elaboração dos desenhos técnicos no software Autodesk Inventor®.

2.3. Construção e montagem do protótipo

O chassi foi confeccionado em aço carbono SAE 1020 (50 × 30 × 1 mm), utilizando operações de corte, soldagem e usinagem. Os eixos foram fabricados em barra rosqueada de 1”. As peças do dosador de sementes e da transmissão foram produzidas por manufatura aditiva em impressora 3D Tronxy P902, utilizando filamento PLA. Os parâmetros de impressão utilizados foram: altura de camada de 0,3 mm, largura de extrusão de 0,4 mm, temperatura do bico de 210 °C, mesa aquecida à 60 °C e velocidade de 45 mm s^{-1}.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.4. Comunicação remota e interface operacional

O sistema eletrônico e de controle do protótipo foi composto por três motores de passo, sendo dois destinados ao acionamento independente das rodas motrizes e um responsável pelo funcionamento do dosador de sementes do tipo disco perfurado horizontal. A variação da rotação entre as rodas permitiu o deslocamento em linha reta e a realização de manobras direcionais.

A arquitetura embarcada do sistema foi baseada em placa Arduino Uno R3 acoplada a uma CNC Shield V3 e drivers modelo DM556, responsáveis pela conversão dos sinais de pulso em movimentos angulares de precisão. A escolha do Arduino Uno R3 ocorreu devido ao baixo custo, ampla disponibilidade, facilidade de programação e compatibilidade com diferentes módulos de automação e comunicação, características relevantes para aplicações voltadas à agricultura de pequena escala. Os drivers DM556 foram selecionados em função da capacidade de controle microprocessado, estabilidade operacional e precisão no acionamento dos motores de passo, reduzindo perdas de sincronismo e oscilações durante o funcionamento.

A alimentação elétrica do sistema foi fornecida por duas baterias estacionárias de 12 V conectadas em série, totalizando 24 V. O consumo energético durante a operação foi monitorado por sensor de corrente ACS712 instalado na saída do circuito de alimentação. A comunicação remota ocorreu via rede Wi-Fi utilizando software Universal GCode Sender (UGS), acessado por dispositivo móvel.

A utilização da comunicação sem fio possibilitou maior flexibilidade operacional e controle remoto do protótipo sem necessidade de conexões físicas diretas. Entretanto, fatores como alcance do sinal, interferências eletromagnéticas, obstáculos físicos e instabilidades da rede podem influenciar a latência de comunicação e a confiabilidade operacional do sistema, especialmente em condições reais de campo. Apesar dessas limitações, durante os testes laboratoriais não foram observadas falhas significativas de comunicação ou perda de resposta dos comandos enviados ao protótipo.

2.5. Avaliação do protótipo

A avaliação do protótipo foi realizada em ambiente laboratorial controlado, visando analisar o desempenho operacional do sistema eletrônico, da mobilidade e do mecanismo dosador de sementes. Foram avaliadas a comunicação remota, a velocidade máxima de deslocamento, a taxa de dosagem de sementes e o consumo energético durante a operação. Os ensaios foram conduzidos com três repetições para cada condição operacional avaliada, buscando reduzir interferências ocasionais e aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A velocidade máxima (V) foi determinada mediante incrementos sucessivos de cinco rotações por minutos (5 rpm) nos motores de tração até a ocorrência de instabilidades operacionais, como perda de sincronismo dos motores ou falhas no deslocamento. O sistema de transmissão de potência de cada roda possui uma relação de transmissão de 8:1, ou seja, a cada oito rotações do motor, a roda de tração completa uma revolução. A velocidade foi estimada conforme a Equação 1.

$$V = \frac{\pi . D . \omega}{60} \quad (1)$$

em que: *V* é a velocidade (m s^{-1}), *D* é o diâmetro da roda (m) e ω é a rotação da roda (RPM).

Para a avaliação do sistema dosador foram utilizadas sementes de soja cultivar IAC Foscarin 31. O mecanismo dosador era composto por disco horizontal perfurado contendo 15 furos. Assim, teoricamente, cada rotação completa do disco permitiria a dosagem de 15 sementes. A eficiência de dosagem (Ef) foi determinada após 20 rotações do disco, considerando 300 sementes como referência teórica máxima de distribuição, conforme a Equação 2.

$$Ef = \frac{sementes\ contabilizadas}{300\ sementes}\ x\ 100 \quad (2)$$

Embora a análise tenha considerado a condição teórica de eficiência máxima, reconhece-se que sistemas reais de dosagem estão sujeitos a perdas operacionais, falhas de alimentação, ocorrência de múltiplos e variações na singulação das sementes, fatores que podem influenciar diretamente a uniformidade da distribuição longitudinal. Dessa forma, os resultados obtidos representam uma avaliação preliminar do funcionamento do mecanismo dosador em condições laboratoriais controladas.

