



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

JOÃO BATISTA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DOSADOR DE SEMENTES E
FERTILIZANTES DE DISCO HORIZONTAL**

FORTALEZA

2025

JOÃO BATISTA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DOSADOR DE SEMENTES E
FERTILIZANTES DE DISCO HORIZONTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Thales Vinicius de Araújo Viana.

Coorientador: 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)

- S58d Silva, João Batista da.
Desenvolvimento de um mecanismo dosador de sementes e fertilizantes de disco horizontal / João Batista da Silva. – 2025.
55 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Thales Vinicius de Araújo Viana.
Coorientação: Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro.
1. semeadura de precisão. 2. acionamento por motor elétrico. 3. dosagem de sementes e fertilizantes. 4. uniformidade de dosagem. I. Título.

CDD 630

JOÃO BATISTA DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM MECANISMO DOSADOR DE SEMENTES E
FERTILIZANTES DE DISCO HORIZONTAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovada em: 25/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Thales Vinicius de Araújo Viana (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Rafaela Paula Melo
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dra. Flora Maria de Melo Villar
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Prof. Dr. Marconi Ribeiro Furtado Junior
Universidade Federal de Viçosa (UFV)

A Deus.

Aos meus pais, João e Telma.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força, sabedoria e perseverança concedidas ao longo de toda a realização deste trabalho.

Ao orientador, Prof. Thales Vinicius de Araújo Viana, pela confiança em mim depositada, e ao coorientador, Prof. Dr. Danilo Roberto Loureiro, pelo suporte nas situações de decisão, pela compreensão diante das dificuldades e pelas contribuições fundamentais para a conclusão deste trabalho.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) e a todos os professores pelos ensinamentos compartilhados e pela dedicação.

O presente estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Meus sinceros agradecimentos ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Laboratório de Automação e Robótica Agropecuária (LAGRO) pela estrutura e suporte técnico disponibilizados para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço também à banca examinadora, composta pela Prof.^a Rafaela Paula, Prof.^a Flora Maria e Prof. Marconi, pelas valiosas contribuições, observações e sugestões que enriqueceram este trabalho e contribuíram para o aprimoramento da pesquisa.

Estendo meus agradecimentos aos amigos Guilherme Martins, Fabrício Vasconcelos, Francisco Arlen, Maria de Fátima e a todos os colegas que colaboraram direta ou indiretamente na execução dos testes, montagem do protótipo e análise dos resultados, bem como aos amigos e familiares pelo apoio, incentivo e compreensão em todos os momentos deste percurso acadêmico.

Por fim, registro meu reconhecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste projeto, tornando possível a realização deste trabalho.

“O campo ensina que paciência e trabalho duro sempre dão resultados.” (Autor desconhecido, 2025).

RESUMO

O uso de motores elétricos no acionamento de mecanismos dosadores de sementes e fertilizantes tem demonstrado maior eficiência em comparação ao tradicional sistema por roda de tração dos implementos. Além disso, a utilização de um único mecanismo para a dosagem de diferentes insumos oferece vantagens como a otimização do espaço operacional e a simplificação das rotinas de manutenção durante a semeadura. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo de dosador de sementes e fertilizantes com disco horizontal, acionado por motor elétrico. O estudo foi conduzido no Laboratório de Automação e Robótica Agrícola, em Fortaleza–CE, onde foram realizados o projeto, a fabricação das peças com o auxílio da impressão 3D e os testes em condições controladas de laboratório. Foi adotado um delineamento inteiramente aleatorizado em esquema fatorial $5 \times 2 \times 2$, com cinco velocidades de rotação dos discos dosadores, dois níveis do reservatório de sementes e dois níveis do reservatório de fertilizante, visando à avaliação quantitativa do desempenho do mecanismo e logo após uma análise qualitativa com a realização do teste de germinação. Os resultados demonstraram que o sistema dosador operou de forma satisfatória nas rotações de 2,45; 4,90; 7,35; 9,80 rpm, sendo também possível identificar o efeito dos diferentes níveis de carga nos reservatórios sobre o desempenho do mecanismo. Ainda assim, o dispositivo demonstrou viabilidade técnica para aplicação, apresentando potencial para ajustes e aperfeiçoamentos em futuras versões.

Palavras-chave: semeadura de precisão; acionamento por motor elétrico; dosagem de sementes e fertilizantes; uniformidade de dosagem.

ABSTRACT

The use of electric motors to drive seed and fertilizer metering mechanisms has demonstrated greater efficiency when compared to the traditional ground wheel-driven systems used in agricultural implements. Furthermore, the use of a single mechanism for dispensing different inputs offers advantages such as operational space optimization and simplification of maintenance routines during sowing operations. In this context, the objective of the present study was to develop a prototype of a seed and fertilizer metering device equipped with a horizontal disc, driven by an electric motor. The study was conducted at the Laboratory of Agricultural Automation and Robotics, in Fortaleza, Brazil, where the design process, manufacturing of parts using 3D printing technology, and testing under controlled laboratory conditions were carried out. A completely randomized design was adopted in a $5 \times 2 \times 2$ factorial scheme, consisting of five disc rotation speeds, two seed reservoir levels, and two fertilizer reservoir levels, aiming to quantitatively evaluate the performance of the mechanism, followed by a qualitative assessment through a seed germination test. The results showed that the metering system operated satisfactorily at rotation speeds of 2.45, 4.90, 7.35, and 9.80 rpm, and also allowed the identification of the influence of different reservoir load levels on the mechanism's performance. Nevertheless, the device demonstrated technical feasibility for practical application and presents potential for refinement and improvement in future versions.

Keywords: precision seeding; electric motor drive; seed and fertilizer dosing; dosage uniformity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Etapas do trabalho segundo a metodologia	22
Figura 2	– Peças do mecanismo	24
Figura 3	– Impressora 3D utilizada	25
Figura 4	– Motor elétrico utilizado	26
Figura 5	– Placas Arduino Uno R3 e CNC Shield V3	26
Figura 6	– Driver utilizado no controle do motor	27
Figura 7	– Fonte chaveada utilizada	27
Figura 8	– Computador utilizado	28
Figura 9	– Dimensões lineares de uma semente	28
Figura 10	– Sementes utilizadas no dosador	29
Figura 11	– Visualização das sementes ejetadas do mecanismo	30
Figura 12	– Esquema de ligação completo	31
Figura 13	– Vista explodida do mecanismo dosador de sementes e fertilizantes	37
Figura 14	– Gráfico boxplot da dosagem de sementes e variabilidade em função da rotação do disco dosador	40
Figura 15	– Dosagem de sementes e variabilidade em função da rotação do disco dosador	43
Figura 16	– Gráfico boxplot da dosagem de fertilizante e variabilidade em função da rotação do disco dosador	45
Figura 17	– Dosagem de fertilizante e variabilidade em função da rotação do disco dosador	47
Figura 18	– Gráfico de dosagem de fertilizante (2,45 RPM) relação entre a massa acumulada de fertilizante (g) e o tempo (s)	47
Figura 19	– Gráfico de dosagem de fertilizante (12,25 RPM) relação entre a massa acumulada de fertilizante (g) e o tempo (s)	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Configurações definidas no software de impressão	25
Tabela 2	– Lista de requisitos do projeto	33
Tabela 3	– Custos dos principais materiais do mecanismo	34
Tabela 4	– Equipe multidisciplinar para elaboração	34
Tabela 5	– Matriz morfológica	35
Tabela 6	– Critérios para avaliação utilizados para a escolha da melhor solução	36
Tabela 7	– Soluções selecionadas no projeto conceitual	36
Tabela 8	– Lista de peças e informações adicionais	38
Tabela 9	– Valores médios das características físicas das sementes de soja	39
Tabela 10	– Análise da variância para variável sementes dosadas	39
Tabela 11	– Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por RPM para Sementes Dosadas (SD)	40
Tabela 12	– Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRS para SD	41
Tabela 13	– Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRF para SD	41
Tabela 14	– Análise da eficiência de dosagem de sementes	42
Tabela 15	– Análise da variância para variável fertilizante dosado	44
Tabela 16	– Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por RPM para Fertilizante Dosado (FD)	44
Tabela 17	– Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRS para FD	45
Tabela 18	– Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRF para FD	46
Tabela 19	– Análise da eficiência de dosagem de fertilizantes	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	JUSTIFICATIVA	13
3	OBJETIVOS	13
3.1	Objetivo Geral	13
3.2	Objetivos Específicos	13
4	REVISÃO DE LITERATURA	14
4.1	Agricultura de precisão	14
4.2	Semeadoras-Adubadoras	14
4.3	Manufatura aditiva na agricultura	16
4.4	Mecanismos dosadores de sementes	19
4.5	Mecanismos dosadores de fertilizantes	20
5	MATERIAIS E MÉTODOS	21
5.1	Desenvolvimento do projeto	21
5.1.1	<i>Planejamento e esclarecimento da tarefa</i>	<i>22</i>
5.1.2	<i>Projeto conceitual</i>	<i>22</i>
5.1.3	<i>Projeto detalhado</i>	<i>23</i>
5.2	Construção e montagem do protótipo	23
5.2.1	<i>Manufatura das peças impressas</i>	<i>24</i>
5.3	Detalhamento dos componentes do sistema a ser desenvolvido	25
5.4	Avaliação do protótipo	28
5.4.1	<i>Dimensões lineares das sementes</i>	<i>28</i>
5.4.2	<i>Dosagem de sementes</i>	<i>29</i>
5.4.3	<i>Dosagem de fertilizantes</i>	<i>31</i>
5.5	Análise estatística dos dados obtidos	32
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
6.1	Desenvolvimento do projeto	32
6.1.1	<i>Projeto informacional</i>	<i>32</i>
6.1.2	<i>Projeto conceitual</i>	<i>35</i>
6.1.3	<i>Projeto detalhado</i>	<i>37</i>
6.2	Avaliação do mecanismo dosador – Dosagem de sementes	38
6.2.1	<i>Caracterização das sementes</i>	<i>38</i>

6.3	Avaliação do mecanismo dosador – Dosagem de fertilizante	43
7	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna, as práticas de plantio e adubação passaram por uma profunda transformação, evoluindo de operações manuais com uso intensivo de mão de obra para processos altamente mecanizados, precisos e apoiados em tecnologias digitais. Nesse contexto, o manejo adequado da adubação é essencial não apenas para aumentar a produtividade, mas também para reduzir o consumo de fertilizantes e minimizar impactos ambientais. Assim, estratégias que combinam múltiplos métodos e diferentes máquinas para otimizar a fertilização e a semeadura em sistemas agrícolas contemporâneos (Yadav; Singh; Kumar, 2005; Yang, et al., 2023).

O uso de motores elétricos nos mecanismos dosadores de sementes e fertilizantes tem se consolidado como alternativa à tradicional transmissão por roda de tração, proporcionando maior precisão, flexibilidade e independência das condições de contato entre solo e roda. Essa tecnologia oferece múltiplos recursos, que vão desde funções simples, como o acionamento dos dosadores e a contagem de sementes, até funções mais complexas, como a aplicação em taxa variada, o desligamento de linhas e a compensação em curvas (Polon, 2023).

A disponibilidade de sistemas compostos por motores elétricos possibilita a oportunidade de pequenos produtores usarem a tecnologia. Podem ser instalados em semeadoras usadas, sem a necessidade de investimento em uma máquina nova, ou ainda, sem que o trator seja trocado (Polon, 2023). Contudo, esse setor enfrenta diversos desafios, como baixa produtividade, acesso restrito à terra e ao crédito, além da falta de assistência técnica por parte de órgãos que poderiam apoiar as atividades dessas famílias e contribuir para a melhoria do desempenho do setor (Soares; Aguiar, 2025).

Nesse contexto, as tecnologias sociais se apresentam como ferramentas fundamentais para apoiar os agricultores familiares na superação de desafios cotidianos. De maneira geral, tratam-se de soluções inovadoras e de baixo custo, voltadas a atender às necessidades específicas de cada realidade local. Frequentemente, essas tecnologias são desenvolvidas de saberes populares ou em centros de pesquisa e universidades, sendo essencial que sua criação ocorra com uma abordagem participativa, envolvendo diretamente a comunidade beneficiada.

. O objetivo deste projeto foi desenvolver um mecanismo dosador acionado por motor elétrico, capaz de realizar simultaneamente a dosagem de sementes e fertilizantes e avaliar seu desempenho em diferentes velocidades de rotações e níveis de reservatório.

2 JUSTIFICATIVA

A justificativa para este trabalho está na necessidade cada vez maior de desenvolver tecnologias que tornem a agricultura mais eficiente e sustentável. Os sistemas tradicionais de dosagem de sementes e fertilizantes, acionados por rodas de tração, ainda enfrentam limitações quando se busca precisão em diferentes condições de campo. Nesse contexto, o desenvolvimento e avaliação de um mecanismo dosador acionado por motor elétrico representam um passo importante, pois oferece um maior controle, facilidade de manutenção e melhor aproveitamento dos insumos aplicados. Outro ponto relevante é o uso da impressão 3D, que permite prototipagem rápida, com menor custo e maior flexibilidade para adaptar o sistema a diferentes culturas agrícolas. Dessa forma, este estudo não apenas avança no campo científico, mas também busca oferecer soluções práticas que podem apoiar produtores rurais e contribuir para agricultura.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Projetar, construir e avaliar em condições de laboratório o protótipo de um mecanismo dosador de sementes e fertilizantes acionado por um motor elétrico.

3.2 Objetivos Específicos

Elaborar do Projeto Informativo, Projeto Conceitual e o Projeto Detalhado de um mecanismo dosador de sementes e fertilizantes;

Realizar construção e montagem de um protótipo de um mecanismo dosador de sementes e fertilizantes;

Determinar a influência da velocidade de dosagem de sementes e fertilizantes no desempenho de funcionamento do mecanismo construído;

Determinar a influência do nível dos reservatórios de sementes e fertilizante no desempenho de funcionamento do mecanismo construído.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Agricultura de precisão

O interesse crescente na evolução da agricultura de precisão tem gerado um intenso debate científico sobre a aplicação da inteligência artificial e da robótica nos sistemas agrícolas. A implementação de sistemas inteligentes e automatizados é crucial para enfrentar o desafio da escassez de mão de obra, lidar com tarefas repetitivas, mitigar riscos à segurança e saúde humanas durante as atividades agrícolas, além de reduzir os custos de produção ao economizar tempo, dinheiro e energia (Gongal et al., 2015).

