

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Rafael Sobroza Becker

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR PARA QUANTIFICAÇÃO DO
FLUXO DE MASSA DE FERTILIZANTES SÓLIDOS**

Santa Maria, RS,
2020

Rafael Sobroza Becker

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR PARA QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE
MASSA DE FERTILIZANTES SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Orientador: Prof. Airton dos Santos Alonço (Dr. Eng.)

Santa Maria, RS
2020

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor. Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Becker, Rafael Sobroza

Desenvolvimento de sensor para quantificação do fluxo de massa de fertilizantes sólidos / Rafael Sobroza
Becker.- 2020.

67 p.; 30 cm

Orientador: Airton dos Santos Alonço

Coorientador: Marcia Xavier Peiter

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2020

1. Semeadora-Adubadora 2. Agricultura de Precisão 3. Taxa Variável 4. Automação 5. Medição I. Alonço, Airton dos Santos II. Peiter, Marcia Xavier III. Título.

© 2020

Todos os direitos autorais reservados a Rafael Sobroza Becker. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Ernesto Pereira, n. 239, Bairro Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-140

Fone: (55) 99993-0594; E-mail: rafaelsobrozabecker@gmail.com

Rafael Sobroza Becker

**DESENVOLVIMENTO DE SENSOR PARA QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE
MASSA DE FERTILIZANTES SÓLIDOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Área de concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 03 de fevereiro de 2020:

Airton dos Santos Alonço, Dr. Eng. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Tiago Rodrigo Francetto, Dr. Eng. (UFSM)

Lucas Augusto da Silva Gírio, Dr. Eng. (IFFar)

Santa Maria, RS
2020

Aos meus pais, Elton e Gislaine, e ao meu irmão, Guilherme, que dignamente me apresentaram a importância da família e o caminho da honestidade, da humildade e da persistência.

À minha namorada, Josiane, pelo amor incondicional.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A construção deste trabalho só foi possível através do envolvimento, compreensão, auxílio, dedicação e empenho de diversas pessoas. Por isso, agradeço:

A Deus, pela saúde e sabedoria em superar os desafios da vida.

Aos meus pais **Elton Leonardo Becker** e **Gislaine de Fátima Sobroza Becker**, pelo exemplo de educação, dignidade, honestidade, amor e incentivo aos estudos durante toda a minha jornada.

Ao meu irmão **Guilherme Sobroza Becker**, pelo exemplo admirável de dedicação, inteligência e por estar sempre disposto em auxiliar no que for necessário.

À minha namorada **Josiane Bertoldo Piovesan**, pelo amor, carinho, paciência e incentivo em todos os momentos, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao professor, orientador e amigo **Airton dos Santos Alonço**, pelos conselhos e ensinamentos, aperfeiçoando a minha carreira profissional, além da paciência em transmitir o conhecimento para os seus orientados.

Aos amigos e colegas: **Dyeverson Pereira**, **Éder Pinheiro**, **Gessieli Possebom**, **Henrique Eguilhor**, **Luana Knierim**, **Lucas Rosa**, **Mayara Mendonça**, **Pablo Alonço**, **Rômulo Bock**, **Tiago Lopes**, **Vitor Scherer** pelo bom convívio diário e a troca de experiências.

Aos amigos **Bruno Zart**, **Dauto Carpes** e **Wagner da Cruz**, pelo auxílio e companheirismo na realização do trabalho.

Ao professor, amigo e colega **Tiago Rodrigo Francetto**, pelo exemplo de dedicação, incentivo, inspiração e auxílio.

Ao professor **Alessandro Dal'Col Lúcio**, pelo auxílio estatístico no trabalho.

À banca examinadora, composta pelos professores **Tiago Francetto** e **Lucas Gírio**, que aceitaram participar da apreciação deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PPGA e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela oportunidade, infraestrutura e apoio financeiro, que foram bases indispensáveis para o meu crescimento acadêmico.

Às demais pessoas que, de uma forma ou outra, contribuíram para a conclusão dessa importante etapa em minha carreira profissional, o meu muito obrigado.

As pessoas que são loucas o suficiente para achar que podem mudar o mundo são aquelas que o mudam.

(Comercial “Pense diferente” da Apple, 1997)

RESUMO

VALIDAÇÃO DE SENSOR PARA QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE MASSA DE FERTILIZANTES SÓLIDOS

AUTOR: Rafael Sobroza Becker
ORIENTADOR: Airton dos Santos Alonço

Este estudo pressupõe que a inserção de sensores capazes de realizar a medição instantânea do fluxo de massa de fertilizantes, após a sua liberação pelo dosador, poderá auxiliar no monitoramento das taxas aplicadas em cada linha de semeadura, por meio da aferição dos dados instantâneos, de maneira que possa servir como base de correção para os controladores que equipam os sistemas automatizados. Com isso, a verificação e os ajustes permitem uma maior eficiência na distribuição de fertilizantes, ocasionando um aumento na lucratividade. Assim sendo, o objetivo compreende o desenvolvimento de um sistema com um sensor microondas, para quantificar o fluxo de massa de fertilizantes sólidos, em função da granulometria do fertilizante e as rotações de acionamento. O estudo foi conduzido nas dependências do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas (LASERG/UFMS). Foi utilizada uma bancada para testes com dosadores de fertilizantes, acoplada com um dosador do tipo helicoidal (sem-fim), com descarga de fertilizante por transbordo transversal. O seu acionamento foi realizado por um motor elétrico de 0,735 kW. Para a alteração e o controle da rotação, a bancada contou com um inversor de frequência e com um sistema de aferição de dados. Os fertilizantes utilizados foram do tipo minerais classificados como mistura granular, mistura de grânulos e mistura farelada e, para isso, algumas propriedades físicas foram determinadas. A taxa de aplicação g min^{-1} foi realizada através da mensuração da massa de fertilizantes coletada num intervalo de 30 segundos, após a estabilização do sistema. Foi montada uma concepção com componentes eletrônicos para automatizar a estimação do fluxo mássico, de forma que fosse validado e calibrado através dos testes estáticos, realizados por meio de medição manual. O experimento foi disposto no delineamento inteiramente ao acaso (DIC), em um arranjo trifatorial (método de medição, tipo de fertilizante e rotação de acionamento), com 5 repetições. Foi observado que a regulagem do inversor de frequência é diretamente proporcional à rotação de acionamento do dosador. Com isso, a conversão da rotação desejada no dosador para a frequência utilizada no inversor pode ser calculada por uma equação linear com coeficiente de determinação de 99,99 %. O sensor permitiu a identificação do incremento das velocidades das partículas e, em decorrência, é possível estimar a taxa de aplicação, que está diretamente proporcional à rotação de acionamento. Os métodos de medição não diferiram quando utilizados os fertilizantes do tipo mistura granular e mistura de grânulos, evidenciando que o uso de sensor é válido para mensurar o fluxo de massa dos fertilizantes. Para a mistura farelada, o sensor subestimou a taxa de aplicação em 21,56 %, confirmando a sua dificuldade em estimar com precisão os materiais mais densos e com menores tamanhos de partículas.

Palavras-chave: Semeadora-Adubadora. Agricultura de Precisão. Taxa Variável. Automação. Medição.

ABSTRACT

SENSOR VALIDATION FOR MASS FLOW QUANTIFICATION OF SOLID FERTILIZERS

AUTHOR: Rafael Sobroza Becker
ADVISOR: Airton dos Santos Alonço

This study assumes that the insertion of sensors capable of instantaneous measurement of the mass flow of fertilizers, after its release by the feeder, can assist in the monitoring of the rates applied in each seeding line, through the measurement of instantaneous data, so that it can serve as a correction base for the controllers that equip the automated systems. With this, the verification and adjustments allow greater efficiency in the distribution of fertilizers, causing an increase in profitability. Therefore, the objective comprises the develop a system with a microwave sensor, to quantify the mass flow of solid fertilizers, depending on the granulometry of the fertilizer and the driving speeds. The study was conducted at the Agricultural Machinery Research and Development Laboratory (LASERG / UFSM). A test bench with fertilizer feeders was used, coupled with a helical feeder (endless), with fertilizer discharge by transverse overflow. Its activation was performed by an electric motor of 0.735 kW. For the alteration and the control of the rotation, the bench had a frequency inverter and a data measurement system. The fertilizers used were of the mineral type classified as granular mixture, mixture of granules and, bran mixture, for that some physical properties were determined. The application rate g min^{-1} was performed by measuring the mass of fertilizers collected in an interval of 30 seconds, after stabilizing the system. A concept was assembled with electronic components to automate the mass flow estimation, so that it was validated and calibrated through static tests, performed by means of manual measurement. The experiment was arranged in a completely randomized design (DIC), in a three-factor arrangement (measurement method, type of fertilizer and drive rotation), with 5 repetitions. It was observed that the regulation of the frequency inverter is directly proportional to the dosing speed. With this, the conversion of the desired speed in the feeder to the frequency used in the inverter can be calculated by a linear equation with a determination coefficient of 99.99 %. The sensor allowed the identification of the increase in the speed of the particles and, as a result, it is possible to estimate the application rate, which is directly proportional to the drive speed. The measurement methods did not differ when using granular mixture and granule mixture type fertilizers, showing that the use of a sensor is valid to measure the mass flow of the fertilizers. For the mash mixture, the sensor underestimated the application rate by 21.56 %, confirming its difficulty in accurately estimating the densest materials with the smallest particle sizes.

Keywords: Row crop planter. Precision Agriculture. Variable Rate. Automation. Measurement.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos fertilizantes minerais.	17
Figura 2 – Classificação dos componentes principais das semeadoras-adubadoras.	22
Figura 3 – Exemplo de dosador helicoidal de fertilizante	23
Figura 4 – Coeficiente de variação obtido para os mecanismos dosadores de fertilizantes.	25
Figura 5 – Sistema de taxa variável em semeadoras-adubadoras.....	26
Figura 6 – Esquema do sistema experimental.	30
Figura 7 – Bancada para ensaios de mecanismos dosadores de fertilizantes.	31
Figura 8 – Dispositivo para determinação do ângulo de repouso.	34
Figura 9 – Fluxograma do sistema automatizado de coleta de dados.	37
Figura 10 – Datalogger e encoder utilizado nas avaliações.....	38
Figura 11 – Bancada utilizada para estimativa do fluxo de massa de fertilizantes.	40
Figura 12 – Equação de regressão linear para determinação da rotação de acionamento do dosador.	45
Figura 13 – Coeficiente de variação relativo as rotações de acionamento reguladas.....	46
Figura 14 – Exemplo de dados característicos da variabilidade da tensão no instante de tempo.	48
Figura 15 – Análise da frequência obtida com a alteração da rotação de acionamento.	49
Figura 16 – Análise das equações de calibração	50
Figura 17 – Análise de regressão para o fator rotação de acionamento.	54
Figura 18 – Regressões do fator rotação de acionamento dentro de cada nível do fator método de medição para todos os fertilizantes.	56
Figura 19 – Regressões do fator rotação de acionamento dentro de cada nível do fator tipo de fertilizante.....	56
Figura 20 – Correlação entre o método manual e o sensor microondas para todos os tipos de fertilizantes.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de natureza física e garantia granulométrica.....	18
Tabela 2 – Principais indicadores de fertilizantes no Brasil.....	20
Tabela 3 – Relação de trocas de fertilizantes e produtos agropecuários.	20
Tabela 4 – Tipos de fertilizantes minerais utilizados nos experimentos.	33
Tabela 5 – Análise granulométrica dos fertilizantes minerais utilizados nos experimentos.	34
Tabela 6 – Propriedades físicas dos fertilizantes.....	36
Tabela 7 – Valores proporcionais as frequências e rotações de acionamento dos dosadores. .	39
Tabela 8 – Materiais utilizados e custo de aquisição.....	42
Tabela 9 – Descrição dos fatores e seus níveis.....	43
Tabela 10 – Fatores, tipos e procedimento de análise.	43
Tabela 11 – Funções matemáticas de calibração para cada tipo de fertilizante estudado.	51
Tabela 12 – Síntese da análise de variância com as médias dos fatores, seus níveis e os resultados do teste F.	52
Tabela 13 – Desdobramento das médias entre os fatores método de medição (F1) e tipo de fertilizante (F2).	55
Tabela 14 – Diferença absoluta da taxa de aplicação obtida entre o método manual e o uso do sensor microondas.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP	Agricultura de Precisão
BANFERTI II	Bancada para testes com dosadores de fertilizantes de semeadoras-adubadoras em linhas
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IFA	<i>International Fertilizer Association</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LASERG	Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
RS	Rio Grande do Sul
SPD	Sistema de Plantio Direto
SSD	Sistema de Semeadura Direta
TV	Taxa Variável
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
3	HIPÓTESES	16
4	REVISÃO DE LITERATURA	17
4.1	FERTILIZANTES MINERAIS	17
4.2	SEMEADORAS-ADUBADORAS	21
4.3	MECANISMOS DOSADORES DE FERTILIZANTES	23
4.4	APLICAÇÕES À TAXA VARIÁVEL	25
4.5	SENSORES PARA MEDIR FLUXO DE MASSA DE MATERIAL GRANULAR	26
4.6	SENSORES MICROONDAS.....	28
5	MATERIAL E MÉTODOS	31
5.1	LOCAL	31
5.2	BANCADA DE TESTES E ENSAIOS	31
5.3	MECANISMO DOSADOR DE FERTILIZANTE	32
5.4	FERTILIZANTES	32
5.4.1	Granulometria	33
5.4.2	Ângulo de repouso	34
5.4.3	Teor de água	35
5.4.4	Densidade Aparente	35
5.4.5	Propriedades físicas dos fertilizantes	36
5.5	AQUISIÇÃO DOS DADOS	36
5.5.1	Rotação de acionamento	37
5.5.2	Mensuração automatizada do fluxo de massa	39
5.5.3	Estimativa de custo do sistema	42
5.6	DESCRIÇÃO E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	42
5.6.1	Análise estatística	43
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
6.1	CALIBRAÇÃO INICIAL.....	45
6.1.1	Rotação de acionamento	45
6.1.2	Características do sinal de saída e calibração	48
6.2	ESTIMATIVA DO FLUXO DE MASSA	52
7	CONCLUSÃO	60
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

1 INTRODUÇÃO

Em função da necessidade de alternativas que possam suprir a demanda por alimentos, a busca pela eficiência produtiva e, conseqüentemente, pelo aumento da produtividade, são opções que podem auxiliar nessa demanda. Esse fato, atrelado aos altos custos de investimentos e custeio da lavoura, faz com que, dia após dia, o setor seja mais competitivo. Então, há muitos investimentos, estudos e trabalhos que visam à qualidade, redução de custos e estratégias gerenciais e organizacionais, a fim de aumentar a eficiência de todas as atividades do setor agrícola.

Os limites que estão atrelados à produção de alimentos para uma população global crescente constituem, há anos, uma constante fonte de debates e preocupações. As projeções populacionais indicam um crescimento acelerado e contínuo nas próximas décadas, que pode ultrapassar a marca de 9,5 bilhões de pessoas no mundo, em 2050, segundo a ONU (2012). Esse crescimento provoca grandes desafios para a agricultura, considerada a sua expansão de forma sustentável, economicamente viável e socialmente ética. No entanto, a ampliação de uso das terras para o uso agrícola é – e será restrita –, mas, como alternativa, há a eficiência dos processos, como o aumento da produção por unidade de área, que deverá proporcionar a elevação na oferta de alimentos.

O adequado crescimento e desenvolvimento das plantas são dependentes da absorção correta de nutrientes, resultante da disponibilidade do solo e da suplementação exata, através da aplicação de fertilizantes. Para tanto, o seu consumo pode aumentar de 166 milhões de toneladas em 2005/2007 para 263 milhões de toneladas em 2050 (ALEXANDRATOS & BRUINSMA, 2013). Contudo, o aumento no consumo e a diminuição das reservas de matérias primas, as quais são utilizadas em sua composição, têm ocasionado um incremento dos custos de aquisição, tornando-se um importante fator quando devem ser de tomadas as decisões no planejamento agrícola.

Dentre as técnicas mais utilizadas atualmente na agricultura, destaca-se o sistema de plantio direto, em que há a preconização do cultivo em solos que apresentam um sistema de rotação de culturas, com quantidade considerável de resíduos culturais sobre o solo, e a mobilização de solo apenas na linha de semeadura. É um manejo conservacionista, que visa reduzir a erosão e o número de operações agrícolas, buscando um maior aproveitamento de nutrientes, a redução da temperatura superficial do solo, a conservação da umidade, o aumento da matéria orgânica e a economia de combustível, fertilizantes e mão de obra.

Nesse sistema, é imprescindível que a realização do processo de semeadura e adubação seja realizado com elevada precisão, pois, na fase inicial do estabelecimento das plantas, os efeitos negativos podem ser irreversíveis. A dosagem correta, o revolvimento do solo localizado e a distribuição de sementes e fertilizantes são elementos decisivos para o sucesso da produção. Nessa premissa, têm-se hoje, dentro da agricultura de precisão (AP), tecnologias de aplicação à taxa variável (TV), responsável pela dosagem correta de sementes ou de fertilizantes em quantidades necessárias ou suficientes em cada ponto da lavoura.

Para viabilizar as aplicações à taxa variável são necessários sistemas de controle que devem definir a posição da máquina e associá-la a uma taxa de aplicação, oriunda de mapas de prescrição ou sensores, além de comandar o acionamento dos dosadores. Esses controladores necessitam de cálculos baseados em algoritmos e têm por objetivo prever o efeito de fatores que influenciam na sua distribuição, bem como na correção.