Adicionalmente, foram observados qualitativamente aspectos relacionados à regularidade do fluxo de sementes e à estabilidade operacional do sistema durante os ensaios. Entretanto, parâmetros tradicionalmente empregados em avaliações normatizadas de semeadoras de precisão, como índice de singulação, percentual de falhas, ocorrência de múltiplos, coeficiente de variação e uniformidade longitudinal de distribuição, não foram determinados nesta etapa do estudo.

A corrente elétrica foi monitorada por sensor ACS712 instalado na saída das baterias. A potência consumida (P) foi estimada pela Equação 3.

$$P = V . I \quad (3)$$

em que: *P* é a potência elétrica consumida da bateria (W), *V* é a tensão (V) e *I* é a *c*orrente elétrica (A).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Ressalta-se que a avaliação do protótipo foi conduzida exclusivamente em ambiente laboratorial, condição que possibilitou maior controle experimental, porém não reproduz integralmente as variabilidades encontradas em condições reais de campo, como irregularidades do terreno, vibrações, presença de resíduos vegetais, variações de umidade e interferências no sistema de comunicação sem fio. Portanto, estudos futuros em ambiente operacional agrícola são necessários para validação mais abrangente do desempenho e da confiabilidade do protótipo em condições reais de uso.

2.6. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à estatística descritiva, com cálculo de média e desvio padrão. Os ensaios foram realizados com repetições experimentais, permitindo analisar a repetibilidade operacional do protótipo nas diferentes condições avaliadas. Quando aplicável, ajustaram-se modelos de regressão em função da rotação operacional. Além disso, recomenda-se, em estudos futuros, a incorporação de análises estatísticas mais robustas, como análise de variância (ANOVA) e testes de comparação de médias, associadas à avaliação de parâmetros específicos da engenharia de semeadura de precisão, como singulação, falhas, múltiplos e uniformidade longitudinal da distribuição de sementes, visando ampliar a confiabilidade e a validação quantitativa dos resultados obtidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Desenvolvimento do projeto

A aplicação da metodologia de projeto proposta por Pahl et al. (2005) possibilitou a condução sistemática das etapas de concepção, seleção de soluções, detalhamento construtivo, montagem e avaliação experimental do protótipo. Essa abordagem favoreceu a organização do processo de desenvolvimento, reduzindo retrabalhos e permitindo maior coerência entre os requisitos inicialmente definidos e a solução final obtida. Além disso, a adoção de componentes eletrônicos de baixo custo e peças produzidas por manufatura aditiva contribuiu para simplificar o processo construtivo e reduzir os custos de prototipagem. Entretanto, algumas limitações técnicas devem ser consideradas, especialmente, em relação à resistência mecânica e à durabilidade de componentes fabricados por impressão 3D quando submetidos às condições operacionais típicas do ambiente agrícola, como vibrações, impactos e exposição contínua à umidade e radiação solar. Da mesma forma, embora a arquitetura eletrônica embarcada adotada apresente simplicidade de implementação e facilidade de integração entre sistemas, fatores

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

como estabilidade da comunicação sem fio e limitações de processamento podem influenciar o desempenho operacional em aplicações futuras realizadas em condições reais de campo.

3.1.1. Projeto Informacional

A partir das demandas funcionais e das limitações técnicas e econômicas previamente identificadas, foram estabelecidos os requisitos operacionais do protótipo (Quadro 1). Entre os principais critérios adotados destacaram-se dimensões compactas, velocidade operacional de até 2.000 m h^{-1}, baixo custo construtivo, fonte de energia elétrica e mínima ocorrência de danos mecânicos às sementes. A definição prévia desses requisitos foi fundamental para direcionar o desenvolvimento da máquina, especialmente no que se refere à portabilidade, autonomia energética e simplicidade operacional.

A velocidade operacional estabelecida foi definida considerando a capacidade de deslocamento compatível com operações em pequenas áreas agrícolas e ambientes laboratoriais, buscando conciliar estabilidade de navegação, precisão da dosagem de sementes e baixo consumo energético. As limitações dimensionais adotadas no projeto tiveram como objetivo facilitar o transporte, a mobilidade e a operação do equipamento em áreas reduzidas, além de permitir maior facilidade de montagem e manutenção dos componentes mecânicos e eletrônicos.

