

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SISTEMAS DE CONTROLE *FUZZY* PARA DOSADORES
HELICOIDAIS DE FERTILIZANTES COM ACIONAMENTO
ELÉTRICO**

ANGEL PONTIN GARCIA

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SISTEMAS DE CONTROLE *FUZZY* PARA DOSADORES
HELICOIDAIS DE FERTILIZANTES COM ACIONAMENTO
ELÉTRICO**

Tese de Doutorado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de Doutor
em Engenharia Agrícola, na área de
concentração em Máquinas Agrícolas.

ANGEL PONTIN GARCIA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

G165s Garcia, Angel Pontin
Sistemas de controle fuzzy para dosadores helicoidais
de fertilizantes com acionamento elétrico / Angel Pontin
Garcia. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Nelson Luis Cappelli.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Máquinas agrícolas. 2. Semeadeira-adubadeira. 3.
Sistemas de controle. I. Cappelli, Nelson Luis. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Fuzzy control systems for auger-type fertilizer distributor
with electric drive

Palavras-chave em Inglês: Agricultural machines, Seed-fertilizer drill, Control
systems

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: José Paulo Molin, Guilherme Bezzon, Paulo Sérgio
Graziano Magalhães, Claudio Kiyoshi Umezu

Data da defesa: 08/02/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

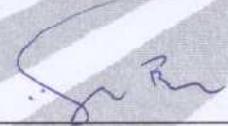
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Angel Pontin Garcia**, aprovada pela Comissão Julgadora em 08 de fevereiro de 2011, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



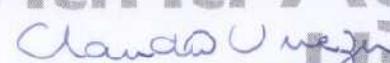
Prof. Dr. José Paulo Molin - Membro Titular
Esalq/USP



Prof. Dr. Guilherme Bezzon - Membro Titular
Metrocamp



Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães - Membro Titular
Feagri/Unicamp



Dr. Cláudio Kiyoshi Umezu - Membro Titular
Feagri/Unicamp

Dedicatória

Ao nonno Giorgio Pontin, à nonna Norina Zasio Pontin, ao vô Andrés Garcia Diez (in memoriam) e à vó Galdiosa Carrera Aires as pessoas mais especiais que conheci.

Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram, não só para a realização deste trabalho em especial, mas sim, da construção de todo o processo que me trouxe até aqui.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. **NELSON LUIS CAPPELLI**, pela oportunidade, confiança e amizade em mais esta etapa de minha vida;

Ao Prof. Dr. **CLÁUDIO KIYOSHI UMEZU**, pelos ensinamentos e constante colaboração em todas as partes deste trabalho;

Ao companheiro e grande amigo Ms. **EDISON RUSSO** pelo constante companheirismo e ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

A minha esposa **GABI** pelo amor e paciência. A **MARINA**, minha filha, pela “ajuda” nos experimentos. A minha **FAMÍLIA** que sempre me apoiou nos meus estudos;

Aos amigos e colaboradores, membros da equipe de pesquisadores do Laboratório de Instrumentação e Controle: **ALEXANDRE TIZZEI, CARLOS MENEGHETTI, CARLOS ROMANINI, EDUARDO NUNES, FRANCISCO MANUEL, HONORATO PACCO, LEONARDO ALVARADO, RAFAEL DE MATOS;**

Aos **professores da FEAGRI - UNICAMP**, tanto na graduação como na pós-graduação, por compartilhar comigo seu conhecimento;

Aos **FUNCIONÁRIOS da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP**, sempre prontos para colaborar com todos os alunos desta instituição. Em especial ao **LEANDRO MORAES** e **ANDRÉ APARECIDO NOGUEIRA;**

Finalmente, agradeço à **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, por ter financiado meus estudos de doutorado.

“Com essa agricultura intensa os senhores estão simplesmente roubando ao solo. o seu fósforo... – os senhores julgam que essa perda pode ser compensada por meio das rochas fosfatadas. Mas que é que vão fazer quando se exaurirem os depósitos? ... Os senhores julgam que estamos em progresso porque vivemos do nosso capital. Fosfatos, carvão, petróleo, salitre – esbanja-se tudo!...

...Os senhores estão transformando o equilíbrio. Ao cabo, a natureza o há de restabelecer. E o progresso será muito desagradável...”

(Aldous Huxley, 1928, p.68)

RESUMO

A operação de aplicação de fertilizante é um fator relevante na composição do custo de produção agrícola no Brasil. A desuniformidade da taxa de aplicação resulta na perda de produtividade da cultura. Além disso, o excesso de fertilizantes implica num gasto desnecessário de produto e pode ser prejudicial às plantas, bem como ao meio ambiente. Por outro lado, sua falta pode resultar em decréscimo na produtividade devido à deficiência de nutrientes. Verifica-se que há um ganho na qualidade da aplicação quando se incrementa novas tecnologias aos mecanismos dosadores, o que justifica pesquisas de novos equipamentos de dosagem de insumos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de controle *fuzzy*, em malha fechada, da taxa de aplicação de fertilizante. Para isso se desenvolveu um modelo matemático que representa o comportamento do mecanismo dosador, um sensor para medir o fluxo de fertilizante e, por fim, o projeto de um controlador do tipo *fuzzy* para controle da taxa de aplicação de fertilizante. A resposta do modelo matemático proposto foi a vazão mássica de fertilizante aplicado, simulado por meio do programa MATLAB. O modelo foi capaz de gerar valores significativamente próximos aos reais. O coeficiente de ajuste variou entre 89,9 e 95,4 %. O protótipo do sensor de medição de fluxo de massa de fertilizante granular conta com um duto vazado na saída do dosador de fertilizante. No interior deste tubo há um êmbolo, com uma célula de carga, que tem a função de medir a força exercida sobre o mesmo. Em função da posição do êmbolo e da força obtida pela célula de carga, pode-se definir a quantidade de fertilizante aplicado. O sensor se mostrou adequado para a aplicação proposta. O controlador foi desenvolvido na ferramenta “*Fuzzy Logic Toolbox*” do programa MATLAB. A variável manipulada foi a tensão de excitação do motor elétrico e as variáveis de entrada foram: o erro e o desvio do erro da taxa de aplicação atual e a taxa requerida, além da velocidade e do desvio da velocidade de deslocamento do equipamento. Pelas simulações observou-se que o sistema de controle foi capaz de corrigir a taxa de aplicação de maneira adequada. Posteriormente, com os parâmetros fornecidos pelas simulações, foi implementado o sistema de controle na bancada de testes, e se observou que o tempo médio de resposta foi de 0,32 s e o erro em regime médio foi de 3,98 %. O sistema de controle foi apropriado para a mudanças no ponto de operação bem como reduzir a característica oscilatória do mecanismo dosador helicoidal.

ABSTRACT

The operation of fertilizer application is an important factor in the composition of production costs in Brazil. The uneven application rate results in the loss of productivity when harvesting. Furthermore, the excess of fertilizer implies an unnecessary waste of product and may be harmful to plants as well as to the environment. On the other hand, its lack may result in decreased productivity due to nutrient deficiency. It appears that there is a gain in quality with increasing application of new technologies to the meter mechanism, justifying research for new equipments for fertilizer application. The aim of this study was to develop an advanced control system in closed loop rate fertilizer application. To this end, it was developed a mathematical model that represents the behavior of the metering system, a sensor for measuring the flow of fertilizer and, finally, the design of a fuzzy type controller to control the rate of fertilizer application. The response of the mathematical model was the mass flow of fertilizer applied, simulated using the program MatLab. The results were compared with experimental data. The model was able to generate significantly amount close to the actual values. The adjustment coefficient ranged between 89.9 and 95.4 %. The prototype sensor for measuring mass flow of granular fertilizer has a leaking pipe at the outlet of the feeder of fertilizer. Inside this tube is a piston with a load cell, which serves to measure the force exerted on it. Depending on the position of the piston and the force obtained by the load cell, you can set the amount of fertilizer applied. The sensor was has shown adequate for the proposed application. The controller was developed in the tool "Fuzzy Logic Toolbox" of MATLAB program. The manipulated variable was the voltage applied to the electric motor housing and the input variables were the error and deviation of the error rate of current application and required rate, beyond the speed and the deviation of the velocity of the equipment. For the simulations showed that the control system was able to fix the rate of application properly. Later, with the parameters provided by the simulations, the system was implemented to control the test bench.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Ilustração de uma semeadora-adubadora; (a) disco de corte; (b) reservatório; (c) dosador de fertilizante; (d) duto de descarga. (adaptado de Kepner et al., 1982)</i>	6
<i>Figura 2. Esquema genérico de um sistema de controle de aplicação a taxas variadas (adaptado de Scott et al., 2002).</i>	11
<i>Figura 3: Diagrama esquemático do sistema de acionamento dos dosadores (UMEZU, 2003)</i>	12
<i>Figura 4: Comportamento dinâmico do sistema para entradas em degraus de velocidade angular do eixo de acionamento (UMEZU e CAPPELLI, 2006)</i>	12
<i>Figura 5. Aplicador à lanço de fertilizante a taxas variadas para cultura de citrus. (a) Equipamento em operação; (b) Esquema do mecanismo dosador (adaptado de Cugati et al., 2006).</i>	13
<i>Figura 6. Diagrama de blocos do sistema de controle de rotação do eixo do mecanismo dosador de fertilizante (adaptado de YU et al., 2006).</i>	14
<i>Figura 7. Esquema da bancada de testes para medir a taxa de aplicação do dosador de fertilizante. (a) bancada; (b) coletores (adaptado de YU et al., 2006).</i>	14
<i>Figura 8: Diagrama de blocos do sistema de controle da taxa de aplicação (GARCIA, 2007)</i>	15
<i>Figura 9: Sistema de controle em malha aberta para a aplicação de fertilizante (GARCIA, 2007)</i>	15
<i>Figura 10: Sistema de controle do protótipo de um dosador de fertilizante à lanço com sensores de fotocélulas (Fonte: MILLER et al., 2004).</i>	16
<i>Figura 11: Sistema de controle do protótipo de um dosador de fertilizante a lanço com sensores ultrassônicos (Fonte: MILLER et al., 2004)</i>	16
<i>Figura 12. Diagrama esquemático do sistema de controle de aplicação de fertilizante (adaptado de Tola, 2008).</i>	17
<i>Figura 13: Diagrama de blocos do Módulo de Interface (RUSSO, 2005)</i>	18
<i>Figura 14. Gráfico de descarga de fertilizante pelo tempo. Linha tracejada é o setpoint de operação (adaptado de Krishman et al. 2006)</i>	19
<i>Figura 15. Distribuição de fertilizante em função da marcha de operação (adaptado de Werner et al., 2007)</i>	20
<i>Figura 16. Desenho do protótipo do dosador de fertilizante (adaptado de Kim et al., 2008)</i>	20
<i>Figura 17. Acurácia da taxa de aplicação para velocidade de $0,33 \text{ m.s}^{-1}$ (-▲-) e $0,66 \text{ m.s}^{-1}$ (-■-). (adaptado de Kim et al. 2008)</i>	21
<i>Figura 18. Diagrama de blocos no programa MatLab – SIMULINK, para controle do motor de corrente contínua (fonte: Pravadalioglu, 2005)</i>	22
<i>Figura 19: Medidor de fluxo de massa (Harris et al., 1997)</i>	24