Esses sistemas já estão sendo implementados em semeadoras-adubadoras que, nos últimos anos, vêm sofrendo adaptações e a inserção de tecnologias embarcadas em seus componentes, com o objetivo de minimizar erros de deposição. Entre esses componentes, destacam-se os mecanismos de dosagem de fertilizantes e os compostos por dosadores de fluxo contínuo, mais utilizados quando do tipo helicoidais. Tais mecanismos apresentam diferenças de disposições construtivas e são encontrados nas mais diversas opções no mercado brasileiro.

Porém, todas as calibrações realizadas na maioria das operações ou dos estudos, visando a aplicação à TV, levam em consideração a rotação do eixo do mecanismo dosador para o ajuste da taxa a ser distribuída. E, geralmente, a vazão mássica de fertilizante é obtida por meio de calibração realizada pelo operador apenas no início da operação. Contudo, poderá haver variabilidade na quantidade distribuída ao longo do tempo, devido às alterações das propriedades físicas dos fertilizantes. Além disso, podem ocorrer variações de até 38% na taxa de aplicação, em decorrência das especificidades de cada dosador, do grau de inclinação, ou devido às diferenças na formulação do fertilizante utilizado (REYNALDO; GAMERO, 2015).

Apesar disso, mesmo com os avanços em tecnologias na aplicação de fertilizantes, diversos autores afirmam que a distribuição desses nutrientes ainda é errônea (BONOTTO, 2012; FERREIRA et al. 2010; FRANCK, 2014; GARCIA, 2007). Os autores, na realização de ensaios em laboratório que avaliem dosadores helicoidais, encontraram dificuldades ao avaliar o desempenho da distribuição longitudinal desses mecanismos, ao aferirem a quantidade mássica de fertilizante que está sendo liberado pelo dosador durante um intervalo de tempo.

Logo, este trabalho pressupõe que a inserção de sensores capazes de realizarem a medição instantânea do fluxo de massa de fertilizantes, após a liberação pelo dosador, poderá

auxiliar na avaliação – em laboratório – do desempenho dos mecanismos dosadores, bem como na influência do nível do reservatório, das inclinações, da granulometria e da umidade dos fertilizantes, podendo proporcionar um valor real da massa de fertilizantes que está sendo distribuída.

Além disso, o monitoramento das taxas de fertilizantes em cada linha de semeadura, por meio da leitura dos dados instantâneos através de sensores, permitirá ao operador monitorar a distribuição, facilitando as regulagens dos dosadores, bem como servir como base de correção para os controladores que equipam sistemas automatizados. Com isso, a verificação e os ajustes permitem a eficácia da distribuição de fertilizantes utilizados na área, favorecendo o aumento da lucratividade na propriedade.

2 OBJETIVOS

a) Objetivo geral

Desenvolver um sistema para quantificar o fluxo de massa de fertilizantes sólidos através da validação de um sensor não intrusivo, baseado na teoria microondas de efeito Doppler, em função da granulometria do fertilizante e rotações do eixo acionamento.

b) Objetivos específicos

Desenvolver uma equação matemática que relacione os valores proporcionais à frequência do inversor com as rotações de acionamento do dosador.

Desenvolver um fator de correção para estimação do fluxo de massa de fertilizantes com o sensor microondas.

3 HIPÓTESES

- I. Se não for encontrada uma diferença significativa entre o método manual e o uso do sensor, então será possível quantificar a dosagem de fertilizantes que se distribui pelo mecanismo dosador, indiferentemente da escolha do método.
- II. Se a granulometria dos fertilizantes interferir no fluxo de massa desse insumo, então, quanto menor for esta, mais elevada será a taxa de aplicação e maior será a diferença de mensuração pelo sensor frente ao método manual.
- III. Se a rotação de acionamento dos dosadores interferir no fluxo de massa desse insumo, então o uso de diferentes métodos de quantificação irá identificar essas modificações com maior diferença de mensuração pelo sensor frente ao método manual em maiores velocidades de acionamento.

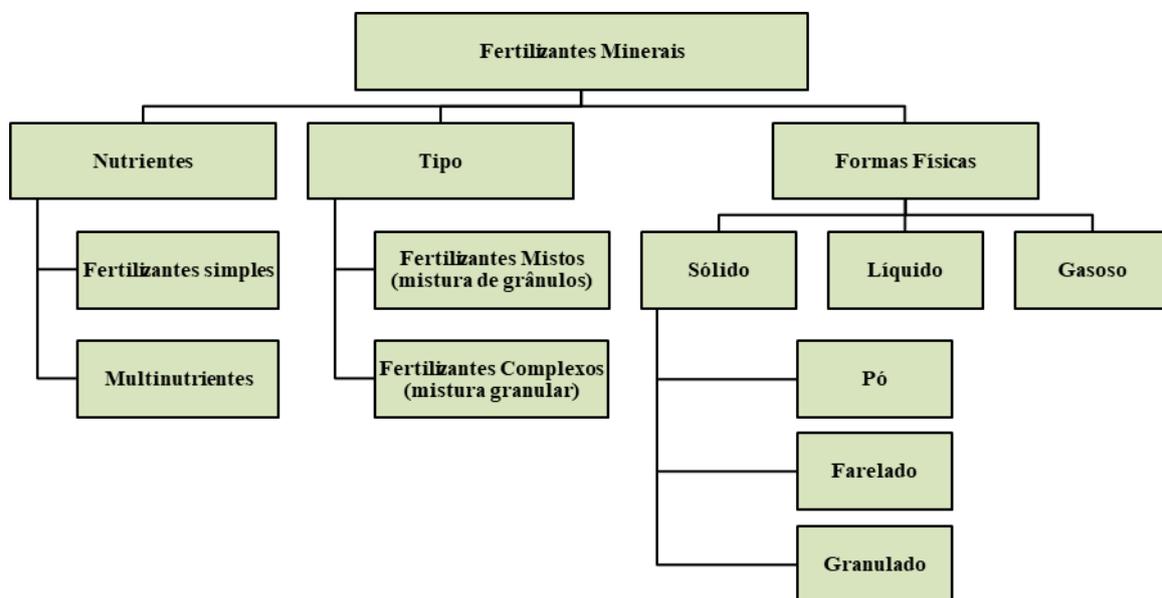
4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 FERTILIZANTES MINERAIS

Os fertilizantes são definidos como substâncias sólidas, líquidas ou gasosas, contendo um ou mais nutrientes vegetais. Eles são aplicados no solo, diretamente na planta (folhas) ou são adicionados às soluções aquosas, a fim de manter a fertilidade do solo, melhorar o desenvolvimento e o rendimento ou qualidade da cultura (IFA, 2019).

De acordo com Alcarde et al. (1998), os fertilizantes são, na maioria das vezes, encontrados com base na concentração de três macronutrientes em sua forma elementar: nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Porém, em grande parte das formulações, são associadas às pequenas concentrações de micronutrientes, visando suprir as deficiências em uma mesma aplicação. A Figura 1 classifica os fertilizantes minerais quanto ao número de nutrientes presentes, ao tipo de combinação e às formas físicas.

Figura 1 – Classificação dos fertilizantes minerais.



Fonte: Adaptado de Alcarde et al. (1998).

Os fertilizantes sólidos são, atualmente, os mais utilizados no setor agrícola através de diversos métodos de aplicação, via solo. As diversas classificações quanto a sua natureza física são realizadas com a utilização de uma sequência de peneiras de diâmetros conhecidos e a

porcentagem de fertilizante retido em cada peneira é o que definirá a sua classificação granulométrica. Esse procedimento é regido pela Instrução Normativa N° 46, de 2016, do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), que pode ser visualizada na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações de natureza física e garantia granulométrica.

Natureza Física	Especificação de natureza física	Garantia Granulométrica	
		Peneira	Partículas Passantes
Sólido	Granulado e mistura de grânulos	4,8 mm (ABNT 4)	100%
		2 mm (ABNT 10)	40% máximo
		1 mm (ABNT 18)	5 % máximo
	Farelado	4,8 mm (ABNT 4)	95% mínimo
		2,8 mm (ABNT 7)	80% mínimo
		0,84 mm (ABNT 20)	25% máximo
	Microgranulado	2,8 mm (ABNT 7)	90% mínimo
		1 mm (ABNT 18)	10% máximo
		Pó	2,0 mm (ABNT 10)
	0,84 mm (ABNT 20)		70% mínimo
	0,3 mm (ABNT 50)		50% mínimo

Fonte: Adaptado de INSTRUÇÃO NORMATIVA N° 46, MAPA, 2016.

Além disso, os fertilizantes sólidos granulados podem ser subdivididos em três tipos:

Misturas de grânulos: são os fertilizantes mistos ou misturas fertilizantes obtidos pela mistura física de dois ou mais fertilizantes granulados;

Misturas granuladas: são os fertilizantes mistos ou misturas fertilizantes onde cada grânulo contém todos os nutrientes garantidos;

Misturas complexas: são os fertilizantes mistos ou misturas resultantes de reação química entre matérias, primas como NH_3 , H_3PO_4 e H_2SO_4 , onde cada grânulo também contém todos os nutrientes garantidos. (RODELLA e ALCARDE, 2000, p. 59).

A classificação física dos fertilizantes apresenta interferência sobre a fluidez, relacionada com a capacidade de escoamento do material e pode influenciar na eficiência da aplicação. Essa propriedade pode ser avaliada pelo parâmetro do ângulo de repouso; quanto menor ele for, melhor será a capacidade de escoamento do material. (RODELLA & ALCARDE, 2000)

Segundo Milan e Gadanha Junior (1996), o ângulo de repouso depende de particularidades do produto, tais como: densidade, forma das partículas, granulometria e umidade. Ainda, segundo os autores, quando materiais com esse parâmetro são menores do que

40°, apresentam boas características de escoamento e, quando estão acima de 50°, têm um baixo índice de fluidez, o que pode prejudicar a sua aplicação.

A finalidade dos fertilizantes compreende suprir a demanda das culturas e compensar os nutrientes consumidos pelos produtos colhidos ou perdidos por escoamentos inevitáveis ao meio ambiente, a fim de manter as condições de solo boas para o cultivo. Diversos estudos realizados em vários países mostraram que pelo menos 30 a 50% da produção das culturas é atribuível à utilização de nutrientes oriundos de fertilizantes comerciais. No Brasil e Peru, a contribuição média dos fertilizantes NPK associados à calagem atingiu, praticamente, valores de 100% no caso da soja e superiores a 95% para arroz e milho, como afirmaram Stewart et al. (2005). Hoje, exige-se cada vez mais que a quantidade seja acompanhada de qualidade.

Para Serrano et al. (2014), a aplicação de fertilizantes minerais no solo é um processo fundamental para que sejam mantidos os níveis de nutrientes adequados para o desenvolvimento das culturas. Entretanto, frequentemente, são realizados sem critérios, ocasionando maiores custos econômicos, energéticos, bem como problemas ambientais. Os mesmos autores apontam que o operador também tem uma parcela de responsabilidade sobre a uniformidade da distribuição do fertilizante e deve aproveitar as tecnologias à sua disposição, a fim de investir na divulgação das tecnologias e na formação dos operadores para obter uma melhor gestão dos recursos disponíveis.

Além disso, a fertilização excessiva e desequilibrada, especialmente sobre a aplicação de fertilizantes N e P, está associada aos impactos negativos sobre o meio ambiente, como emissões de gases de efeito estufa, degradação da terra e poluição atmosférica (FENG et al., 2013; LIU et al., 2015).

Logo, reduzir a quantidade de nutrientes requer uma compreensão das taxas em que os agricultores aplicam fertilizantes. Pesquisas anteriores indicam que os agricultores usam inúmeras fontes de informação para tomar as decisões de aplicação de fertilizantes, incluindo os comerciantes de fertilizantes, os agrônomos das empresas de sementes, bem como a experiência pessoal. Contudo, as informações e as recomendações provenientes de cientistas universitários e agentes de extensão do governo são desconhecidas pela grande maioria dos agricultores (OSMOND et al., 2015; STUART et al., 2014).

Segundo dados da FAO (2018), cada tonelada de fertilizante mineral aplicada em um hectare, de acordo com princípios que permitam sua máxima eficiência, equivale à produção de quatro novos hectares sem adubação. É, portanto, indissociável a estreita inter-relação entre fertilidade do solo e a produtividade agrícola.

No cenário brasileiro, é possível observar o incremento na utilização de fertilizantes nos últimos anos, visto o aumento na produção de cereais, leguminosas e oleaginosas. Porém, o país apresenta uma forte dependência das importações de matérias-primas para o suprimento da demanda porque a produção nacional não é suficiente e a tendência é que ocorra a redução ao longo do tempo, devido ao esgotamento das fontes (ANDA, 2000). Os principais indicadores do mercado brasileiro de fertilizantes podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Principais indicadores de fertilizantes no Brasil.

	2015	2016	2017	2018	2017 / 2018
Entregues ao Mercado (t)	30.201.998	34.083.415	34.438.840	35.506.301	3,1%
Produção Nacional (t)	9.115.260	9.040.747	8.184.611	8.169.543	-0,2%
Importação (t)	21.087.299	24.481.089	26.324.628	27.496.625	4,5%
Exportações (t)	526.173	549.444	331.624	336.071	1,3%

Fonte: Adaptado de ANDA, 2018.

Um dos fatores para a obtenção de um desenvolvimento adequado das plantas compreende a aplicação da dose correta de fertilizantes. Se essa dose for menor do que a recomendada, pode resultar em um desequilíbrio nutricional e na ineficiência fisiológica da planta, gerando um menor rendimento da cultura. Por outro lado, o excesso desses nutrientes é danoso à saúde das plantas e pode comprometer a produção da mesma forma que a falta de nutrientes, bem como trazer problemas ambientais e gastos desnecessários (SANTOS, 2015).

Desta forma, a utilização dos fertilizantes impactam diretamente nos custos de produção, conforme visualizado na Tabela 3. Portanto, são necessários estudos e tecnologias que aumentem a eficiência de aplicação e absorção desses nutrientes às plantas.

Tabela 3 – Relação de trocas de fertilizantes e produtos agropecuários.

	Unidade	2015	2016	2017	2018
Algodão c/ Caroço	15 kg	62,3	52,5	47,4	45,2
Arroz em Casca	saca 60 kg	30,0	24,5	25,6	30,1
Cana-de-açúcar	t	27,9	27,5	26,7	28,1
Café Arábica	saca 60 kg	2,9	2,7	2,5	2,9
Milho	saca 60 kg	70,6	43,6	66,2	56,3
Soja	saca 60 kg	22,8	20,0	22,2	20,6

Nota: Quantidade de produto agrícola necessária para adquirir 1 tonelada de fertilizante. Estimativa praticada em 10 de maio de 2019. Fonte: Adaptado de CONAB apud ANDA, 2019.

Para Grisso et al. (2011), esse aumento na eficiência da aplicação de fertilizantes está diretamente ligado ao avanço de tecnologias capazes de aplicar a quantidade necessária em cada local da lavoura, reduzindo erros ocasionados por diferentes fatores.

A distribuição de fertilizantes sólidos é baseada no sistema agrônômico adotado e pelas características físicas do produto a ser aplicado. Em termos de mecanização agrícola há, atualmente, a subdivisão quanto ao tipo de aplicação do insumo, sendo eles: distribuidores de aplicação localizada e distribuidores de aplicação a lanço. Dentro dessa classificação, são encontrados os mais diversos tipos de equipamentos, cada qual com a sua peculiaridade.

Porém, neste trabalho, serão descritas as definições que embasam a investigação de distribuidores de aplicação localizada, através do uso de sistemas de dosagem de semeadoras-adubadoras em linha.

4.2 SEMEADORAS-ADUBADORAS

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994), as semeadoras são classificadas, segundo a forma de distribuição de sementes, em semeadoras de precisão e semeadoras de fluxo contínuo. As semeadoras de precisão são máquinas que distribuem as sementes no sulco de semeadura – uma a uma ou agrupadas –, em linhas e intervalos regulares, de acordo com a densidade de semeadura pré-estabelecida. No entanto, se a máquina aplica uma razão de fertilizantes sólidos, concomitantemente no sulco de semeadura, ela deve ser denominada de semeadora-adubadora (BALASTREIRE, 2004).

Essas máquinas sofreram as maiores alterações ao longo do tempo, tendo em vista a sua grande importância no sistema de produção agrícola, conforme destacam Francetto et al. (2015). A grande diversidade de tipos de solo, de acordo com Coelho (1996), exigiu dos fabricantes um grande trabalho de adequação de projetos, principalmente no que se refere aos elementos sulcadores e estruturas das semeadoras-adubadoras desenvolvidas para operar no sistema plantio direto (SPD).

As semeadoras-adubadoras para o SPD, conforme Gadanha Júnior et al. (1991), se constituem de maneira semelhante às convencionais, tanto as de precisão como as de fluxo contínuo, ainda que possuam algumas modificações que permitem seu uso em solos não preparados e com cobertura vegetal. Também destacam que uma modificação consiste na introdução de um sistema de corte, colocado à frente da máquina, que realiza o corte da cobertura vegetal, abrindo caminho para o sulcador ou funcionando como o próprio.

Os componentes de uma semeadora-adubadora podem ser classificados, de acordo com Murray et al. (2006), em: componentes de ataque inicial ao solo; componentes de abertura do sulco e controle de profundidade; componentes de dosagem de sementes e fertilizantes e componentes de condução das sementes e fertilizantes. A Figura 2 ilustra os principais componentes das semeadoras-adubadoras, apesar de serem encontradas nas mais diversas configurações, formatos e características dos seus componentes, de acordo com sua peculiaridade ou preferência do fabricante.

Figura 2 – Classificação dos componentes principais das semeadoras-adubadoras.



Fonte: Adaptado de John Deere^{®1}.