A adoção de alimentação elétrica por baterias foi motivada pela necessidade de desenvolver um sistema com menor emissão de ruído, reduzida complexidade mecânica e possibilidade de operação autônoma sem dependência direta de motores a combustão. A potência disponível do sistema foi dimensionada considerando os requisitos mínimos necessários para acionamento simultâneo dos motores de tração e do mecanismo dosador, priorizando baixo consumo energético e maior autonomia operacional durante os ensaios. Além disso, buscou-se minimizar danos mecânicos às sementes por meio da seleção de mecanismos de dosagem com menor ocorrência de impactos e esmagamentos durante a operação, visando preservar a integridade física do material propagativo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 1. Lista de requisitos do protótipo de semeadora autônoma

Usuário: João Batista			**Lista de Requisitos**		**Identificação Classificação** **Pag.:** 01 **Folha:** 01
			Para: DENA	**Projeto/Produto:** Semeadora Autopropelida	
Modificação	**N/V**		**Requisitos**		**Exigência**
Data da alteração: 20/06/2023	Assinalar (N) necessidade ou (V) vontade		1. Geometria - Dimensões externas do mecanismo recolhedor:		
		N	Comprimento:		900 mm
		N	Largura:		600 mm
		N	Altura:		400 mm
			2. Declividade do terreno:		
		N	Longitudinal ao deslocamento:		0%
		N	Transversal ao deslocamento:		0 - 10%
			3. Cinemática e Dinâmica:		
		N	Posicionamento da semente:		Centralizada com o dosador
		N	Velocidade de trabalho:		até 2000 m h^{-1}
			Direcionamento:		Duas rodas de tração com acionamento independente
		N	Danos nas sementes:		
		N	Quantitativos:		Mínimo possível
			Qualitativos:		Mínimo possível
		N	Fonte de energia:		Elétrica
			4. Potência disponível:		0,25 cv
			Baixo custo:		Limite de R$ 3500,00

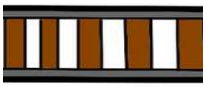
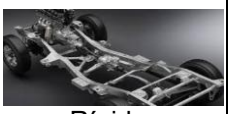
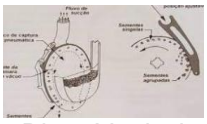
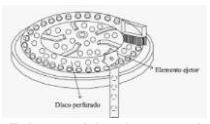
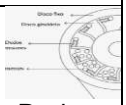
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

3.1.2. Projeto conceitual

A decomposição funcional do sistema em subfunções permitiu avaliar separadamente os principais processos envolvidos na operação da semeadora, como deslocamento, transmissão de potência, dosagem de sementes, abertura e fechamento do sulco. A aplicação da matriz morfológica permitiu selecionar a combinação de soluções mais adequada aos requisitos técnicos e econômicos previamente estabelecidos (Quadro 2).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 2. Matriz morfológica contendo as soluções e subfunções do mecanismo recolhedor

Soluções / Sub-funções		1	2	3	4
1	Mecanismo de tração	 Rodas	 Esteira	 Trilhos	
2	Transmissão de potência na tração	 Engrenagens	 Engrenagem sem-fim	 cardã	 Direto no eixo
3	Conformação do Chassi	 Rígido	 Articulado		
4	Dosador de Sementes	 Disco Vertical	 Disco Horizontal	 Pneumático	 Dedos Prensores
5	Transmissão de potência na distribuição de sementes	 Engrenagens	 Engrenagem sem-fim	 cardã	 Direto no eixo
6	Abrir o solo	 Haste fixa	 Disco duplo	 Punção	
7	Fechar o solo	 Roda simples	 Roda dupla	 Corrente	

Fonte: Elaborada pelos autores.

A configuração final do protótipo foi composta por tração sobre rodas, transmissão por engrenagem sem-fim, chassi articulado, dosador do tipo disco horizontal, haste fixa sulcadora e roda dupla para fechamento do sulco. Essa combinação priorizou simplicidade construtiva, baixo custo e eficiência operacional compatíveis com a proposta de uma semeadora autônoma de pequeno porte. As alternativas geradas foram submetidas à análise multicritério, considerando

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

fatores técnicos, econômicos e operacionais (Tabela 1). Os critérios de maior peso foram eficiência no deslocamento, eficiência de distribuição de sementes e eficiência energética. Entretanto, reconhece-se que parte das ponderações adotadas apresenta caráter parcialmente subjetivo, uma vez que depende da interpretação técnica dos projetistas e das condições específicas estabelecidas para o desenvolvimento do protótipo.

Tabela 1. Critérios de avaliação utilizados para a escolha da melhor solução

Critérios de Avaliação	Peso do Critério	Variante Perfeita	Nota
Baixo custo de construção	0,100	100	10,0
Baixo custo de operação e manutenção	0,100	100	10,0
Soluções que respeitam o ambiente	0,030	100	3,0
Eficiência no deslocamento	0,200	100	20,0
Eficiência na distribuição de sementes	0,200	100	20,0
Eficiência energética	0,200	100	20,0
Baixos danos mecânicos nas sementes	0,050	100	5,0
Eficiência da conversão de energia	0,050	100	5,0
Fácil operação e Manutenção	0,010	100	1,0
Segurança na operação	0,010	100	1,0
Utilização de peças padronizadas	0,050	100	5,0
Total	1,00		100

Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

A solução conceitual selecionada (Tabela 2) mostrou-se compatível com os objetivos de simplicidade mecânica, baixo custo e precisão operacional. A adoção de rodas motrizes independentes representa vantagem adicional, pois permite melhor manobrabilidade e controle direcional do protótipo, característica desejável em sistemas autônomos de pequeno porte.