Figura 20. Diagrama de blocos do sensor de fluxo; S sensor acústico, A amplificador, F filtro, RMS medidor de amplitude do sinal e C sinal de partida do sistema. (a) Sistema com um sensor; (b) Sistema com sensores cruzados (adaptado de BENES e ZEHNULA, 2000)	24
Figura 21. (a) Gráfico da correlação entre fluxo de massa e sinal de saída do sensor; (b) correlação entre a referência de vazão com os valores obtidos experimentalmente (BENES e ZEHNULA, 2000)	25
Figura 22. Sensor óptico de fluxo de fertilizante granular. (a) esquema do sensor; (b) resultados obtidos (adaptado de SWISHER, 2002)	25
Figura 23. Esquema experimental do sensor de fluxo (adaptado de GRIFT e CRESPI, 2008).	26
Figura 24. Gráfico da relação do número de conjunto de partículas pelo fluxo (adaptado de GRIFT e CRESPI, 2008).	26
Figura 25: Bancada de teste para utilizando uma câmera de alta velocidade (adaptado de KARAYEL et al., 2005)	27
Figura 26. Diagrama de blocos do modelo proposto	33
Figura 27. Diagrama esquemático do sistema de medição da vazão mássica	37
Figura 28. Taxa de aplicação de fertilizante em função do tempo em função do tempo (a) $2,72 \text{ rad s}^{-1}$ (26 min^{-1}); (b) $5,23 \text{ rad s}^{-1}$ (50 min^{-1}); (c) $7,33 \text{ rad s}^{-1}$ (70 min^{-1}); e (d) $14,66 \text{ rad s}^{-1}$ (140 min^{-1})	38
Figura 29. Fluxograma do programa de simulação do modelo proposto	39
Figura 30. Comparação entre a simulação do modelo proposto e os dados experimentais; (a) velocidade angular de $2,72 \text{ rad s}^{-1}$ (26 min^{-1}); (b) rotação de $5,73 \text{ rad s}^{-1}$ (50 min^{-1}); (c) rotação de $7,33 \text{ rad s}^{-1}$ (70 min^{-1}); e (d) rotação de $14,66 \text{ rad s}^{-1}$ (140 min^{-1})	40
Figura 31. Resultados da simulação do modelo proposto variando-se a eficiência do dosador helicoidal (a) variação da taxa de aplicação ao longo do tempo; (b) coeficiente de variação em função da eficiência do dosador	41
Figura 32: Diagrama de blocos da simulação do sistema em malha aberta no programa MATLAB-SIMULINK	42
Figura 33. Simulação da taxa de aplicação em função do tempo para tensão de armadura constantes no ciclo de operação do acionamento do motor	44
Figura 34. Simulação do conjunto motor elétrico – dosador para um sinal de acionamento senoidal. (a) CV em função da amplitude da velocidade angular de acionamento; (b) CV em função da defasagem do sinal de atuação	45
Figura 35 Simulação da taxa de aplicação em função do tempo para ϑ constante e ϑ variável no ciclo de operação	46
Figura 36. Esquema do mecanismo do sensor de medição de fluxo de fertilizante granular;(a) vista lateral;(b) vista em perspectiva; (i) Motor de passo; (ii) Êmbolo; (iii) Célula de carga; (iv) Câmera de descarga; (v) eixo de posicionamento	53

<i>Figura 37. (a) Montagem do sensor de fluxo; (b) Detalhe do embolo e da célula de carga do sensor de fluxo de fertilizante; (i) reservatório; (ii) dosador; (iii) motor elétrico; (iv) sensor; (v) êmbolo; (vi) célula de carga</i>	53
<i>Figura 38. Detalhe do sensor de fluxo de fertilizante: (a) motor de passo; (b) driver de acionamento do motor de passo; (c) rosca de deslocamento linear.</i>	54
<i>Figura 39. Sistema de aquisição de dados e controle da banca de testes</i>	55
<i>Figura 40. Vazão mássica média em função da tensão média da leitura da célula de carga</i>	57
<i>Figura 41. Análise espectral de frequência da vazão mássica para diversas rotações do eixo do dosador</i>	58
<i>Figura 42. Frequência dominante da vazão mássica instantânea em função da rotação do eixo de acionamento do dosador</i>	59
<i>Figura 43. Tensão média observada em função da vazão</i>	59
<i>Figura 44. Diagrama de blocos do sistema de controle proposto</i>	65
<i>Figura 45. Sistema de controle da taxa de aplicação de fertilizante proposto</i>	70
<i>Figura 46. Esquema de sinal de excitação do sistema para avaliar sistemas de controle para ATV (adaptado de SCOTT et al., 2002).</i>	72
<i>Figura 47. Programa do sistema de controle fuzzy proposto</i>	73
<i>Figura 48. Esquema da interface do sistema de controle e da bancada de testes</i>	73
<i>Figura 49. Funções de pertinência para as variáveis de entrada, erro e desvio do erro da taxa de aplicação; (a) erro da taxa de aplicação; (b) variação do erro da taxa de aplicação</i>	74
<i>Figura 50. Funções de pertinência para as variáveis de entrada, erro e desvio do erro da taxa de aplicação; (a) velocidade de deslocamento; (b) variação da velocidade de deslocamento</i>	74
<i>Figura 51. Funções de pertinência para variável de saída, atuação no motor elétrico</i>	74
<i>Figura 52. Superfície gerada pelo toolbox fuzzy do MATLAB para o controle da taxa de aplicação. (a) Superfície de atuação em função do erro e variação do erro da taxa de aplicação na atuação; (b) Superfície de atuação em função do erro e variação do erro da velocidade na atuação</i>	76
<i>Figura 53: Simulação do sistema composto dosador e motor elétrico em malha aberta</i>	76
<i>Figura 54: Diagrama de blocos (MatLab – Simulink) do sistema de controle fuzzy</i>	77
<i>Figura 55: Diagrama de blocos (MatLab – Simulink) do subsistema de controle e de atuação do dosador de fertilizante</i>	77
<i>Figura 56: Diagrama de blocos (MatLab – Simulink) do subsistema do modelo do motor elétrico</i>	78
<i>Figura 57: Diagrama de blocos (MatLab – SIMULINK) do subsistema do modelo do dosador de fertilizante</i>	78
<i>Figura 58. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante</i>	79
<i>Figura 59. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante com variação de velocidade</i>	80
<i>Figura 60. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante com múltiplos degraus na taxa de aplicação</i>	81

Figura 61. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante com múltiplos degraus na taxa de aplicação e variação na velocidade de deslocamento _____ 82

Figura 62. Gráfico da taxa de aplicação fornecida pelo dosador de fertilizante com sistema de controle proposto
_____ 84

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Taxa de aplicação de fertilizante, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, em função do nível de fertilizante no reservatório e velocidade de deslocamento do equipamento.</i>	9
<i>Tabela 2. Classificação de controladores convencionais e avançados (fonte: COELHO et al., 2003)</i>	10
<i>Tabela 3. Resultados experimentais médios em função da velocidade angular do helicóide em rad s^{-1} entre parênteses as velocidades angulares em rotação por minuto.</i>	38
<i>Tabela 4. Propriedades do material utilizado nos experimentos, entre parênteses desvio padrão</i>	56
<i>Tabela 5. Análise da variância para o ajuste do modelo linear, pelo método de mínimos quadrados</i>	57
<i>Tabela 6: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo</i>	58
<i>Tabela 7. Dados obtidos do dosador de fertilizante Fertisystem – Agrimaq e dados utilizados na simulação do dosador</i>	66
<i>Tabela 8: Parâmetros obtidos experimentalmente do modelo matemático do motor de corrente contínua</i>	68
<i>Tabela 9. Regras de inferências para o erro e derivada do erro da taxa de aplicação de fertilizante. Onde as funções de pertinência são definidas como negativo forte (NF), negativo médio (Nm), Nulo (N), positivo médio (Pm) e positivo forte (PF) e a atuação é definida como: negativa forte (Pf), negativa média (Pm), negativa fraca (Pfr), nula (N), positiva fraca (Pfr), positiva média (Pm), positiva forte (Pf).</i>	75
<i>Tabela 10. Regras de inferências para a velocidade e a variação da velocidade de deslocamento do equipamento. Onde as funções de pertinência são definidas como negativo forte (NF), negativo médio (Nm), Nulo (N), positivo médio (Pm) e positivo forte (PF) e a atuação é definida como: negativa forte (Pf), negativa média (Pm), negativa fraca (Pfr), nula (N), positiva fraca (Pfr), positiva média (Pm), positiva forte (Pf).</i>	75
<i>Tabela 11. Coeficientes do controlador fuzzy</i>	78
<i>Tabela 12. Resultados da simulação do dosador de fertilizante com sistema de controle proposto.</i>	81
<i>Tabela 13. Resultados da simulação do dosador de fertilizante com sistema de controle proposto com distúrbios na velocidade de deslocamento do equipamento.</i>	83
<i>Tabela 14. Resultados da simulação do dosador de fertilizante com sistema de controle proposto com distúrbios na velocidade de deslocamento do equipamento.</i>	84
<i>Tabela 15. Parâmetros avaliados no sistema de controle proposto</i>	85

LISTA DE SIMBOLOS

A é a área do helicóide [m^2];

B é o atrito viscoso do motor [$N\ m\ s\ rad^{-1}$]

d é o diâmetro médio dos grânulos de fertilizante [mm].

$de(k)$ é o desvio do erro da taxa de aplicação de fertilizante;

$e(k)$ é o erro entre o sinal de entrada e o sinal medido

e é o espaçamento entre linhas [m];

f é o fator de enchimento [%];

$G_M(s)$ é a função de transferência do motor elétrico;

i_A é a corrente de armadura [A];

J é o momento de inércia combinado da armadura do motor e da carga [$kg.m^2$];

K faixa de variação da taxa de aplicação de fertilizante;

K_c é o ganho proporcional da saída do sinal de atuação;

K_E é a constante da força contra-eletromotriz [$V\ s\ rad^{-1}$];

K_i é o ganho integral da saída do sinal de atuação;

L é a indutância da armadura do motor elétrico [H];

l_m é a mínima largura do duto de descarga [mm];

m_a é a quantidade aplicada pelo dosador [$kg\ ha^{-1}$];

\dot{m}_i é a vazão mássica instantânea de fertilizante [$kg\ s^{-1}$]

\dot{m}_m é a vazão mássica média de fertilizante [$kg\ s^{-1}$];

\dot{m}_r é a vazão mássica média de fertilizante medida [$kg\ s^{-1}$];

p é o passo do helicóide do dosador de fertilizante [m];

r é o raio interno do helicóide do dosador de fertilizante [m].

R é o raio externo do helicóide do dosador de fertilizante [m];

r_a e r_b são os raios das engrenagens motora e movida do dosador de fertilizante [mm].

R_a é a resistência de armadura do motor elétrico [Ω]

t é o tempo [s];

$u(k)$ é o sinal de atuação do controlador *fuzzy*;

$U(s)$ é a atuação no processo;

v é a velocidade de deslocamento do equipamento [$m\ s^{-1}$];

v_A é a tensão aplicada no circuito da armadura do motor elétrico [V];

v_g é a força contra-eletromotriz gerada pelo motor elétrico [V];

$y(k)$ é o sinal medido pelo sensor de fluxo de fertilizante [$kg\ ha^{-1}$];

y_r é o sinal de entrada de referência do controlador *fuzzy* [$kg\ ha^{-1}$];

η é a eficiência de transporte [%];

Θ_a e Θ_b são a velocidade angular do eixo de entrada e saída, repectivamente [$rad\ s^{-1}$];

ρ é a densidade do fertilizante [$kg\ m^{-3}$];

LISTA DE ABREVIATURAS

ATV - Aplicação a Taxas Variadas;

ASABE - Associação Americana de Engenharia Agrícola e Biológica (do inglês: *American Society of Agricultural and Biological Engineers*);

DC - Corrente Contínua (do inglês: *Direct Current*);

DGPS - Sistema de Posicionamento Global com Correção Diferencial (do inglês: *Differential Global Positioning System*);

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Agricultura e Pecuária;

FEBRAPDP - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha;

IBGE - Instituto Brasileiro Geografia e estatística;

IHM - Interface Homem Máquina;

NPK - Nitrogênio, Fósforo e Potássio;

PID - Proporcional, Integral e Derivativo;

PWM - Modulação por Largura de Pulso (do inglês: *Pulse-width modulation*);

RMS - Raiz Média ao Quadrado ;

SIG - Sistema de Informação Geo-Referenciada;

SPD - Sistema de Plantio Direto;