De acordo com Siqueira e Casão Jr. (2004), independentemente do tipo, número de linhas ou requerimento de potência, uma semeadora-adubadora de semeadura direta deverá: cortar resíduos culturais; abrir sulco com pequena remoção de solo e resíduo; dosar corretamente sementes e fertilizantes; depositar fertilizantes e sementes em profundidades adequadas; cobrir sementes com solo e resíduos e compactar o solo lateralmente à semente.

As semeadoras de precisão que estão disponíveis no mercado possuem mecanismos dosadores, tanto de fertilizantes quanto de sementes, e atendem parcialmente os requisitos preestabelecidos, em função de diversos fatores. Para Balastreire (2004), a precisão das semeadoras em realizar sua operação se dá, ainda: pelo tipo de mecanismo dosador, pela forma de acionamento, pelo sulcador e pelo mecanismo de cobertura da semente.

¹ A citação de marcas e modelos não implica em aprovação e/ou recomendação dos mesmos por parte do autor.

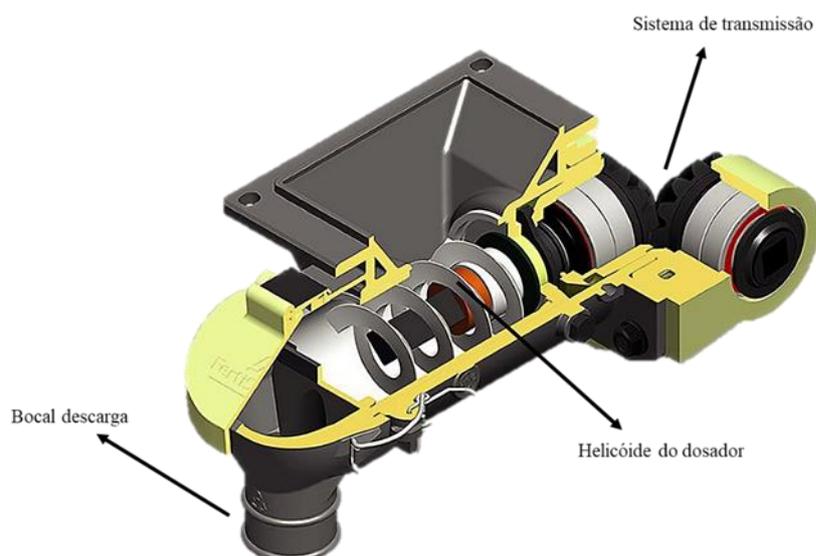
4.3 MECANISMOS DOSADORES DE FERTILIZANTES

Os dosadores de fertilizantes têm como função transferir fertilizantes do reservatório para o componente de deposição, segundo uma dose preestabelecida (ABNT, 1994). Eles podem ser classificados quanto ao tipo, como: eixo helicoidal, rotores dentados, discos horizontais giratórios, rotor vertical impulsor, correias ou correntes e cilindros canelados (BALASTREIRE, 2004; BONOTTO, 2012; GARCIA, 2007).

Mesmo com a diversidade de dosadores disponíveis no mercado, os do tipo eixo helicoidal estão presentes na maior parte das semeadoras-adubadoras no Brasil. De acordo com Francetto et al. (2012), ao realizarem um levantamento dos mecanismos dosadores de fertilizantes, em um total de 18 marcas, englobando 558 modelos, obtiveram um resultado de que 94,44 % dos modelos estavam equipados com dosadores helicoidais, seguido do disco horizontal giratório 2,86 %, cilindro acanalado 2,15% e rotor dentado 0,53%.

O dosador helicoidal, conforme a Figura 3, é o tipo de dosador mais utilizado pelos fabricantes de semeadoras-adubadoras. É composto por um eixo com um helicóide, colocado sob o depósito de fertilizante.

Figura 3 – Exemplo de dosador helicoidal de fertilizante



Fonte: Adaptado de Fertisystem®, 2020.

A quantidade de fertilizante depositado no solo varia conforme é modificada a velocidade angular do eixo de acionamento do dosador, ou ainda pela substituição de helicóides

de diferentes passos. Ainda, pode ser realizada uma pré-regulagem do sistema de transmissão, por meio de engrenagens ou sistemas de corrente (GARCIA, 2007). Atualmente, o acionamento pode ser feito por motor elétrico individual para dosador, permitindo um controle mais preciso de rotação e a possibilidade de realizar aplicação a taxa variável linha a linha.

O termo passo do helicóide refere-se à distância entre o centro de cada crista do mesmo. Quanto menor for essa distância, menor será a taxa a ser aplicada pelo dosador. Além disso, a utilização de helicóides com os menores passos reduzem as oscilações na dosagem de fertilizante quando a semeadora é submetida a inclinações longitudinais (SIQUEIRA, 2008). Contudo, os dosadores helicóidais têm como característica a liberação do fertilizante em pulsos, podendo ocasionar desuniformidade ao longo da linha.

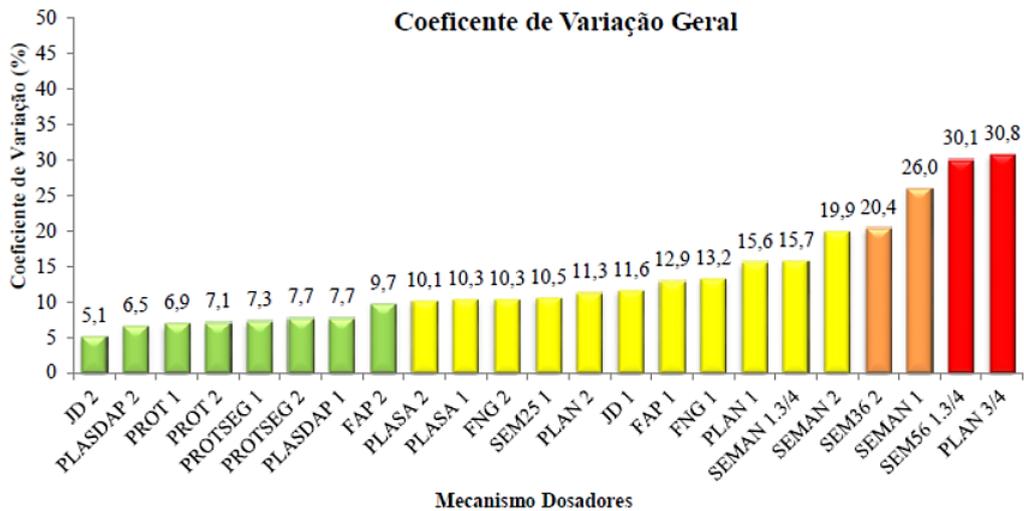
Alguns fatores podem influenciar diretamente na precisão dos dosadores de fertilizantes, tais como: disposição construtiva do dosador, inclinação do conjunto, nível do reservatório, densidade, granulometria, ângulo de repouso e teor de água do fertilizante a ser aplicado, tipo de helicóide (para dosadores com dosagem por roscas transportadoras helicóidais), velocidade de deslocamento e rotação de acionamento. As correlações dos fatores de influência podem fazer com que a amplitude de distribuição assumam valores elevados, prejudicando a qualidade de deposição.

Ferreira et al. (2010), ao avaliarem quatro combinações de dosadores e passo de helicóide, cinco inclinações longitudinais do mecanismo dosador e duas rotações de acionamento, concluíram que nas maiores inclinações ocorreu alteração na quantidade média de fertilizante distribuído, independentemente do dosador. Aqueles do tipo transbordo transversal apresentaram os melhores resultados, com coeficiente de variação em torno de 7%, e aqueles por gravidade, 13%.

Bonotto et al. (2013), descrevem que os melhores resultados obtidos em ensaios de laboratório foram encontrados quando utilizados os dosadores do tipo helicóidais. Apesar disso, o desempenho de todos os dosadores foi considerado insatisfatório quanto à distribuição longitudinal, independentemente da dose ou tipo de fertilizante aplicado.

Reynaldo (2013), avaliando o desempenho de mecanismos dosadores do tipo rosca sem fim (helicóidais) disponíveis no mercado, em diferentes passos e inclinações longitudinais e transversais de trabalho, concluiu que todos os mecanismos dosadores apresentaram erros na dosagem de fertilizantes, maiores nas inclinações longitudinais e menores nas transversais. A Figura 4 ilustra o coeficiente de variação geral para todos os dosadores.

Figura 4 – Coeficiente de variação obtido para os mecanismos dosadores de fertilizantes.



Fonte: Reynaldo (2013)

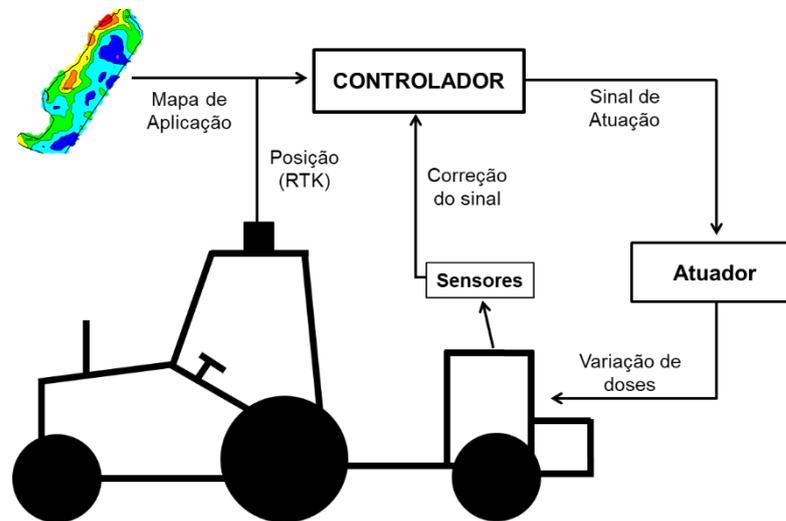
Reynaldo (2013) ainda destaca que uma solução para a redução dos erros de dosagens consiste na realização de semeadura em nível, pois os dosadores serão menos expostos aos níveis de inclinações causadores de erro.

4.4 APLICAÇÕES À TAXA VARIÁVEL

A utilização da agricultura de precisão busca considerar os aspectos de variabilidade espacial dos fatores de produção, otimizando os recursos e alavancando a produtividade. Com isso, as tecnologias de taxa variável visam aplicar as quantidades de insumos requeridos em cada ponto.

Segundo Grisso et al. (2011), existem várias tecnologias disponíveis para aplicação à taxa variável de fertilizantes, produtos fitossanitários e distribuição de sementes que podem ser usadas com ou sem um sistema de GPS. As duas tecnologias básicas são: as baseadas em mapas, nas quais a taxa de aplicação são de acordo com um mapa georreferenciado, que em conjunto com um receptor GPS alteram a dose desejada conforme o deslocamento da adubadora e as baseadas em sensores, que medem as propriedades do solo ou as características da cultura e com base no fluxo contínuo de informação recebido, um sistema de controle calcula as necessidades em tempo real por algoritmos abastecidos pelos dados dos sensores (YUAN et al., 2010). A Figura 5 ilustra um sistema simplificado dos componentes para aplicação a taxa variável.

Figura 5 – Sistema de taxa variável em semeadoras-adubadoras.



Fonte: Autor.

REYES et al. (2015) implementaram e testaram um sistema automático para controlar a taxa variável de aplicação de fertilizantes em uma cultura experimental de trigo de primavera. Durante a operação, um microcontrolador recebia os dados da taxa real, correspondentes à quantidade de aplicação e comparava com a taxa em tempo real, mostrada pelo mapa de prescrição previamente carregado no computador. Através do ajuste do fluxo de fluido ao motor hidráulico, o sistema corrigia a posição da válvula hidráulica e, portanto, a taxa de fertilização. Esses autores obtiveram um erro geral de 5,46% na aplicação de fertilizantes, utilizando um dosador de rotor acanalado pelo sistema de controle de taxa variável.

4.5 SENSORES PARA MEDIR FLUXO DE MASSA DE MATERIAL GRANULAR

Os métodos de medição existentes podem ser classificados em duas categorias: os métodos não intrusivos e os métodos intrusivos. Estes últimos podem influenciar no comportamento do fluxo de queda dos sólidos, causando efeitos inesperados por interferir na estrutura do fluxo, reduzindo a eficiência de deposição. Já os não intrusivos podem realizar a medição sem interferir no fluxo dos materiais.

Além disso, são diversas as técnicas de mensuração de vazão mássica de sólidos, tais como: métodos elétricos, ressonância, atenuação e dispersão, tomografia de fluxo, imagem digital, Doppler, correlação cruzada e filtragem espacial (PANG et al., 2018; ZHENG e LIU, 2011). Esses métodos objetivam a medição da velocidade das partículas e concentração dos

sólidos. Segundo Yan (1996), para mensurar partículas granuladas são frequentemente utilizados os métodos indiretos, como a acústica, a óptica e a capacitância.

Sensores ópticos baseados na interrupção de luz, compostos por 32 elementos emissores e receptores (fotodiodos), foram capazes de medir a vazão mássica sem interferir no fluxo de fertilizantes, mas necessitaram de várias calibrações ao longo dos ensaios, limitando o algoritmo de análise de dados (SWISHER et al., 2002). Já Ribeiro (2017), utilizou um sensor óptico baseado em dois modelos distintos para medir a vazão de fertilizantes em dosador helicoidal. O autor concluiu que o primeiro modelo não foi capaz de realizar a medição, já o segundo, sim, com uma correlação linear (R^2 de 0,98) entre a vazão e a leitura de tensão do sensor.

A procura pela estimativa de fluxo de massa instantâneo de sementes miúdas ou de fertilizantes na qual está sendo realmente depositado no solo está sendo alvo de pesquisas. Al-Mallahi e Kataoka (2013) desenvolveram uma nova metodologia utilizada em laboratório para estimar a massa de sementes de grãos de centeio que fluem em forma de aglomerados. Nessa metodologia, foi utilizado um sensor digital de fibra para detectar o comportamento dos aglomerados e uma modelagem de regressão linear múltipla para estimar a massa dos parâmetros detectados pelo sensor, que eram o comprimento e a densidade dos aglomerados. Os mesmos autores concluíram que a metodologia foi bem sucedida na estimativa da massa de fluxo contínuo de aglomerados de sementes, obtendo um erro geral na estimativa das taxas de fluxo de 5,3%. Além disso, os autores mostraram evidências de que o sensor pode ser usado para cobrir uma gama mais ampla de taxas de fluxo de diferentes materiais granulares.

Mais tarde, esses mesmos autores desenvolveram um novo sistema para medir o fluxo de massa de sementes em adubadoras na operação a campo (AL-MALLAHI e KATAOKA, 2016). Um sensor foi instalado na saída do dosador de sementes e utilizaram o modelo de estimativa de massa que desenvolveram (AL-MALLAHI e KATAOKA, 2013). Entretanto, os resultados obtidos foram diferentes daqueles que foram aferidos em laboratório, em função da condição operacional da máquina e do meio ambiente.

Por outro lado, Tola et al. (2008) calcularam o fluxo de massa de fertilizantes através da fixação de um encoder na parte superior do cilindro experimental onectado à haste do encoder uma placa de aço, que foi colocada no topo da massa de fertilizante dentro do cilindro experimental. Conforme a saída do fertilizante, o encoder foi utilizado para detectar a profundidade do fertilizante dentro do cilindro experimental, convertendo-o em taxa de fluxo de fertilizante. De acordo com a equação de calibração, suas conclusões afirmam que o sistema foi eficaz com erros de $\pm 5\%$.

Com o objetivo de avaliar a vazão de adubo de um dosador helicoidal, Bica e Souza (2010) desenvolveram e testaram um sensor. Porém, tiveram dificuldade de medição da vazão por sensores ultrassônicos e óticos, devido à dispersão dos grânulos no tubo de distribuição. Por isso, montaram um sensor de deformação elástica que foi inserido em um tubo de 50 mm de diâmetro, com um funil para concentrar a passagem do fertilizante. A deformação ocasionada pelo adubo foi medida por um extensômetro, convertida em massa por tempo resultando em vazão mássica.

Estudos relacionando a vazão mássica real de fertilizantes e as taxas de aplicações variáveis estão sendo realizados em dosadores do tipo helicoidal que, apesar de serem os mais utilizados atualmente em adubadoras de precisão nacionais, ainda apresentam variação na taxa de aplicação de fertilizantes (REYNALDO e GAMERO, 2015). Em consequência desse erro de dosagem, foram realizados estudos sobre o comportamento dinâmico de dosadores helicoidais de fertilizantes. Com isso, modelos matemáticos foram propostos para desenvolver estratégias de ação e reduzir significativamente a imprecisão da dosagem de fertilizantes (FRANCK et al., 2015; GARCIA et al., 2012).

Além disso, sistemas de controle convencionais para a integração de sistemas mecânicos com sensores foram utilizados em máquinas agrícolas (KIM et al., 2008; TOLA et al., 2008). No entanto, como essas máquinas geralmente realizam processos não lineares (GARCIA et al., 2012), os requisitos de projeto não podem ser satisfeitos quando métodos de controle convencionais, baseados em modelos de processo linear, são usados. Dessa forma, Garcia et al. (2014) desenvolveram um controlador em lógica fuzzy para regular e uniformizar a vazão mássica de fertilizantes, aplicada por um dosador do tipo helicoidal, sendo capaz de reduzir os erros de dosagem.

No entanto, cada técnica apresenta suas próprias limitações sob diferentes requisitos de aplicação, pois as variáveis físicas e ambientais intrínsecas às semeadoras-adubadoras afetam fortemente na precisão destas técnicas. Além disso, a instalação complexa e a operação instável são desvantagens comuns entre os métodos.

4.6 SENSORES MICROONDAS

As microondas são uma pequena porção do espectro eletromagnético com comprimentos de onda que variam de 1 mm a 1 m em espaço livre e frequência entre 300 GHz e 300 MHz, respectivamente.