Dentre os protótipos utilizados em pesquisas para o desenvolvimento de novas tecnologias e aplicações no setor agrícola, destacam-se os que visam aprimorar a automação de máquinas e equipamentos, até mesmo concebendo robôs agrícolas móveis específicos. Esses avanços visam introduzir um alto nível de automação para auxiliar nas tarefas do campo, como cultivo e colheita seletiva, com mínima interferência humana. Para atingir esse objetivo, é essencial que os robôs agrícolas sejam capazes de se adaptar e responder a diversas condições e circunstâncias variáveis (Mahadhir et al., 2014).

Conforme observado por (Gonzalez et al., 2020), as principais distinções funcionais entre robôs industriais e agrícolas residem na maneira como se deslocam em relação aos demais elementos: i) em ambientes industriais, os equipamentos são estacionados em posições fixas, enquanto os materiais se movem ao longo das linhas de produção; ii) em ambientes agrícolas, é comum que o robô se desloque em relação às plantas ou outros materiais que permanecem em posições estáticas. A locomoção de um robô agrícola representa um verdadeiro desafio, dada a natureza dinâmica e pouco estruturada do ambiente, que apresenta variações no relevo do solo, condições de luminosidade, períodos de oclusão, entre outros fatores, conforme ressaltado por (Fountas et al., 2020).

4.2 Semeadoras - Adubadoras

As semeadoras-adubadoras de precisão são máquinas que realizam simultaneamente a semeadura e a adubação de culturas de sementes grandes, como soja e milho. Essas máquinas depositam as sementes uma a uma, com distância teoricamente uniforme entre elas, resultado do funcionamento do mecanismo dosador-distribuidor e do deslocamento da máquina (Silva, 2015).

Segundo (Silva et al., 2000), as semeadoras adubadoras possuem diferentes mecanismos dosadores de sementes, sendo os mais comuns: disco perfurado, rotor acanalado, dedo prensor, copo distribuidor e dosador pneumático. Os autores explicam que esses mecanismos são posicionados na máquina a certa altura do solo, fazendo com que as sementes percorram uma longa distância em queda livre, dentro de um tubo condutor, até chegarem ao solo.

Para garantir que as plantas de soja fiquem bem espaçadas, sem aglomerações ou falhas na linha de plantio, é essencial utilizar semeadoras de alta precisão. Dessa forma, a distribuição uniforme das sementes assegura um estabelecimento eficiente das plantas (França-Neto, 2016).

As semeadoras são amplamente consideradas por especialistas como a máquina agrícola mais importante depois do trator. No contexto da modernização da agricultura, a semeadura foi uma das primeiras operações agrícolas a ser mecanizada (Portella, 1997).

Melo (2017) destaca que a operação de semeadura é um dos principais fatores para o sucesso da produção, pois a semeadora permite o estabelecimento rápido e uniforme da cultura. Quando utilizada corretamente, essa máquina melhora a eficiência da produção, possibilita a expansão para áreas maiores e facilita as tarefas no campo.

Vários fatores são cruciais no processo de semeadura. O primeiro envolve o solo, a máquina que podem afetar a uniformidade da distribuição das sementes. O segundo está relacionado à máquina, onde o mecanismo dosador, o tipo de sulcador, o mecanismo de cobertura da semente e o método de acionamento influenciam o processo de semeadura de qualquer cultura (Balastreire, 1987). Nascimento (2019) concorda com essa visão e acrescenta que, além desses elementos, a velocidade de semeadura também pode impactar a eficiência do processo.

De acordo com (Garcia et al., 2011), durante a semeadura mecanizada, além dos diversos fatores que podem influenciar o estabelecimento do estande de plantas e a produtividade da cultura, sendo a velocidade de operação da máquina um deles. Esse parâmetro pode impactar o deslizamento dos rodados, a capacidade operacional no campo, a velocidade do mecanismo dosador, a distância entre as sementes, a profundidade e exposição das sementes, além de aumentar a ocorrência de espaçamentos duplos ou falhos e causar danos mecânicos às sementes.

O aumento da velocidade na operação de semeadura pode impactar negativamente o estabelecimento das plantas, resultando na redução da porcentagem de espaçamentos

aceitáveis e no aumento do número de falhas durante o processo de semeadura (Santos et al., 2011).

Modolo et al., (2004) afirmam que a dosagem correta de sementes e fertilizantes pela semeadora é uma etapa crucial no processo de semeadura de qualquer cultura, e que um sistema eficiente de dosagem de sementes garante uma distribuição uniforme, conforme os padrões recomendados para cada cultura.

No entanto, essa dosagem e distribuição podem ser prejudicadas se a velocidade de deslocamento da máquina não for considerada. Problemas como quebra ou rachadura das sementes, tempo de queda, sementes duplas, patinagem do rodado e a velocidade periférica do dosador podem ocorrer (Lima Filho et al., 2017).

A maioria das máquinas agrícolas de semeadura disponíveis no mercado possui mecanismos dosadores de sementes e fertilizantes acionados pelo rodado, cuja eficiência está diretamente relacionada às condições do solo, à carga vertical, às características do pneu e às propriedades físicas do solo (Cavichioli, 2014). De acordo com (Reis et al., 2003), o contato entre o rodado e o solo, assim como a velocidade de deslocamento do conjunto tratorizado, influenciam diretamente a eficiência das semeadoras.

4.3 Manufatura aditiva na agricultura

A impressão 3D tem ganhado cada vez mais destaque em diversas indústrias devido à sua tecnologia inovadora e ao impacto significativo na produção. Com seu processo eficiente e sustentável, essa tecnologia permite a criação de uma ampla variedade de objetos por meio da deposição de camadas sucessivas, tornando-se uma solução promissora para a adoção em massa (Dizon et al., 2018).

Essa tecnologia reduz significativamente o desperdício e o tempo de produção em comparação com a fabricação convencional, que utiliza processos subtrativos, nos quais parte do material é removida para obter o produto final. Uma das principais vantagens da manufatura aditiva em relação à manufatura formativa é a capacidade de criar formas complexas com maior precisão. Além disso, os altos custos da produção tradicional são consideravelmente reduzidos por meio da impressão 3D (Dizon et al., 2020).

As impressoras 3D viabilizam a fabricação de objetos com detalhes complexos, sem que o criador precise possuir um amplo conhecimento em manufatura ou recorrer a recursos e ferramentas específicas. Em virtude dessas características, estão surgindo estudos sobre a produção e os impactos que a prototipagem 3D pode ter na indústria, uma vez que

qualquer pessoa poderá desenvolver, baixar ou adquirir um arquivo digital para imprimir seus próprios produtos sem sair de casa (Gao et al., 2015).

Quando se trata de filamentos para impressoras 3D, os materiais mais utilizados são PLA - ácido polilático, ABS - acrilonitrilo butadieno estireno, PET - polietileno Tereftalato, PTT - politereftalato de trimetileno, Nylon, os flexíveis TPE - elastômero Termoplástico, porém as características técnicas difundidas se resumem apenas sobre resistências, durabilidade e custos, mas as características ambientais como toxicidade e consumo de energia emitida na fabricação das peças durante o processo de impressão ou reciclabilidade não são muito levadas em conta pelos usuários na sua grande maioria. Por isso é de suma importância fazer um levantamento destes aspectos para que estas informações possam ser multiplicadas (Besko et al., 2017).

O processo de impressão 3D geralmente ocorre em cinco etapas. Primeiro, um modelo tridimensional é criado usando software de desenho assistido por computador (CAD). Em seguida, esse modelo é convertido em um arquivo no formato Standard Tessellation Language (.STL), permitindo que a impressora 3D interprete sua geometria de superfície. Posteriormente, o modelo é segmentado em múltiplas camadas, gerando as instruções necessárias para a impressão. No quarto estágio, o objeto é construído camada por camada através do sistema de manufatura aditiva. Por fim, realiza-se o pós-processamento para aprimorar a qualidade do objeto impresso (Dizon et al., 2018).

O PLA e o ABS são dois dos materiais mais utilizados na impressão 3D, especialmente na tecnologia de impressão FDM voltada para consumidores. Disponíveis em uma ampla variedade de cores, esses filamentos são populares devido à sua resistência, rigidez, facilidade de impressão, custo acessível e outras propriedades vantajosas (Markforged, 2025).

O PLA é um poliéster alifático termoplástico e biodegradável, derivado de fontes renováveis, como amidos vegetais e trigo. Por essa razão, é considerado um material sustentável e desempenha um papel significativo na substituição de polímeros derivados do petróleo, como polietileno (PE), polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET) e poliestireno (PS), em diversas aplicações (Castro-Aguirre et al., 2016).

A impressão 3D pode ter um impacto significativo na agricultura, abrangendo desde a fabricação de ferramentas e equipamentos de apoio até a otimização das condições de produção e a personalização dos produtos finais. Além disso, possibilita o reaproveitamento e a reciclagem de resíduos da indústria alimentícia. Na agricultura moderna, o uso de sensores e soluções para coleta de dados tornou-se essencial tanto no cultivo agrícola quanto na pecuária,

cada um com suas necessidades e características específicas. Com a impressão 3D, é possível desenvolver ferramentas e invólucros personalizados que, quando integrados a sensores tradicionais, auxiliam de forma eficaz nas aplicações agrícolas. Essa tecnologia permite a criação de soluções sob medida, aumentando a eficiência e a precisão das práticas no setor (Schné; Jaskó, 2023).

A irrigação é um elemento fundamental da agricultura moderna, influenciando diretamente a produtividade das culturas e a eficiência no uso da água. No entanto, os sistemas de irrigação convencionais podem ser onerosos e nem sempre atendem às demandas específicas de diferentes propriedades rurais. Com a impressão 3D, é possível projetar e fabricar peças personalizadas, como bicos, emissores de gotejamento e conectores, garantindo soluções adaptadas às necessidades de cada fazenda (Al-Agele; Nackley; Higgins, 2021).

A impressão 3D permite a criação rápida de ferramentas de plantio personalizadas, adaptáveis às necessidades específicas de culturas e condições de plantio. Isso possibilita que os agricultores ajustem facilmente suas ferramentas para otimizar os resultados e experimentem diferentes métodos. Plantadores de sementes personalizados, feitos por impressão 3D, garantem precisão no plantio e redução da perda de sementes, além de serem ajustáveis para acomodar diversos tipos e tamanhos de sementes e testar diferentes padrões de plantio (Padhiary et al., 2024).

A impressão 3D utilizando resíduos agrícolas é uma área de pesquisa inovadora e em crescimento. Embora esses materiais, devido às suas propriedades e perecibilidade, não sejam originalmente adequados para aplicações técnicas, a indústria alimentícia e agrícola gera uma quantidade considerável de resíduos em escala global. O desperdício de alimentos é um desafio significativo e, sob a perspectiva da reciclagem e da redução de resíduos, os resíduos agrícolas podem se tornar um recurso valioso (Yu; Wong, 2023).

A impressão 3D permite a transformação destes resíduos em produtos úteis e recicláveis, como ferramentas agrícolas, materiais de embalagem ou mesmo materiais de construção. Desta forma, a reciclagem de resíduos alimentares pode contribuir para o desenvolvimento sustentável e a proteção ambiental, ao mesmo tempo que cria valor econômico. Além disso, essas tecnologias podem ajudar na utilização mais eficiente dos recursos e na redução de resíduos na agricultura (Schné; Jaskó, 2023).

4.4 Mecanismos dosadores de sementes

Balastreire (1987) afirma que o mecanismo dosador e de liberação das sementes deve ser adequado à espécie e variedade a ser semeada, para evitar danos que possam comprometer o poder germinativo das sementes.

A população de plantas é um dos principais fatores que determinam a produtividade das culturas. Os distribuidores de sementes são componentes essenciais de uma semeadora, pois influenciam diretamente o resultado final do estande de plantas. Portanto, é crucial minimizar as falhas na semeadura, pois elas podem permitir que plantas daninhas concorram pelos recursos necessários à sobrevivência de ambas (Anghinoni, 2019).

A eficiência do mecanismo dosador de sementes em semeadoras é crucial para a produtividade da cultura. Viganó et al., (2008) destacam que os diferentes tipos de mecanismos dosadores influenciam de maneira distinta o índice de velocidade de emergência das sementes. Em um estudo comparativo entre mecanismos dosadores de disco alveolado e pneumáticos, (Machado; Reynaldo, 2017) constataram que o dosador pneumático apresentou resultados superiores em relação ao dosador de disco alveolado.

A quebra das sementes geralmente é resultado da pressão exercida sobre elas no contato com o dosador e o limitador. Quanto menor a pressão, menor será a quantidade de sementes quebradas (Balastreire, 1987). O autor destaca que a principal vantagem dos dosadores pneumáticos é a quase total ausência de danos mecânicos nas sementes, tornando-os especialmente recomendados para sementes sensíveis.

Além disso, um sistema de distribuição eficaz é aquele que separa individualmente as sementes de um reservatório, garantindo que não sofram danos mecânicos e que sejam distribuídas uniformemente, de acordo com as necessidades de cada cultura. Em resumo, a distribuição precisa das sementes é uma das funções fundamentais de uma semeadora, visando sempre otimizar a produtividade (Portella, 2001).

No estudo realizado por Vianna, Reis e Machado (2014), foi desenvolvido um protótipo de dosador de sementes do tipo disco horizontal com duas saídas, projetado para atender às necessidades de pequenos agricultores. Este dosador é adequado para as culturas de milho e feijão e destina-se a ser integrado a uma semeadora de pequeno porte, visando a mecanização da agricultura familiar. O mecanismo dosador incorporou componentes disponíveis no mercado de peças de reposição para diversas marcas de dosadores. Os testes realizados indicaram que o desempenho do protótipo foi semelhante ao de um dosador

comercial de características comparáveis, sugerindo sua viabilidade para uso em semeadoras de precisão destinadas à agricultura familiar.

4.5 Mecanismos dosadores de fertilizantes

Os diversos métodos de aplicação de fertilizantes, seja de forma localizada ou a lanço, visam assegurar que o fertilizante seja corretamente depositado e disponível para absorção pelas plantas (Barbosa et al., 2015). Segundo (Brondani, 2013), o dosador tem a função de medir a quantidade previamente determinada do produto, ou seja, controla a quantidade que é liberada do reservatório.