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SIMBOLOS	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS	XVI
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 HISTÓRICO E CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DE DOSADORES DE FERTILIZANTE NA ÁREA AGRÍCOLA	5
2.2 CARACTERIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO	6
2.2.1 TIPOS DE MECANISMOS DISTRIBUIDORES DE FERTILIZANTE	6
2.3 MECANISMO DOSADOR DE FERTILIZANTE HELICOIDAL	7
2.3.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE	7
2.3.1.1 Velocidade de deslocamento do equipamento	7
2.3.1.2 Tipo de fertilizante	8
2.3.1.3 Nível do reservatório	8
2.4 SISTEMAS DE CONTROLE	9
2.4.1 PROJETOS DE EQUIPAMENTOS ELETRONICAMENTE CONTROLADOS	10
2.4.1.1 Sistemas de controle <i>Fuzzy</i>	22
2.4.2 SENSORES	23

<u>CAPÍTULO 3. DOSADOR HELICOIDAL DE FERTILIZANTE GRANULAR: MODELO E SIMULAÇÃO</u>	
DINÂMICA	28
RESUMO	28
ABSTRACT	29
3.1 INTRODUÇÃO	30
3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO	33
3.3 MODELO MATEMÁTICO	34
3.3.1 VALIDAÇÃO E SIMULAÇÃO	36
3.3.2 SIMULAÇÃO DO CONJUNTO MOTOR-DOSADOR	42
3.4 CONCLUSÕES	46
3.5 BIBLIOGRAFIA	47
<u>CAPÍTULO 4. SENSOR DE DESUNIFORMIDADE DE FLUXO DE FERTILIZANTE GRANULAR</u>	50
RESUMO	50
ABSTRACT	50
4.1 INTRODUÇÃO	51
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	52
4.2.1 PROTÓTIPO DO SENSOR DE FLUXO	53
4.2.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	54
4.2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	55
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.4 CONCLUSÕES	60
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
<u>CAPÍTULO 5. CONTROLE FUZZY DE UM DOSADOR DE FERTILIZANTES COM ACIONAMENTO</u>	
ELÉTRICO	63
RESUMO	63
ABSTRACT	63

5.1	INTRODUÇÃO	64
5.2	CONSTRUÇÃO DOS MODELOS E ESTRATÉGIA DE CONTROLE	65
5.2.1	ESTRATÉGIA DE CONTROLE	69
5.2.2	SIMULAÇÕES	70
5.2.3	AVALIAÇÃO	71
5.2.4	TESTE OPERACIONAL	72
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
5.3.1	SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	79
5.3.2	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	83
5.4	CONCLUSÕES	85
5.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
CAPÍTULO 6.	CONCLUSÕES GERAIS	88
CAPÍTULO 7.	BIBLIOGRAFIA	89

Capítulo 1. Introdução

A utilização de semeadoras-adubadoras no Brasil foi impulsionada com o avanço do Sistema de Plantio Direto (SPD) no país nos anos 1990. Segundo a FEBRAPDP¹ (2010), a área cultivada no SPD em território nacional na safra 1990/1991 era de 1 Mha passando, na safra 2005/2006, para aproximadamente 25,5 Mha, cerca de 55% das áreas de lavouras temporárias do país (IBGE², 2010).

A produção agrícola, em escala comercial, depende da reposição de nutrientes do solo. Para isso se faz necessário a utilização de fertilizantes para repor ou melhorar a fertilidade do solo para que se obtenha uma produtividade economicamente viável. Contudo, tal operação é um fator relevante no custo total de produção. Barbosa Neto (2008) verificou que o gasto com fertilizante representa cerca de 35 % do custo de produção de soja no estado de Mato Grosso, ou aproximadamente 37 % do custo de produção do milho produzido no Paraná. Além disso, o país produz somente parte do fertilizante que utiliza, aproximadamente 8,8 Mton, e importa cerca de 15,4 Mton (64 % do consumo nacional de fertilizantes) o que implica num déficit na balança comercial neste item (ANDA³, 2011).

A falta de qualidade na aplicação de fertilizantes afeta negativamente a produtividade agrícola. Em um estudo realizado por Sogaard e Kierkegaard (1994), verificou-se que a desuniformidade da taxa de aplicação de Nitrogênio resulta na perda de produtividade da cultura. Worrell et al. (1994) verificaram que boas práticas de utilização de equipamentos dosadores de fertilizante podem provocar uma economia de 41 % de material utilizado. Segundo Godwin et al. (2003), pode-se reduzir em até 20 % a taxa de aplicação de fertilizantes em comparação ao sistema convencional de aplicação. Já Lan et al. (2008) verificaram que tais práticas provocam uma redução de aproximadamente 30 %. Além disso, o excesso na aplicação de fertilizantes pode ser prejudicial às plantas e ao meio ambiente, causando o gasto

¹ FEBRAPDP - Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha

² IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

³ ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos

desnecessário de produto. Já sua falta, pode resultar em decréscimo na produtividade devido à deficiência de nutrientes para as plantas (COELHO, 1996).

Tendo em vista que a qualidade de aplicação de insumos agrícolas é um parâmetro relevante na produtividade da cultura e que as máquinas atuais aplicam o fertilizante com um coeficiente de variação de 12% (CASÃO JÚNIOR, 2000), se torna necessário, conforme Reis e Forcellin (2006), o desenvolvimento de equipamentos mais precisos para a aplicação, e que atendam as necessidades dos clientes finais (AREND et al., 2005). Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas à agricultura pode permitir maior precisão, flexibilidade, confiabilidade e eficácia às diferentes etapas da produção. Para isso é essencial o aperfeiçoamento das máquinas e equipamentos utilizados, que devem produzir cada vez mais com o mínimo de recursos desperdiçados (SCARLETT, 2001).

Neste sentido diversos trabalhos buscam desenvolver ou adaptar novas tecnologias aos equipamentos de aplicação existentes. Umezu e Cappelli (2006) projetaram um sistema de controle de rotação um dosador de fertilizante helicoidal. Este controlador mostrou-se capaz de atuar no sistema modificando a taxa de aplicação de forma mais precisa que o sistema convencional. Cugatti et al. (2006) projetaram um sistema de controle e atuação no sistema hidráulico de um mecanismo de aplicação a lança de fertilizante sólido a taxas variáveis. Em ambos os casos os autores também buscaram adaptação de seus equipamentos à Agricultura de Precisão (AP), isto é, desenvolveram equipamentos capazes de atuar de maneira específica em cada local da área de atuação.

Pesquisas apontam que, sistemas de aplicação de insumos que possuem sistemas de controle atuam de maneira precisa, reduzem a quantidade de produto aplicado e incrementam a produtividade. Verifica-se que há um ganho da qualidade de aplicação quando são incrementadas novas tecnologias aos mecanismos dosadores, assim justifica-se a pesquisa em novos equipamentos de dosagem de fertilizantes. Diante disso, a hipótese deste trabalho foi que estratégias de controle avançadas podem melhorar o desempenho de um dosador de fertilizante utilizado para Aplicação a Taxa Variada (ATV) e reduzir ou eliminar as características oscilatórias do dosador helicoidal, quando associadas a um sistema de acionamento elétrico, sem a necessidade de alterações no projeto mecânico.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de controle avançado, em malha fechada, da taxa de aplicação de fertilizante. Para atingir tal objetivo este trabalho foi dividido

em capítulos para melhor compreensão das partes do projeto. Este capítulo é uma introdução do tema abordado na tese, bem como a justificativa da escolha do assunto. Já o capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica que serviu de suporte para a pesquisa realizada.

Os capítulos seguintes, 3, 4 e 5 são referentes aos trabalhos específicos realizados. O capítulo 3 mostra o desenvolvimento de um modelo matemático para o dosador de fertilizante helicoidal, sendo este o primeiro passo para o desenvolvimento de um sistema de controle capaz de reduzir a variação da taxa de aplicação, que será abordado no capítulo 5. Já o capítulo 4 descreve o desenvolvimento de um sensor de fluxo de fertilizante que é indispensável na implementação e validação do sistema de controle proposto. Por fim, o capítulo 6 apresenta a conclusão geral do trabalho e o capítulo 7, a bibliografia utilizada.

Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados trabalhos que nortearam os rumos desta pesquisa. Estes se mostraram de grande relevância para o desenvolvimento desta tese, além de mostrar possíveis caminhos a serem percorridos.

Primeiramente, neste capítulo, mostrar-se-á o estado atual dos equipamentos de semeadura e fertilização. Posteriormente, serão abordados os problemas pertinentes no processo e quais as possíveis tecnologias que podem ser implementadas neste projeto.

Por último serão apresentadas soluções pertinentes encontradas, que puderam auxiliar o desenvolvimento do projeto. Tais soluções não ficaram restritas as encontradas em projetos de máquinas agrícolas, mas sim em novas tecnologias que possam ser adaptadas e utilizadas no setor. Com isso, ao fim deste capítulo espera-se obter o embasamento teórico e técnico sobre o assunto, a fim de, a partir daí, construir um novo conhecimento à área em estudo.

2.1 Histórico e caracterização do setor de dosadores de fertilizante na área agrícola

No biênio 2005/06 a área cultivada utilizando-se o SPD chegou a 25,5 Mha no Brasil, que representa cerca de 55 % da área cultivada no país (FEBRAPDP, 2010; IBGE, 2010). Contudo, até a década de 1990, o SPD foi muito pouco utilizado no país, devido principalmente a duas razões que frearam esta expansão: alto custo dos herbicidas e a falta de máquinas de plantio direto na palha.

O desenvolvimento de equipamentos específicos para o SPD se dá principalmente no início da década de 1990. Estas máquinas possuíam na linha de plantio uma unidade semeadora, componentes de ataque ao solo, disco de corte e unidade de aplicação de fertilizante.

Casão Junior e Araújo (2008) fizeram um levantamento do início da utilização do SPD e da adaptação das máquinas a este sistema. No fim da década de 1970 se iniciou o uso de tais equipamentos no Brasil com a importação das primeiras máquinas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Tais semeadoras-adubadoras se tornaram a base para projetos de empresas nacionais que passaram a desenvolver equipamentos na área. No início da década de 1980 foi desenvolvida pela empresa Semeato a primeira semeadora-adubadora do país. Já no início dos anos 1990 foi introduzido o sistema dosador de rosca-sem-fim para a aplicação de fertilizante pela empresa Jumil. A partir dos anos 1990, com o avanço do SPD para o cerrado brasileiro, houve uma grande expansão do uso de semeadoras-adubadoras. Contudo, tal avanço se deu principalmente nos elementos de interação com o solo, sendo que os mecanismos de dosagem sofreram poucas adaptações do conceito original do projeto.

2.2 Caracterização do equipamento

Balastreire (1987) observou que existiam diversas formas de classificação de semeadoras e de aplicação de fertilizantes. Estes tipos de classificação foram amplamente divulgados em diversos tipos de publicações, como em Kepner et al. (1982), Balastreire (1987), Coelho (1996), Silva (2003), Casão Junior e Araújo (2007). Devido a isso, nos subitens a seguir serão limitados a citação dos tipos de mecanismos mais utilizados. A Figura 1 mostra, em corte, um sistema de uma semeadora-adubadora.

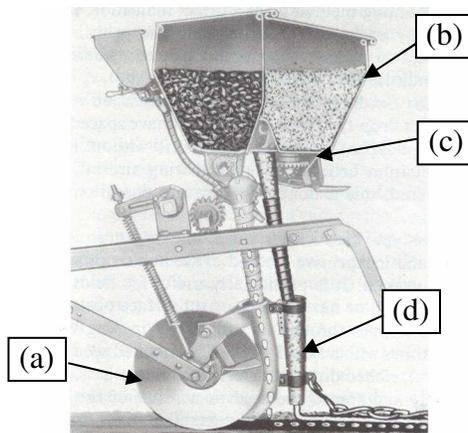


Figura 1: Ilustração de uma semeadora-adubadora; (a) disco de corte; (b) reservatório; (c) dosador de fertilizante; (d) duto de descarga. (adaptado de Kepner et al., 1982)

2.2.1 Tipos de mecanismos distribuidores de fertilizante

Dentro da classificação proposta por Balastreire (1987) as máquinas dosadoras de adubo sólido podem ser enquadradas em dois grandes grupos, de acordo com a forma que realizam a aplicação:

- a) Adubadoras ou distribuidoras a lança;
- b) Adubadoras de fileiras.