Já o radar é um dispositivo que permite medir distâncias, altitudes, direções e velocidade de objetos estáticos ou em movimento através das ondas eletromagnéticas. Ele funciona transmitindo sinais de rádio que se dispersam até se chocar com o objeto, recebendo logo em seguida uma porção dos sinais refletidos na direção da antena presente. Os tipos de radares mais práticos para utilização são os monoestáticos, pois transmitem e recebem sinais com uma mesma antena.

De acordo com Hamid e Stuchly (1975), os métodos de medição microondas que utilizam o princípio de efeito de radar Doppler, são utilizados por muitos anos na navegação e controle de tráfego. Essa técnica pode ser usada para monitorar líquidos e sólidos particulados através da medição da velocidade que não obstrui o fluxo, evitando a perturbação do processo, podendo ser aplicado em ambientes hostis e em situações inacessíveis, além de apresentar baixo custo, ser simples e de alta confiabilidade. Segundo os autores, os medidores de microondas utilizam o princípio de radar doppler de ondas contínuas. O transmissor envia sinais eletromagnéticos contínuos e o receptor também executa continuamente os sinais de retorno que transmitem informações sobre a velocidade de aproximação do alvo, devido ao efeito Doppler.

De acordo com Zou et al. (2020), a teoria de efeito doppler se caracteriza quando a energia de microondas é refletida a partir de um objeto em movimento, resultando uma mudança de frequência do sinal, ao fornecer informações sobre a velocidade do objeto em movimento. A frequência doppler, que é a diferença entre a frequência dos sinais transmitidos e retornados, é diretamente proporcional à velocidade alvo em direção ou fora do radar. A velocidade do alvo pode ser facilmente medida pela contagem do número de ciclos do sinal Doppler em um segundo (HAMID e STUCHLY, 1975). Matematicamente, a velocidade pode ser expressa como:

$$v = \left(\frac{c}{2f \cos \theta} \right) * f_d \quad (1)$$

Onde:

v – velocidade do alvo (m s^{-1});

c – velocidade da luz (m s^{-1});

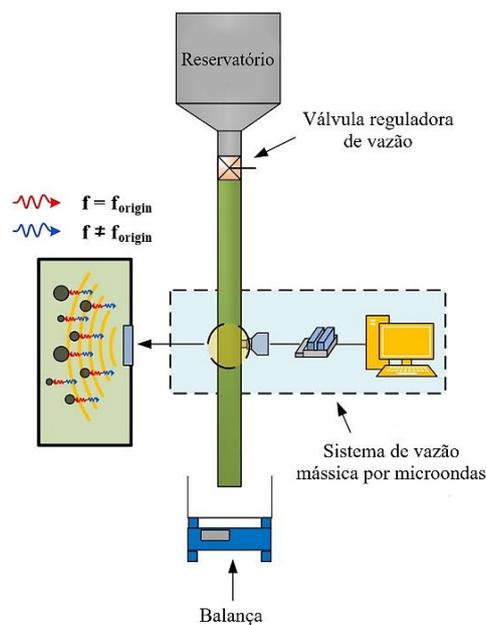
f – frequência do transmissor de radar doppler (Hz);

θ – ângulo de visão da antena;

f_d – frequência doppler (Hz).

Segundo Pang et al. (2018), as técnicas de microondas têm sido utilizadas para medir parâmetros do fluxo de sólidos, mas ainda por ser um método não intrusivo, acaba não interferindo no fluxo dos sólidos. Em comparação aos demais métodos, o sensor microondas é relativamente pequeno em tamanho, sendo mais fácil de instalar, ajustar e apresenta um melhor desempenho em condições adversas (poeira, luz, vibração). Os mesmos autores desenvolveram um sistema baseado na teoria microondas e efeito doppler, Figura 6, para medir a taxa de fluxo de massa sólida de partículas de diferentes tamanhos, sendo elas: areia de quartzo, carbonato de cálcio e óxido de alumínio. Esses autores concluíram que a correlação do sinal de saída com a taxa de fluxo de massa sólida para areia pode ser calibrada com uma curva exponencial com ampla faixa de medição e o sistema pode ser aplicado a outras partículas sólidas.

Figura 6 – Esquema do sistema experimental.



Fonte: Adaptado de Pang et al. (2018).

No entanto, embora muitos pesquisadores concluam que o método de microondas tem um grande potencial para medir a taxa de fluxo de massa sólida, o efeito das propriedades das partículas (por exemplo, tipo de material e tamanho de partícula) nas medições não é bem explicado, o que limita bastante a aplicação do método de microondas. Além disso, o fluxo de sólidos instáveis e não homogêneos poderá afetar a medição.

5 MATERIAL E MÉTODOS

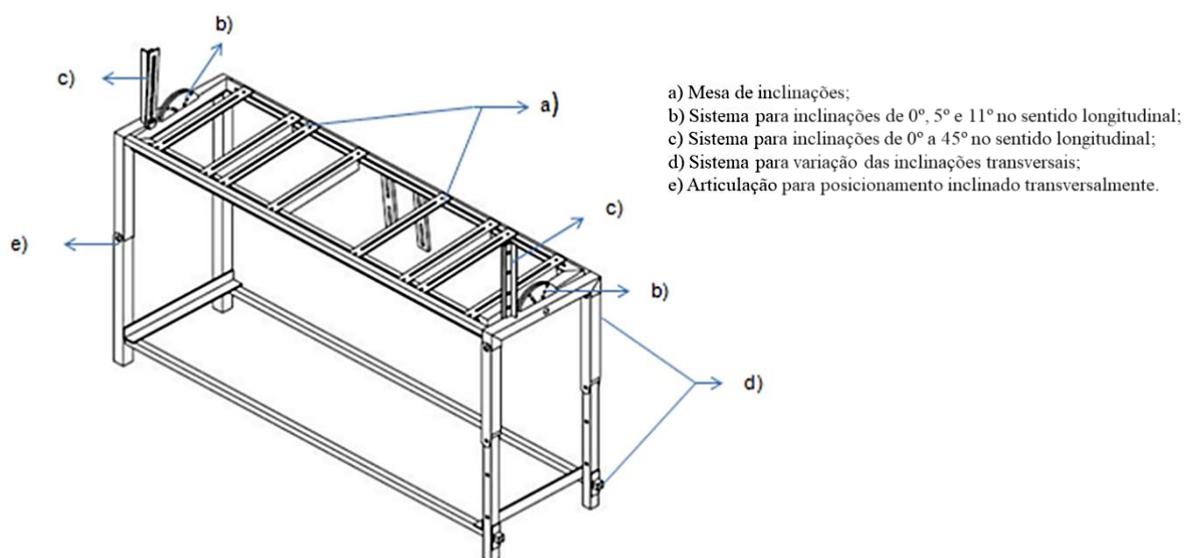
5.1 LOCAL

O estudo foi conduzido no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas (LASERAG), vinculado à Universidade Federal de Santa Maria, localizado nas coordenadas 29°43'19,3" latitude Sul e 53°43'0,4" longitude Oeste, altitude de 104,7 m. Posicionado geograficamente no município de Santa Maria, depressão central do estado do Rio Grande do Sul.

5.2 BANCADA DE TESTES E ENSAIOS

Para realização do trabalho foi utilizada uma bancada para testes e ensaios com dosadores de fertilizantes – BANFERTI II. A mesma foi desenvolvida por Moreira et al. (2011) de forma a possibilitar ensaios previstos pela norma ISO 5690/2 (1984). Esta possibilita simular inclinações transversais e longitudinais de até 21° a -21°, conforme Figura 7, buscando reproduzir condições nas quais os dosadores serão expostos durante a sua atuação nas semeadoras-adubadoras a campo.

Figura 7 – Bancada para ensaios de mecanismos dosadores de fertilizantes.



O acionamento do dosador, fornecimento de energia mecânica, foi realizado por um motor elétrico de 0,735 kW, acoplado a um redutor de parafuso sem fim e coroa, com relação de transmissão de 10:1. Para a alteração e o controle das velocidades angulares de acionamento, a bancada contou com um inversor de frequência Weg® CFW 08, com entrada monofásica de 200 a 240 Volts (V). Através da alteração da rotação de acionamento, será possível atingir as diferentes taxas de aplicação, g min^{-1} .

A taxa de aplicação é a expressão da distribuição de fertilizantes através de uma unidade de massa por unidade de tempo, g min^{-1} , por exemplo. Já a dose de aplicação é a expressão de uma unidade de massa por unidade de área, kg ha^{-1} . Com isso, para a mesma taxa de aplicação é possível obter diferentes doses, em função da variação da velocidade e do espaçamento entre linhas da semeadora-adubadora.

5.3 MECANISMO DOSADOR DE FERTILIZANTE

O mecanismo dosador utilizado foi do tipo helicoidal (sem-fim), com descarga de fertilizante por transbordo transversal. Essa opção ocorreu devido à representatividade que possui no mercado de dosadores, conforme destacado por Francetto et al. (2012). Esse tipo possui um eixo com um helicoide (sem-fim), colocado sob o depósito de fertilizante. O transbordo ocorre, pois possui um sistema de uniformidade de fluxo, constituído de uma barreira localizada no corpo do dosador. Logo após o fim do helicoide, esse dispositivo faz com que o fertilizante chegue ao tubo condutor somente após transbordar a barreira.

O dosador é da marca Fertisystem, modelo Auto-Lub AP NG, desenvolvido pela empresa AGRIMAQ®. Para o experimento, foi utilizado o helicoide com passo de 25,4 mm, tendo em vista que proporciona as taxas de aplicações de referência.

5.4 FERTILIZANTES

Os fertilizantes utilizados no experimento são do tipo minerais, multinutrientes, ou seja, são formulados a partir da mistura de três macronutrientes, sendo eles: Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K). Essa mistura pode ocorrer de diversas formas, o que irá diferenciá-los quanto às suas classificações físicas. Esse tipo de insumo é o mais utilizado em adubadoras em linha, pois proporciona versatilidade e eficiência ao possuir diversos nutrientes em seu conteúdo. Além disso, em grande parte das formulações são associadas pequenas concentrações de micronutrientes visando suprir as deficiências em uma mesma aplicação.

Portanto, foi realizada a seleção de fertilizantes usuais no mercado, diferenciados por suas características físicas e composição química. Na Tabela 4, são apresentados os três tipos de fertilizantes utilizados nos testes, seguido das classificações quanto as formas físicas sólidas através da instrução normativa nº 46, (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2016) e a formulação de nutrientes contida.

Tabela 4 – Tipos de fertilizantes minerais utilizados nos experimentos.

Fertilizante	Forma física sólida	Formulação (N-P-K)
Ft1	Mistura granular	05-20-20
Ft2	Mistura de grânulos	05-20-20
Ft3	Farelado	00-30-15

Fonte: Autor.

Contudo, é importante ressaltar que a utilização do fertilizante farelado neste estudo é devida à normatização dos ensaios e objetiva identificar a influência da granulometria sobre a taxa de aplicação e o desempenho do sensor. Já que o sensor é pouco utilizado na adubação em linha com semeadoras-adubadoras, em função de sua sensibilidade à umidade, ocorrendo agregação das partículas (empedramento) e dificultando a aplicação pelos dosadores.

Além disso, para fins de reprodutibilidade e repetibilidade dos ensaios, comparação com os demais fertilizantes e estudos de mensuração do fluxo de volume e massa dos mesmos, algumas propriedades físicas foram determinadas. Para a mensuração de todas as propriedades foram utilizadas 3 repetições.

5.4.1 Granulometria

A granulometria é um método de análise que classifica as partículas através do seu tamanho. Para a realização desta análise, foi coletada uma massa conhecida (amostra) para cada tipo de fertilizante, que foram passadas por uma sequência de peneiras de diâmetros conhecidos. Através da pesagem do material presente em cada peneira relacionado com a massa total, definiu-se a classificação granulométrica, conforme a Instrução normativa Nº 46, de 2016, do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), Tabela 5.

Tabela 5 – Análise granulométrica dos fertilizantes minerais utilizados nos experimentos.

Peneira (mm)*	Fertilizantes		
	Mistura Granular	Mistura de Grânulos	Farelado
	Porcentagem Retida na Peneira (%)		
4,00	21,69	4,05	0,00
2,00	72,92	76,54	0,27
1,19	3,01	11,27	1,25
1,00	0,68	1,73	3,11
0,84	0,41	0,91	2,47
0,50	0,72	2,60	25,08
Fundo	0,57	2,90	67,83
TOTAL	100	100	100

Nota: *: A escolha das peneiras se deu pela disponibilidade das mesmas na instituição. Fonte: Autor.

5.4.2 Ângulo de repouso

Para determinação do ângulo de repouso, foi utilizado um dispositivo (Figura 8), descrito por Altmann et al. (2010), dispoendo de uma estrutura para reservatório de fertilizante que escoam através de um funil (A), mecanismo de controle de descarga de fertilizante (B) e base plana onde será depositado o fertilizante após ser liberado de uma altura fixa (C). Foi utilizada uma quantidade mássica de 4 kg para cada tipo de fertilizante.

Após a descarga, a determinação do ângulo de repouso foi realizada através da análise das imagens fotográficas processadas através do *software* AutoCAD® (*Computer Aided Design*), 2018.

Figura 8 – Dispositivo para determinação do ângulo de repouso.



Fonte: Autor.

5.4.3 Teor de água

O percentual de água dos fertilizantes foi mensurado através da coleta de amostras de massa previamente conhecida e mantidas em estufa a 105° C por 24h. Após este tempo, a massa foi determinada e o teor de água calculado pela Equação 2.

$$U = \left(\frac{Mfu - Mfs}{Mfs} \right) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

U – Teor de água, %;

Mfu – Massa de fertilizantes úmido, g;

Mfs – Massa de fertilizantes seco, g.

5.4.4 Densidade Aparente

A densidade aparente é a razão entre a massa de fertilizante por unidade de volume, determinada por meio da Equação 3, com o auxílio de uma proveta volumétrica e uma balança de semianalítica, com escala centesimal.

$$Da = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Onde:

Da – Densidade aparente, g cm⁻³;

m – massa de fertilizantes, g;

v – volume, cm³.

5.4.5 Propriedades físicas dos fertilizantes

As propriedades físicas dos três tipos de fertilizantes são visualizadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Propriedades físicas dos fertilizantes

Propriedade Física	Fertilizantes		
	Mistura Granular 5-20-20	Mistura de Grânulos 5-20-20	Farelado 0-30-15
Densidade (g cm ⁻³)	0,97	1,02	1,11
Ângulo de Repouso (°)	31,01	30,47	32,15
Teor de água (%)	1,78	4,78	3,12

Fonte: Autor.

5.5 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Com o objetivo de eliminar o efeito do nível de reservatório sobre a dosagem de fertilizantes, para todas as coletas de dados o reservatório foi preenchido com 50% de sua capacidade, conforme ABNT (1994).

A determinação da taxa de aplicação, g min⁻¹, foi realizada através da mensuração da massa de fertilizantes coletada num intervalo de 30 segundos após estabilização do sistema (BONOTTO, 2012; CARDINAL, 2011; FERREIRA et al., 2010; FRANCK, 2014). Essa simulação representa a coleta da taxa de aplicação de fertilizantes de uma semeadora-adubadora que percorre uma distância de 50 metros, se deslocando a uma velocidade de 6 km h⁻¹, por exemplo.

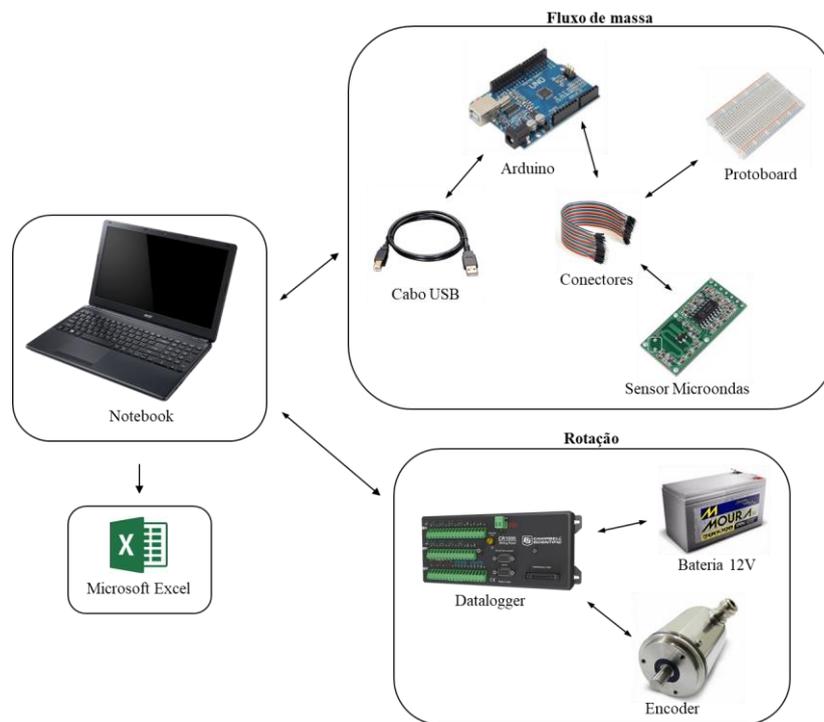
A estimativa do fluxo de massa dos fertilizantes pelo sensor microondas foi validada e calibrada através dos testes estáticos, realizados por meio de medição manual (método manual). A estimativa compreende a coleta do fertilizante após a liberação pelo dosador, em um recipiente, no tempo de 30 segundos, com isso através da aferição da massa obtida no recipiente, é verificado o fluxo de massa dado pelo dosador.

Para o controle do tempo nas coletas manuais de dados, foi utilizado um cronômetro digital LiveUp modelo LS3193. Para a mensuração da massa de fertilizantes coletada, foi utilizada uma balança digital, com precisão decimal Kitchen Scale modelo SF-400.