Tabela 2. Solução selecionada no projeto conceitual

Subfunções	Solução Conceitual
Mecanismo de Tração	Rodas
Transmissão de potência na tração	Engrenagem sem-fim
Conformação do Chassi	Articulado
Dosador de sementes	Disco horizontal
Transmissão de potência na distribuição de sementes	Direto no eixo
Abrir o solo	Haste fixa
Fechar o solo	Roda dupla

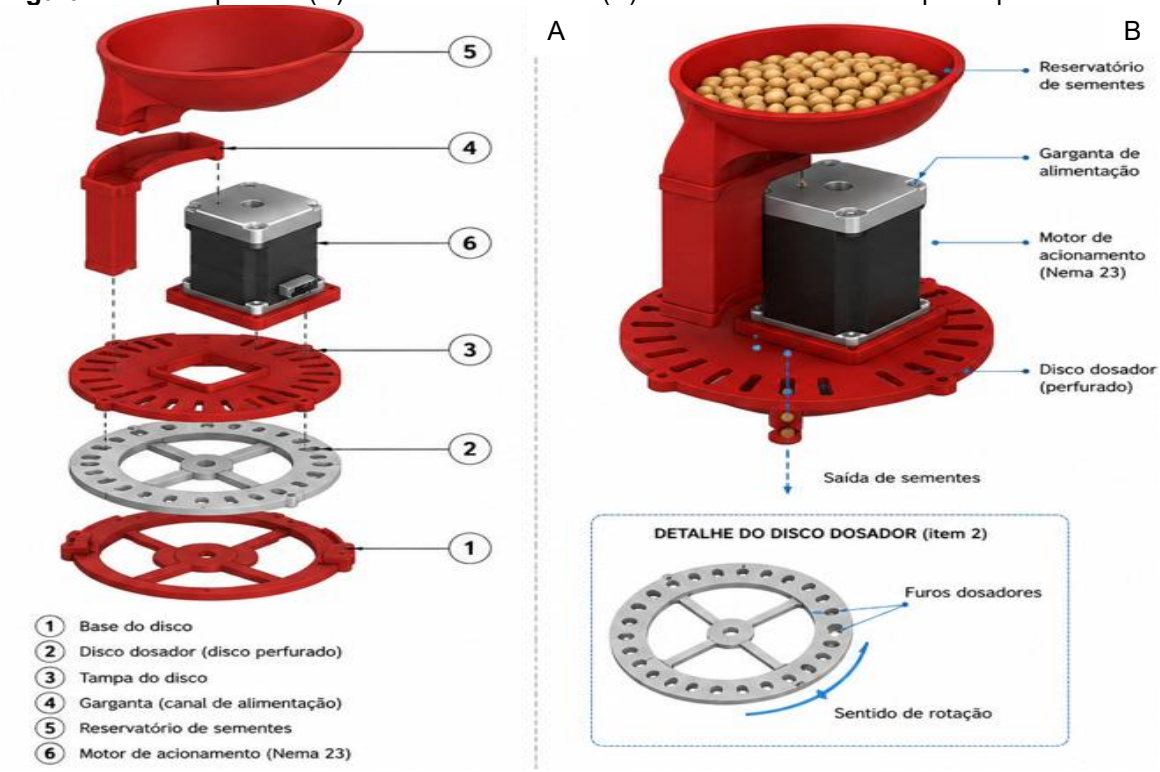
Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.1.3. Projeto detalhado

Após a definição conceitual, foi realizado o detalhamento tridimensional dos componentes e conjuntos mecânicos no software Autodesk Inventor®. O uso de modelagem computacional permitiu o dimensionamento preciso das peças, a verificação de interferências entre componentes e a geração de desenhos técnicos para fabricação (Figura 1 e 2). O sistema dosador foi constituído por seis componentes principais: base do disco, responsável pela sustentação estrutural; disco dosador perfurado, destinado à dosagem e condução das sementes; tampa do disco, utilizada para fechamento e proteção do mecanismo; garganta de alimentação, responsável pelo direcionamento das sementes ao disco; reservatório de sementes; e motor de acionamento Nema 23, responsável pelo fornecimento do movimento rotacional ao sistema dosador (Figura 1). A seleção dos componentes priorizou simplicidade construtiva, modularidade e baixo custo de fabricação. As peças confeccionadas em PLA apresentaram função estrutural e operacional no sistema de dosagem, enquanto o motor Nema 23 foi utilizado devido à precisão de acionamento e compatibilidade com o sistema eletrônico embarcado.