Por esta classificação o dosador de fertilizante helicoidal, que foi o objeto de estudo deste trabalho, se enquadra em adubadoras de fileiras.

2.3 Mecanismo dosador de fertilizante helicoidal

O mecanismo dosador helicoidal é composto por um helicóide fixado à um eixo rotativo colocado sob o depósito de fertilizante. A quantidade de produto depositada no solo varia conforme é alterada a velocidade angular do eixo de acionamento do dosador ou pelo passo do helicóide utilizado. Nas máquinas comerciais, normalmente, são realizadas pré-regulagens do sistema de transmissão que é realizado por meio de engrenagens ou sistemas de corrente. Este tipo de dosador de fertilizante é o mais utilizado nas semeadoras-adubadoras produzidas no país.

2.3.1 Características do sistema de aplicação de fertilizante

Diversos parâmetros de utilização do mecanismo dosador podem influir na qualidade de aplicação do fertilizante. Por operarem em um sistema de malha aberta, isto é, sem um dispositivo de medição da taxa de aplicação real, o mecanismo dosador é incapaz de corrigir possíveis distúrbios. Nos itens a seguir mostrar-se-á como tais parâmetros influem na qualidade de aplicação.

2.3.1.1 Velocidade de deslocamento do equipamento

Yamamoto et al. (2006) desenvolveram e avaliaram um sistema dosador pulsionador de fertilizante. A avaliação foi realizada variando a velocidade de deslocamento do equipamento e a abertura o mecanismo dosador. Como resultados, verificaram que o comportamento de distribuição do dosador é proporcional à velocidade de deslocamento do equipamento. Para cada acréscimo de $3,6 \text{ m s}^{-1}$ houve uma redução na taxa de aplicação de 11 kg ha^{-1} .

Contudo, em estudos realizados utilizando mecanismo dosador de fertilizante do tipo helicoidal não verificaram influencia da velocidade na taxa de aplicação. Mahl (2002), que avaliou uma semeadora-adubadora de fluxo contínuo marca Semeato modelo TD300, Mahl et al. (2006), que realizaram testes em uma semeadora-adubadora de precisão da marca Marchesan modelo PST2 e Ferreira et al. (2006) que efetuaram testes com uma adubadora

marca DCS modelo 53 com seis linhas de dosadores para fertilizantes em todos os casos não se observou a influencia da velocidade na taxa de aplicação de fertilizantes.

2.3.1.2 Tipo de fertilizante

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. Observaram que a taxa de aplicação depende do tipo de fertilizante utilizado. Ainda, notaram que a taxa de aplicação fornecida pelo fabricante em função da regulagem pré-realizada e da velocidade de deslocamento do equipamento, apresenta um valor discrepante da quantidade de fertilizante aplicada na realidade. No experimento foram utilizadas cinco formulações de fertilizantes: 02-20-18 Topmix Trevo, 08-20-20 Fertipar, 08-20-20 Topmix Trevo, 02-20-18 Somax Trevo/NPK e 02-20-20 Mistura de grânulos Trevo. Foram realizados testes com três velocidades (1,38; 1,94 e 2,5 m s⁻¹) e três dosagens (mínima, média e máxima, de acordo com o manual do usuário). Com isso, concluíram que existem variações nas vazões obtidas nos ensaios se comparados com os valores nominais do manual do equipamento. A taxa de aplicação é influenciada pela diferença das propriedades físicas do fertilizante utilizado, sendo assim há a necessidade de se regular o sistema dosador de fertilizante conforme a formulação usada.

2.3.1.3 Nível do reservatório

Outro fator que pode influenciar a não uniformidade da taxa de aplicação é a altura do nível de fertilizante no reservatório. Ferreira et al. (2006) realizaram um estudo com um distribuidor tipo helicoidal, no qual foi avaliada a influência do nível de fertilizante no depósito sobre a quantidade depositada pelo dosador. Para isso os autores realizaram ensaios com três níveis de fertilizantes no reservatório do equipamento ($\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$). Além disso, utilizaram sete relações de transmissão. Os resultados indicam que no mecanismo dosador helicoidal a quantidade de produto no reservatório influencia a quantidade de fertilizante distribuído. Quanto maior o nível de produto no depósito, maior a quantidade depositada.

Mahl et al. (2006) realizaram teste com uma semeadora-adubadora de milho para verificar a influencia da velocidade e da altura do nível de fertilizante no reservatório na taxa de aplicação. Neste estudo foram efetuados testes com três diferentes velocidades de operação de semeadura de milho (0,91; 1,97 e 2,72 m.s⁻¹) e três alturas do nível de fertilizante no reservatório ($\frac{1}{1}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{6}$). Com o reservatório cheio ocorreu uma dosagem 5,8% maior na taxa de aplicação de fertilizante em relação ao reservatório abastecido com 50% de sua capacidade. Contudo, a dosagem de fertilizante não diferiu das demais quando o depósito se encontrava com $\frac{1}{6}$ de sua capacidade (Tabela 1).

Tabela 1: Taxa de aplicação de fertilizante, em kg.ha⁻¹, em função do nível de fertilizante no reservatório e velocidade de deslocamento do equipamento.

Velocidade (km h ⁻¹)	Nível de produtos nos reservatórios			Média
	Cheio (1/1)	Médio (1/2)	Mínimo (1/6)	
3,3	266,61	248,03	265,84	260,16
7,1	262,16	252,63	254,06	256,28
9,8	269,41	254,10	252,83	258,78
Média	266,06 a	251,59 b	257,57 ab	258,41

*Médias seguidas de letras minúsculas diferentes em cada linha diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. A ausência de letras indica que as médias não diferem entre si pelo referido Teste. Coeficiente de variação: 6,80%.

Fonte: MAHL *et al.* (2006)

2.4 Sistemas de controle

A introdução de novos conceitos em projetos de máquinas agrícolas necessita de novas práticas de projetos. Kepner et al. (1982) já visualizavam a utilização de computadores para o auxílio a novos projetos. A introdução de sistemas de controle, devido à redução de custos de implementação e de um crescente número de pesquisas realizadas sobre o assunto tornam tais tecnologias cada vez mais próximas da realidade. Segundo Coelho et al. (2003) nos anos de 1960, controle avançado significava algum algoritmo ou estratégia que difere do controlador PID (proporcional, integral e derivativo) clássico. O projeto de algoritmos avançados, sob outro ponto de vista, descreve usualmente a combinação de elementos de muitas disciplinas, tais como engenharia de controle, processamento de sinais, estratégia,

teoria de decisão, inteligência computacional, entre outras. A Tabela 2 apresenta a classificação de controladores convencionais e avançados.

Tabela 2. Classificação de controladores convencionais e avançados (fonte: COELHO et al., 2003)

Projeto	Tipo de controlador
Convencional	Manual, PID, proporcional, em cascata e <i>feedforward</i>
Avançado: clássico	Escalonamento de ganhos, compensação do atraso de transporte, controle desacoplado
Avançado: com aplicações	Preditivo, modelo interno, adaptativo, <i>fuzzy</i>
Avançado: poucas aplicações	Não-linear, inteligente (neural e evolutivo)

A malha de controle convencional tem sido utilizada na maioria dos processos automatizados no meio industrial nos últimos 50 anos. Entre os motivos pode-se mencionar: estrutura simples, robustez, reduzido número de parâmetros, conhecimento intuitivo sobre o desempenho destas técnicas de controle e requerimento mínimo de conhecimento matemático e técnico.

2.4.1 Projetos de equipamentos eletronicamente controlados

Observa-se que há um grande interesse em pesquisas direcionadas a mecanismos eletromecânicos de controle de aplicação de fertilizante. Também se observa que na grande maioria dos trabalhos os mecanismos são projetados para sistemas que utilizam ferramentas de agricultura de precisão, isto é, aplicação de fertilizante a taxas variadas com Sistema de Informação Geo-referenciadas (SIG) e a presença de sensores. A Figura 2 mostra um esquema genérico de um sistema de controle em aplicação a taxas variadas. Nesta situação, pode-se observar que há uma interface homem-máquina (IHM) para que o operador configure o sistema além de realizar o acompanhamento do funcionamento do sistema, um sensor de velocidade de deslocamento do equipamento, um sistema de posicionamento, sensores e atuadores de processo. Todos estes equipamentos ligados a uma unidade de controle do sistema.

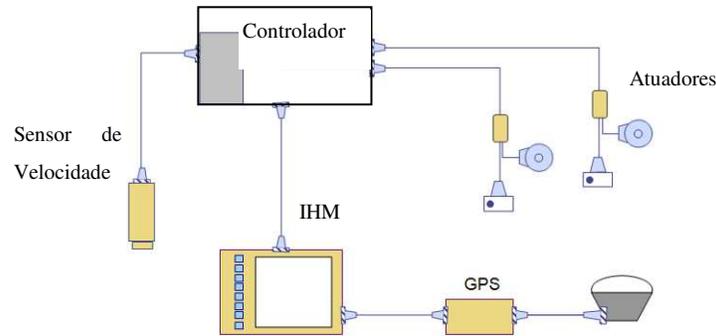


Figura 2. Esquema genérico de um sistema de controle de aplicação a taxas variadas (adaptado de Scott et al., 2002).

Para a utilização de sistemas de controle visando a aplicação localizada de fertilizantes, Oliva et al.(2001) realizaram adaptações em uma máquina convencional de aplicação de fertilizantes comercial, marca Jumil, modelo EXACTA AIR 2980 EX 08, para torná-la um equipamento de aplicação localizada. Foi utilizado um sistema de acionamento hidráulico acionado por um motor elétrico com um conversor de frequência que o acionou na rotação desejada para se obter a taxa de aplicação indicada. Como resultado, os autores observaram que o sistema hidráulico de acionamento dos eixos dos dosadores mostrou-se adequado para o fim proposto.

Umezu (2003) utilizou um controlador PID para definir a vazão de aplicação e a formulação de fertilizantes. Esse sistema contou com um receptor DGPS com correção diferencial, em tempo real, para fornecer informações geo-referenciadas da posição do equipamento. Os dispositivos dosadores, Figura 5, foram acionados por motores hidráulicos com velocidades angulares controladas através de servoválvulas de vazão, compensadas à pressão. O mecanismo de dosador utilizado no experimento foi do tipo helicoidal flutuante.

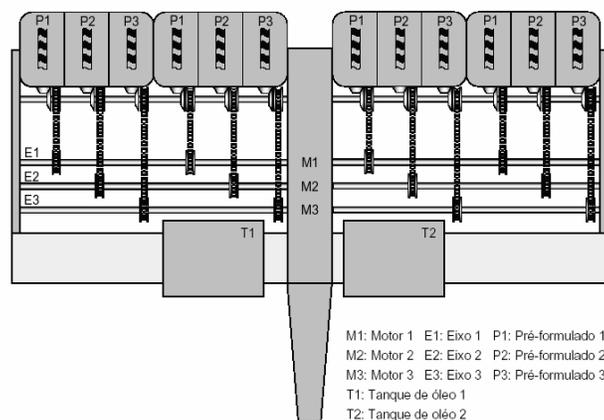


Figura 3: Diagrama esquemático do sistema de acionamento dos dosadores (UMEZU, 2003)

Menegatti *et al.* (2004) desenvolveram um protótipo de um sistema de dosagem de fertilizantes sólidos composto por: um dosador do tipo rotores acanalados que atende a duas linhas de plantio e regula a vazão somente em função de sua velocidade angular, um microcontrolador; um motorreductor de corrente contínua; um amplificador de potência chaveado; um sistema de transmissão de movimento; e um reservatório. Com este protótipo foram realizados os ensaios que forneceram dados para avaliação do desempenho do sistema. Tanto Umezu e Cappelli (2006) quanto Menegatti et al. (2004) realizaram ensaios do comportamento da vazão em função da velocidade angular do dosador e realizaram ensaios do comportamento dinâmico do sistema para entradas em degrau de velocidade para a verificação da resposta do sistema a distúrbios externos, Figura 4.