Já para as coletas automatizadas de dados (sensores), foi montada uma concepção com componentes eletrônicos, conforme a Figura 9, a fim de mensurar a rotação do mecanismo dosador e realizar a estimativa do fluxo de massa dos fertilizantes. As escolhas desses

componentes levaram em consideração alguns aspectos, tais como: baixo custo de aquisição, simplicidade na montagem de componentes e facilidade operacional.

Figura 9 – Fluxograma do sistema automatizado de coleta de dados.



Fonte: Autor.

5.5.1 Rotação de acionamento

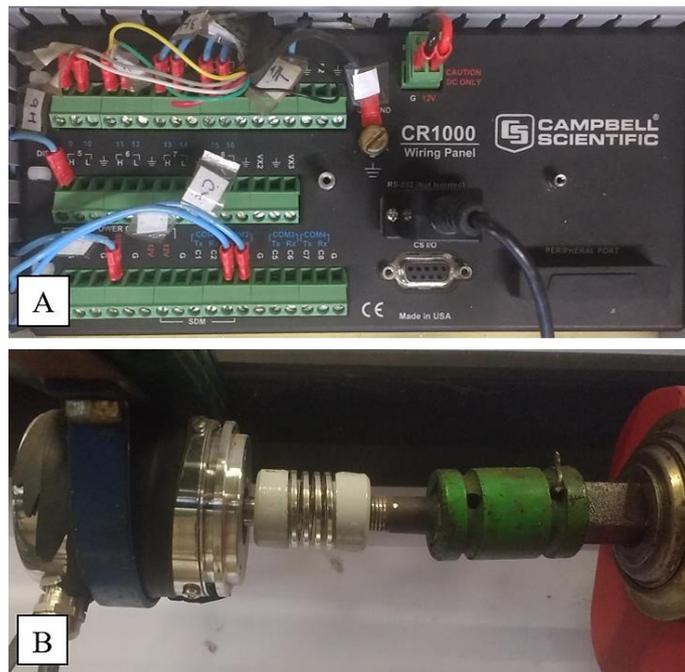
Para a verificação da rotação do mecanismo dosador, foi utilizado um sistema de aferição de dados. Para a sua aquisição, gerenciamento e armazenamento, foi utilizado um módulo de medição e controle (datalogger), marca Campbell Scientific[®], modelo CR1000, no qual foi conectado um sensor de rotação do tipo encoder incremental, marca Hohner[®], modelo Série 58 (Figura 10). A taxa de aquisição de dados utilizada com o sistema foi de 10 Hz. Para a alimentação de energia do módulo de medição e controle e sensor, foi utilizada uma bateria estacionária de 12 v.

As frequências de acionamento inseridas no inversor realizam o controle de rotação do motor, que irá transmitir a rotação para o mecanismo dosador, através das relações de

transmissão presentes. Portanto, o sensor foi instalado no eixo final, que movimenta o mecanismo, a fim de coletar com precisão a rotação do mesmo.

Os dados obtidos pelo encoder foram inseridos no programa computacional Microsoft Excel e, com isso, a conversão das frequências em valores de rotação gerou uma equação de regressão linear.

Figura 10 – Datalogger e encoder utilizado nas avaliações.



Nota: (A) Módulo de medição e controle – Datalogger, (B) Sensor de rotação - Encoder
Fonte: Autor.

Foram selecionadas e usadas dez rotações de acionamento do dosador, alteradas através do inversor de frequência. Cada uma corresponde a uma determinada taxa de aplicação para cada tipo de fertilizante utilizado. As escolhas das taxas pré-estabelecidas levaram em consideração as recomendações mais usuais das doses de aplicações de fertilizantes.

A configuração do inversor de frequência que altera a rotação do motor elétrico foi mantida para todos os tipos de fertilizantes. A Tabela 7 apresenta as rotações de acionamento, bem como os valores proporcionais às frequências do inversor.

Tabela 7 – Valores proporcionais as frequências e rotações de acionamento dos dosadores.

Valor CFW 08*	100,2	200,1	300	400,2	500,1	600	700,2	800,1	900	1001
Rotação do Dosador (rpm)	11,09	22,25	32,14	41,98	51,76	61,61	71,53	81,38	91,31	101,33

*: O valor proporcional é a frequência do inversor (Hertz) multiplicado a um fator de escala de referência do CFW 08. Fonte: Autor.

5.5.2 Mensuração automatizada do fluxo de massa

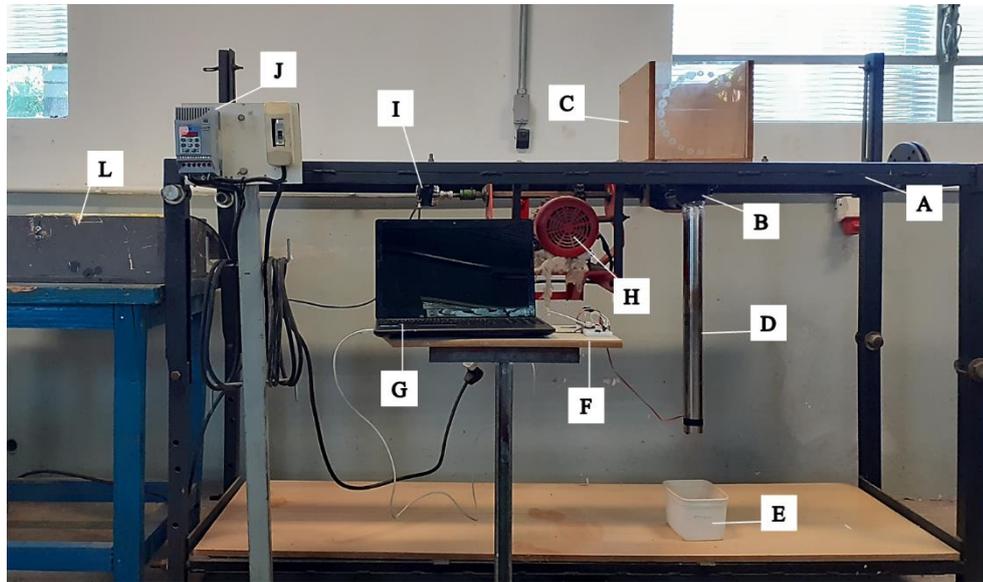
O sensor microondas utilizado usa a tecnologia de radar por efeito Doppler, sendo capaz de detectar corpos dentro do seu raio de ação. Possui um emissor de sinal eletromagnético de microondas de alta frequência e um receptor e, através disso, a particularidade de cada material irá refletir e o sinal sofrerá alteração. De modo geral, o efeito Doppler é a alteração da frequência captada por um receptor a partir de um sinal refletido (luz) pelo corpo em movimento.

O comprimento do sinal refletido é maior ou menor, proporcionalmente ao afastamento ou aproximação do receptor que capta o sinal eletromagnético. Em caso de aproximação do receptor, a frequência da onda recebida tende a ser maior e, no caso de afastamento, a frequência tende a diminuir.

Para o funcionamento do sensor, foi utilizado como microcontrolador uma placa de prototipagem Arduino UNO e para a alimentação com energia externa, foi usado um cabo USB, tendo em vista que esse componente já realiza a transmissão de dados entre a placa e o computador. Por isso, não houve a necessidade de ser empregada uma bateria como fonte externa.

Além disso, para evitar a influência de movimentos externos que poderiam afetar na estimativa da velocidade de partículas, o sensor microondas foi fixado no interior de um tubo condutor fabricado em aço inox, que tem como dimensões 600 mm de comprimento, 50 mm de diâmetro e 1 mm de espessura de chapa. A escolha desse material tem por base a eficiência do mesmo na retenção das ondas eletromagnéticas, fazendo com que elas permaneçam confinadas no interior do tubo. A bancada para estimativa do fluxo de massa de fertilizantes pode ser visualizada na Figura 11.

Figura 11 – Bancada utilizada para estimativa do fluxo de massa de fertilizantes.



Nota: (A) BANFERTI II, (B) Dosador de fertilizante, (C) Reservatório, (D) Tubo condutor com sensor microondas, (E) Recipiente, (F) Microcontrolador arduino, (G) Computador, (H) Motor elétrico, (I) Sensor de rotação – Encoder, (J) Inversor de frequência, (L) Módulo de medição e controle – Datalogger.

Fonte: Autor.

O desenvolvimento da programação do *software* foi feito por meio do ambiente integrado de desenvolvimento (IDE – *Integrated Development Environment*) do próprio Arduino, realizada em linguagem “C/C++” e realizado o *upload* do código para a placa através do cabo USB. O código foi implementado na tela de desenvolvimento do Arduino.

A condução do sinal do sensor para a placa de prototipagem ocorreu através de conectores elétricos, também conhecidos como *jumpers*. Para a visualização e armazenagem dos dados coletados, foi utilizada uma ferramenta de complemento para o *software* Microsoft Excel, conhecida como *Parallax Data Acquisition (PLX-DAQ)*, versão 2.3, que permite adquirir até 26 canais de dados de qualquer microcontrolador, inserindo os dados de forma instantânea nas colunas do Excel, o que facilita o monitoramento e a coleta dos dados.

A programação teve como variável resultante a variação da tensão durante o instante de tempo. Esses dados foram obtidos através da leitura da entrada analógica do Arduino, que recebe como parâmetro a variação de tensão do pino A0 (pino conectado ao sensor microondas) e através do conversor AD de 10 bits de precisão converte o sinal de entrada de 0 a 5 volts para um valor numérico interno de programação de 0 a 1023. Por exemplo, permite uma resolução entre leituras de: 5 volts / 1024 unidades, ou 0,0049 volts (4.9 mV) por unidade. Para todos os tratamentos, a fonte externa de energia do computador permaneceu desconectada, com o

objetivo de não haver interferência da rede elétrica na leitura dos valores de tensão. Dentro da programação do microcontrolador, foi usado o comando *Serial.begin*, que permite configurar a velocidade de comunicação da placa através da conexão USB. O valor foi de 115200 bauds, objetivando a maior taxa de transmissão de dados através da conexão.

Esse sistema permitiu a coleta de 4096 dados de variação de tensão no intervalo de 30 segundos, sendo o mesmo período de tempo das coletas manuais. Contudo, para a parametrização da estimava de fluxo de massa, foi necessária a transformação dos valores de tensão no instante de tempo, em frequência (Hertz). Portanto, foi realizada uma análise espectral para estudar o comportamento desses sinais no domínio da frequência e para transformar o sinal do domínio do tempo para o domínio de frequência, foi utilizada a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT), através do uso da ferramenta de análise de dados do Microsoft Excel[®].

Com a posse dos dados sobre a diferença entre a frequência dos sinais transmitidos e retornados, foi possível estimar a velocidade das partículas, usando como base os estudos de Pang et al. (2018), Hamid e Stuchly (1975). A velocidade pode ser facilmente medida pela contagem do número de ciclos do sinal Doppler em um segundo. Matematicamente, a mesma pode ser expressa conforme Equação 4:

$$v = \left(\frac{c}{2f \cos \theta} \right) * f_d \quad (4)$$

Onde:

v – velocidade do alvo (m s^{-1});

c – velocidade da luz (m s^{-1});

f – frequência do transmissor de radar doppler (Hz);

θ – ângulo de visão da antena;

f_d – frequência doppler (Hz).

Com isso, a taxa do fluxo de fertilizantes é indicada pela densidade das partículas que o compõe, a área da seção do tubo e pela velocidade média destas partículas, conforme a Equação 5.

$$Q = \rho_a * A * v \quad (5)$$

Onde:

Q – Fluxo mássico dos sólidos (kg s^{-1});

ρ_a – Densidade aparente de partículas (kg m^3);

A – Área da seção transversal do tubo (m^2);

v – Velocidade média das partículas (m s^{-1}).

Além disso, é importante ressaltar que fluxo de massa e taxa de aplicação são usados como sinônimos do decorrer deste estudo.

5.5.3 Estimativa de custo do sistema

A Tabela 8, apresenta a descrição de custos dos componentes utilizados no sistema de estimativa do fluxo de massa.

Tabela 8 – Materiais utilizados e custo de aquisição.

Descrição	Quant.	Un.	Preço un.	Preço total
Placa Arduino + cabo USB	1	pç	R\$ 44,79	R\$ 44,79
Protoboard	1	pç	R\$ 14,67	R\$ 14,67
<i>Jumpers</i>	3	pç	R\$ 0,50	R\$ 1,50
Sensor microondas	1	pç	R\$ 10,48	R\$ 10,48
Tubo condutor INOX	0,6	m	R\$ 110,00	R\$ 66,00
Total				R\$ 137,44

Nota: Cotação do dólar americano no dia da estimativa: \$ 1,00 = R\$ 4,37.

Fonte: Autor.

O custo final do sistema foi de R\$ 137,44. Os demais equipamentos não foram contabilizados, pois foram empregados a fim de validação e calibração do sistema.

5.6 DESCRIÇÃO E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi disposto no delineamento inteiramente ao acaso (DIC), em um arranjo trifatorial 2x3x10, com 5 repetições, totalizando 60 tratamentos. O primeiro fator compreende os métodos de medição de fluxo, com dois níveis, sendo o primeiro o método

manual e o segundo o sensor microondas. O segundo fator consiste no tipo de fertilizante, com 3 níveis. O terceiro fator foi a rotação de acionamento do dosador, com 10 níveis. A descrição dos fatores pode ser visualizada na Tabela 9.

Tabela 9 – Descrição dos fatores e seus níveis.

Níveis	Fatores		
	Mensuração Fluxo de Massa	Tipo de Fertilizante	Rotação de acionamento
1	Manual	Mistura Granular	11,09
2	Sensor	Mistura de Grânulos	22,25
3	-	Farelado	32,14
4	-	-	41,98
5	-	-	51,76
6	-	-	61,61
7	-	-	71,53
8	-	-	81,38
9	-	-	91,31
10	-	-	101,33

Fonte: Autor.

5.6.1 Análise estatística

Após a aquisição dos dados, os mesmos foram submetidos ao teste de Kolmogorov-Smirnov para verificar a normalidade dos erros e ao teste Cochran para testar a homogeneidade de variâncias. A posteriori, os dados foram submetidos à análise estatística de variância (ANOVA), verificado a significância dos fatores através do teste F.

Os procedimentos de análise podem ser entendidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Fatores, tipos e procedimento de análise.

Fatores	Tipo de Fator	Procedimentos de análise
Métodos de Medição (F1)	Qualitativo	Teste de Scott-Knott (95%)
Tipo de Fertilizante (F2)	Qualitativo	Teste de Scott-Knott (95%)
Rotação de acionamento (F3)	Quantitativo	Regressão
F1 x F2	Quali x Quali	Teste de médias de F1 em F2 e F2 em F1 *
F1 x F3	Quali x Quanti	Regressão de F3 dentro de F1 *
F2 x F3	Quali x Quanti	Regressão de F3 dentro de F2 *
F1 x F2 x F3	Quali x Quali x Quanti	Desdobramento de três interações duplas *

Nota: *: Realizou-se o procedimento de análise quando houve significância entre os fatores no teste f, caso contrário a análise foi individual para cada fator. Fonte: Autor.

Para a interpretação de tratamentos não ordenados por critérios numéricos (qualitativos), houve a comparação múltipla de médias com o teste de análise de Scott-Knott, em nível de 5%

de probabilidade de erro. Já para os tratamentos de valores ordenáveis (quantitativos), foi realizada a análise de regressão, buscando expressar matematicamente o comportamento desses fatores. Para isso, foi utilizado o software SISVAR® versão 5.7.

Além disso, foram realizadas análises das diferenças absolutas (Equação 6), entre os dois níveis do primeiro fator, com o intuito de evidenciar detalhadamente a eficiência do sensor microondas para validá-lo. Também, foi efetuada uma análise de regressão, a fim de explicar o comportamento dos fatores.

$$DA_i = TS_i - TM_i \quad (6)$$

Onde:

DA_i – Diferença absoluta ($\text{g } 30\text{s}^{-1}$);

TS_i – Taxa de fertilizantes obtida pelo sensor ($\text{g } 30\text{s}^{-1}$);

TM_i – Taxa de fertilizantes obtida manualmente ($\text{g } 30\text{s}^{-1}$).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

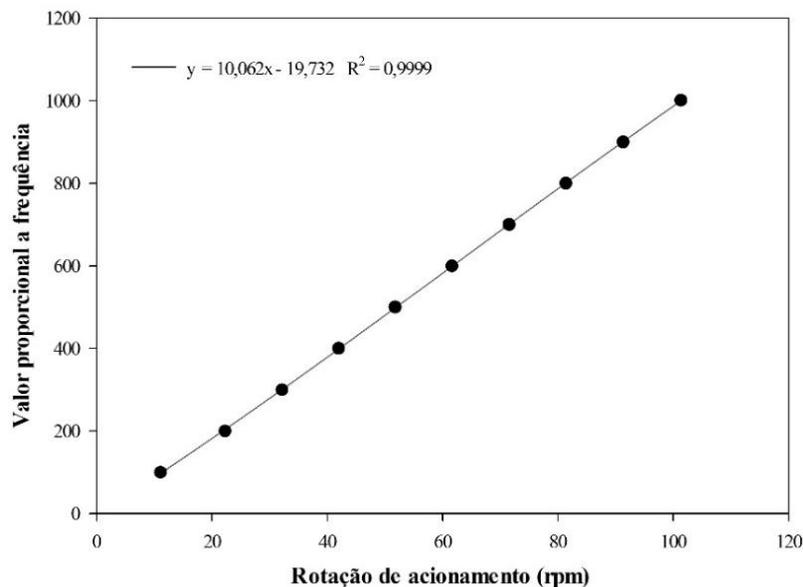
6.1 CALIBRAÇÃO INICIAL

6.1.1 Rotação de acionamento

A medição precisa da rotação de acionamento é fundamental para a validação das equações de estimativas de fluxo e para a reprodutibilidade experimental. Além disso, é o principal fator de regulação de fluxo do dosador. Portanto, as definições das rotações de acionamento e o estudo de sua variabilidade foram realizadas pelo sistema de aferição de dados.