Figura 1. Vista explodida (A) e o modelo montado (B) do sistema dosador do protótipo

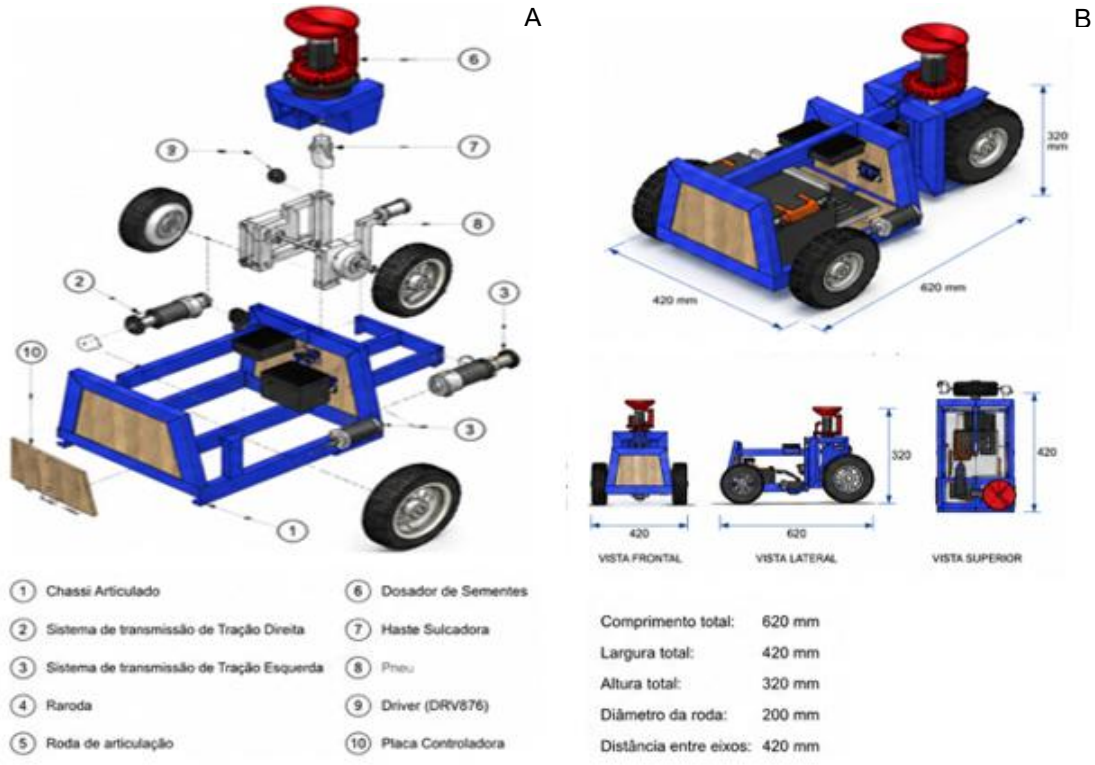


Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A construção do protótipo de semeadora autônoma envolveu a utilização de chassi articulado, sistemas independentes de transmissão para as rodas motrizes, roda de articulação traseira, sistema dosador de sementes, haste sulcadora, pneus e componentes eletrônicos de controle e acionamento (Figura 2). O chassi articulado, confeccionado em aço carbono e madeira, constituiu a estrutura principal de suporte dos sistemas mecânicos e eletrônicos. Os sistemas de transmissão direita e esquerda foram responsáveis pela transferência de potência dos motores às rodas motrizes, permitindo deslocamento e manobras direcionais do protótipo. A roda de articulação traseira contribuiu para a estabilidade e mobilidade do conjunto durante a operação. O sistema dosador de sementes, composto por peças em PLA e aço, foi responsável pelo armazenamento e distribuição das sementes, enquanto a haste sulcadora realizou a abertura do sulco para deposição do material propagativo. Os pneus proporcionaram tração e deslocamento do equipamento. O controle eletrônico foi realizado por drivers DRV876 e placa controladora, responsáveis pelo gerenciamento dos sinais de acionamento, comunicação e controle operacional do protótipo.