Os mecanismos responsáveis pela dosagem e pelo depósito de fertilizante em semeadoras-adubadoras podem ser influenciados, principalmente, pelas características físicas do fertilizante (Gilbertson; Vallin, 2016). Conforme indicado por Rodella e Alcarde (2000) e Gilbertson e Vallin (2016), propriedades como o tamanho dos grânulos, a higroscopicidade, o índice de dispersão e a densidade do fertilizante impactam diretamente na dosagem e na qualidade da distribuição.

O dosador de fertilizante precisa ser robusto e capaz de desfazer os aglomerados de fertilizante que se formam devido à sua capacidade de absorver a umidade do ar. Esses aglomerados causam obstrução nos dosadores e podem ter um efeito corrosivo. Assim, a função do dosador é capturar o fertilizante, desestruturá-lo, conduzi-lo em doses controladas e liberá-lo na tubulação de descarga (Casão Junior e Siqueira, 2006).

O mecanismo dosador mais comum utilizado pelos fabricantes de semeadoras-adubadoras é do tipo rosca sem-fim, geralmente posicionado logo abaixo do depósito de adubo. Nesse sistema, o fertilizante é transportado pelo movimento rotativo de uma rosca helicoidal, que preenche o espaço entre as espiras, sendo então deslocado para a tubulação de descarga (Rosa et al., 2020). A quantidade de fertilizante aplicada é controlada pela variação da rotação do eixo que movimenta o helicóide, sendo possível ajustar essa dosagem por meio de modificações na relação de transmissão (Siqueira, 2008).

A distribuição do fertilizante é consideravelmente influenciada quando o dosador é posicionado em diferentes ângulos de trabalho, conforme afirmam Reynaldo e Gamero (2015). Os mesmos autores observam que helicoidais com um passo menor no helicóide apresentam maiores variações nas dosagens quando expostos a diferentes inclinações longitudinais e transversais.

A pesquisa conduzida por Santos et al., (2021), intitulado "Adaptação de dosadores elétricos para distribuição de fertilizantes com adubadora microtratorizada", apresenta a integração de motores elétricos e a tecnologia Arduino em uma adubadora microtratorizada, com o objetivo de melhorar a precisão na aplicação de fertilizantes. O protótipo desenvolvido utiliza um mecanismo dosador helicoidal ("rosca sem fim"), produzido por meio de impressora 3D, com conexões em PVC para os tubos de distribuição. O sistema controlador baseado em Arduino permite que a velocidade de rotação do motor do dosador seja ajustada de acordo com as informações fornecidas pelo operador via Bluetooth, garantindo uma aplicação eficiente e controlada do fertilizante. Os testes realizados indicaram que o protótipo possui desempenho satisfatório, sendo uma solução de baixo custo, fácil operação e adequada para pequenos e médios produtores.

O estudo conduzido por Vasconcelos e Reis (2012) sobre o desenvolvimento e pré-teste de um protótipo de dosador de palhetas com dupla saída resultou na criação de um dosador de fertilizantes destinado a semeadoras-adubadoras voltadas para pequenos agricultores. O protótipo foi fabricado com aço SAE 1020 e possui um rotor de palhetas composto por oito células de dosagem, além de um disco de regulação com duas aberturas para controlar a entrada do fertilizante. A estrutura do dosador foi projetada para acomodar o rotor e conta com duas saídas, permitindo a distribuição do fertilizante em duas linhas de plantio simultaneamente. Os testes preliminares demonstraram que o equipamento atende às demandas da agricultura familiar, apresentando uma alternativa eficiente e acessível para a aplicação precisa de fertilizantes.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho realizado no Laboratório de Automação e Robótica Agropecuária do Departamento de Engenharia Agrícola – (Lagro) da Universidade Federal do Ceará, estabelecido no município de Fortaleza - CE e foi estruturado em três etapas principais: projeto, construção e avaliação do mecanismo dosador.

5.1 Desenvolvimento do projeto

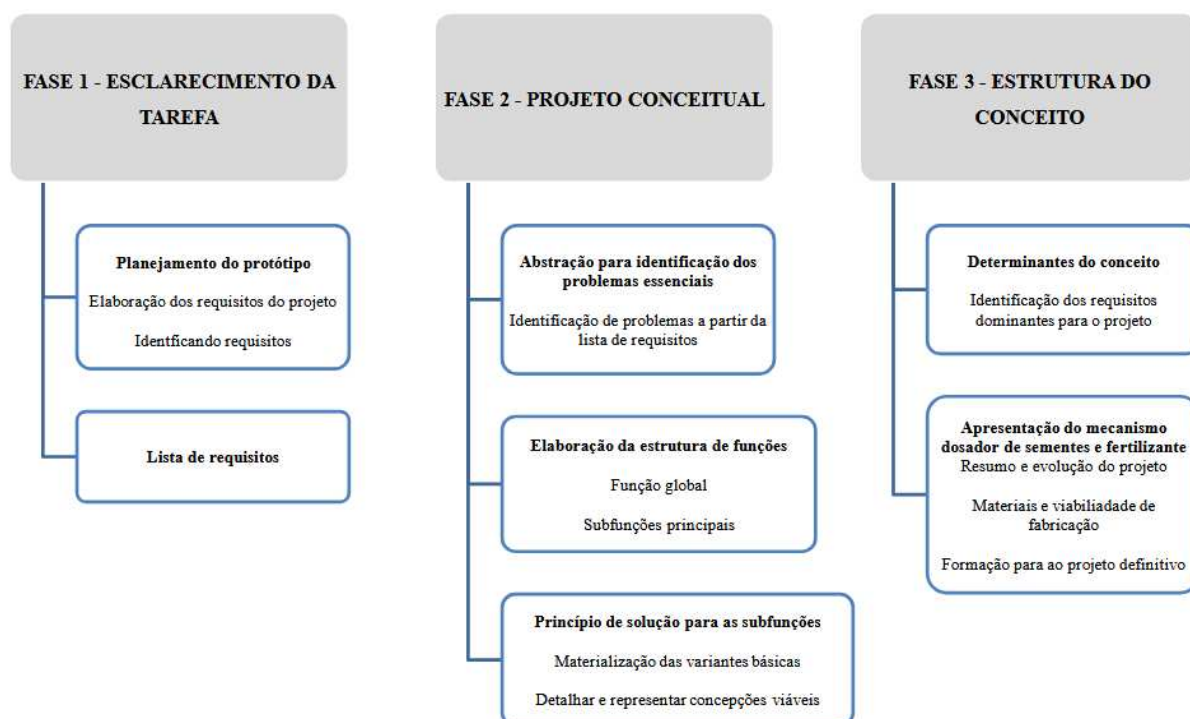
Na fase inicial, um projeto informativo, conceitual e detalhado foi elaborado para um mecanismo dosador de semente e fertilizante acionado por meio de um motor elétrico. A abordagem metodológica adotada nesta etapa seguiu os princípios delineados por Pahl et al.,

(2005) para o desenvolvimento de projetos na engenharia.

5.1.1 Planejamento e esclarecimento da tarefa

Na fase inicial do projeto, houve o planejamento e a definição da tarefa em questão, com o objetivo de coletar informações sobre os requisitos fundamentais para o funcionamento do sistema a ser desenvolvido, bem como compreender as restrições existentes e sua relevância. Como resultado dessa etapa, foi elaborado uma lista de requisitos que o produto deve atender e os custos da produção de uma unidade do mecanismo dosador, sendo ajustada e adaptada conforme as necessidades específicas do projeto e as etapas subsequentes de trabalho.

Figura 1 – Etapas do trabalho segunda a metodologia



Fonte: elaborado pelo autor.

5.1.2 Projeto conceitual

Com base nos requisitos do mecanismo a ser desenvolvido determinou-se a função que representa a interação geral objetivada entre entrada e saída de um sistema. Portanto, a função global pode ser indicada, a qual aponta, mediante utilização de um diagrama de blocos, a inter-relação entre variáveis de entrada e de saída com referência a

conversão de energia, material e/ou sinal, de forma neutra com relação à solução. As variantes de soluções elaboradas foram avaliadas e as que não atenderam as exigências da lista de requisitos foram eliminadas. Com base na avaliação decidiu-se pelo conceito cujo desenvolvimento foi continuado.

O método empregado para a determinação das soluções foi o da matriz morfológica que consiste em uma tabela onde são listadas as funções necessárias no produto a ser projetado e ao lado dessas funções são citadas em forma de esboço as soluções possíveis para que seja suprida aquela função. As soluções foram colocadas num diagrama morfológico ou matriz de projeto de um modo que as diversas combinações fossem facilmente analisadas. O método permitiu ainda a visualização das diversas possibilidades em estudo, oportunizando o surgimento de concepções inovadoras obtidas, por exemplo, através da interação entre dois ou mais princípios.

5.1.3 Projeto detalhado

Essa é a fase do projeto que complementa a estrutura de criação do sistema desenvolvido por meio de prescrições definitivas sobre a forma do mecanismo, dimensionamento e acabamento superficial de todas as peças, definição de todos os materiais e verificação das possibilidades de produção. O resultado do detalhamento foi a definição da tecnologia de produção da solução. Nesta fase ocorreu a elaboração da documentação para a produção, especialmente dos desenhos de componentes individuais para a fabricação, dos desenhos de conjuntos, até onde necessário, e do desenho completo até as listas das peças. Esta fase da etapa de detalhamento foi auxiliada e automatizada por meio de processamento gráfico, utilizando-se o software Autodesk Inventor®, o qual possui compatibilidade com máquinas de comando numérico. Os desenhos de detalhamento foram elaborados da seguinte forma: peças individuais apresentam informações sobre o material utilizado, processo de fabricação e tolerância nas dimensões. Dessa forma, ao acessar a montagem final do protótipo foi possível identificar todas as partes constituintes sabendo como foi seu processo de fabricação e qual material foi utilizado.

5.2 Construção e montagem do protótipo

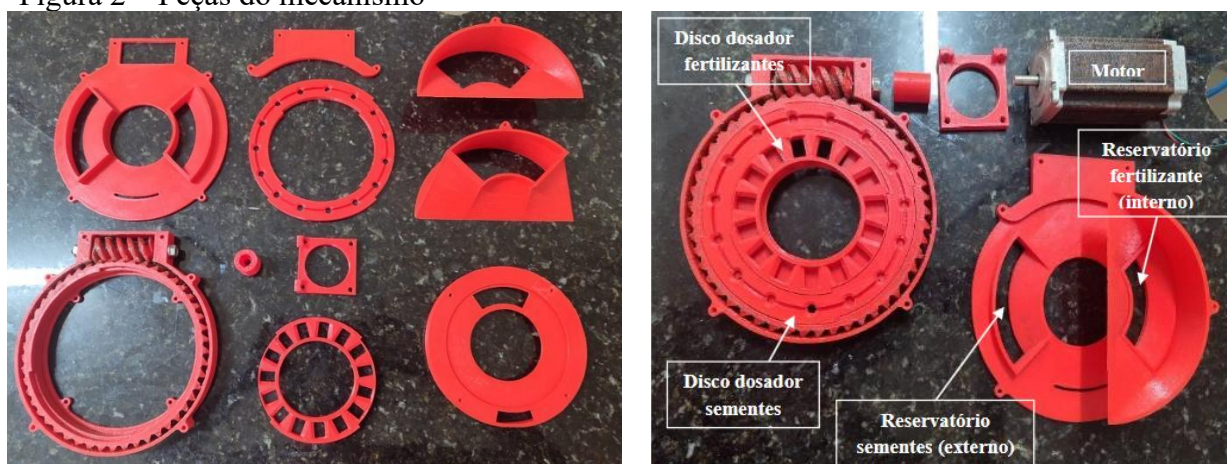
Após o desenvolvimento do mecanismo, deu-se início à segunda etapa do projeto com a construção de um protótipo e verificação em condições de laboratório da capacidade de

simular a operação de semeadura e distribuição de fertilizante. Para a construção do protótipo, foi utilizado os materiais definidos no projeto detalhado.

O mecanismo acionado por um motor de passo, cujo eixo possui um helicóide em contato com uma cremalheira. Nesta cremalheira estão acoplados dois discos dosadores: um para sementes, localizado na parte periférica, e outro para fertilizantes, posicionado mais internamente. O conjunto se movimenta de forma simultânea, porém com funções distintas. O disco dosador de sementes percorre o interior do reservatório de sementes, cuja saída também está localizada na periferia. Já o disco dosador de fertilizantes opera dentro de um reservatório mais interno. Dessa forma, ambos os discos funcionam de maneira conjunta, mas atuam separadamente em seus respectivos reservatórios. O mecanismo conta com duas saídas separadas, permitindo a dosagem independente de cada insumo.

A Figura 2 a seguir apresenta, de forma detalhada, as peças manufaturadas que compõem o mecanismo dosador de sementes e fertilizantes.

Figura 2 – Peças do mecanismo



Fonte: elaborado pelo autor.

5.2.1 Manufatura das peças impressas

As peças que compõem o mecanismo dosador de sementes e fertilizante foram confeccionadas utilizando uma impressora 3D da marca Tronxy modelo p902 apresentada na Figura 3. O material escolhido para ser utilizado foi um polímero termoplástico feito com ácido polilático conhecido como PLA.

Figura 3 – Impressora 3D utilizada



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a utilização da impressora 3D, foi necessário utilizar o software Repetier-Host para converter os arquivos de desenhos gerados na etapa de projeto em arquivos compatíveis Controle Numérico Computadorizado (CNC) e definir os parâmetros do processo de impressão como temperatura da impressão, densidade do material impresso, velocidade de impressão entre outros.

A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros configurados no software para a realização das impressões.

Tabela 1 – Configurações definidas no software de impressão

Parâmetro	Valor atribuído
Material	PLA
Altura de camada	0,3 mm
Largura de extrusão	0,4 mm
Temperatura de impressão	210 °C
Temperatura da mesa de impressão	60 °C
Velocidade de impressão	45 mm/s

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3 Detalhamento dos componentes do sistema a ser desenvolvido

O dosador de sementes utilizado é do tipo disco perfurado horizontal, adaptado para operar com sementes de soja. Esse disco permite que as sementes presentes no reservatório preencham os furos do disco, promovendo sua individualização. À medida que o disco gira, as sementes nos furos são transportadas até um ponto específico, onde são ejetadas e conduzidas ao solo. O mesmo processo ocorre para o fertilizante. O protótipo utiliza um

motor de passo, responsável pela propulsão, direcionamento e acionamento do sistema. A Figura 4 ilustra o modelo do motor empregado no protótipo.