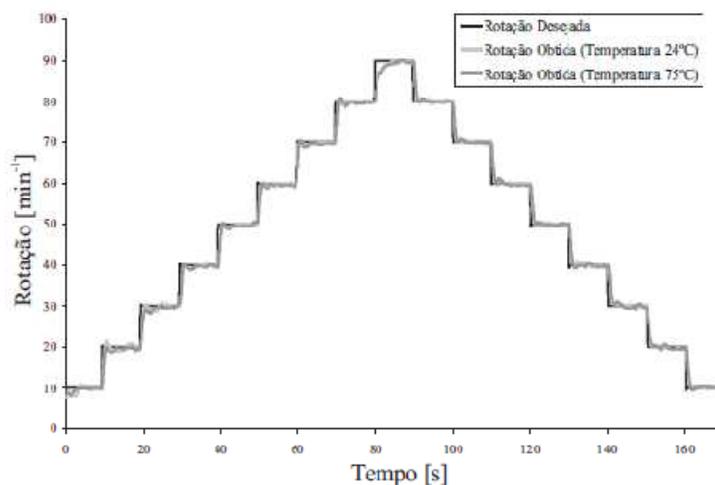


Figura 4: Comportamento dinâmico do sistema para entradas em degraus de velocidade angular do eixo de acionamento (UMEZU e CAPPELLI, 2006)

Cugati et al. (2006), utilizando um dosador de fertilizante a lanço a taxas variáveis, Figura 5, com acionamento hidráulico dos dosadores, testaram dois tipos de atuadores que atuam no controle da vazão (motor DC e válvula solenóide proporcional). Estes foram utilizados na válvula de controle de vazão de óleo no motor hidráulico. Foram obtidos o tempo morto de cada elemento e a constante de tempo dos elementos atuadores.

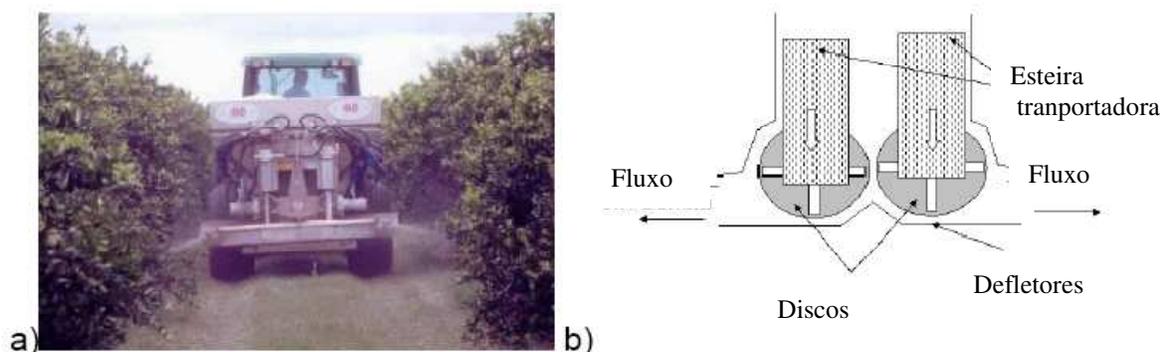


Figura 5. Aplicador à lanço de fertilizante a taxas variadas para cultura de citrus. (a) Equipamento em operação; (b) Esquema do mecanismo dosador (adaptado de Cugati et al., 2006).

Os autores utilizaram um sistema de controle de aplicação em malha fechada com controlador tipo PID e como variável de controle o fluxo de óleo que passa para o mecanismo dosador. Com isso, foi verificado que, no caso do motor DC, o tempo de resposta ficou em torno de 0,09 s e o tempo morto observado foi de 0,08 s e na válvula solenóide proporcional estes valores foram de 0,04 e 0,02 s, respectivamente. Este trabalho mostra que o tempo de resposta de motores elétricos é satisfatório para a utilização em sistemas dosadores de fertilizante. Com isso se abre a possibilidade de utilização deste tipo de acionamento com este tipo de sistema de controle.

Yu et al. (2006) desenvolveram e fabricaram um sistema de controle (puramente proporcional) para aplicação de taxas variadas de fertilizantes granulares para a produção de arroz. Os autores utilizaram um sensor de rotação no eixo de acionamento do mecanismo dosador como variável medida e correlacionou tal variável com a taxa de aplicação, conforme ilustra a Figura 6.

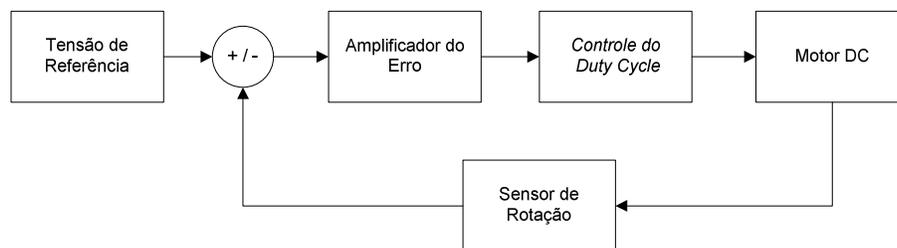


Figura 6. Diagrama de blocos do sistema de controle de rotação do eixo do mecanismo dosador de fertilizante (adaptado de YU et al., 2006).

Para medir a taxa de aplicação do mecanismo dosador os autores construíram uma bancada de teste, Figura 7a. Esta bancada era composta de uma esteira que se deslocava a uma velocidade de $0,1 \text{ m s}^{-1}$ e recolhia o material de descarga do dosador de fertilizante em coletores, Figura 7b.



Figura 7. Esquema da bancada de testes para medir a taxa de aplicação do dosador de fertilizante. (a) bancada; (b) coletores (adaptado de YU et al., 2006).

Com isso, observaram que o coeficiente de variação da velocidade de rotação do motor foi no máximo de 3 %. Também observaram que para diferentes tipos de fertilizante houve uma mudança significativa na taxa de aplicação devido à medida indireta do fluxo de massa. Os resultados apontados pelos autores apresentaram um desempenho do sistema bastante satisfatório, erro máximo de 3 % entre a aplicação nominal e a real, muito próximos aos obtidos por Umezu (2003) e Menegatti *et al.* (2004).

Garcia (2007) utilizou como elemento de atuação no sistema de dosagem um motor elétrico de corrente contínua, eliminando, com isso, a necessidade de utilização de um sistema hidráulico e partindo para um sistema de atuação puramente eletro-mecânico. A Figura 8 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle proposto.

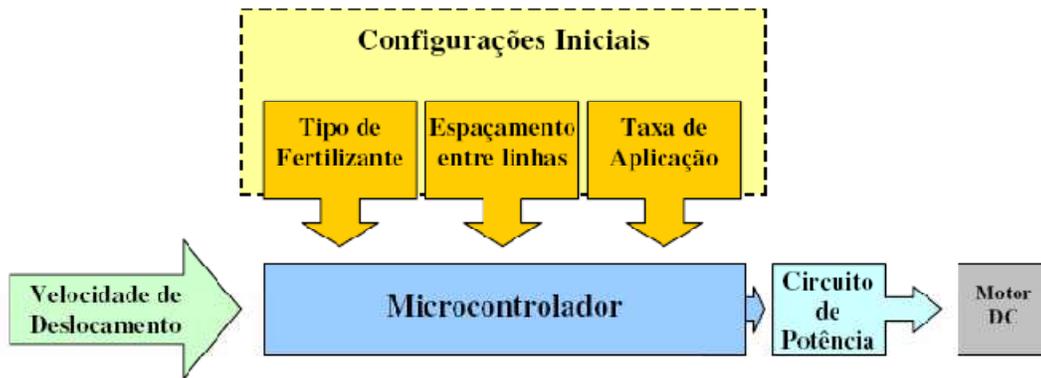


Figura 8: Diagrama de blocos do sistema de controle da taxa de aplicação (GARCIA, 2007)

O autor utilizou um sistema de controle em malha aberta, Figura 9. Este controle referenciava o *set point* informado pelo operador e a velocidade de deslocamento do equipamento com a atuação no motor elétrico (variando a sua velocidade angular).

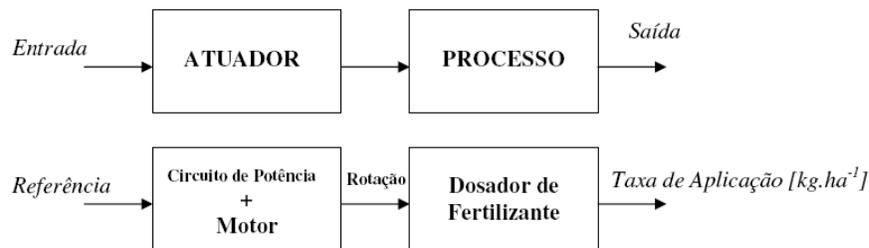


Figura 9: Sistema de controle em malha aberta para a aplicação de fertilizante (GARCIA, 2007)

Nos teste experimentais o desvio médio relativo entre a taxa de aplicação real e a taxa pré-estabelecida ficou entre 0,8 e 11,4 %.

A fim de mensurar e corrigir possíveis variações da taxa de aplicação provocadas por distúrbios se torna necessária a medição da taxa de aplicação para realimentar o sistema de controle. Miller et al. (2004) desenvolveram e testaram dois sistemas em malha fechada para um sistema de aplicação de fertilizante granular a lanço para a cultura de citrus. O primeiro protótipo, Figura 10, continha sensores do tipo fotocélula que monitoravam, em tempo real, a taxa de aplicação do equipamento. Tais dados são enviados a um controlador (Legacy 6000) que concentra as informações de mapa de aplicação, velocidade de deslocamento e

posicionamento global. Com estes parâmetros o sistema de controle atua em uma servo-válvula que regula o fluxo de óleo no motor hidráulico. Com isso, aplica-se uma quantidade de fertilizante de maneira adequada a cada condição.

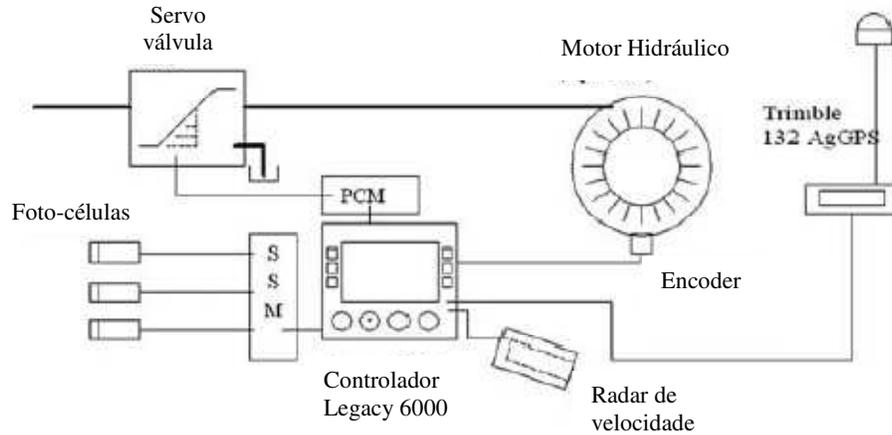


Figura 10: Sistema de controle do protótipo de um dosador de fertilizante à lanço com sensores de fotocélulas (Fonte: MILLER et al., 2004).

Já o segundo protótipo desenvolvido por Miller et al. (2004) consiste de um sistema composto por um sensor do tipo ultrassônico que atua de forma booleana nas válvulas gerando um sinal modulado (PWM) que controla o fluxo de óleo no motor hidráulico.