Figura 2. Vista explosiva (A) e modelo montado (B) do protótipo da semeadora autônoma



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A seleção dos materiais e componentes priorizou baixo custo construtivo, simplicidade de fabricação, facilidade de manutenção e compatibilidade com sistemas embarcados aplicados à automação agrícola de pequena escala. O emprego de ferramentas CAD mostrou-se estratégico no desenvolvimento do equipamento, pois reduziu erros de fabricação, facilitou ajustes geométricos e possibilitou rápida integração entre partes metálicas, componentes impressos em 3D e sistema eletrônico. Além disso, a modelagem digital favorece futuras modificações construtivas, escalonamento do projeto e replicação do sistema em novos estudos, ampliando o potencial tecnológico da solução proposta.

3.2. Construção e montagem da semeadora

A construção do protótipo foi realizada no Laboratório de Robótica Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC), conforme as especificações definidas na etapa de projeto detalhado. O chassi estrutural foi confeccionado em perfil de aço carbono SAE 1020, com dimensões de 50 × 30 × 1 mm (altura × largura × espessura), material selecionado em função da resistência mecânica, disponibilidade comercial e baixo custo. As etapas de fabricação envolveram operações de corte, soldagem e usinagem dos componentes metálicos. Após a conclusão estrutural do chassi, procedeu-se ao acabamento superficial e à aplicação de pintura, com a finalidade de aumentar a proteção contra corrosão e melhorar o aspecto final do equipamento.

Os componentes confeccionados em polímero termoplástico PLA, destinados principalmente aos mecanismos de transmissão e dosagem de sementes, foram produzidos por manufatura aditiva em impressora 3D disponível no laboratório. A modelagem tridimensional das peças foi realizada no software Autodesk Inventor®, enquanto a conversão dos arquivos para formato STL e o fatiamento para impressão foram executados no software Repetier-Host. A escolha do PLA ocorreu devido à facilidade de impressão, baixo custo, estabilidade dimensional e ampla utilização em processos de prototipagem rápida, permitindo maior agilidade no desenvolvimento e na substituição de componentes durante os testes experimentais.

A integração entre componentes metálicos usinados e peças produzidas por impressão 3D mostrou-se adequada para a construção do protótipo, permitindo redução de custos, rapidez no processo de fabricação e facilidade de substituição ou redesenho de peças. Entretanto, a utilização de componentes fabricados em PLA apresenta limitações importantes quando aplicada a máquinas agrícolas submetidas a condições operacionais severas. Fatores como vibração contínua, esforços mecânicos cíclicos, impactos, desgaste por atrito, exposição à radiação solar e variações térmicas podem comprometer a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

a durabilidade das peças ao longo do uso em campo. Dessa forma, embora o PLA tenha apresentado desempenho satisfatório na fase de prototipagem laboratorial, aplicações futuras em condições reais poderão demandar materiais com maior resistência mecânica e térmica, como ABS, PETG ou polímeros reforçados, especialmente em componentes sujeitos a maiores solicitações estruturais e desgaste operacional.

3.3. Avaliação do protótipo

Os ensaios conduzidos em laboratório permitiram avaliar o desempenho operacional do protótipo de semeadora autônoma em condições controladas, contemplando velocidade de deslocamento, eficiência do sistema dosador, consumo energético e comunicação remota (Figura 3). A realização dos testes em ambiente laboratorial possibilitou maior controle das variáveis experimentais e melhor repetibilidade das avaliações, contribuindo para a validação preliminar do funcionamento dos sistemas mecânico, eletrônico e de comunicação embarcados.

Figura 3. Protótipo de semeadora autônoma



Fonte: Elaborada pelos autores (2026).

Entretanto, a avaliação operacional realizada apresenta limitações inerentes às condições controladas de laboratório, uma vez que não reproduz integralmente as variabilidades encontradas em ambientes agrícolas reais. Fatores como irregularidades e ondulações do terreno, presença de resíduos vegetais, vibrações mecânicas, variações de umidade do solo e interferências na comunicação sem fio podem influenciar diretamente a estabilidade operacional, a mobilidade do protótipo e a uniformidade da dosagem de sementes em condições de campo. Dessa forma, os resultados obtidos representam uma validação inicial do sistema, sendo necessários estudos futuros em condições reais de operação para ampliar a confiabilidade e a robustez da avaliação operacional do protótipo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.3.1. Velocidade máxima de deslocamento

Os testes realizados em laboratório demonstraram que a rotação máxima alcançada pelos motores de tração foi de aproximadamente 24 rpm. A partir desse valor e com base na Equação 1, estimou-se velocidade máxima de deslocamento de 0,37 m s^{-1}. O limite operacional foi determinado pela ocorrência de falhas nos motores em rotações superiores, indicando restrições relacionadas ao torque disponível nos motores de passo utilizados.

A velocidade obtida é compatível com equipamentos autônomos compactos, nos quais menores velocidades favorecem maior estabilidade, precisão no posicionamento e melhor controle direcional (Han et al., 2020; Yan et al., 2024). Para futuras versões do sistema, a utilização de motores com maior torque ou ajustes na relação de transmissão pode ampliar a capacidade operacional do equipamento.