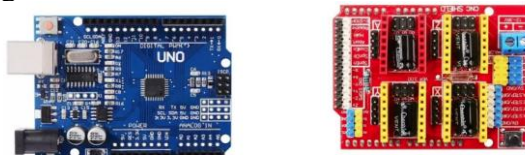
Figura 4 – Motor elétrico utilizado



Fonte: elaborado pelo autor.

O motor de passo foi controlado por uma placa Arduino UNO utilizando uma outra placa Shield CNC V3 com capacidade para trabalhar com até quatro motores de passo de maneira independentes. Esse controle da posição do eixo dos motores de passo ocorre através de um Driver que convertem os sinais de pulso do controlador em movimento do motor para conseguir um posicionamento preciso. A Figura 5 apresenta o microcontrolador e o Shield para controle do motor.

Figura 5 – Placas Arduino Uno R3 e CNC Shield V3



Fonte: elaborado pelo autor.

O driver utilizado para o controle de motor de passo é do modelo Microstep Driver DM 556 que foi configurado para trabalhar com uma corrente de 3,2 Amperes, com uma tensão de alimentação de 20 – 50 Volts e com uma precisão de 1600 pulsos/ revolução. A Figura 6 apresenta o driver utilizado para o controle do motor de passo.

Figura 6 – Driver utilizado no controle do motor



Fonte: elaborado pelo autor.

Para atender à tensão necessária do driver, foi utilizada uma fonte chaveada estabilizadora de 24 Volts e 20 Amperes, capaz de fornecer tensão constante e estável. Esse equipamento é amplamente empregado em aplicações industriais, automação, sistemas de iluminação e dispositivos eletrônicos que demandam alimentação confiável e de alta potência. A Figura 7 apresenta o modelo da fonte utilizada no protótipo.

Figura 7 – Fonte chaveada utilizada



Fonte: elaborado pelo autor.

Na placa Arduino, foi instalado um software G-code Resolver Based Logic (GRBL). Esse software GRBL é um firmware desenvolvido para interpretar os códigos G, também conhecidos como G-code. Esse código foi desenvolvido para suprir a necessidade dos fabricantes industriais em ter uma linguagem padronizada em sistemas CNC.

Um computador foi utilizado para estabelecer a comunicação com a placa Arduino por meio de uma rede Wi-Fi. Nesse computador, foi instalado o software de controle de motores de passo Universal G-code Sender - (UGS), capaz de interpretar e executar códigos G. O UGS também permite criar um link de acesso remoto, possibilitando que qualquer dispositivo móvel conectado à mesma rede tenha acesso ao programa em execução e envie os códigos para serem processados. A Figura 8 ilustra o computador utilizado para essa

finalidade.

Figura 8 – Computador utilizado



Fonte: elaborado pelo autor.

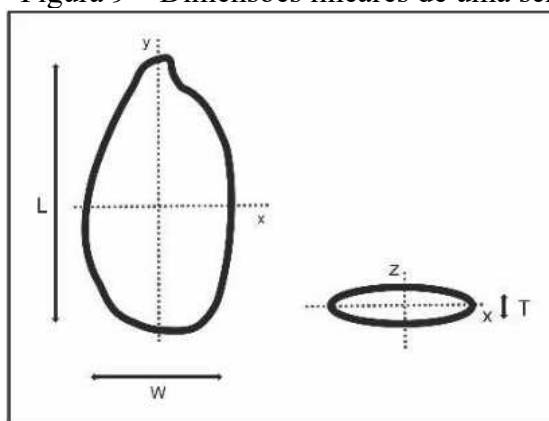
5.4 Avaliação do protótipo

A avaliação do mecanismo dosador teve como objetivo quantificar a distribuição e uniformidade dos insumos sementes e fertilizantes, considerando a variação dos níveis dos reservatórios e a velocidade de giro dos discos dosadores.

5.4.1 Dimensões lineares das sementes

As dimensões lineares das sementes Figura X foram obtidas utilizando-se um paquímetro digital da marca MTX, com resolução de 0,01 mm. As medições foram realizadas em uma amostra compostas por 100 sementes de acordo com a ilustração da Figura 9.

Figura 9 – Dimensões lineares de uma semente



Fonte: Coşkuner e Karababa (2007).

A esfericidade das sementes foi obtida por meio da equação 1, apresentada por

Mohsenin (1986).

$$Es = \left(\frac{\sqrt[3]{L \times W \times T}}{L} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Es = esfericidade da semente (%);

L = comprimento da semente (mm);

W = largura da semente (mm);

T = espessura da semente (mm).

5.4.2 Dosagem de sementes

As sementes utilizadas no mecanismo dosador foram de soja da marca BRSEEDS, cultivar IAC Foscari 31, safra 2023/2024, com 99% de pureza, 80% de germinação, categoria S2 e peso líquido de 3 kg por embalagem, apresentadas na Figura 10 abaixo.

Figura 10 – Sementes utilizadas no dosador



Fonte: BRSeeds (2016).

O disco dosador de sementes apresenta 15 alvéolos. Desta forma a cada rotação do disco, considerando uma eficiência de 100%, seriam dosadas 15 sementes.

A verificação da taxa máxima de dosagem de sementes será feita através do incremento gradual na rotação do motor que aciona o disco dosador de sementes. Utilizando o software Universal G-code Sender (UGS) para realizar um incremento de rotações por minuto (rpm) para cada verificação.

Para realizar a verificação foi fixado que o disco dosador realizará sete rotações. No final dessas rotações deve-se obter um valor de 105 sementes individualizadas para cada repetição se obter 100% de eficiência.

A eficiência foi calculada de acordo com a Equação 2 abaixo:

$$Efs = \frac{SD - (F + Q)}{SD} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Efs – Eficiência dosagem de sementes;

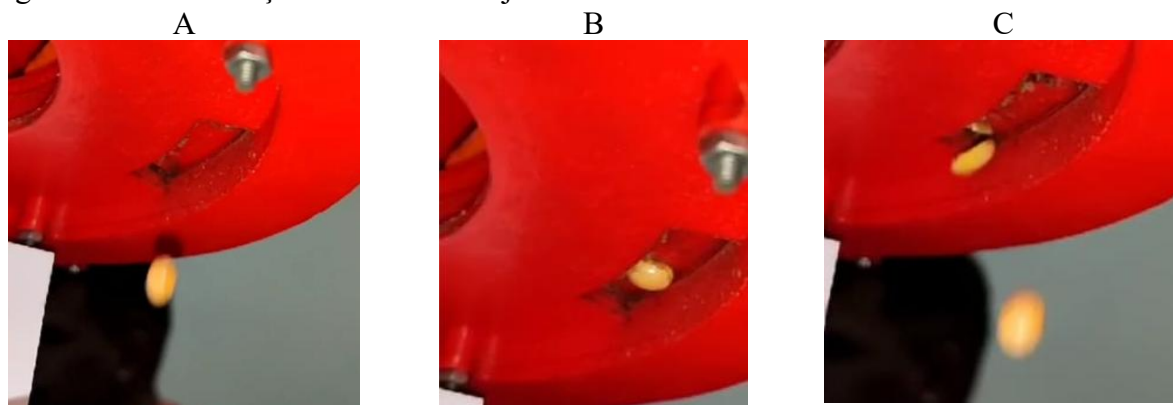
SD – Quantidade de sementes dosadas normais;

F – Quantidade de sementes falhas;

Q – Quantidade de sementes quebradas.

Na Figura 11 é apresentado os critérios utilizados para a classificação das sementes em três categorias distintas: (A) dosagem simples, quando a semente é ejetada corretamente pelo dosador, sem apresentar danos físicos aparentes; (B) falha, caracterizada pela ausência de semente no furo do disco ou pela retenção da semente no mecanismo; e (C) quebra, quando a semente apresenta danos visíveis resultantes da ação mecânica do sistema dosador.

Figura 11 – Visualização das sementes ejetadas do mecanismo



Fonte: elaborado pelo autor.

A eficácia do mecanismo dosador de sementes foi avaliada por meio de gravações em vídeo, utilizando um smartphone configurado no modo câmera lenta, com resolução de 720p e taxa de aquisição de 240 quadros por segundo para cada repetição e tratamento. Essa abordagem metodológica foi adaptada de (Li et al., 2025), que empregaram câmeras de alta velocidade para análise da trajetória das sementes durante a distribuição.

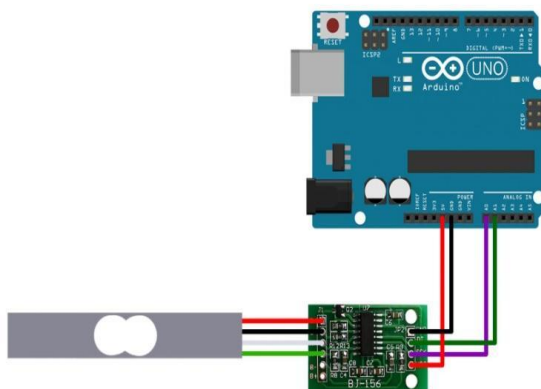
Posteriormente, os vídeos serão analisados para identificar e quantificar sementes falhas, sementes duplas, quebras ou entupimento dos alvéolos do disco.

5.4.3 Dosagem de fertilizantes

O fertilizante utilizado é NPK, fertilizante granulado misto da marca PlantFertil, que combina os elementos químicos nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) com uma formulação 10-10-10. Ele é do tipo mistura de grânulos, composto por três grânulos diferentes, cada um fornecendo exclusivamente um dos nutrientes.

A quantificação das doses de fertilizantes foi feita por meio de uma balança desenvolvida utilizando uma placa controladora do tipo Arduino UNO R3 que possui um microcontrolador ATmega328P conectado à uma célula de carga com capacidade para um quilograma, tendo o objetivo de medir a massa de fertilizante em função da velocidade de giro e da carga agindo sobre o disco dosador.

Figura 12 – Desenho do esquema de ligação completo



Fonte: Usinainfo (2025).

Após a construção da balança, a mesma foi calibrada para garantir medições confiáveis com precisão de uma grama, isso pode ser feito colocando pesos conhecidos na balança e ajustando os valores lidos pelo sensor até que correspondam aos pesos.

O disco dosador de fertilizante possui 15 células com volume total de 22,382 cm³ que, quando totalmente preenchidos, podem dosar uma média de 21,8 gramas de fertilizante por volta. O mecanismo dosador será avaliado com o aumento da velocidade em cada tratamento, realizando sete voltas. A eficiência de distribuição do mecanismo será analisada com base na Equação 3 abaixo, seguida da quantificação da distribuição em relação à velocidade de funcionamento.

$$Eff = \frac{\text{Massa real coletada}}{\text{Massa teórica esperada}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Eff - Eficiência dosagem de fertilizante.

5.5 Análise estatística dos dados obtidos

Avaliar se existem diferenças significativas nas variáveis de resposta em função dos fatores experimentais: velocidade de rotação do disco, altura do reservatório de sementes e altura do reservatório de fertilizante, além de suas interações.

O delineamento utilizado no experimento foi inteiramente aleatorizado em esquema fatorial de (5x2x2), onde são avaliadas cinco velocidades dos discos dosadores (2.45, 4.90, 7.35, 9.80 e 12.25 RPM), dois níveis de reservatórios de sementes (NRS 50 e 100%) de preenchimento e dois níveis de reservatório de fertilizantes (NRF 50 e 100%) de preenchimento, onde foram realizadas 5 repetições para cada tratamento.

Os dados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey a 5% de significância. Foram avaliadas suas interações. As análises estatísticas foram conduzidas utilizando o software gratuito SAS® Studio, versão 9.4.

Essa análise permitirá determinar as melhores condições operacionais para o mecanismo dosador, otimizando seu desempenho e minimizando danos às sementes.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Desenvolvimento do projeto

6.1.1 Projeto Informacional

No projeto informativo teve como objetivo o desenvolvimento de um mecanismo dosador de sementes e fertilizantes, voltado à aplicação em sistemas agrícolas. O dispositivo foi projetado considerando as demandas específicas do setor, com atenção às restrições técnicas e aos aspectos econômicos envolvidos na construção do protótipo. Durante o desenvolvimento, foi realizada a estimativa dos custos de materiais, componentes eletrônicos e mecânicos, bem como dos processos de montagem e prototipagem, a fim de garantir a viabilidade técnica e financeira do projeto.

Além disso, o desenvolvimento do trabalho contou com a colaboração de uma equipe interdisciplinar, composta por profissionais das engenharias agrícola e agrônoma,

bem como por discentes do curso de Agronomia. Essa integração de diferentes áreas do conhecimento proporcionou uma abordagem mais abrangente do problema, favorecendo a concepção de um sistema funcional, eficiente e alinhado às demandas práticas do setor agrícola.

A Tabela 2 mostra o projeto informativo de forma detalhada.

Tabela 2 – Lista de requisitos do projeto

Edição: 01				
		Lista de Requisitos		Identificação Classificação Pag.: 01 Folha: 01
Usuário: João Batista		Para: DENA	Projeto/Produto: Dosador de sementes e fertilizante	
Modificação	N/V		Requisitos Técnicos	Exigências
Data da alteração: 28/08/2024	Assinalar (N) Necessidade ou (V) Vontade	N	1- Precisão na dosagem	Capaz de fornecer quantidades precisas de sementes e fertilizantes para garantir uma distribuição uniforme e eficiente.
		V	2- Compatibilidade com Diferentes Tipos de Sementes e Fertilizantes	Ser capaz de lidar com uma variedade de tamanhos e tipos de sementes e fertilizantes.
		N	3- Facilidade de Calibração e Ajuste	Deve ser simples e rápido de calibrar e ajustar para diferentes culturas e taxas de aplicação.
		N	4- Resistência a Condições Ambientais	O dosador deve ser resistente a condições ambientais adversas, como umidade, poeira e variações de temperatura.
			Requisitos Econômicos	Exigências
		N	5- Custo Acessível	O custo de fabricação do dosador deve ser razoável e acessível para os agricultores, garantindo um retorno sobre o investimento.
		N	6- Manutenção Simplificada	Deve exigir pouca manutenção e ser fácil de reparar, reduzindo os custos de manutenção ao longo do tempo.
		V	7- Vida Útil	Deve ser durável e ter uma vida útil longa para maximizar o retorno do investimento.