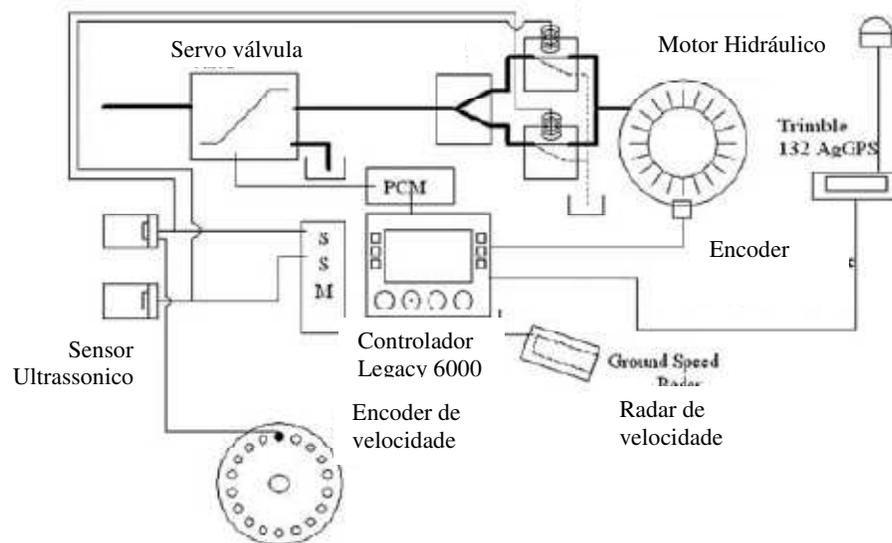


Figura 11: Sistema de controle do protótipo de um dosador de fertilizante a lanço com sensores ultrassônicos (Fonte: MILLER et al., 2004)

Em testes preliminares relatados pelos autores, os equipamentos, que operam com uma lógica de controle do tipo liga - desliga, apresentam um erro na taxa de aplicação entre 1,0 % e 20,7 % do valor nominal configurado. Estes valores elevados de variação podem ser explicados pela lógica de controle utilizada que tem como característica a flutuação do ponto de operação em uma faixa de operação.

Tola et al. (2008) desenvolveram um sistema de controle da taxa de aplicação de fertilizantes em mecanismos de aplicação pneumáticos. Este sistema, Figura 2, opera em malha fechada, sendo que o sensor de aplicação utilizado é *encoder* linear incremental que mede a altura do nível do reservatório do produto, com a diferença da altura em função do tempo pode-se definir qual quantidade de fertilizante aplicado.

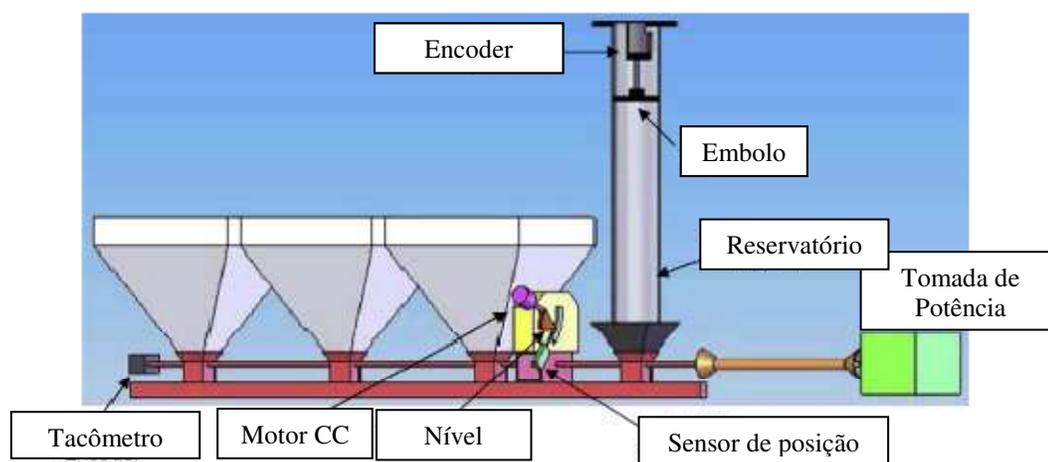


Figura 12. Diagrama esquemático do sistema de controle de aplicação de fertilizante (adaptado de Tola, 2008).

Os resultados desse estudo indicaram que a configuração automática dos parâmetros de aplicação, o período de checagem e o controle da taxa de saída puderam ser realizados de maneira eficiente. Os dados indicaram que o sistema pode ser usado com precisão para aplicação, a taxas variadas, de fertilizantes granulares com erros entre $\pm 5\%$.

Nos sistemas de controle propostos por Miller et al. (2004) e Tola et al. (2008), a variável medida foi a taxa de aplicação, tornando possível a atuação em função do erro da

taxa. Com isso, os distúrbios provocados por fatores de operação ou por características do mecanismo dosador de fertilizante são percebidos e podem ser corrigidos automaticamente.

Russo (2005) desenvolveu um Módulo de Interface (MDI) para ser utilizado em um sistema de formulação e aplicação localizada de nutrientes líquidos a taxas variáveis. A função deste módulo é receber as informações provenientes do controle do sistema de aplicação, efetuar as leituras dos sensores de campo, processar os dados e comandar os periféricos envolvidos na aplicação, tais como: bombas, eletro-válvulas e válvulas proporcionais para controle de fluxo. Para isso, o autor desenvolveu um *hardware* e *software* visando a otimização das funções executadas pelo MDI com a finalidade de possibilitar a operação do sistema utilizando um microcontrolador.

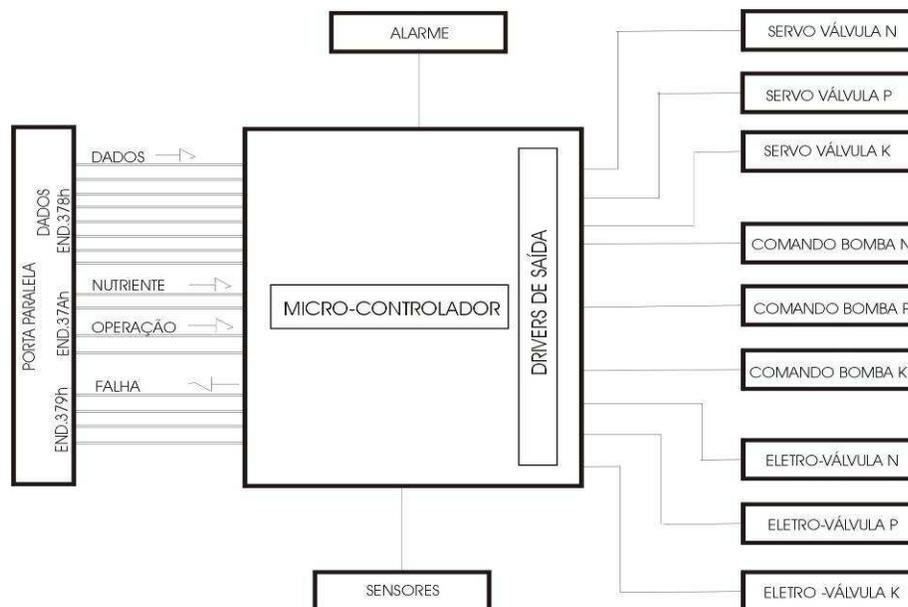


Figura 13: Diagrama de blocos do Módulo de Interface (RUSSO, 2005)

Krishman et al. (2006) desenvolveram um sistema de controle adaptativo para uma distribuidora de fertilizante a lanço. O sistema de controle contava com duas entradas: velocidade de rotação dos discos distribuidores e a abertura do sistema de descarga de fertilizante. Como saída o sistema tinha a quantidade de fertilizante aplicada no solo. O sistema de controle adaptativo teve a função de variar os parâmetros do sistema de controle utilizado conforme a condição de operação do conjunto dosador, isto é, ao se reduzir a

quantidade de fertilizante no reservatório, os parâmetros do controlador mudavam. O gráfico da Figura 14 mostra os resultados obtidos experimentalmente, sendo que a linha tracejada representa o *setpoint* de operação e a linha contínua, a taxa de aplicação. Pode-se notar que o sistema de controle se adapta as novas condições de operação ao longo do tempo, o que torna este tipo de controlador uma opção adequada para a utilização em controle de aplicação de fertilizantes.

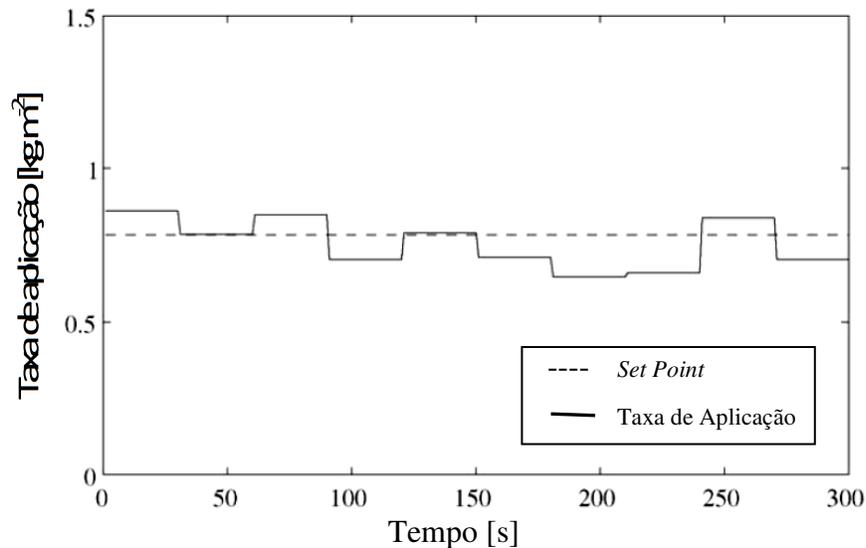


Figura 14. Gráfico de descarga de fertilizante pelo tempo. Linha tracejada é o *setpoint* de operação (adaptado de Krishnan et al. 2006)

Werner et al. (2007) utilizaram outro tipo de sistema de controle de aplicação de fertilizantes. Os autores utilizando um distribuidor de fertilizante a lanço conseguiram variar a taxa de aplicação ao se variar a velocidade de deslocamento do equipamento. Na análise de distribuição obtiveram valores de coeficiente de variação entre 8 e 12 %. A Figura 15 mostra a taxa de aplicação em função da distância percorrida e o comportamento da taxa de aplicação em função da troca de marcha do trator. Observa-se que o tempo de acomodação do sistema é mais lento, aproximadamente 6 s, que os sistemas de controle implementados diretamente do mecanismo dosador (normalmente abaixo de 1 s).

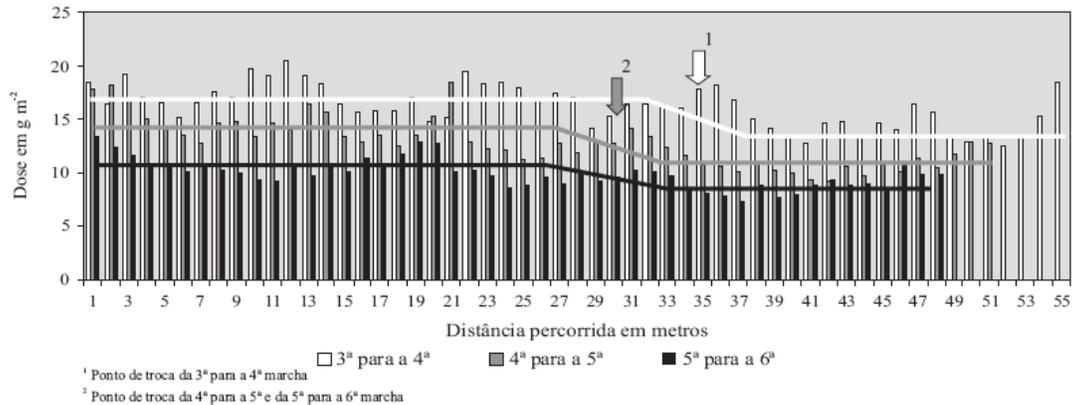


Figura 15. Distribuição de fertilizante em função da marcha de operação (adaptado de Werner et al.,2007)

Kim et al. (2008), utilizaram um aplicador de fertilizante granulado pneumático com um sistema de controle que atua na velocidade de deslocamento do equipamento. Esta é obtida por meio de um sinal DGPS instalado no conjunto, conforme ilustra a Figura 16. O controle da velocidade é realizado por meio da atuação no sinal de atuação (*duty cycle* do PWM) no motor elétrico que aciona o equipamento.