3.3.2. Desempenho do sistema dosador de sementes

O mecanismo dosador foi avaliado utilizando sementes de soja, com o objetivo de determinar a faixa de rotação capaz de manter elevada eficiência de distribuição. Entre 1 e 10 rpm, o sistema apresentou eficiência de 100%, alcançando capacidade operacional de até 150 sementes min^{-1}. Esse resultado demonstra que o dosador de disco perfurado horizontal foi capaz de realizar a individualização das sementes sem ocorrência significativa de falhas ou sobreposição. Em rotações superiores a 10 rpm, observou-se redução da eficiência para aproximadamente 90%, comportamento possivelmente associado ao menor tempo disponível para preenchimento adequado dos alvéolos do disco em velocidades mais elevadas.

Os resultados obtidos reforçam a importância do sistema dosador para a qualidade da semeadura. Segundo Zha *et al*. (2025), o disco dosador constitui componente central dos mecanismos de distribuição, influenciando diretamente a precisão da operação. De forma complementar, Hussain *et al.* (2025) relatam que a velocidade de rotação e as características construtivas do sistema exercem influência significativa sobre o desempenho da semeadura. Assim, mesmo utilizando solução mecânica simplificada, o protótipo apresentou comportamento compatível com tendências observadas em sistemas mais avançados

3.3.3. Consumo energético

O consumo energético foi avaliado em duas condições operacionais: menor velocidade e velocidade máxima de deslocamento. As correntes elétricas medidas foram de 2,27 A e 1,28 A, respectivamente. Considerando tensão nominal de 24 V, a potência consumida foi estimada em: 54,48 W na menor velocidade operacional e 30,72 W na velocidade máxima. Dessa forma, a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

maior potência registrada durante os ensaios foi de 54,48 W, evidenciando baixo consumo energético do protótipo.

Observou-se redução da potência com o aumento da rotação, comportamento associado à diminuição do torque disponível nos motores de passo em velocidades elevadas. Embora essa característica seja inerente ao tipo de motor empregado, os valores obtidos indicam baixo consumo energético do sistema. Esse resultado representa vantagem relevante para aplicações autônomas alimentadas por baterias, especialmente em propriedades de pequena escala, nas quais a eficiência energética e a autonomia operacional são fatores estratégicos.

3.3.4. Sistema eletrônico e comunicação remota

Durante os ensaios, foi possível estabelecer comunicação estável entre o protótipo e os dispositivos móveis, como smartphones, por meio de rede Wi-Fi. O sistema permitiu o envio remoto de comandos operacionais, viabilizando o acionamento dos motores e o controle do deslocamento da máquina. A integração entre microcontrolador Atmega328 embarcado na plataforma Arduino e comunicação sem fio demonstrou desempenho satisfatório, ampliando as possibilidades futuras de automação, monitoramento em tempo real e integração com sensores agrícolas. Segundo Qin *et al*. (2025), o uso de microcontroladores em sistemas agrícolas automatizados tem proporcionado maior precisão operacional e flexibilidade de controle.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo apresentou funcionamento satisfatório quanto à locomoção, acionamento do sistema dosador e comunicação remota, evidenciando a viabilidade da integração entre componentes mecânicos, eletrônicos e sistemas embarcados de baixo custo.

Em termos operacionais, o protótipo atingiu velocidade máxima de deslocamento de 0,37 m s^{-1} e capacidade de dosagem de até 150 sementes min^{-1}, com eficiência de 100% na faixa operacional avaliada em laboratório. O consumo energético máximo foi de 54,48 W, indicando potencial para aplicações alimentadas por baterias.

Os resultados confirmam a viabilidade técnica do sistema proposto para operações agrícolas de pequena escala e indicam potencial de uso em processos associados à agricultura de precisão e automação agrícola. Recomenda-se a realização de ensaios em condições reais de campo, visando validar o desempenho do equipamento sob diferentes condições de solo, relevo e operação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REFERÊNCIAS

ALRESHIDI, E. Smart Sustainable Agriculture (SSA) Solution Underpinned by Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI). **International Journal of Advanced Computer Science and applications**, v.10, n.5, p.93-102, 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.03106

ARAÚJO, S. A. de.; LIBRANTZ, A. F. H. Visão e inteligência computacionais aplicadas a navegação autônoma de robôs. **Exacta**, v.4, n.2, p.343-352, 2006. Disponível em: https://uninove.emnuvens.com.br/exacta/article/view/768/671. Acesso em: 19 mai. 2026.