Fonte: elaborado pelo autor.

A estimativa de custos constitui uma etapa essencial no planejamento e desenvolvimento do projeto, pois permite avaliar a viabilidade técnica e econômica da proposta. Nesta fase, são considerados os gastos com materiais, componentes eletrônicos e mecânicos, mão de obra, prototipagem e eventuais ensaios experimentais. A análise dos custos orienta as decisões de projeto, buscando soluções que conciliem desempenho, durabilidade e

baixo custo de fabricação. Além disso, o controle orçamentário possibilita ajustar o desenvolvimento às restrições financeiras disponíveis, garantindo maior eficiência no uso dos recursos.

Na Tabela 3 a seguir, estão a descrição e os valores gastos para a produção de uma unidade do mecanismo dosador de sementes e fertilizantes.

Tabela 3 – Custos dos principais materiais do mecanismo

Quantidade	Descrição	Preço (R\$) *
1	Motor de passo NEMA 23 28 Kgf/cm	329,90
1	Driver para motor de passo 5.6 A DM 556	180,40
1	Filamento PLA	119,90
1	Arduino UNO R3	44,90
1	Shield CNC V3	22,70
1	Cabo USB para Arduino	8,46
Total		706,26

Preços médios dos componentes disponíveis na internet em outubro de 2025*

Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, o desenvolvimento do trabalho contou com a colaboração de uma equipe interdisciplinar, composta por profissionais das engenharias agrícola e agrônoma, bem como por discentes do curso de Agronomia. Essa integração de diferentes áreas do conhecimento proporcionou uma abordagem mais abrangente do problema, favorecendo a concepção de um sistema funcional, eficiente e alinhado às demandas práticas do setor agrícola.

A matriz interdisciplinar apresentada na Tabela 4 a seguir, mostra as áreas envolvidas e os participantes envolvidos no projeto.

Tabela 4 – Equipe multidisciplinar para elaboração.

Nome	Formação	Vínculo ao projeto
Danilo Loureiro	Dr. Engenharia Agrícola	Coorientador
João Batista	Engenheiro Agrônomo	Aluno de Mestrado
Guilherme Martins	Aluno de Graduação	Bolsista
Francisco Arlen	Aluno de Graduação	Estagiário

Fonte: elaborada pelo autor.

6.1.2 Projeto Conceitual

A estrutura de funções permitiu a decomposição da tarefa complexa de distribuição de sementes e fertilizantes no solo em subfunções gerenciáveis. Isso possibilitou uma análise e resolução individual de todas as subfunções, levando a uma solução mais adequada de acordo com os critérios técnicos e econômicos estabelecidos nos requisitos do projeto.

A seguir, a Tabela 5, apresentou a matriz morfológica utilizada para documentar as soluções individuais de cada subfunção. Essa matriz oferece uma visão abrangente de todas as possíveis soluções para cada aspecto do projeto, auxiliando na seleção da abordagem mais viável.

Tabela 5 – Matriz morfológica

Solução	A	B	C	D
Subfunção				
Mecanismo dosador de sementes	Fluxo contínuo	Precisão	A lanço	
Tipo de dosador	Disco Horizontal	Disco Inclinado	Dedos Prensos	Pneumático
Mecanismo dosador de Fertilizante	Rotor vertical Impulsor	Discos	Rotores dentados	Helicoidais
Transmissão de potência na distribuição dos insumos	Engrenagens	Cardã	Engrenagem sem-fim (helicóide)	Direto no eixo
Material de Fabricação	Ferro	PLA	Alumínio	Plástico
Acionamento do mecanismo	Motor de corrente contínua	Motor de passo	Encoder	Servo Motor

Fonte: elaborado pelo autor.

As sub-soluções para cada subfunção foram colocadas num diagrama morfológico ou matriz de projeto para serem combinadas em forma de variáveis de solução de um modo que as diversas combinações foram facilmente analisadas e visualizadas. Por intermédio do simples arranjo das diferentes linhas e colunas da matriz, o método utilizado permitiu a elaboração de diversas variantes de soluções para o problema.

Após a identificação das subfunções e suas respectivas sub-soluções, estas foram organizadas em um diagrama morfológico ou matriz de projeto. Essa estrutura permitiu

combinar as diferentes sub-soluções de forma a criar diversas variantes de soluções para o problema. Através da simples manipulação das linhas e colunas da matriz, foi possível visualizar e analisar facilmente as diferentes combinações.

Após criar as variantes de soluções, elas foram avaliadas de acordo com os critérios técnicos e econômicos. Para cada critério utilizado foi fornecido uma nota com um peso, e no final da avaliação a variante de solução que apresentou a maior nota foi utilizada como solução no projeto conceitual. Na Tabela 6 são apresentados os critérios de avaliações utilizados para a escolha da solução.

Tabela 6 – Critérios de avaliação utilizados para a escolha da melhor solução

Críticos 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 na distribuição do fertilizante	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: elaborado pelo autor.

A variante de solução que apresentou os melhores resultados esta apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Solução selecionada no projeto conceitual

Subfunções	Solução Conceitual
Mecanismo dosador de sementes	Precisão
Tipo de dosador	Disco horizontal
Mecanismo dosador de fertilizante	Discos
Transmissão de potência na distribuição dos insumos	Engrenagem sem-fim (helicoide)
Material de fabricação	PLA
Acionamento do mecanismo	Motor de passo

Fonte: elaborado pelo autor.

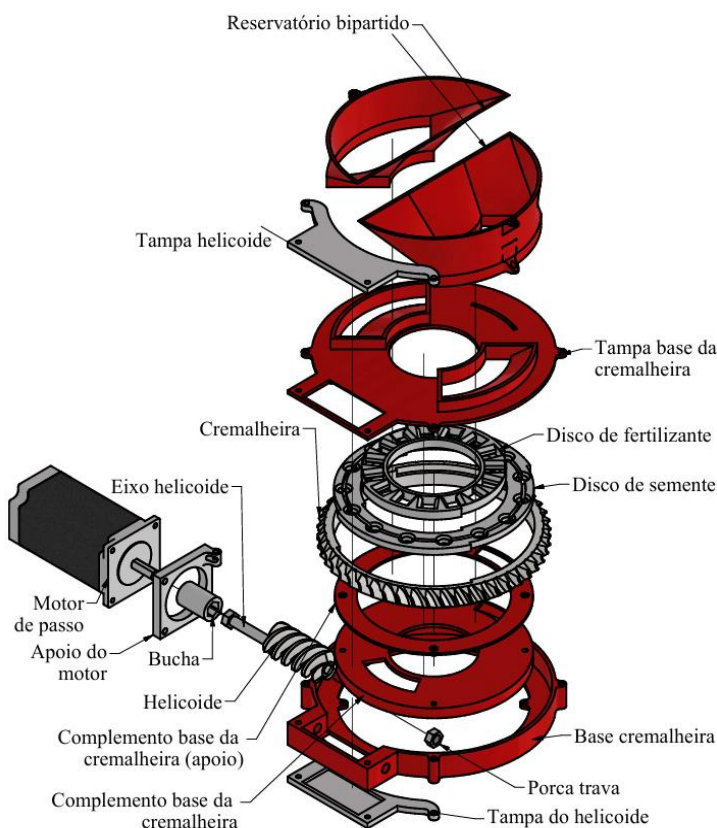
6.1.3 Projeto detalhado

Para o desenvolvimento deste projeto, foi utilizado o software Autodesk Inventor, que possibilitou a modelagem tridimensional das peças, a criação das montagens e a simulação do funcionamento do mecanismo dosador. O uso dessa ferramenta contribuiu para a visualização detalhada do conjunto, identificação de interferências entre componentes e análise dos movimentos relativos entre as partes móveis.

A partir dos modelos gerados, foi possível otimizar o design do mecanismo, garantindo maior precisão dimensional e melhor desempenho operacional. Além disso, a simulação virtual reduziu a necessidade de múltiplos protótipos físicos, permitindo ajustes ainda na fase digital e tornando o processo de desenvolvimento mais eficiente, econômico e tecnicamente confiável.

A Figura 13 apresenta a vista explodida do protótipo e os detalhes das peças que compõe o mecanismo.

Figura 13 – Vista explodida do mecanismo dosador de sementes e fertilizantes



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 8 a seguir apresenta de forma organizada as especificações dos componentes empregados na construção do mecanismo dosador, incluindo informações sobre as quantidades utilizadas, materiais de fabricação e observações complementares. Esses dados são essenciais para o registro técnico do projeto, permitindo o correto entendimento da composição do sistema e servindo como referência para futuras reproduções, manutenções ou aprimoramentos do protótipo.

Tabela 8 – Lista de peças e informações adicionais

UN	DESCRIÇÃO	MATERIAL	FILAMENTO (m)	TEMPO IMPRESSÃO
1	Base da cremalheira		25,2	2h:41min
1	Complemento base da cremalheira		15,1	1h:40min
1	Complemento base da cremalheira (Apoio)		5	38 min
1	Cremalheira		18	1h:51min
1	Helicoide		6,2	33 min
1	Disco de semente		12,8	1h:17min
1	Disco de fertilizante		8,8	54 min
1	Tampa da base cremalheira		28,2	2h:54min
2	Tampa do helicoide		4,5	25 min
1	Eixo do helicoide		-	-
1	Porca trava		-	-
1	Apoio do Motor		4	25 min
1	Motor de passo		-	-
1	Bucha		2	10 min
2	Reservatório bipartido		15	1h:30min

Fonte: elaborado pelo autor.

6.2 Avaliação do mecanismo dosador – Dosagem de sementes

6.2.1 Caracterização das sementes

A caracterização das sementes constitui uma etapa essencial em estudos e projetos relacionados à semeadura, ao desenvolvimento de mecanismos dosadores e à avaliação da qualidade fisiológica. Esse processo possibilita a identificação das propriedades físicas das sementes, fornecendo dados fundamentais para o dimensionamento e o ajuste adequado dos equipamentos de semeadura. Essas informações são determinantes para o bom desempenho dos mecanismos dosadores e para garantir maior uniformidade na distribuição das sementes durante o processo de semeadura.

Os resultados da caracterização das sementes de soja estão apresentados na Tabela

9.

Tabela 9 – Valores médios das características físicas das sementes de soja

Variável	Média	Mínimo	Máximo	CV (%)
Comprimento (mm)	7.8090000	6.7300000	9.5100000	6.9915315
Largura (mm)	5.6253000	5.2200000	6.2600000	4.0760001
Espessura (mm)	6.7038000	5.8000000	7.7000000	5.4883552
Esfericidade (%)	85.3368000	77.7400000	92.8200000	4.0379614

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 10 apresenta os resultados da análise de variância para a eficiência de dosagem de sementes, considerando os efeitos principais e as interações entre a rotação do motor (RPM) e o nível do reservatório de fertilizante (NRF).

Observa-se que a velocidade de rotação do motor (RPM) apresentou efeito altamente significativo ($p < 0,0001$) sobre a eficiência de dosagem, com um valor de F de 22,57. Isso indica que a variação na rotação influencia diretamente a precisão na distribuição das sementes, corroborando com os dados observados no experimento.

A interação entre RPM e NRF foi significativa ($p = 0,0421$), indicando que a influência da rotação na eficiência da dosagem depende do nível do reservatório de fertilizante. Este achado sugere que, em determinadas rotações, o comportamento do sistema pode ser alterado em função da carga aplicada pelo fertilizante.

Tabela 10 – Análise da variância para variável sementes dosadas

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Valor - p
RPM	4	6829.840000	1707.460000	22.57	<.0001**
NRS	1	82.810000	82.810000	1.09	0.2985
RPM×NRS	4	160.240000	40.060000	0.53	0.7143
NRF	1	24.010000	24.010000	0.32	0.5747
RPM×NRF	4	787.240000	196.810000	2.60	0.0421*
NRS×NRF	1	3.610000	3.610000	0.05	0.8276
RPM×NRS×NRF	4	163.640000	40.910000	0.54	0.7061

RPM - Rotações por minuto; NRS - Níveis de enchimento do reservatório de sementes; NRF - Níveis de enchimento do reservatório de fertilizantes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

A Tabela 11 apresenta a análise da interação tripla RPM×NRS×NRF, fatiada por níveis de RPM, com o objetivo de verificar se, em velocidades específicas, há influência combinada dos níveis dos reservatórios sobre a eficiência de dosagem.

Constata-se que apenas na maior rotação avaliada (12,25 RPM) a interação entre NRS e NRF foi significativa ($p = 0,0116$). Isso indica que, sob condições de alta velocidade, a

combinação entre os níveis de carga de sementes e fertilizante afeta significativamente a eficiência de distribuição. Esse comportamento pode estar associado à maior exigência mecânica imposta ao sistema dosador em altas velocidades, o que compromete a uniformidade da dosagem. Esse efeito pode ser fisicamente explicado pelo aumento da velocidade do motor, que resulta na redução do torque disponível para a dosagem.