A Figura 12 ilustra o comportamento dos valores proporcionais à frequência em função da rotação de acionamento e a respectiva equação a qual foi empregada para definir as frequências utilizadas para os tratamentos. Para cada frequência, foi utilizado um tamanho amostral de 230 coletas, repetidas 5 vezes.

Figura 12 – Equação de regressão linear para determinação da rotação de acionamento do dosador.



Nota: O valor proporcional é a frequência do inversor (Hertz) multiplicado a um fator de escala de referência do CFW 08. Fonte: Autor.

É possível observar que a regulação e o controle de rotação de acionamento é adequado e preciso com o uso do inversor de frequência. Com isso, a conversão da rotação desejada no

dosador para a frequência utilizada no inversor pode ser calculada pela Equação 7, que possui um coeficiente de determinação de 99,99 %.

$$y = 10,062 x - 19,732 \quad (7)$$

Onde:

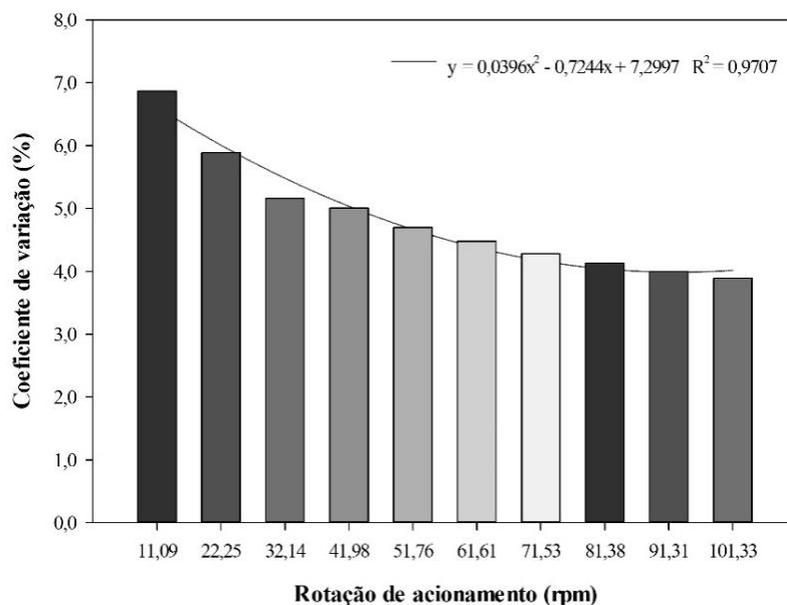
y – valor proporcional a frequência configurada no inversor;

x – rotação do dosador de fertilizante (rpm);

Além disso, os estudos de Garcia et al. (2006) demonstram que de forma simples é possível adequar modelos matemáticos de regressão linear com elevado coeficiente de determinação (98,9 %) para a predição da taxa de aplicação, em função da rotação de acionamento. Contudo, nesses estudos não foram considerados os efeitos das inclinações de trabalho dos mecanismos dosadores sobre a taxa de aplicação de fertilizantes.

Portanto, é necessário mensurar esta variável para efetuar os procedimentos de calibração do sensor e verificar a sua confiabilidade. Na Figura 13, são apontados os coeficientes médios de variação, obtidos para todas as rotações de acionamento.

Figura 13 – Coeficiente de variação relativo as rotações de acionamento reguladas.



Fonte: Autor.

É possível observar que mesmo com o uso de ambiente experimental controlado e livre de interferências externas, a variabilidade da rotação pode ser um dos fatores causadores da desuniformidade na distribuição de fertilizantes. Contudo, essa oscilação é reduzida com o aumento da rotação, ao passo de 2,98 % da menor para a maior.

Entretanto, as pesquisas evidenciam a variabilidade da distribuição de fertilizantes, mas atrelam-na somente ao desempenho das disposições construtivas do mecanismo e das características dos fertilizantes. Porém, a variabilidade evidenciada na rotação pode ser uma fonte intrínseca a desuniformidade da distribuição de fertilizantes sólidos.

A investigação quanto à variação da rotação de acionamento é de suma importância para a precisão da estimação do fluxo de massa, pois influencia diretamente na uniformidade da distribuição de fertilizantes sólidos, sendo o principal fator de regulação dos dosadores. Esse fato é confirmado nos estudos de Camacho-Tamayo et al. (2009), Franck (2014), Garcia et al. (2014), sobre modelos estatísticos da taxa de aplicação de fertilizantes, os quais usam a rotação de acionamento como função.

Di Raimo (2011), ao desenvolver um protótipo de aplicação à taxa variável de fertilizantes, também verificou através do encoder uma oscilação da rotação de acionamento na ordem de 3 rpm para mais ou para menos, sendo esse valor aumentado quando considerado o efeito da transmissão e do torque do motor.

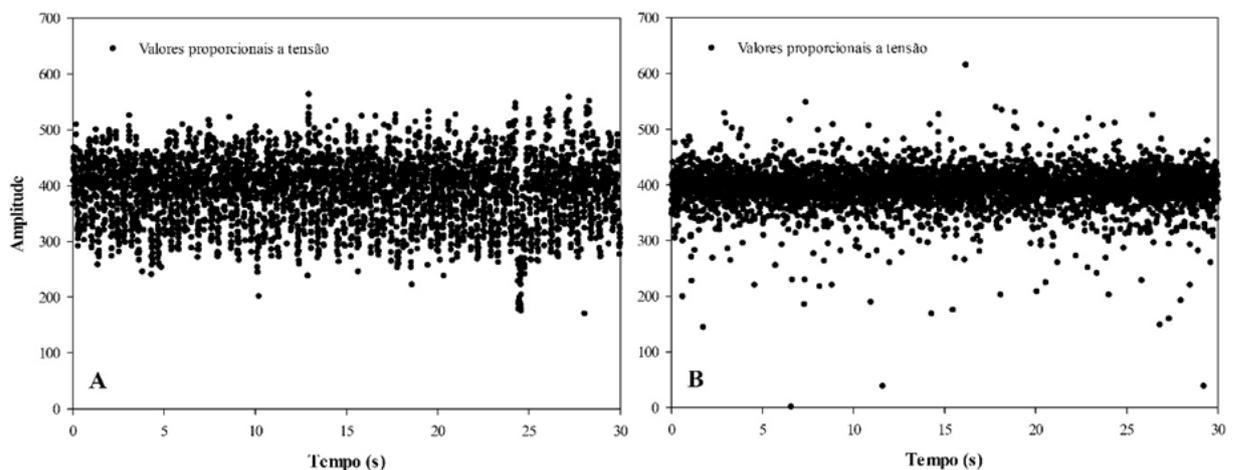
Ferreira et al. (2007) estudaram a uniformidade de vazão dos mecanismos dosadores em função de inclinações longitudinais e concluíram que as menores variações são obtidas com as maiores velocidades e os menores passos de rosca. Martins (1999), estudando adaptações a um mecanismo dosador sem-fim, constatou uma redução na amplitude de fertilizante aplicado quando os equipamentos eram acionados em maiores rotações. Guler (2010) avaliou um sistema de dosagem de fertilizantes pneumático e também observou que seu desempenho é melhor nas maiores vazões.

Ao avaliar o desempenho de um protótipo de distribuição de fertilizantes helicoidal a taxa variável em bancada, Moreno et al. (2016) obtiveram os maiores erros de distribuição em baixas velocidades. O maior erro (8,3 %) foi obtido na rotação de 4 rpm e o menor (0,1%) ocorreu em 28 rpm. Com a dosagem de 45 kg ha⁻¹, o protótipo apresentou erro de 3,56 %. Já com a dosagem de 85 kg ha⁻¹, o erro foi de 1,78%, indicando que dosadores helicoidais operaram em altas velocidades de rotação e podem ter distribuição mais uniforme.

6.1.2 Características do sinal de saída e calibração

O sistema automatizado de coleta de dados retorna como valor de saída para a placa do Arduino a oscilação da tensão (V) em determinado instante de tempo, conforme a Figura 14. Porém, ao analisar o sinal resultante do sensor microondas em função do tempo, pode ser observado que o mesmo possui uma característica cíclica, sendo possível, através de uma análise gráfica, notar visualmente um componente de baixa frequência associada a um componente de frequência superior ao primeiro. Essa mesma característica foi observada por Martins (1999), que usou em seus estudos um sistema com célula de carga e placa de impacto para medir a vazão instantânea de fertilizantes sólidos.

Figura 14 – Exemplo de dados característicos da variabilidade da tensão no instante de tempo.



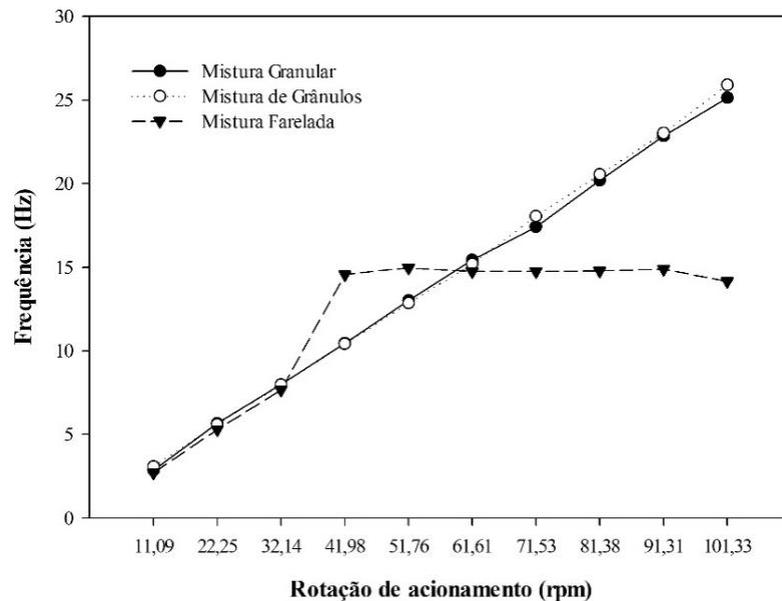
Nota: tipo de fertilizante utilizado: mistura granular, (A) Rotação de acionamento: 11,09 rpm, (B) Rotação de acionamento: 101,33 rpm. Fonte: Autor.

Além disso, é notória a dispersão desuniforme de alguns valores obtidos, podendo ser uma fonte de interferência na análise espectral. Tal fato decorre da não utilização de filtragem e amplificação externa de sinal no circuito eletrônico. Porém, como este estudo não objetiva a concepção final de produto, essas características não desqualificam o mesmo e deixam expectativas de trabalhos futuros.

Contudo, a oscilação verificada por si só não permite a correlação do sinal com a estimativa da velocidade de deslocamento das partículas. Desse modo, foi realizada uma análise espectral para estudar o comportamento desses sinais no domínio da frequência. Para transformar o sinal do domínio do tempo para o domínio de frequência, foi utilizada a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT). Portanto, a coleta dos 4096 dados, em 30 segundos,

com as modificações de rotações e fertilizantes, indicam após a transformação, as unidades de frequência, conforme a Figura 15.

Figura 15 – Análise da frequência obtida com a alteração da rotação de acionamento.



Fonte: Autor.

Para as misturas granulares e de grânulos, é possível notar um ajuste linear, evidenciando que o aumento da rotação de acionamento do dosador e, conseqüentemente, da taxa de aplicação, ocorre a aquisição proporcional da frequência observada. Esse fato evidencia que o sensor permite a identificação do incremento das velocidades das partículas e, em decorrência, pode ser estimada a taxa de aplicação, corroborando com Hamid e Stuchly (1975), que concluem a possibilidade de estimar a velocidade de partículas pelo método microondas.

Entretanto, para o fertilizante do tipo mistura farelada é possível observar a linearidade dos resultados até a rotação de 32,14 rpm. Após é verificado um amplo incremento na frequência que se mantém até a maior rotação estudada. Esse caso incidiu, pois as oscilações dos dados de tensão ocorreram de forma cíclica, mas com maior amplitude, alternando entre os valores de 0 a 800.

A ampliação do fluxo mássico sólido causa dois efeitos antagônicos na medição. Por um lado, os valores de tensão aumentam com o acréscimo da taxa de fluxo dos fertilizantes porque mais microondas são refletidas pelas partículas. Por outro, quanto maior for a

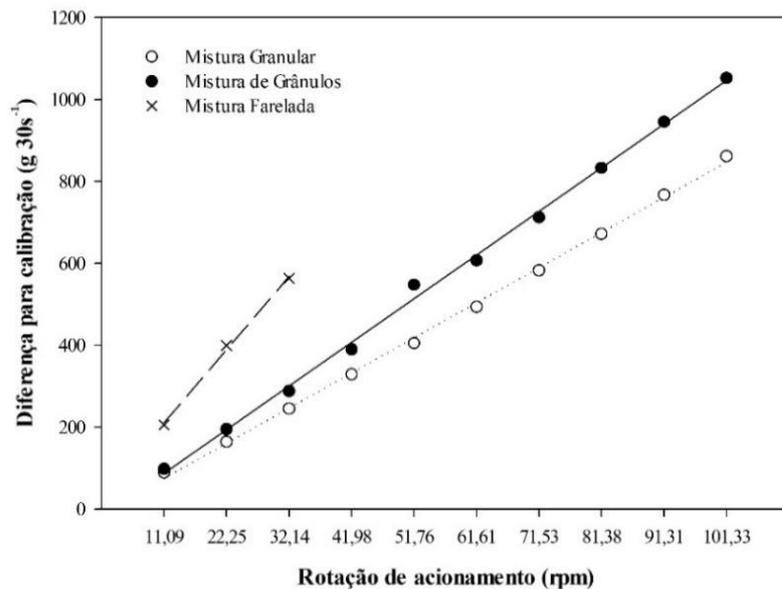
concentração desses sólidos, a maioria destas microondas serão refletidas pelas partículas próximas ao sensor, de modo a dificultar a detecção com precisão das partículas distantes dele.

De acordo com Pang et al. (2018), este efeito é conhecido como "blindagem" o que causará influência negativa na medição. Assim, é necessário determinar uma faixa de mensuração adequada antes de aplicar esse método de medição por microondas. Para os autores, o ponto limite de medição da vazão mássica dos sólidos areia de quartzo, carbonato de cálcio e óxido de alumínio é de $1,1 \text{ kg s}^{-1}$. Quando a vazão mássica sólida é maior que esse valor, o método de medição por microondas não é mais aplicável.

Desse modo, para a mistura farelada, a medição é limitada até a rotação de 32,14 rpm. Isso ocorre porque o fertilizante apresenta os menores índices granulométricos, ou seja, que possuem partículas de menor tamanho se comparado aos demais, o que influenciará diretamente no efeito de blindagem causados por elas na medição do sensor.

Contudo, após a análise inicial dos dados de frequência, estimativa da velocidade (Equação 4) e a estimativa do fluxo mássico dos sólidos (Equação 5), foi observado que para todos os fertilizantes ocorreu uma superestimativa dos dados de fluxo de massa. Assim sendo, foi proposta a inserção de um fator de correção que leva em consideração a rotação de acionamento, conforme a Figura 16 e a Tabela 11. Para o fertilizante farelado, o fator foi aplicado para as três primeiras rotações de acionamento, de modo que nas demais não incidiram correções.

Figura 16 – Análise das equações de calibração



Fonte: Autor.

Tabela 11 – Funções matemáticas de calibração para cada tipo de fertilizante estudado.

Fertilizantes	Função matemática de calibração (Ec)	Coefficiente de determinação R^2
Mistura Granular	$y = 8,6291 x - 27,776$	99,81%
Mistura de Grânulos	$y = 10,719 x - 40,191$	99,72%
Mistura Farelada	$y = 16,986 x - 18,908$	99,98%

Fonte: Autor.

Para a calibração dos dados coletados, foi proposto um Fator de Correção (Fc) (Equação 8), levando em consideração a equação de calibração obtida através da análise de regressão dividida pelo fluxo estimado no sistema de aquisição de dados.

$$Fc = \frac{(Ec)}{Q} \quad (8)$$

Onde:

Fc – Fator de correção;

Ec – Equação de calibração;

Q – Fluxo mássico dos sólidos ($g\ 30\ s^{-1}$);

De posse dos dados de fluxo mássico dos fertilizantes coletados com o sensor e do fator de calibração proposto, pudemos estimar o fluxo de massa dos fertilizantes sólidos por meio do uso do sensor microondas, através da Equação 9.

$$Q' = Q * Fc \quad (9)$$

Onde:

Q' – Fluxo mássico de aplicação dos fertilizantes corrigida ($g\ 30s^{-1}$);

Q – Fluxo mássico de aplicação dos fertilizantes sensor ($g\ 30s^{-1}$);

Fc – Fator de correção.

6.2 ESTIMATIVA DO FLUXO DE MASSA

A análise de variância (ANOVA) da variável taxa de aplicação, com sua respectiva média, níveis e resultados do teste F, são apresentados na Tabela 12. Foi observada normalidade dos erros e homogeneidade de variâncias.

Tabela 12 – Síntese da análise de variância com as médias dos fatores, seus níveis e os resultados do teste F.