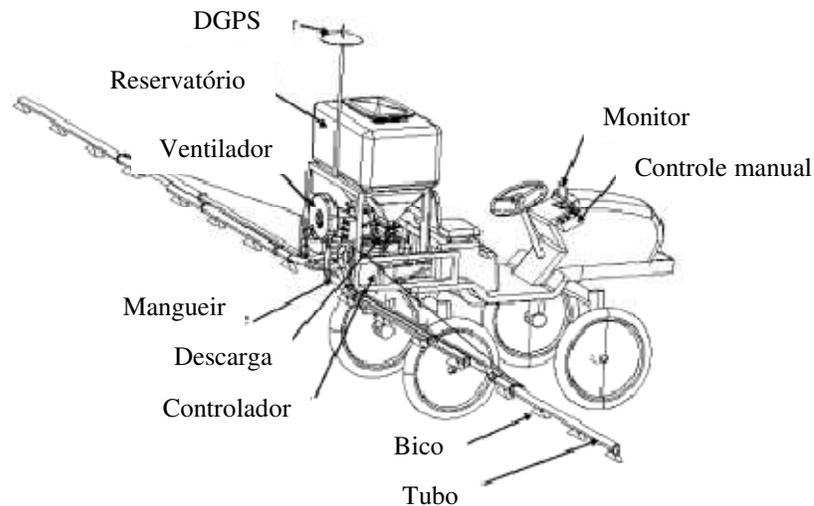


Figura 16. Desenho do protótipo do dosador de fertilizante (adaptado de Kim et al., 2008)

Os autores observaram que o tempo de resposta variou entre 1,5 e 3,0 s. Além disso, observaram que o protótipo apresentou uma acurácia que varia de aproximadamente 82 a 97 %, como se observa o gráfico da Figura 17, e que o sistema de controle apresentou melhores índices de aplicação com velocidade de deslocamento menor.

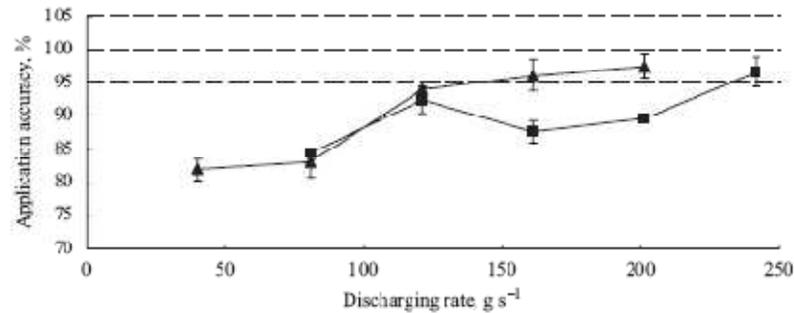


Figura 17. Acurácia da taxa de aplicação para velocidade de $0,33 \text{ m.s}^{-1}$ (-▲-) e $0,66 \text{ m.s}^{-1}$ (-■-). (adaptado de Kim et al. 2008)

Com isso, nota-se que os sistemas de controle utilizados por Umezu (2003), Menegatti *et al.* (2004), Cugati et al. (2006) e Garcia (2007) têm grande potencial de uso. Contudo, em todos os casos, a variável medida foi a rotação do eixo de acionamento do mecanismo dosador ou o fluxo de óleo pelo motor hidráulico de acionamento do dosador e por meio deste parâmetro se definiu, por uma razão linear proposta pelos autores, a taxa de aplicação. No entanto, como observado anteriormente, o mecanismo está sujeito a distúrbios que podem afetar a taxa de aplicação, estes não seriam detectados por estes sistemas de controle, provocando uma desuniformidade na aplicação, como mostrado Yu et al. (2006) que obteve uma variação da rotação do motor de 3 % enquanto que a variação na taxa de aplicação chegou a 11 %. Nestes casos as estratégias de controle utilizadas a que se destaca é a do tipo PID. Contudo para controle de sistemas não lineares e complexos, como o caso de dosadores de fertilizante, Pinheiro (2000) sugere que as teorias de controle clássico e moderno apresentam limitações. Rigatos (2009) relata que a utilização de sistemas de controle do PID para os motores de corrente contínua não possuem um desempenho adequado quando há alterações da dinâmica do motor ou carga. Neste segundo caso se enquadra o mecanismo dosador já que a carga sofre alterações conforme o tipo de produto aplicado ou mesmo devido às condições de operação. Abrindo a oportunidade de se utilizar ferramentas de controle como a lógica *fuzzy*, já que este tipo de controlador permite utilizar o conhecimento e a experiência de um especialista humano além da possibilidade controlar processos não lineares.

2.4.1.1 Sistemas de controle *Fuzzy*

Filet et al. (2007) observaram que quando o sistema é do tipo não-linear ou não há conhecimento suficiente sobre a influência de todas as variáveis que afetam o processo, a lógica *fuzzy* pode se tornar uma opção adequada. Diversos autores utilizaram este sistema de controle para as mais diversas aplicações tais como Gundogdua e Erenturkb (2005) para atuar num mecanismo de quatro barras ou Derdiyok et al. (2005) para acionar as rodas de um veículo elétrico.

No que tange a controle de motores de corrente contínua, objeto de estudo deste trabalho, pode-se citar o trabalho proposto por Lim (1995), que utilizou algoritmos de controle *fuzzy* proposto por Chen e Chen (1991) para controlar um motor de corrente contínua. O autor verificou que o sistema de controle *fuzzy* PID se mostrou adequado além de se mostrar mais robusto se comparado ao controle do tipo PID para várias condições de teste.

Em outro trabalho Pravadalioglu (2005) mostrou a viabilidade de se utilizar controladores *fuzzy* em sistemas de baixo custo, no caso foi utilizado um microcontrolador. O autor desenvolveu a lógica de controle por meio do programa MatLab – SIMULINK, conforme ilustra a Figura 18.

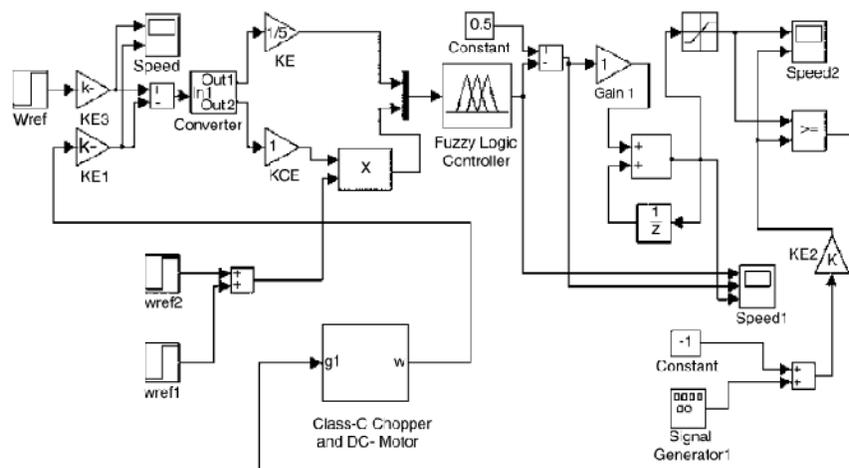


Figura 18. Diagrama de blocos no programa MatLab – SIMULINK, para controle do motor de corrente contínua (fonte: Pravadalioglu, 2005)

Após a simulação, a lógica foi inserida em um microcontrolador e se observou que tanto os resultados teóricos quanto experimentais indicam que o controlador *fuzzy* se mostrou adequado para controle em tempo real em diversas condições experimentais.

Coelho et al. (2003) projetaram um sistema de controle *fuzzy* para controlar um sistema de controle de posicionamento de uma barra horizontal. Para isso, utilizaram dois motores elétricos de corrente contínua, que acionam dois ventiladores. Este trabalho abriu a possibilidade de implementação de sistemas de controle *fuzzy* adaptativos. Callai et al. (2007) utilizaram o protótipo proposto por Coelho et al. (2003) e implementaram um sistema de controle *fuzzy* convencional e controle *fuzzy* adaptativos.

Estes trabalhos apontam que há a possibilidade de se projetar um sistema de controle de acionamento de um motor elétrico baseado na lógica *fuzzy*. Além disso, mostram a viabilidade de utilização da ferramenta “*Fuzzy Logic Toolbox*” do programa MatLab para o desenvolvimento do controlador *fuzzy* e posteriormente da utilização do programa MatLab – SIMULINK para a simulação do processo controlado.

2.4.2 Sensores

No último tópico deste capítulo são abordados tipos de sensores que podem auxiliar no desenvolvimento de um sensor específico para medir o fluxo de fertilizante na saída do mecanismo dosador. Este sensor é parte fundamental para elaboração do sistema de controle, pois, como visto anteriormente, há a necessidade de se obter dados referentes à descarga de fertilizante para o controle efetivo da taxa de aplicação e correção de possíveis distúrbios ou características dinâmicas do mecanismo dosador.

Na agricultura a não uniformidade dos elementos utilizados nos processo, bem como a falta de controle do ambiente onde estão locados os sensores faz com que a sua utilização fique mais complexa que sua utilização em ambientes industriais. Com isso, soluções encontradas na indústria podem encontrar problemas para serem adaptadas às condições de campo.

Harris et al. (1997) desenvolveram um sistema de medição do fluxo de massa de grânulos. Este sistema, Figura 19, consiste em um cone instrumentado com uma célula de carga que mede a massa depositada acima do mesmo. O fluxo de massa escoo pelos orifícios e quanto maior o fluxo de massa depositada sobre o cone, maior será a coluna de sólido, pois a vazão que flui pelos orifícios depende da área da seção do mesmo.

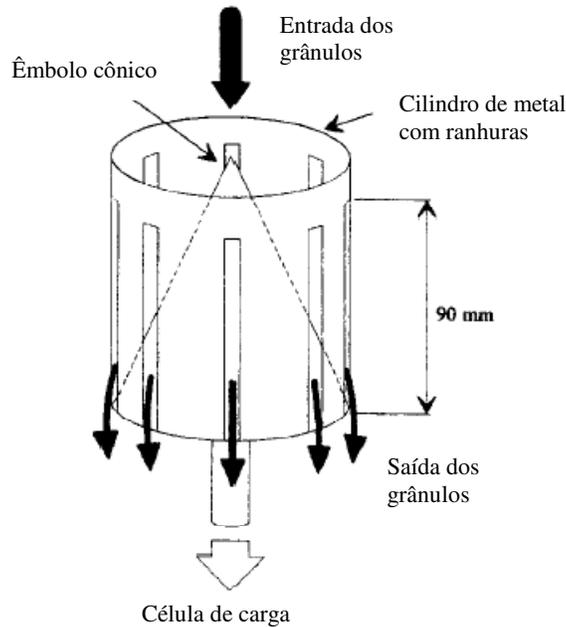


Figura 19: Medidor de fluxo de massa (Harris et al., 1997)

Benes e Zehnula (2000) desenvolveram um sensor de medição de fluxo de partículas sólidas, por meio de um sensor acústico. Neste sistema se correlaciona a intensidade do sinal elétrico com a quantidade de produto que passa pelo duto instrumentado. A Figura 20 mostra o esquema de medição utilizado: (a) um sensor acústico; e (b) dois sensores acústicos que operam de forma cruzada.