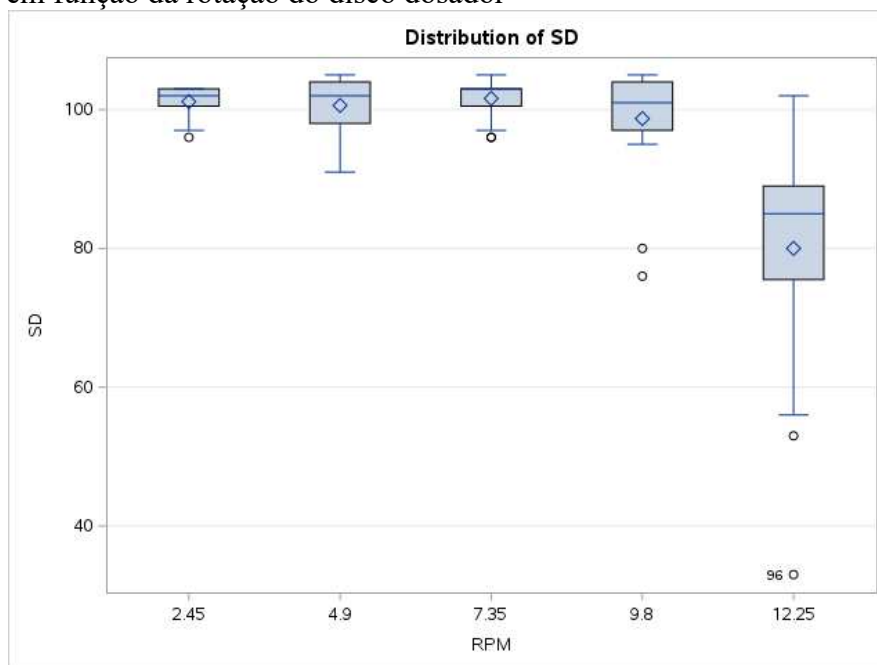
Nas demais rotações (2,45; 4,90; 7,35 e 9,80 RPM), a interação não foi significativa ($p > 0,42$), indicando que, em condições de menor exigência, o sistema opera de forma mais estável, independentemente das variações nos níveis dos reservatórios.

Tabela 11 – Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por RPM para Sementes Dosadas (SD)

RPM	GL	SQ	QM	F	Valor - p
2.45	3	20.950000	6.983333	0.09	0.9641
4.9	3	85.200000	28.400000	0.38	0.7709
7.35	3	15.600000	5.200000	0.07	0.9764
9.8	3	212.200000	70.733333	0.94	0.4277
12.25	3	887.600000	295.866667	3.91	0.0116*

RPM - Rotações por minuto; NRS - Níveis de enchimento do reservatório de sementes; NRF - Níveis de enchimento do reservatório de fertilizantes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

Figura 14 – Gráfico boxplot da dosagem de sementes e variabilidade em função da rotação do disco dosador



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 12 apresenta os resultados da interação entre RPM, NRS e NRF, fatiada por níveis de NRS, considerando a variável SD. Já, a Tabela 13 mostra essa mesma interação

fatiada por NRF. Os dados indicam que tanto o nível de sementes quanto o nível de fertilizante influenciam significativamente a variabilidade da dosagem, especialmente quando os reservatórios estão completamente cheios (100%).

Esse comportamento sugere que o sistema dosador apresenta menor estabilidade operacional sob condições de maior carga, principalmente quando combinado com diferentes velocidades de rotação. A elevação da variabilidade pode estar relacionada ao aumento da pressão interna, à possível sobrecarga do mecanismo dosador e à maior mobilidade dos materiais em velocidades mais altas. Dessa forma, evidencia-se a importância de implementar ajustes precisos no projeto do dosador e no controle da rotação do motor, de modo a garantir a uniformidade da dosagem em diferentes condições operacionais.

Tabela 12 – Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRS para SD

NRS	GL	SQ	MQ	F	Valor - p
50	9	2855.680000	317.297778	4.20	0.0002**
100	9	5112.900000	568.100000	7.51	<.0001**

NRS - Níveis de enchimento do reservatório de sementes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

Tabela 13 – Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRF para SD

NRF	GL	SQ	MQ	F	Valor - p
50	9	1987.700000	220.855556	2.92	0.0048**
100	9	6039.680000	671.075556	8.87	<.0001**

NRF - Níveis de enchimento do reservatório de fertilizantes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

Estudos anteriores e recentes sobre sistemas de dosagem de sementes por vácuo demonstraram que mecanismos acionados por motores DC sem escovas (Cay, Kocabiyik e May, 2018; He et al., 2017; Zhai et al., 2025), motores DC com escovas (Ling et al., 2024) e motores de passo (Li et al., 2025), apresentam desempenho superior em relação aos sistemas convencionais acionados por rodas de tração. No entanto, essas abordagens envolvem o uso de tecnologias de custo elevado.

No presente estudo, o dosador de disco horizontal apresentou desempenho satisfatório, embora a limitação de torque do motor utilizado tenha comprometido a eficiência em rotações mais altas. A utilização de um motor com maior potência poderia mitigar essa perda de torque em altas velocidades e variação do nível de reservatório dos insumos, resultando em maior estabilidade e uniformidade na dosagem de sementes.

A Tabela 14 apresenta os resultados da eficiência de dosagem de sementes para diferentes rotações do disco dosador. Observa-se que, com o aumento da velocidade de

rotação até 9,80 rpm, a eficiência permaneceu elevada, com valores superiores a 92%, e coeficientes de variação (CV) relativamente baixos, indicando boa dosagem de sementes. No entanto, na maior velocidade testada (12,25 rpm), a eficiência caiu drasticamente para 59,35%, acompanhada de um CV de 82,60%, evidenciando alta variabilidade entre os tratamentos.

Esse comportamento sugere que a operação em altas velocidades compromete o desempenho do sistema dosador, possivelmente devido ao aumento da força centrífuga sobre as sementes, dificultando sua correta alocação nos alvéolos do disco.

Tabela 14 – Análise da eficiência de dosagem de sementes

RPM*	Média Eficiência (%)	Desvio Padrão (σ)	CV (%)
2.45	96.1487796	2.2449674	2.3348891
4.90	95.4475457	4.5115485	4.7267307
7.35	96.5380991	2.7291502	2.8270188
9.80	92.8690239	10.0435796	10.8147789
12.25	59.3461201	49.0209540	82.6017841

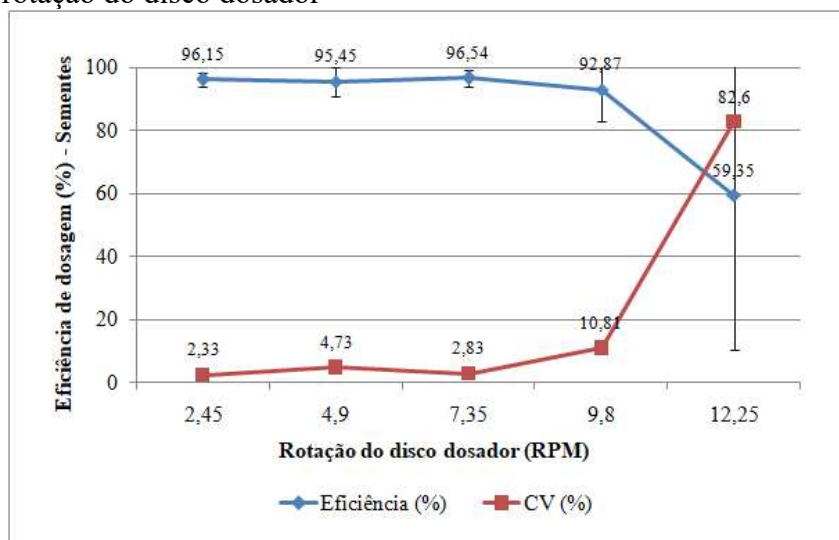
*RPM - rotações por minuto, CV - coeficiente de variação

No experimento realizado para avaliar o desempenho de motores elétricos em mecanismos dosadores de sementes, constatou-se que índice de qualidade de distribuição sementes foi pouco significativo em baixas e médias velocidades, tornando-se mais perceptíveis com o aumento da velocidade (Wang et al., 2024).

Embora este trabalho tenha avaliado diretamente a eficiência de dosagem em função da velocidade de rotação, resultados semelhantes foram observados por (Ling et al., 2024), que verificaram aumento no coeficiente de variação do espaçamento entre sementes e diminuição do índice de qualidade com velocidades de plantio mais elevadas, indicando que maiores velocidades comprometem a uniformidade de distribuição.

Os resultados indicam que o dosador apresenta elevada eficiência e baixa variabilidade operacional em velocidades inferiores a 10 rpm, sendo a faixa entre 2,45 e 9,80 rpm a mais recomendada neste estudo, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Dosagem de sementes e variabilidade em função da rotação do disco dosador



Fonte: elaborado pelo autor.

A dosagem de sementes realizada pelo sistema dosador de precisão com acionamento elétrico foi significativamente afetada pela variação na rotação do motor. Verificou-se que o aumento da velocidade comprometeu a uniformidade da distribuição, resultando em menor eficiência e maior coeficiente de variação (CV). Esse comportamento é consistente com os resultados obtidos por (Cay et al., 2018a, 2018b), que também observaram uma queda na qualidade da dosagem em velocidades elevadas.

6.3 Avaliação do mecanismo dosador – Dosagem de fertilizante

Na Tabela 15 a análise de variância (ANOVA) para a variável fertilizante dosado revelou que a rotação do dosador (RPM) teve efeito altamente significativo sobre a quantidade de fertilizante aplicada ($p < 0,0001$), indicando que a variação na velocidade de operação impacta diretamente a precisão da dosagem do insumo.

Além disso, o nível do reservatório de sementes (NRS) também apresentou efeito significativo ($p = 0,0276$), sugerindo que a quantidade de sementes presente no sistema pode influenciar, de forma indireta, a estabilidade da aplicação de fertilizante. A interação entre RPM e NRS foi significativa ($p = 0,0241$), o que evidencia que o efeito da velocidade sobre a dosagem de fertilizante depende do nível de sementes no reservatório, possivelmente devido a alterações na carga e dinâmica interna do sistema.

Por outro lado, o nível do reservatório de fertilizante (NRF) e suas interações com RPM e NRS não apresentaram efeitos estatisticamente significativos ($p > 0,05$), indicando

que, de forma isolada, a variação na quantidade de fertilizante no reservatório não afetou significativamente a dosagem sob as condições testadas.

Tabela 15 – Análise da variância para variável fertilizante dosado

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Valor - p
RPM	4	13637.94000	3409.48500	8.95	<.0001**
NRS	1	1918.44000	1918.44000	5.04	0.0276*
RPM×NRS	4	4535.26000	1133.81500	2.98	0.0241*
NRF	1	169.00000	169.00000	0.44	0.5073
RPM×NRF	4	2265.70000	566.42500	1.49	0.2140
NRS×NRF	1	864.36000	864.36000	2.27	0.1360
RPM×NRS×NRF	4	1449.74000	362.43500	0.95	0.4390

RPM - Rotações por minuto; NRS - Níveis de enchimento do reservatório de sementes; NRF - Níveis de enchimento do reservatório de fertilizantes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

A análise da interação tripla Tabela 16 entre RPM, NRS e NRF, fatiada por níveis de rotação (RPM), revelou que apenas na maior velocidade testada (12,25 rpm), assim como na dosagem de sementes houve efeito estatisticamente significativo sobre a dosagem de fertilizante ($p = 0,0063$). Isso sugere que, em condições de alta rotação, o desempenho do sistema dosador torna-se mais sensível às combinações entre os níveis dos reservatórios de sementes e fertilizante, impactando diretamente a uniformidade da aplicação.

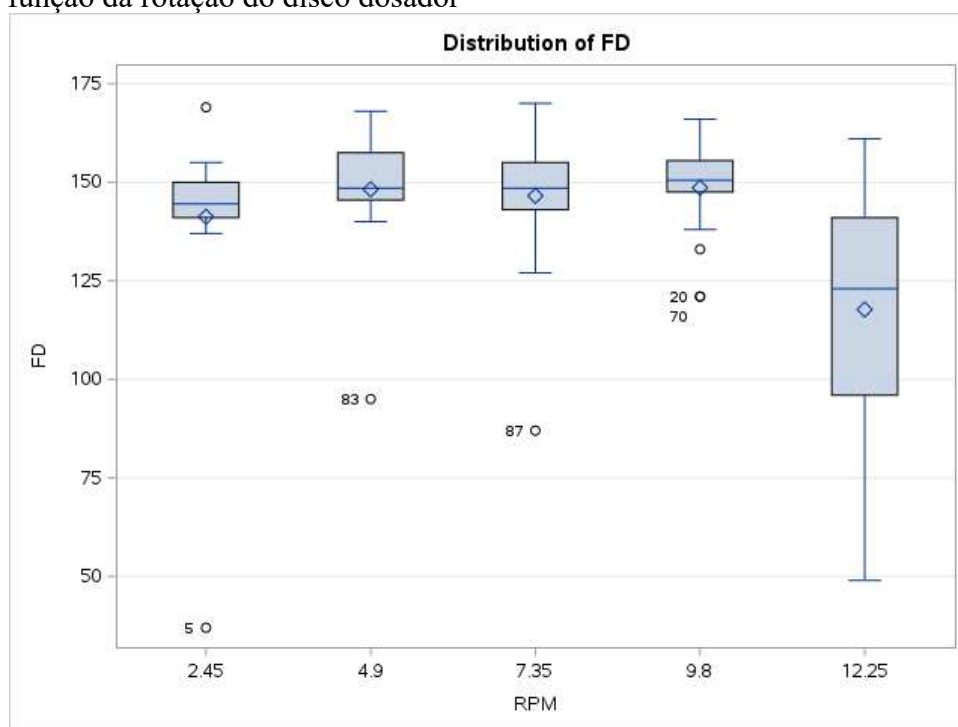
Nas demais rotações (2,45 a 9,80 rpm), os valores de $p > 0,05$ indicam ausência de significância estatística, demonstrando que, em velocidades moderadas e baixas, o sistema apresenta maior estabilidade na dosagem de fertilizante, mesmo com variações nos níveis dos reservatórios.

Tabela 16 – Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por RPM para Fertilizante Dosado (FD)

RPM	GL	SQ	QM	F	Valor - p
2.45	3	2536.550000	845.516667	2.22	0.0923
4.9	3	1226.800000	408.933333	1.07	0.3652
7.35	3	1705.750000	568.583333	1.49	0.2230
9.8	3	678.800000	226.266667	0.59	0.6208
12.25	3	5054.600000	1684.866667	4.42	0.0063**

RPM - Rotações por minuto; NRS - Níveis de enchimento do reservatório de sementes; NRF - Níveis de enchimento do reservatório de fertilizantes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

Figura 16 - Gráfico boxplot da dosagem de fertilizante e variabilidade em função da rotação do disco dosador



Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 17 interação tripla RPM*NRS*NRF, quando fatiada por níveis de NRS, revelou que o sistema dosador apresentou comportamento diferenciado conforme a carga de sementes. Para o reservatório com 100% de capacidade, a interação foi altamente significativa ($p < 0,0001$), indicando que, sob carga máxima, a dinâmica interna do sistema sofre interferência relevante na dosagem de fertilizante. Já no nível de 50%, o efeito foi não significativo ($p = 0,0667$).