BAI, Y.; ZHANG, B.; XU, N.; ZHOU, J.; SHI, J.; DIAO, Z. Vision-based navigation and guidance for agricultural autonomous vehicles and robots: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.205, 107584, 2023. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107584

BARROS, Felipe Bonfati de. **Identificação de perigos e riscos para tomada de decisão em operações de semeadoras autônomas**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2025. Disponível em: https://hdl.handle.net/20.500.12733/41408. Acesso em: 10 abr. 2026.

BERNHARDT, H.; BOZKURT, M.; BRUNSCH, R.; COLANGELO, E.; HERRMANN, A.; HORSTMANN, J.; KRAFT, M.; MARQUERING, J.; STECKEL, T.; TAPKEN, H.; WELTZIEN, C.; WESTERKAMP, C. Challenges for agriculture through industry 4.0. **Agronomy,** v.11, n.10, p.1935. 2021. https://doi.org/10.3390/agronomy11101935

DE MATTOS, E.; WALBER, M. Desenvolvimento do conceito de uma semeadora de precisão. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 7, p.51985-52003, 2022. https://doi.org/10.34117/bjdv8n7-218

FINCH-SAVAGE, W. E.; BASSEL, G. W. Seed vigour and crop establishment: extending performance beyond adaptation. **Journal of Experimental Botany**, v.67, n.3, p.567-591, 2016. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490

FUJINAGA, T. Autonomous navigation method for agricultural robots in high-bed cultivation environments. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 231, p.110001, 2025. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110001

HAN, J.H.; PARK, C-H.; KWON, J. H.; LEE, J.; KIM, T. S.; JANG, Y. Y. Performance evaluation of autonomous driving control algorithm for a crawler-type agricultural vehicle based on low-cost multi sensor fusion positioning. **Applied Sciences**, v.10, n.13, p.4667, 2020. https://doi.org/10.3390/app10134667.

HASAN, MD. M.; ISLAM, U. M.; SADEQ, M. J. Towards technological adaptation of advanced farming through AI, IoT, and robotics: A comprehensive overview. **In**: Artificial Intelligence and Smart Agriculture Tecnology Book, Chapter 2. 2022, 27p. Disponível em: https://arxiv.org/pdf/2202.10459. Acesso em: 19 mai. 2026.

HUSSAIN, S.; CHEN, Y.; YU, X.; FARID, M. U.; GHAFOOR, A.; ALSHAMALI, S. J.; MUNIR, T.; HU, J. Design optimization and aerodynamic investigations of air suction seed metering devices system through CFD-DEM approach. **Smart Agricultural Technology**, v.12, p.101082, 2025. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101082.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MARTINS, F. F.; CARVALHO, T. M.; CELECIA, A.; OLIVEIRA, A. I. S.; BARBOSA, G. B. P.; VELLASCO, M. M. B.; CAARLS, W.; FIGUEIREDO, K.; LEITE, A. C. Sistema de navegação autônoma para o robô agrícola Soybot. **In:** XV Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Sociedade Brasileira de Automática, v.1, n.1, 7p. Disponível em: https://wouter.caarls.org/files/martins2021.pdf https://doi.org/10.20906/sbai.v1i1.2646. Acesso em: 19 mai. 2026.

PADHIARY, M.; SAHA, D.; KUMAR, R.; SETHI, L. N.; KUMAR, A. Enhancing precision agriculture: A comprehensive review of machine learning and AI vision applications in all-terrain vehicle for farm automation. **Smart Agricultural Technology**, v.8, p.100483, 2024. https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100483

PAHL, Gerhard.; BEITZ, Wolfgang.; FELDHUSEN, Jorg.; GROTE, H. Karl-Heinrich. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

SCHNÉ, T.; JASKO, S. 3D printing in agriculture - review. **Georgikon for Agriculture**, v.27, n.2, p.45–54, 2023. Disponível em: https://journal.uni-mate.hu/index.php/gfa/article/view/4986. Acesso em: 20 fev. 2025.

QIN, W.; LI, Y.; QIAN, C.; FAN, Z.; YAN, D.; ZOU, G.; LIU, S.; WANG, Z.; ZANG, Y.; ZHANG, M. The development of an air suction precision seed-metering device for rice plot breeding. **Agronomy**, v.15, n.7, p.1642, 2025. https://doi.org/10.3390/agronomy15071642.

YAN, J.; ZHANG, W.; LIU, Y.; PAN, W.; HOU, X.; LIU, Z. Autonomous trajectory tracking control method for an agricultural robotic vehicle. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.17, n.1, p. 215–224, 2024. Disponível em: https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/7296. Acesso em: 10 abr. 2026.

ZHA, X.; LI, J.; ZHAO, H.; CHEN, L.; YANG, W.; YANG, R.; LIU, W. Design optimization of an air-suction type seeder for rice breeding plots based on the discrete element method (DEM). **Smart Agricultural Technology**, v.12, p.101658, 2025. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101658.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.