Fatores	Variável
	Fluxo de mássico (g 30s ⁻¹)
MÉTODO DE MEDIÇÃO	
Manual (Mm)	684,48 b
Sensor (Ms)	612,08 a
TIPO DE FERTILIZANTE	
Mistura Granular	461,90 a
Mistura de Grânulos	567,94 b
Mistura Farelada	915,00 c
ROTAÇÃO DE ACIONAMENTO	
11,09 rpm (R1)	123,33 a
22,25 rpm (R2)	246,76 b
32,14 rpm (R3)	363,33 c
41,98 rpm (R4)	530,73 d
51,76 rpm (R5)	638,03 e
61,61 rpm (R6)	721,86 f
71,53 rpm (R7)	817,46 g
81,38 rpm (R8)	915,66 h
91,31 rpm (R9)	1016,23 i
101,33 rpm (R10)	1109,36 j
CV e MG	
CV (%)	2,54
Média Geral (MG)	648,28
TESTE F	
Método de Medição (F1)	1446,55*
Tipo de Fertilizante (F2)	26666,53*
Rotação de acionamento (F3)	12086,42*
F1 x F2	1525,93*
F1 x F3	430,91*
F2 x F3	317,26*
F1 x F2 x F3	400,76*

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem significativamente entre si no teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).
*: Significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Fonte: Autor.

Todos os fatores em estudo apresentaram influência significativa para a variável fluxo mássico, ao nível de 5% de probabilidade. Além disso, ocorreu a interação entre todos os fatores, ou seja, o efeito ou mudança em um destes irá influenciar significativamente em outro. O coeficiente de variação obtido foi de 2,54 %, podendo indicar uma baixa magnitude ($CV <$

10%), de acordo com o critério estabelecido por Gomes (1990), aferindo uma alta precisão experimental na obtenção da variável resposta.

O uso do sensor subestimou a média da taxa de aplicação em 10,57 % ($72,4 \text{ g } 30\text{s}^{-1}$) em comparação ao método manual, ocasionando uma diferenciação estatística. Contudo, vale ressaltar que na média geral estão incluídos os valores não calibrados para o fertilizante farelado, cujas evidências serão explicadas no desmembramento dos fatores.

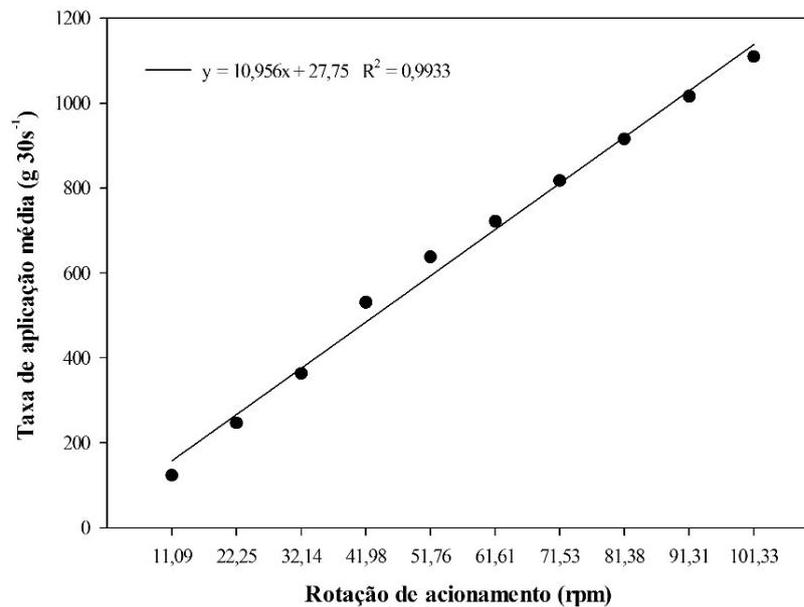
Ao analisar o fator tipo de fertilizante, é possível verificar a diferenciação estatística entre os três tipos utilizados, evidenciando que quanto maior a densidade do fertilizante, maior será o seu fluxo mássico para a mesma regulagem, de 49,52 % do fertilizante farelado para o granular. Além disso, é importante notar que a amplitude da taxa de aplicação do fertilizante mistura de grânulos para o mistura granular pode ter sofrido influência positiva, devido ao teor de água presente nos mesmos, à proporção de 4,78 e 1,78 %, respectivamente.

Franck (2014) teve como resultado que a maior taxa de aplicação ocorreu com o fertilizante mistura farelada, que possuiu a maior densidade entre os fertilizantes estudados. Já a menor é apresentada com a utilização do fertilizante mistura de grânulos, tendo em vista que apresentou o menor ângulo de repouso entre os demais.

A densidade é a relação da massa de um material com o volume que ocupa. Essa característica é importante para a determinação da capacidade de vazão dos dosadores (RODELLA e ALCARDE, 2000). Além disso, pode ocorrer a segregação do material sendo entendida como a separação dos grânulos componentes de uma mistura. As partículas mais finas e densas vão para o fundo do reservatório e são distribuídas primeiro, o que pode ocasionar uma variação na composição e na quantidade a ser aplicada (SILVEIRA, 1989).

Na Figura 17 é apresentada a análise de regressão para o fator rotação de acionamento.

Figura 17 – Análise de regressão para o fator rotação de acionamento.



Fonte: Autor.

A taxa de aplicação média é diretamente proporcional à rotação de acionamento, podendo ser determinada através de uma equação de regressão linear com grau de determinação de 99,33 %. Com isso, verificamos que a rotação é o principal fator de regulação de fluxo de fertilizantes em mecanismos dosadores helicoidais, corroborando com os resultados de Garcia et al. (2006) e Lassen et al. (2010), Martins (1999) e sua indicação de que a vazão é determinada pela velocidade de acionamento, possuindo correlação linear.

Com isso, modelos matemáticos foram propostos para desenvolver estratégias no desenvolvimento de sistemas de controle eletrônicos para reduzir a imprecisão da dosagem de fertilizantes, em que a correção da taxa de aplicação é realizada por meio da rotação de acionamento (FRANCK et al., 2015; GARCIA et al., 2012).

Com a interação significativa entre os fatores é necessário analisar a influência mútua entre eles, como é mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 – Desdobramento das médias entre os fatores método de medição (F1) e tipo de fertilizante (F2).

Tipo de Fertilizante (F2)	Taxa de aplicação (g 30s ⁻¹)	
	Método de Medição (F1)	
	Método Manual	Método Sensor
Mistura Granular	460,96 Aa	462,84 Aa
Mistura de Grânulos	566,92 Ba	568,96 Ba
Mistura Farelada	1025,56 Cb	804,44 Ca

Nota: Médias seguidas de mesma letra na minúscula linha e maiúscula na coluna, não diferem pelo teste de Scott-Knott, considerando o valor nominal de 5% de significância. Fonte: Autor.

Não ocorreu diferenciação entre os métodos de medição quando utilizados os fertilizantes do tipo mistura granular e mistura de grânulos e farelada, evidenciando que o uso de sensor é eficiente para mensurar o fluxo de massa dos fertilizantes.

Logo, para a mistura farelada, o sensor subestimou a taxa de aplicação em 21,56 %, evidenciando a dificuldade do mesmo em estimar com precisão materiais mais densos e com menores tamanhos de partículas.

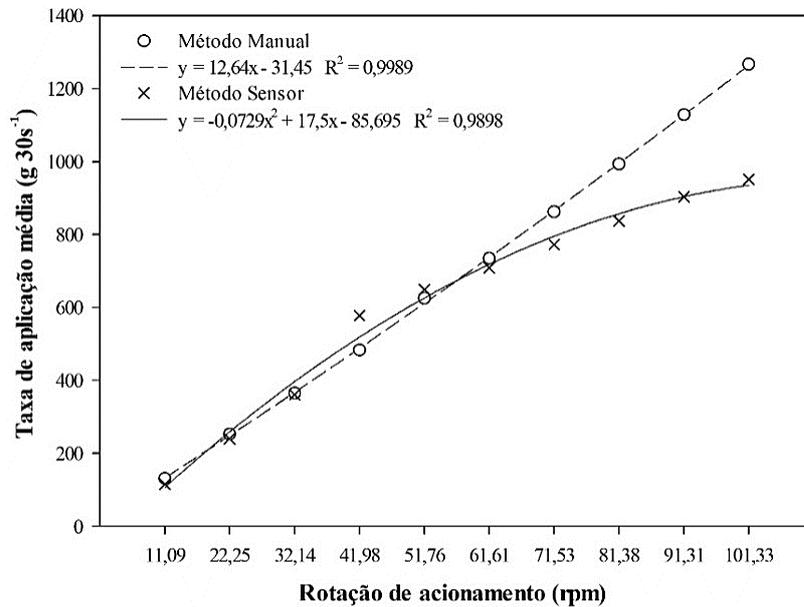
Também é possível verificar a significância estatística entre todos os fertilizantes utilizados, tanto para o método manual como para o sensor. Isso comprova que é extremamente necessário o desenvolvimento de sistemas que possibilitem a estimativa da taxa de aplicação para corrigir a rotina dos atuadores, uma vez que a alteração manual da regulação das semeadoras-adubadoras, para cada diferença granulométrica do insumo, torna o processo inviável no contexto da aplicação a taxa variável.

Schneider et al. (2005) verificaram que a aplicação de fertilizante ocorre de maneira imprecisa. Em seu estudo, os autores utilizaram diversos tipos de fertilizantes, com diferentes propriedades físicas, e observaram que a taxa de aplicação depende do tipo de fertilizante utilizado, sendo influenciada pela diferença das propriedades físicas do fertilizante, incidindo a necessidade de se regular o sistema dosador, conforme a formulação usada.

Na Figura 18, é apresentada a análise de regressão entre a interação dos fatores rotação e método de medição.

O aumento da taxa de aplicação é diretamente proporcional ao aumento da rotação de acionamento, podendo ser estimada por uma equação linear (R^2 : 99,89) para o método manual e por uma equação quadrática (R^2 : 98,98) para o sensor. É possível verificar que o aumento na rotação promove um incremento no desvio da taxa de aplicação estimada pelo sensor, pois para o fertilizante farelado não foi possível realizar uma estimativa adequada acima da rotação de 32,14 rpm.

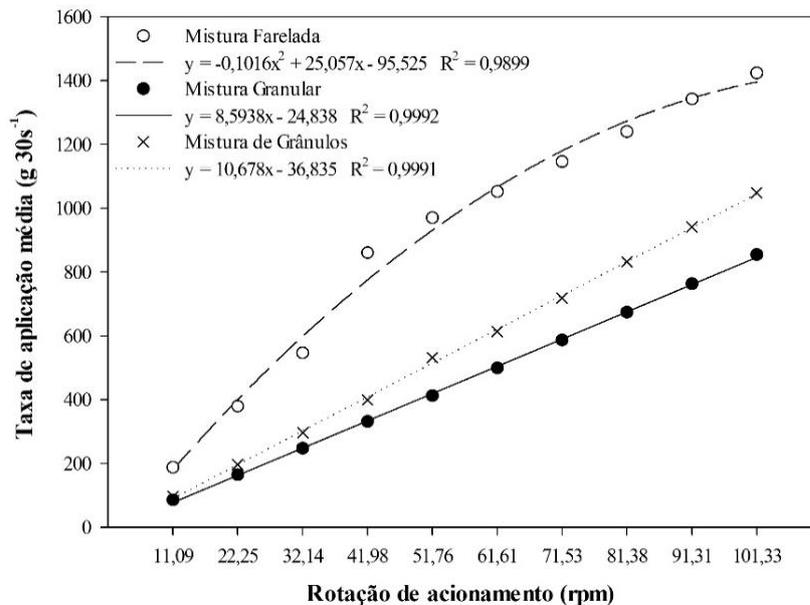
Figura 18 – Regressões do fator rotação de acionamento dentro de cada nível do fator método de medição para todos os fertilizantes.



Fonte: Autor

Já a análise de regressão do fator rotação dentro de cada tipo de fertilizante pode ser visualizada na Figura 19.

Figura 19 – Regressões do fator rotação de acionamento dentro de cada nível do fator tipo de fertilizante.



Fonte: Autor.

É possível observar alguns aspectos importantes que ocorrem na medição do fertilizante farelado, de maneira que o primeiro é relacionado a magnitude da taxa de aplicação em relação aos demais fertilizantes para as mesmas rotações reguladas. Como exemplo, pode ser observado que na rotação de 41,98 rpm para o farelado, a taxa é maior do que na rotação de 101,33 rpm para o fertilizante granular. Isso ocorre porque a sua densidade é diferenciada por 1,11 e 0,97 g cm³, respectivamente. Também, o menor tamanho das partículas do farelado, atrelada à alta taxa de aplicação, promovem a limitação do sensor em estimar com precisão o fluxo mássico.

Yan (1996) descreve que alguns fatores afetam diretamente na estimativa de fluxo de partículas por sensores, quais são: distribuição não homogênea dos sólidos, velocidades irregulares, tamanho variável de partículas. Além disso, o autor salienta que esses sensores devem ser insensíveis a umidade do material analisado.

Também, buscando evidenciar detalhadamente a eficiência do sensor microondas na estimativa do fluxo mássico, foram realizadas análises das diferenças absolutas (g 30s⁻¹), conforme Tabela 14 e Figura 20.

Tabela 14 – Diferença absoluta da taxa de aplicação obtida entre o método manual e o uso do sensor microondas.

Rotação (rpm)	Diferença Absoluta (g 30s ⁻¹)		
	Mistura Granular	Mistura de Grânulos	Mistura Farelada
11,09	-6,65	-4,06	-36,39
22,25	0,30	3,38	-40,57
32,14	4,88	16,73	-34,44
41,98	6,08	20,46	258,47
51,76	14,27	-32,69	92,56
61,61	10,29	13,61	-101,58
71,53	-6,49	14,55	-288,31
81,38	4,10	-0,44	-471,80
91,31	-6,49	-6,33	-662,40
101,33	-14,15	-5,45	-925,65

Fonte: Autor.

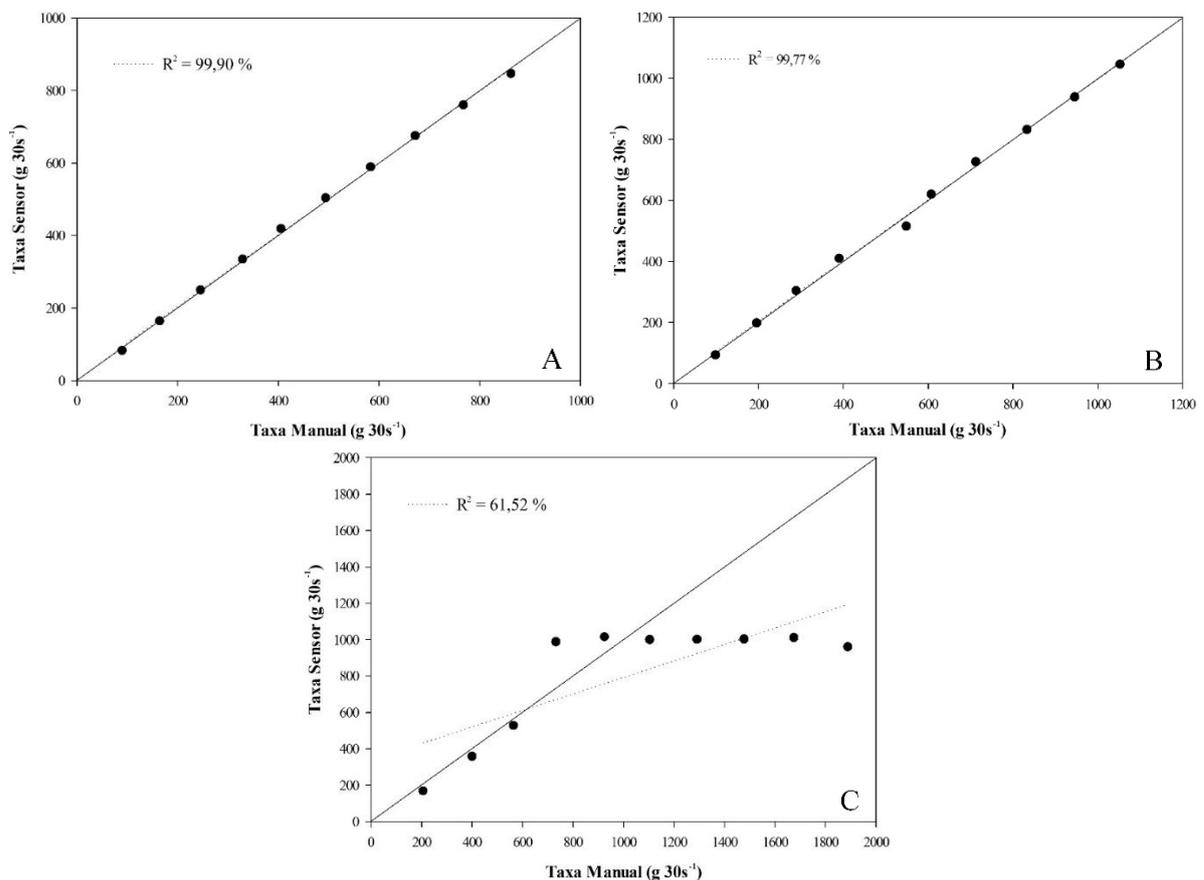
O erro médio entre os métodos de medição para todas as rotações de acionamento foi de 1,91, 1,98 e -221,01 g 30s⁻¹ para os fertilizante mistura granular, mistura de grânulos e mistura farelada, respectivamente. Com isso, considera-se que para o fertilizantes granular e mistura de grânulos, o uso do sensor e a proposta de calibração foi adequada, havendo uma pequena superestimativa do fluxo mássico. Pernirschke et al. (2009), ao desenvolverem um

sistema com a utilização do método Doppler, estimando a velocidade das partículas, obtiveram um erro inferior a 10%.