Tabela 17 – Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRS para FD

NRS	GL	SQ	QM	F	Valor - p
50	9	6449.920000	716.657778	1.88	0.0667
100	9	16472	1830.231111	4.80	<.0001**

NRS - Níveis de enchimento do reservatório de sementes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

De forma semelhante, o fatiamento por NRF Tabela 18 mostrou significância estatística tanto para o reservatório com 50% de fertilizante ($p = 0,0018$) quanto com 100% ($p = 0,0004$). Esses resultados indicam que o volume de fertilizante no reservatório exerce influência direta sobre a dosagem, especialmente em combinação com as demais variáveis operacionais (RPM e NRS).

Tabela 18 – Efeito RPM×NRS×NRF fatiado por NRF para FD

NRF	GL	SQ	QM	F	Valor - p
50	9	11295	1255.013333	3.29	0.0018**
100	9	13376	1486.257778	3.90	0.0004**

NRF - Níveis de enchimento do reservatório de fertilizantes; GL - Graus de liberdade; SQ - Soma dos quadrados; QM - Quadrado médio, * significância representativa ($p < 0,05$); ** significância representativa ($p < 0,01$).

Na Tabela 19 os resultados indicam que a eficiência da dosagem de fertilizante se manteve elevada (acima de 92%) nas rotações de 2,45 a 9,80 RPM, com os menores valores de CV observados em 9,80 RPM (8,05%) e 4,90 RPM (9,94%), evidenciando boa uniformidade na dosagem nessas condições.

Por outro lado, na rotação de 12,25 RPM, houve queda expressiva na eficiência (77,13%) e aumento acentuado do CV (25,26%) e do desvio padrão, indicando significativa instabilidade e perda de uniformidade na dosagem.

Esse comportamento reforça que velocidades excessivas comprometem a precisão do mecanismo, aumentando a variabilidade do processo.

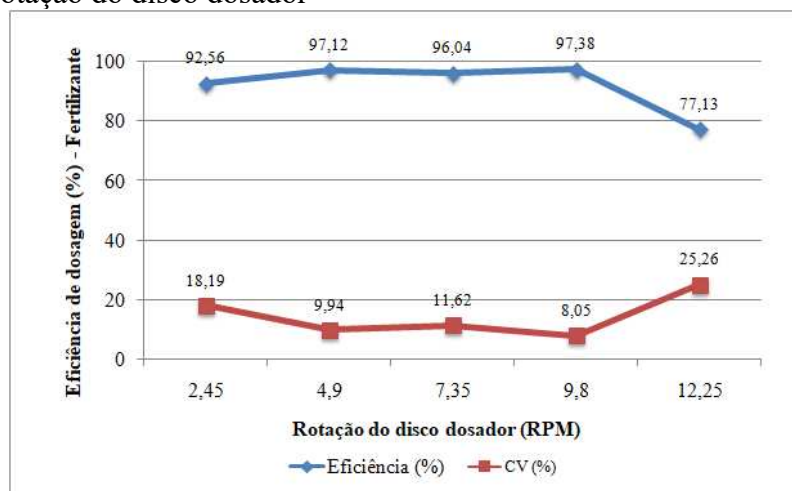
Tabela 19 – Análise da eficiência de dosagem de fertilizantes

RPM*	Média Eficiência (%)	Desvio Padrão (σ)	CV (%)
2.45	92.5622543	16.8336568	18.1863082
4.90	97.1166448	9.6511821	9.9377220
7.35	96.0353866	11.1624800	11.6232988
9.80	97.3787680	7.8360554	8.0469856
12.25	77.1297510	19.4826634	25.2595958

*RPM - rotações por minuto, CV - coeficiente de variação

Com base nos valores do coeficiente de variação (CV), observou-se uma distribuição uniforme da dosagem de sementes em todas as velocidades, exceto na menor e a maior rotação testada. De acordo com (Kim et al., 2008), a uniformidade da aplicação pode ser considerada satisfatória quando os valores de CV permanecem abaixo de 15%, critério atendido nas demais condições avaliadas neste estudo.

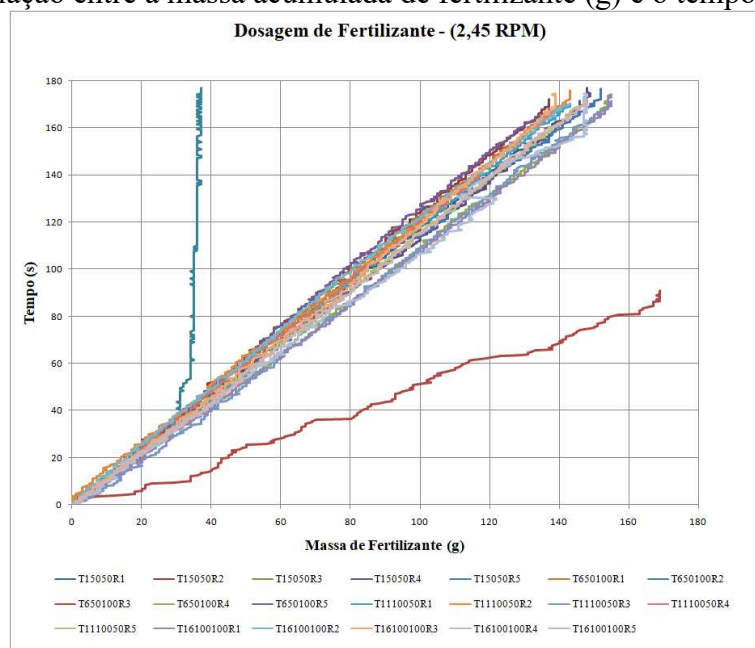
Figura 17 – Dosagem de fertilizante e variabilidade em função da rotação do disco dosador



Fonte: elaborado pelo autor.

A análise das curvas de dosagem revelou, em sua maioria, uma relação aproximadamente linear entre o tempo e a massa acumulada de fertilizante, o que indica que o sistema operou com taxa de dosagem relativamente constante sob condições normais. Essa linearidade é um indicativo positivo de desempenho, refletindo estabilidade operacional e uniformidade na liberação do insumo características desejáveis em mecanismos dosadores. A Figura 18, mostra a distribuição de fertilizante para os tratamentos onde a velocidade de rotação dos discos foi de 2,45 rpm.

Figura 18 – Gráfico de dosagem de fertilizante (2,45 RPM) relação entre a massa acumulada de fertilizante (g) e o tempo (s)



Fonte: elaborado pelo autor.

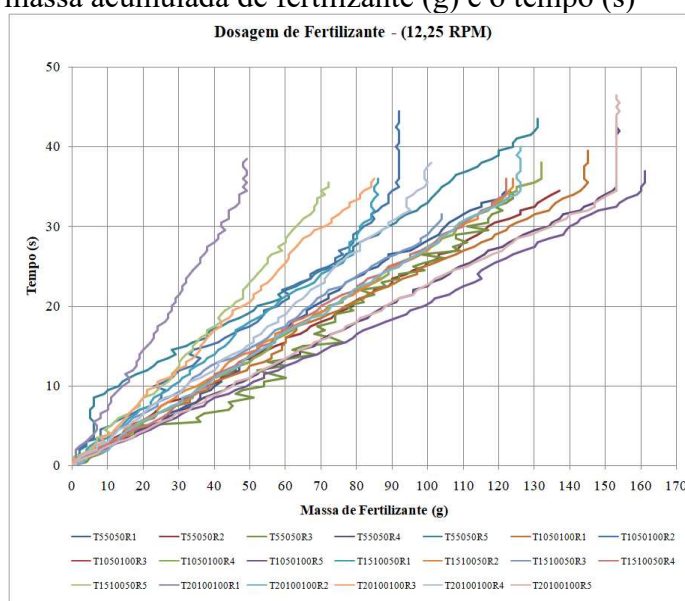
Entretanto, algumas curvas apresentaram desvios em relação a esse padrão, evidenciando trechos com crescimento irregular ou quedas abruptas na massa dosada ao longo do tempo. Tais comportamentos podem estar associados a interferências mecânicas ou instabilidades no fluxo do fertilizante, possivelmente ocasionadas por compactação do material no interior do reservatório, variações na densidade ou na granulação do fertilizante, bem como pela influência dos diferentes níveis de carga sobre o escoamento. Esses fatores, em conjunto ou isoladamente, podem comprometer a uniformidade da dosagem e devem ser considerados no aprimoramento do sistema.

O padrão de dosagem de fertilizante manteve-se consistente entre as velocidades avaliadas, exceto na rotação de 12,25 rpm, na qual foi observado um comportamento divergente em relação às demais.

Ao contrário do gráfico de 2,45 RPM, nesta condição de 12,25 RPM observa-se grande variabilidade entre as curvas de dosagem de fertilizante, com trajetórias mais irregulares, inclinadas e menos sobrepostas. Isso indica redução significativa da uniformidade de dosagem. Muitas curvas apresentam segmentos com oscilações abruptas dando sinais de instabilidade na operação.

A Figura 19, mostra a distribuição de fertilizante para os tratamentos onde a velocidade de rotação dos discos foi de 12,25 rpm.

Figura 19 – Gráfico de dosagem de fertilizante (12,25 RPM) relação entre a massa acumulada de fertilizante (g) e o tempo (s)



Fonte: elaborado pelo autor.

A elevação da rotação para 12,25 RPM possivelmente comprometeu a capacidade do motor em manter torque constante, resultando em uma alimentação intermitente dos alvéolos do disco dosador. Tal instabilidade pode ter ocasionado falhas parciais no preenchimento ou na ejeção do fertilizante, comprometendo a regularidade da dosagem.

Embora o tempo necessário para atingir massas semelhantes de fertilizante tenha sido reduzido em comparação à rotação de 2,45 RPM, o aumento da velocidade ocorreu em detrimento da precisão e da repetibilidade, afetando negativamente a qualidade da aplicação.

A operação do sistema dosador sob alta rotação evidenciou baixa uniformidade e elevada variabilidade entre as repetições, indicando que, na configuração atual, o mecanismo não é adequado para operar de forma eficiente em velocidades elevadas.

7 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho permitiu a execução das etapas de elaboração do projeto informativo, conceitual e detalhado de um mecanismo dosador de sementes e fertilizantes, culminando na construção e montagem de um protótipo funcional;

Através dos ensaios realizados, foi possível avaliar de forma sistemática a influência da velocidade de dosagem e do nível de preenchimento dos reservatórios no desempenho operacional do mecanismo. Os resultados demonstraram que a variação na rotação do mecanismo exerce influência significativa sobre a uniformidade e a eficiência da dosagem, sendo que, a partir da velocidade de (9,8 rpm), observaram-se maiores instabilidades operacionais, comprometendo a regularidade da operação;

Os diferentes níveis de carga nos reservatórios de sementes e fertilizantes alteraram o comportamento do mecanismo dosador, com tendência à redução da precisão em condições de 100% preenchimento;

O protótipo desenvolvido demonstrou viabilidade técnica potencial para aplicação em condições reais de campo, embora requeira aprimoramentos em versões futuras, especialmente voltados

ao aumento da precisão de dosagem em maiores velocidades de operação. Recomenda-se, ainda, a realização de ensaios de qualidade fisiológica das sementes, a fim de avaliar possíveis danos mecânicos decorrentes do processo de dosagem.

REFERÊNCIAS

- AL-AGELE, Hadi A.; NACKLEY, Lloyd; HIGGINS, Chad. Testing Novel New Drip Emitter with Variable Diameters for a Variable Rate Drip Irrigation. **Agriculture**, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 87, 20 jan. 2021. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture11020087>.
- AUTODESK. **Autodesk Inventor Professional 2024** [software]. San Rafael: Autodesk Inc., 2024. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/inventor/>. Acesso em: 4 jun.2025.
- ANGHINONI, Matheus. **Mecanismos dosadores de sementes e velocidade de deslocamento do conjunto trator-semeadora nos componentes agrônômicos do milho**. 2019. 42 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2019. Disponível em: <https://files.ufgd.edu.br/arquivos/arquivos/78/MESTRADO-DOCTORADO-AGRONOMIA/Disserta%C3%A7%C3%B5es%20Defendidas/Matheus%20Anghinoni.pdf>. Acesso em: 8 maio 2025.
- BALASTREIRE, Luiz Antonio. **Máquinas Agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 308 p.
- BARBOSA, Newton Cabral; ARRUDA, Everton Martins; BROD, Elias; PEREIRA, Hamilton Seron. Distribuição vertical do fósforo no solo em função dos modos de aplicação. **Bioscience Journal**. Uberlândia, p. 87-95. fev. 2015. Disponível em: <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-963686>. Acesso em: 8 abr. 2025.
- BESKO, M.; BILYK, C.; SIEBEN, P. G. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Revista Eletrônica dos Cursos de Engenharia**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 9-18, 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>. Acesso em: 2 abr. 2025.
- BRONDANI, Leonardo Basso. **Desempenho de protótipos de disco para distribuição de ureia a lanço**. 2013. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7574/BRONDANI,%20LEONARDO%20BASO.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2024.
- CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R. **Máquinas para manejo de vegetações e semeadura em plantio direto**. Sistema plantio direto com qualidade, Iapar / Itaipu Binacional, p.85-126, 2006.
- CASTRO-AGUIRRE, E.; IÑIGUEZ-FRANCO, F.; SAMSUDIN, H.; FANG, X.; AURAS, R. Poly (lactic acid) — Mass production, processing, industrial applications, and end of life. **Advanced Drug Delivery Reviews**, [s. l.], v. 107, p. 333-366, dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addr.2016.03.010>.
- CAVICHOLI, Fabio Alexandre. **Velocidade de semeadura e profundidade da haste em sistema plantio direto de milho e soja**. 2014. 80 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/ccfb547e-fef5-4f3b-86d7-5b17c9404fd1/content>. Acesso em: 6 maio 2025.

CAY, Anil; KOCABIYIK, Habib; MAY, Sahin. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part I: design and laboratory simulation. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. l.], v. 144, p. 71-79, jan. 2018a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.11.035>.

CAY, Anil; KOCABIYIK, Habib; MAY, Sahin. Development of an electro-mechanic control system for seed-metering unit of single seed corn planters Part II: field performance. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. l.], v. 145, p. 11-17, fev. 2018b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.021>.

DIZON, John Ryan C.; ESPERA, Alejandro H.; CHEN, Qiyi; ADVINCULA, Rigoberto C. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Additive Manufacturing**, [s. l.], v. 20, p. 44-67, mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.

DIZON, J. R. C.; VALINO, A. D.; SOUZA, L. R.; ESPERA, A. H.; CHEN, Q.; ADVINCULA, R. C. 3D printed injection molds using various 3D printing technologies. **Materials Science Forum**, Switzerland, v. 1005, p. 150-156, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1005.150>. Acesso em: 8 maio 2025.

FOUNTAS, Spyros; MYLONAS, Nikos; MALOUNAS, Ioannis; RODIAS, Efthymios; SANTOS, Christoph Hellmann; PEKKERIET, Erik. Agricultural Robotics for Field Operations. **Sensors**, [s. l.], v. 20, n. 9, p. 2672, 7 maio 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/s20092672>.

FRANÇA-NETO, José de Barros; KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos; HENNING, Ademir Assis; PÁDUA, Gilda Pizzolante de; LORINI, Irineu; HENNING, Fernando Augusto. **Tecnologia da produção de semente de soja de alta qualidade**. 380. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2016. 82 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1057882/1/Documentos380OL1.pdf>. Acesso em: 6 maio 2025.

GAO, Wei; ZHANG, Yunbo; RAMANUJAN, Devarajan; RAMANI, Karthik; CHEN, Yong; WILLIAMS, Christopher B.; WANG, Charlie C.L.; SHIN, Yung C.; ZHANG, Song; ZAVATTIERI, Pablo D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, [s. l.], v. 69, p. 65-89, dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>.

GARCIA, Ricardo Ferreira; VALE, Welington Gonzaga do; OLIVEIRA, Márcia Teresinha Ramos de; PEREIRA, Érica Mirre; AMIM, Reynaldo Tancredo; BRAGA, Thiago Costa. Influência da velocidade de deslocamento no desempenho de uma semeadora-adubadora de precisão no Norte Fluminense. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s. l.], v. 33, n. 3, p. 417-422, 22 jun. 2011. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v33i3.6085>.

GILBERTSON, Jo; VALLIN, Estelle. **Handbook of solid fertiliser blending**: code of good practice for quality. 3. ed. France: European Fertilizer Blenders Association, 2016. 48 p. Disponível em: www.european-blenders.org. Acesso em: 8 ago. 2024.

GONGAL, A.; AMATYA, S.; KARKEE, M.; ZHANG, Q.; LEWIS, K. Sensors and systems for fruit detection and localization: a review. **Computers and electronics in agriculture**, [s. l.], v. 116, p. 8-19, ago. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.021>.

GONZALEZ-DE-SANTOS, Pablo; FERNÁNDEZ, Roemi; SEPÖLVEDA, Delia; NAVAS, Eduardo; EMMI, Luis; ARMADA, Manuel. Field Robots for Intelligent Farms—Inhering Features from Industry. **Agronomy**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 1638, 24 out. 2020. <http://dx.doi.org/10.3390/agronomy10111638>.

HE, X.; CUI, T.; ZHANG, D.; WEI, J.; WANG, M.; YU, Y.; LIU, Q.; YAN, B.; ZHAO, D.; YANG, L.. Development of an electric-driven control system for a precision planter based on a closed-loop PID algorithm. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. l.], v. 136, p. 184-192, abr. 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.028>.

KIM, Y.J.; KIM, H.J.; RYU, K.H.; RHEE, J.y.. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 100, n. 4, p. 498-510, ago. 2008. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.05.007>.

LI, Zhaodong; ZHANG, Heng; HUANG, Jialuo; LOU, Chao; CHEN, Yongxin; LIU, Lichao; ZHANG, Tian; CHEN, Liqing. Design and parameter optimization of air-delivery auxiliary seed guide for pneumatic plate precision rapeseed metering device. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. l.], v. 230, p. 109840, mar. 2025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2024.109840>.

LIMA FILHO, M. R.; de ALBIERO, D.; CAVALCANTE, E. S.; MELO, R. P.; MONTEIRO, L. A. Avaliação do desempenho de uma semeadora pneumática trabalhando em condições semiárida. **Revista Craibeiras da Agroecologia**. Rio Largo. v.1, n.1, 2017.

LING, Lin; XIAO, Yuejin; HUANG, Xinguang; WU, Guangwei; LI, Liwei; YAN, Bingxin; GENG, Duanyang. Design and Testing of Electric Drive System for Maize Precision Seeder. **Agriculture**, [s. l.], v. 14, n. 10, p. 1778, 9 out. 2024. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture14101778>.

MACHADO, Thiago Martins; REYNALDO, Étore Francisco. Avaliação de diferentes semeadoras e mecanismos dosadores de sementes em relação à velocidade de deslocamento. **Energia na Agricultura**, [s. l.], v. 32, n. 1, p. 12–16, 2017. DOI: 10.17224/EnergAgric.2017v32n1p12-16. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/2345>. Acesso em: 2 out. 2024.

MAHADHIR, Khairul Azmi; TAN, Shing Chiang; LOW, Cheng Yee; DUMITRESCU, Roman; AMIN, Adam Tan Mohd; JAFFAR, Ahmed. Terrain Classification for Track-driven Agricultural Robots. **Procedia Technology**, [s. l.], v. 15, p. 775-782, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.050>.

MARKFORGED. **PLA vs ABS vs Nylon**: 3d printer filament types explained. 3D Printer Filament Types Explained. 2025. Disponível em: <https://markforged.com/resources/blog/pla-abs-nylon>. Acesso em: 8 maio 2025.

MAY, Sahin; KOCABIYIK, Habib. Design and development of an electronic drive and control system for micro-granular fertilizer metering unit. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. l.], v. 162, p. 921-930, jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.048>.

MELO, Rafaela Paula. **Desenvolvimento e avaliação do protótipo de uma semeadora punccionadora para agricultura familiar**. 2017. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/24071>. Acesso em: 3 mar. 2025.

MODOLO, Alcir José; SILVA, Suedêmio de Lima; SILVEIRA, João Cleber Modernel da; MERCANTE, Erivelto. Avaliação do desempenho de duas semeadoras-adubadoras de precisão em diferentes velocidades. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 12, n. 4, p. 298-306, dez. 2004. Disponível em: <https://archivum.grupomarista.org.br/pergamumweb/vinculos/00007b/00007b2b.pdf>. Acesso em: 4 mar. 2025.

NASCIMENTO, Elivânia Maria Sousa. **Desenvolvimento e avaliação do protótipo de semeadora-adubadora no sistema de camalhão**. 2019. 104 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/46192>. Acesso em: 4 mar. 2025.

PADHIARY, Mrutyunjay; BARBHUIYA, Javed Akhtar; ROY, Dipak; ROY, Pankaj. 3D printing applications in smart farming and food processing. **Smart Agricultural Technology**, [s. l.], v. 9, p. 100553, dez. 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atech.2024.100553>.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich. **Projeto na Engenharia**. São Paulo: Blucher, 2005. 411 p.

POLON, Airton. **Uso de motores elétricos em semeadoras como ferramenta para o aumento da produtividade em ambientes de agricultura de precisão**. 2023. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/29035>. Acesso em: 29 mar. 2025.

PORTELLA, José Antonio. **Mecanismos dosadores de sementes e de fertilizantes em máquinas agrícolas**. Passo Fundo: Embrapa, 1997. 40 p. (EMBRAPA-CNPT. Documentos, 41). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/849988>. Acesso em: 3 mar. 2025.

REIS, E. F.; CUNHA, J. P. A. R. da.; FERNANDES, H. C.; RONDÓN, P. P. Influência de mecanismos rompedores de solo no desempenho de uma semeadora-adubadora de plantio direto. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, Havana, v. 12, n. 4, p. 1-5, 2003. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/932/93212401.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2025.

REYNALDO, Étore Francisco; GAMERO, Carlos Antonio. Avaliação de mecanismos dosadores de fertilizantes helicoidais em ângulos de nivelamento longitudinal e transversal. **Energia na agricultura**, [s. l.], v. 30, n. 2, p. 125–136, 2015. DOI: 10.17224/EnergAgric.2015v30n2p125-136. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/1049>. Acesso em: 3 out. 2025.

RODELLA, A. A.; ALCARDE, J. C. Requisitos de qualidade física e química de fertilizantes minerais. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. **Nutrição e fertilização florestal**.

Piracicaba: IPEF, 2000. p. 59-78.

ROSA, David Peres da; SPAGNOLO, Roger Toscan; ALVES, Alisson; CANSIAN, Cesar Augusto; LONGARETTI, Marcos. **Redutor de perdas no distribuidor de fertilizantes**. 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/redutor-de-perdas-no-distribuidor-de-fertilizantes>. Acesso em: 20 jun. 2025.

SANTOS, Alessandro José Marques; GAMERO, Carlos Antonio; OLIVEIRA, Rone Batista; VILLEN, Andréia Correa. Análise espacial da distribuição longitudinal de sementes de milho em uma semeadora-adubadora de precisão. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 16-23, fev. 2011. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7355/6836>. Acesso em: 4 mar. 2025.

SANTOS, Jusimara Andrade; VALE, Welington Gonzaga do; PACHECO, Edson Patto; BARRETO, Aurélio Lima; ENES, Adilson Machado. Adaptação de dosadores elétricos para distribuição precisa de fertilizantes com adubadora microtratorizada. **Scientific Electronic Archives**, [s. l.], v. 14, n. 6, 2020. DOI: 10.36560/14620211284. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/index.php/SEA/article/view/1284>. Acesso em: 19 fev. 2025.

SAS INSTITUTE INC. **SAS: Statistical Analysis System** [software]. Version 9.4. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2013. Disponível em: <https://www.sas.com>. Acesso em: 5 jun. 2025.

SCHNÉ, Tamás; JASKÓ, Szilárd. 3D printing in agriculture - review. **Georgikon for agriculture**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 45–54, 2023. Disponível em: <https://journal.uni-mate.hu/index.php/gfa/article/view/4986>. Acesso em: 2 oct. 2024.

SILVA, José Geraldo da; KLUTHCOUSKI, João; SILVEIRA, Pedro Marques da. Desempenho de uma semeadora-adubadora no estabelecimento e na produtividade da cultura do milho sob plantio direto. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 57, n. 1, p. 7-12, mar. 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162000000100003>.

SILVA, Vicente Filho Alves. **Qualidade da semeadura direta de milho com dois mecanismos de pressão no disco sulcador sob duas velocidades**. 2015. 65 f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2015. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/123810>. Acesso em: 6 abr. 2025.

SIQUEIRA, Rubens. **Milho: semeadoras-adubadoras para sistema de plantio direto com qualidade**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2008, Londrina. Anais... Londrina: IAPAR, 2008. p. 1–6.

SOARES, Joyce Aristércia Siqueira; AGUIAR, José Otávio. Desafios na adoção de tecnologias sociais na agricultura familiar: percepção dos sujeitos no semiárido paraibano. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 1-2, 30 jun. 2025. <http://dx.doi.org/10.55905/oelv23n6-183>.

VASCONCELOS, Márcia Beatriz Silva; REIS, Ângelo Vieira dos. Desenvolvimento e pré-teste de um protótipo de dosador de palhetas com dupla saída. In: XIV ENPOS, 14., 2012, Pelotas. **Anais [...]**. Pelotas: Ufpel, 2012. p. 1-4. Disponível em:

https://www2.ufpel.edu.br/enpos/2012/anais/pdf/EN/EN_00154.pdf. Acesso em: 15 mar. 2024.

VIANNA, Leonardo R.; REIS, Ângelo V. dos; MACHADO, Antônio L. T. Desenvolvimento de dosador de sementes com dupla saída para disco horizontal. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 18, n. 10, p. 1086-1091, out. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1086-1091>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/KSqZ49yhm65Jv4PRvrvdMqt/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 1 fev. 2024.

VIGANÓ, J. P.; TAVARES, C. A.; FORALOSSO, A. A.; BITENCOURT, R.; DUARTH, M.; SONCELA, R.; SILVA, T. R. B.; SILVA, S. L.; PRIMO, M.A. Velocidade de emergência na cultura do milho em função da velocidade de deslocamento e mecanismos sulcadores. **Revista Cultivando o Saber**. Cascavel 3 PR. v.1, n.1, p. 7-16, 2008.

WANG, Haoyu; YANG, Li; ZHANG, Dongxing; CUI, Tao; HE, Xiantao; XIAO, Tainpu; LI, Hongsheng; DU, Zhaoxue; XIE, Chunji. Comparative investigation and evaluation of electric-drive seed-metering systems across diverse speed ranges for enhanced high-precision seeding applications. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. l.], v. 222, p. 108976, jul. 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2024.108976>.

YADAV, Dinesh Kumar; SINGH, Jaivir; KUMAR, Pankaj. Precision planting and seeding: A review of technologies and techniques. **International Journal of Research in Agronomy**, India, v. 8, n. 4, p. 548-551, mar. 2025. Disponível em: <https://www.doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i4g.2830>. Acesso em: 20 jul. 2025.

YANG, Wenjie; YU, Jie; LI, Yanhang; JIA, Bingli; JIANG, Longgang; YUAN, Aijing; MA, Yue; HUANG, Ming; CAO, Hanbing; LIU, Jinshan. Optimized NPK fertilizer recommendations based on topsoil available nutrient criteria for wheat in drylands of China. **Journal of Integrative Agriculture**, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 2421-2433, jul. 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jia.2023.11.049>.

YU, Iris K.M.; WONG, Ka-Hing. Food waste-derived 3D printable materials: a carbon neutral solution to global foodloss. **Trends In Food Science & Technology**, [s. l.], v. 137, p. 156-166, jul. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2023.05.014>.

ZHAI, Chengkun; LU, Caiyun; LI, Hongwen; HE, Jin; WANG, Qingjie; WANG, Chao; JIN, Wenlong; CHEN, Liyu; CHANG, Fangle; BI, Jinshuo. An electric-driven maize seeding system: improving the quality of accelerate seeding using tracking differential filtering-optimal tracking control (tdf-otc) method. **Computers And Electronics In Agriculture**, [s. l.], v. 236, p. 110488, set. 2025. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2025.110488>.