Pang et al. (2018) ao desenvolverem um sistema baseado na teoria microondas e efeito doppler para medir a taxa de fluxo de massa sólida de partículas de areia de quartzo, carbonato de cálcio e óxido de alumínio, encontraram um desvio médio relativo de 7,73 %, indicando que a proposta de calibração também foi de acordo com os dados.

Na Figura 20 é possível visualizar a correlação entre os métodos de medição para todos os tipos de fertilizantes.

Figura 20 – Correlação entre o método manual e o sensor microondas para todos os tipos de fertilizantes.



Nota: (A) Fertilizante mistura granular, (B) fertilizante mistura de grânulos, (C) Fertilizante mistura farelada.

Fonte: Autor.

Os fertilizantes do tipo mistura granular e de grânulos apresentaram uma correlação positiva entre os métodos, desde que empregado o uso do fator de correção.

Foi possível constatar a maior precisão do sensor microondas na estimativa do fluxo mássico para o fertilizante mistura granular, porque possui uma melhor uniformidade e maior tamanho de grânulos, apresentando 94,61% das partículas retidas nas peneiras com tamanho de 4 e 2 mm. Já para o mistura de grânulos, esses índices são reduzidos para 80,59 %, constatando a presença de partículas fareladas e pó em sua composição o que dificulta a medição do sensor pelo efeito de blindagem das partículas.

Esse efeito foi confirmado com o uso do fertilizante farelado que apresenta 92,91 % de suas partículas menores que 0,5 mm, que impedem a eficiência do sensor nas maiores taxas de aplicação.

Contudo, para o fertilizante mistura farelada, o baixo coeficiente de determinação obtido foi devido à dificuldade do sensor em mensurar as taxas aplicadas nas rotações acima de 32,14 rpm. No entanto, ao realizar a adequação da função matemática para esse fertilizante nas três primeiras rotações, foi obtido um coeficiente de determinação de 99,90 %.

7 CONCLUSÃO

Nas condições em que este estudo foi realizado, pode-se concluir que:

O uso do sensor microondas foi eficiente para mensurar o fluxo mássico de fertilizantes sólidos do tipo mistura granular e mistura de grânulos, confirmando a hipótese I. Para o fertilizante farelado, a medição foi limitada até a rotação de 32,14 rpm, com subestimativa média de $-37,13 \text{ g } 30\text{s}^{-1}$.

Quanto menor a granulometria do fertilizante maior foi seu fluxo mássico para a mesma regulação. Além disso, foi encontrada maior diferença do sensor frente ao método manual, confirmando a hipótese II.

O aumento da taxa de aplicação é diretamente proporcional a rotação, com maior diferença de mensuração pelo sensor frente ao método manual em maiores velocidades de acionamento, confirmando a hipótese III.

Foi possível desenvolver uma equação matemática de primeiro grau que relacione os valores proporcionais à frequência do inversor com as rotações de acionamento do dosador.

Foi possível desenvolver um fator de correção levando em consideração todas as rotações de acionamento para os fertilizantes do tipo mistura granular e de grânulos e apenas as três primeiras velocidades angulares para o fertilizante farelado.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. Os adubos e a eficiência das adubações. **ANDA**, São Paulo, 3 ed., 35 p., dez, 1998. Boletim técnico. Disponível em: <http://anda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/boletim_03.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2020.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. **World Agriculture towards 2030/2050: The 2013 Revision**, ESA Working. p. 12-03, FAO, Rome, 2013.
- AL-MALLAHI, A. A.; KATAOKA, T. Application of fibre sensor in grain drill to estimate seed flow under field operational conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 412–419, 2016.
- AL-MALLAHI, A. A.; KATAOKA, T. Estimation of mass flow of seeds using fibre sensor and multiple linear regression modelling. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, p. 116–122, 2013.
- ALTMANN, A.; ALONÇO, A. dos S.; BEDIN, P. R.; BONOTTO, G.J.; SILVEIRA, H. A. T.; DIAS, V. de O.; CARPES, D. P.; MONTEMEZZO, L. Determinação do ângulo de repouso de fertilizantes e sementes através da análise de imagens. In: Simpósio de ensino, pesquisa e extensão. 2010. Santa Maria, **Anais...**, Santa Maria: UNIFRA, 2010 CD-Rom.
- ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Indicadores**. 2018. Disponível em: <<http://anda.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 20 mai. 2019.
- ASABE. ASAE S341.3. **Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders**. St Joseph: ASABE Standards, p. 215-218, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de norma 04: 015. 06 – 004: **Semeadora de precisão: ensaio de laboratório - método de ensaio**. Rio de Janeiro, p. 7, 1994.
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo. Manole, p. 307, 2004.
- BICA, M. R. R., SOUSA, E. A. C. **Medição de vazão mássica para adubos sólidos em sistemas de adubação a taxas variáveis**. In: IV Seminário da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Unesp – Bauru. 2010.
- BONOTTO, G. J. **Desempenho de dosadores de fertilizantes de semeadoras-adubadoras em linhas**. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.
- BONOTTO, G. J.; ALONÇO, A. dos S.; BEDIN, P. R.; ALTMANN, A. S.; MOREIRA L; J.. Distribuição longitudinal de fertilizantes por dosadores de semeadoras-adubadoras em linhas. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, v. 21, n. 4, p. 368-378, jul./ago. 2013.
- CAMACHO-TAMAYO, J. H.; BARBOSA, A. M.; PÉREZ, N. M.; LEIVA, F. R.. RODRÍGUEZ, G.A. Operational characteristics of four metering systems for agricultural

fertilizes and amendments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 605-613, out/dez. 2009.

CARDINAL, K. M.; BELLÉ, M. P.; ALONÇO, A. dos S.; BONOTTO, G. J.; CARPES, D. P. **Determinação do tamanho de amostra para ensaio de regularidade de vazão de dosadores de fertilizante**. In: XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. Cuiabá, MT, 2011.

COELHO, J. L. D. Ensaio & certificação das máquinas para a semeadura. In: MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: FEALQ, p. 551-570.1996.

DI RAIMO, C. **Desenvolvimento e análise de um protótipo automatizado para dosagem pontual de fertilizantes sólidos em taxas variáveis**. 2011. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Agricultural production by countries**. Oct. 2018. . Disponível em: <<http://www.fao.org/statistics/en/>>. Acesso em: 15 mar. 2019.

FENG, J.F.; CHEN, C.Q.; ZHANG, Y.; SONG, Z.W.; DENG, A.X.; ZHENG, C.Y.; ZHANG, W.J. Impacts of cropping practices on yield-scaled greenhouse gas emissions from rice field in China: a meta-analysis. **Agric. Ecosyst. Environ.** v. 164, p. 220–228, 2013.

FERREIRA, M.F.P.; OLIVEIRA, A.; MACHADO, R. L. T.; REIS, A. V.; MACHADO, A. L. T. Desempenho de distribuidores de adubo tipo rosca sem fim por transbordo e por gravidade em função do nivelamento longitudinal do dosador. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, vol. 11, n. 1 e 2, p. 37-40, jan./dez.2007.

FERREIRA, M. F. P.; DIAS, V. de O.; OLIVEIRA, A.; ALONÇO, A. dos S.; BAUMHARDT, U. B. Uniformidade de vazão de fertilizantes por dosadores helicoidais em função do nivelamento longitudinal. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 18, n. 4, p. 297-304, jul./ago. 2010.

FRANCETTO, T. R.; DAGIOS, R. F.; LEINDECKER, J. A.; ALONÇO, A. dos S.; FERREIRA, M. F. Características dimensionais e ponderais das semeadoras-adubadoras de precisão no Brasil. **Tecno-Lógica**, v. 19, p. 18-24, 2015.

FRANCETTO, T. R.; DAGIOS, R. F.; FERREIRA M.F.; ALONÇO, A dos S. **Mecanismos dosadores de sementes e fertilizantes presentes nas semeadoras-adubadoras de precisão no Brasil**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 41. Londrina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, CD-ROM, jul., 2012.

FRANCK, C.J. **Modelagem matemática para dosadores de fertilizantes por delineamento composto central rotacional**. 2014. 156f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

FRANCK, C. J.; ALONÇO, A. dos S.; MACHADO, O. da C.; FRANCETTO, T. R.; CARPES, D. P; BELLÉ, M. P. Modelos estatísticos para seleção de dosadores helicoidais com diferentes dispositivos de descarga de fertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.5, p. 512–518, 2015.

GADANHA JÚNIOR, C. D.; MOLIN, J. P.; COELHO, J. L. D.; YAHN, C. H.; TOMIMORI, S. M. A. W. **Máquinas e Implementos Agrícolas do Brasil**. São Paulo: NSI/IPT E CIENTEC, 468 f. 1991.

GARCIA, A. P.; UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L.; RUSSO, E. **Caracterização de um mecanismo dosador helicoidal de fertilizantes sólidos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35. João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, ago, CD-ROM. 2006.

GARCIA, A.P. **Desenvolvimento de um sistema de controle eletro-mecânico para dosador de fertilizantes**. 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Electrically Driven Fertilizer Applicator Controlled By Fuzzy Logic. **Engenharia Agrícola**, v.34, n.3, p.510-522, 2014.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Auger-type granular fertilizer distributor: mathematical model and dynamic simulation. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.151-163, 2012.

GRISSE, R.; ALLEY, M.; THOMASON, W.; HOLSHOUSER, D.; ROBERSON, G. T. Precision farming tools - Variable-Rate Application (VRA). **VCE Publication**. p. 442-505, 2011.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 13.ed. Piracicaba: Nobel, 468p. 1990.

GULER, I. E. The effects of different distributor head types, air velocities and fertilizing rates on flow evenness for some fertilizers. **African Journal of Agricultural Research**. vol. 5, p. 2359-2369, set., 2010.

HAMID, A.; STUCHLY, S. S. Microwave Doppler-Effect Flow Monitor. **IEEE transactions on industrial electronics and control instrumentation**, v. ieci-22, n.2, p. 224-228, may, 1975.

ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. O uso de fertilizantes minerais e o meio ambiente. 2000. Disponível em: <<http://anda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/OUsodeFertilizantesMinerais.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

INTERNATIONAL FERTILIZER ASSOCIATION. **What are Fertilizers?** 2019. Disponível em: <<https://www.fertilizer.org/>>. Acesso em: 27 mar. 2019.

ISO 5690/2. **Equipment for distributing fertilizers – Test methods - Part 2: Fertilizer distributors in lines**. Switzerland, 1984.

KIM, J. Y.; YANG, S. H.; RHEE, J.Y. Fertiliser application performance of a variable-rate pneumatic granular applicator for rice production. **Biosystems Engineering**. Amsterdam, v. 100, n.4, p. 498-510, ago. 2008.

LASSEN, P.; BONOTTO, G. J.; RIST, G. P.; SILVEIRA, H. T. da ; BAUMHARDT, U. B.; RIES, B.; CARDINAL, K. M. **Determinação da vazão de um dosador de fertilizantes em função da velocidade de acionamento.** In: XIV Simpósio de ensino, pesquisa e extensão. SEPE, Unifra, Santa Maria, RS, nov. 2010.

LIU, Y.L.; ZHOU, Z.Q.; ZHANG, X. X.; XU, X.; CHEN, H.; XIONG, Z.Q. Net globalwarming potential and greenhouse gas intensity from the double rice systemwith integrated soil-crop system management: a three-year field study. **Atmos. Environ.** v. 116, p. 92–101, 2015.

MARTINS, M. M. **Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, 1999.

MILAN, M.; GADANHA JÚNIOR, C. D. **Ensaio & certificação de máquinas para aplicação de fertilizantes e corretivos.** In: Mialhe, L. G. (org.). Máquinas agrícolas: Ensaio & certificação. Piracicaba: Shekinah, p. 515-550, 1996.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Instrução normativa nº 46, de 22 de novembro de 2016. Regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura. **Diário Oficial da União**, 07 dez. 2016, Seção 1. 2016.

MOREIRA, L. J. B.; ALONÇO, A. dos S.; BONOTTO, G. J.; BELLÉ, M. P.; BEDIN, P. R.; ALTMANN, A. S. **BANFERTI II: Bancada para testes com dosadores de fertilizantes de semeadoras-adubadoras em linhas.** In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO E MÁQUINAS PRECISAS, 1. Não-Me-Toque: Cooperativa Agropecuária e Industrial – Cotrijal, set. 2011, CD-ROM.

MORENO, J. R. S.; RAIMO, C. D., CAVALCANTI, R. R. C.; MONTEZUMA, M. A.; SOUZA, E. A. C. Study of an electromechanical system for solid fertilizer variable rate planting. **African Journal of Agricultural.** vol. 11(3), pp. 159-165, 21 Janeiro, 2016.

MURRAY, J. R.; TULLBERG, J. N.; BASNET, B.B. **Planters and their Components: types, attributes, functional requirements, classification and description.** ACIAR Monograph nº 121. University of the Queensland, Australia, p. 178. 2006.

ONU, United Nations, Department of economic and social affairs The United Nations. **Population Division, Population Estimates and Projections Section**, 2012.

OSMOND, D.L.; HOAG, D.L.K.; LULOFF, A.E.; MEALS, D.W.; NEAS, K. Farmers use of nutrient management: lessons from watershed studies. **J. Environ.** Qual. 44 (2), p. 382–390, 2015.

PANG, L.; SHAO, Y.; GENG, C.; ZHONG, W.; LIU, G.; LIU, L.; TIAN, W.; Measurement of solid mass flow rate by a non-intrusive microwave method. **Powder Technology.** v. 323, p. 525-532, 2018.

PERNIRSCHKE, A.; PUENTES, M.; MAUNE, H.; SCHÜBLER, M; GAEBLER, A.; JAKOBY, R. **Microwave Mass Flow Meter for Pneumatic Conveyed Particulate Solids**. International Instrumentation and Measurement. Singapore, may. 2009.

PORTELLA, J. A.; BATISTA, D. G. Teste eletrônico. **Cultivar Máquinas**, Não Me Toque. n. 118, p.12-14. 2012.

REYES, J. R.; ESQUIVEL, W.; CIFUENTES, D.; ORTEGA, R. Field testing of an automatic control system for variable rate fertilizer application. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.113, p. 260–265, 2015.

REYNALDO, E. F. **Avaliação de mecanismos dosadores de fertilizantes sólidos tipo helicoidais em diferentes níveis de nivelamento longitudinal e transversal**. 2013. 81f. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Botucatu. Botucatu, 2013.

REYNALDO, E. F.; GAMERO, C. A. Avaliação de mecanismos dosadores de fertilizantes helicoidais em ângulo de nivelamento longitudinal e transversal. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.30, p.125-136. 2015.

RIBEIRO, A. H. B. **Sensor óptico de vazão mássica para fertilizante granular**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas – SP, Fev. 2017.

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, p. 59-78, 2000.

ROSSATO, F.T.; MACHADO, O. D. da C.; ALONÇO, A. dos S.; FRANCK, C. J.; FRANCETTO, T. R. Rendimento potencializado. **Cultivar Máquinas**, v. 122, p.10-13, set. 2012.

SANTOS, J. Q. Fertilização. **Fundamentos agroambientais da utilização dos adubos e corretivos**. Publindústria. Edições Técnicas. Porto, abr. 2015.

SERRANO, J.; PEÇA, J.; SILVA, J. M. SHAHIDIAN, S.. Aplicação de fertilizantes: tecnologia, eficiência energética e ambiente. **Rev. de Ciências Agrárias**. Lisboa. v. 37. n. 3, p. 270-279. 2014.

SCHNEIDER, P. A.; FEY, E.; ORLANDO, A. F.; PIVETTA, L. A.; FURLAN, F.; DALLABRIDA, W. R. **Distribuição de adubos de diferentes fórmulas em mecanismos dosadores de semeadoras-adubadoras**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 34. Canoas: ULBRA, jul. 2005.

SIQUEIRA, R. **Milho: Semeadoras-adubadoras para Sistema de plantio direto com qualidade**. In: XXVII CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO. 2008

SIQUEIRA, R.; CASÃO JUNIOR, R. **Trabalhador no cultivo de grãos e oleaginosas: Máquinas para manejo de coberturas e semeadura no sistema de plantio direto**. Curitiba: SENAR-PR, p. 88, 2004.

SILVEIRA, G. M. **As Máquinas para Plantar: aplicadores, distribuidoras, semeadoras, plantadoras e cultivadoras**. 1 ed., Rio de Janeiro: Globo, 1989.

STEWART, W. M.; DIBB, D. W.; JOHNSTON, A. E.; SMYTH, T. J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. **Agronomy Journal**. American Society of Agronomy, v. 97, n° 1, p. 1-6, jan./feb. 2005.

STUART, D.; SCHEWE, R.L.; MCDERMOTT, M. Reducing nitrogen fertilizer application as a climate change mitigation strategy: understanding farmer decision-making and potential barriers to change in the US. **Land Use Policy**. v. 36, p. 210–218, 2014.

SWISHER, D.; BORGELT, S.; SUDDUTH, K. Optical sensor for granular fertilizer flow rate measurement. Transactions of the ASAE, **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 45, n. 4, p. 881, 2002.

TOLA, E; KATAOKA, T.; BURCE, M.; OKAMOTO, H.; HATA, S. Granular fertiliser application rate control system with integrated output volume measurement. **Biosystems Engineering**, Amsterdam. v. 101, n. 4, p. 411-416, 2008.

YAN, Y. Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines. **Measurement Science and Technology**. IOP Publishing, v. 7, n. 12, p. 1687, 1996.

YUAN, J.; LIU, C. L.; LI, Y. M.; ZENG, Q.; ZHA, X. F. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.70, p.33-41, 2010.

ZHENG, Y.; LIU Q. Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids. **Measurement**. v. 44, n. 4, p. 589-604, 2011.

ZOU, J.; LIU, C.; WANG, H.; WU, Z. P. Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods. **Powder Technology**. v. 360, p. 112-119, 2020.