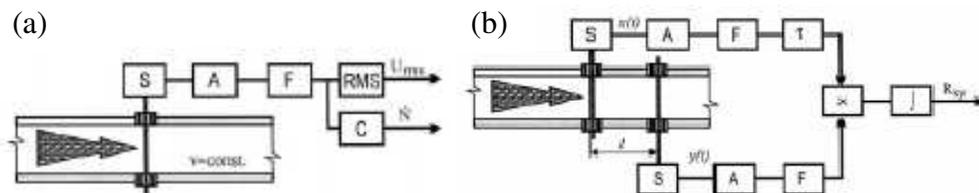


Figura 20. Diagrama de blocos do sensor de fluxo; S sensor acústico, A amplificador, F filtro, RMS medidor de amplitude do sinal e C sinal de partida do sistema. (a) Sistema com um sensor; (b) Sistema com sensores cruzados (adaptado de BENES e ZEHNULA, 2000)

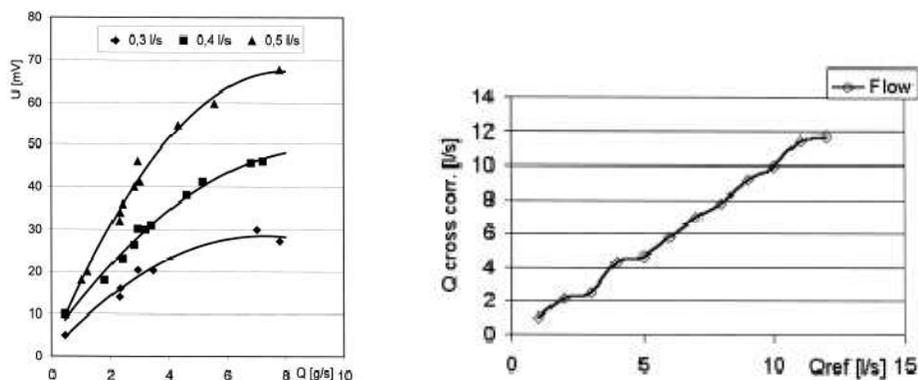


Figura 21. (a) Gráfico da correlação entre fluxo de massa e sinal de saída do sensor; (b) correlação entre a referência de vazão com os valores obtidos experimentalmente (BENES e ZEHNULA, 2000)

Swisher et al. (2002) desenvolveram e avaliaram em laboratório um protótipo de um sensor óptico para mensurar a taxa, em número de partículas, de materiais granulares, conforme ilustra a Figura 22a. Os componentes do sensor incluíam um gerador de laser o qual transmitia a luz através de uma câmera trapezoidal para um grupo de 32 elementos fotodiodos. Foram realizados testes estáticos e dinâmicos (fluxo de massa através da câmara) determinando a quantidade de luz que foi atenuada por uma partícula de fertilizante localizada na câmara. Com isso, foram obtidos resultados, conforme a Figura 22b, da correlação entre a variação da velocidade angular do eixo do mecanismo dosador e a taxa de aplicação percebida pelo sensor.

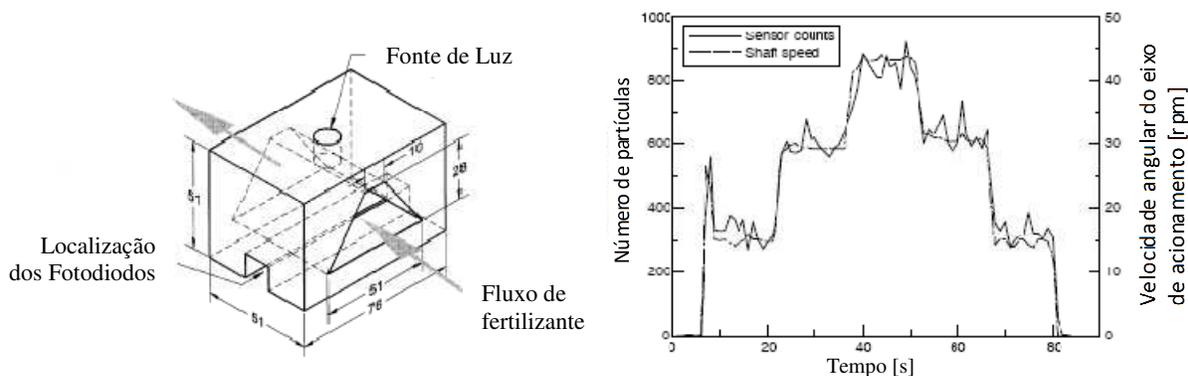


Figura 22. Sensor óptico de fluxo de fertilizante granular. (a) esquema do sensor; (b) resultados obtidos (adaptado de SWISHER, 2002)

Por fim, observaram que tal dispositivo requer uma calibração específica para cada tipo de fertilizante utilizado, o que dificulta a sua utilização. Também concluíram que são

necessárias melhorias no protótipo e na metodologia aplicada para tornar possível a construção de um modelo comercial.

Grift e Crespi (2008) desenvolveram um sistema, como ilustra a Figura 23, para determinar o fluxo de partículas usando o método de Poisson, que consiste na medição de intervalos de tempo que não é detectada a passagem de produto pelo sensor e intervalos com produto detectado, e com isso determinar a quantidade de produto que passou pelo sensor.

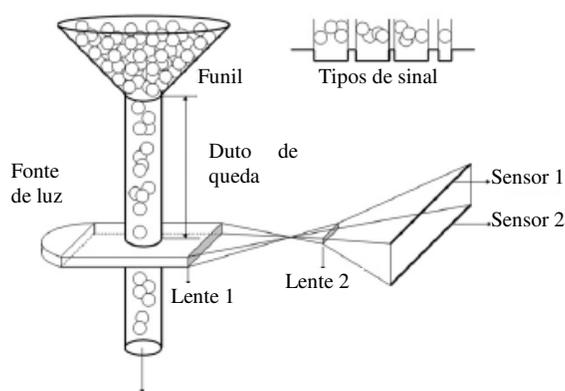


Figura 23. Esquema experimental do sensor de fluxo (adaptado de GRIFT e CRESPI, 2008).

O gráfico da Figura 24 apresenta a correlação entre o número de espaçamentos e o fluxo de partículas percebidas pelo sensor. A linha contínua representa o fluxo teórico de partículas no experimento, os pontos são os resultados obtidos experimentalmente. Pode-se observar que há uma forte correlação entre ambos, assim o sistema se mostra adequado para a medição do fluxo de partículas.

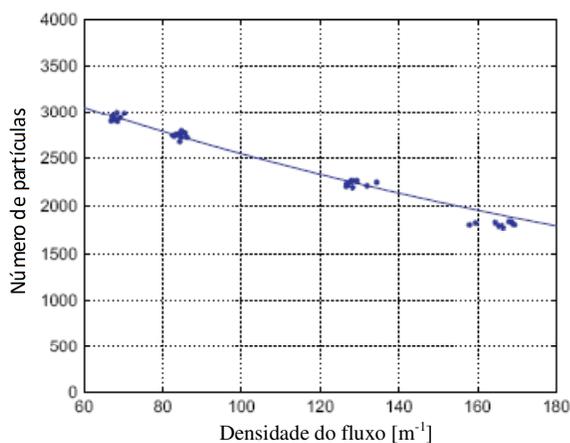


Figura 24. Gráfico da relação do número de conjunto de partículas pelo fluxo (adaptado de GRIFT e CRESPI, 2008).

Karayel et al. (2005) utilizaram uma câmera de alta velocidade para observar a taxa de aplicação e a velocidade de queda de sementes de soja e trigo. Para isso, os autores construíram uma bancada de testes, conforme ilustra a Figura 25. A utilização da câmera de alta velocidade se mostrou adequada para a verificação do espaçamento dentre sementes de soja e trigo, não deixando de captar nenhuma semente.

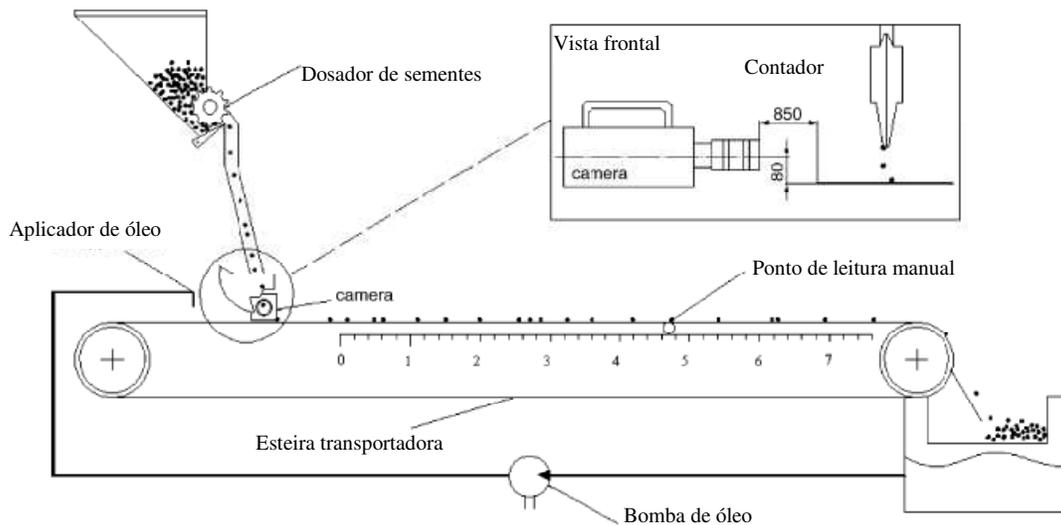


Figura 25: Bancada de teste para utilizando uma câmera de alta velocidade (adaptado de KARAYEL et al., 2005)

Dentro os tipos de sensores desenvolvidos pelos autores citados pode-se observar que os sistemas propostos por Harris et al. (1997) e Benes e Zehnula (2000) podem ser utilizados para medir o fluxo de massa de grânulos. Já os propostos Karayel et al. (2005) e Grift e Crespi (2008) mostram que sensores ópticos geralmente são utilizados para medir o fluxo de partículas, empregado na contagem de grânulos. No caso do mecanismo dosador de fertilizante o fluxo de massa se dá de maneira volumétrica. Com isso, as soluções propostas por Harris et al.(1997) e Benes e Zehnula (2000) podem servir de base para o projeto do sensor de fluxo de massa de fertilizante granular.

Capítulo 3. DOSADOR HELICOIDAL DE FERTILIZANTE GRANULAR: MODELO E SIMULAÇÃO DINÂMICA

RESUMO: Para que as semeadoras-adubadoras possam operar com aplicação a taxas variáveis é necessário uma adaptação no mecanismo dosador de fertilizante e a utilização de um sistema de controle, com a finalidade de modificar automaticamente a dosagem em função da demanda e corrigir características inerentes ao tipo de mecanismo dosador. Os modelos matemáticos podem auxiliar o projeto de tais sistemas. Este trabalho objetivou modelar matematicamente, simular e validar o comportamento dinâmico do modelo para propor uma forma de atuação na velocidade angular de acionamento do eixo do dosador helicoidal de fertilizante com a finalidade de reduzir o CV da taxa de aplicação. A resposta do modelo proposto foi a vazão mássica de fertilizante aplicado, em função das características construtivas (diâmetro interno e externo do helicóide e passo da rosca), densidade do fertilizante, fator de enchimento, posição do fim do helicóide em relação ao duto de descarga e da entrada do modelo que é velocidade angular do eixo de acionamento do dosador. Simulou-se, por meio do aplicativo MATLAB, o fluxo de fertilizante resultante, em função de quatro velocidades angulares de acionamento de 2,93; 5,03; 7,33 e 14,66 rad s⁻¹. Quanto maior a velocidade angular do eixo de acionamento do dosador, melhor foi o ajuste do modelo. O coeficiente de ajuste variou entre 89,9 % e 95,4 % para velocidades de acionamento de 2,93 e 14,66 rad s⁻¹ respectivamente. Posteriormente, o modelo foi utilizado para a construção de um sistema de controle, em malha aberta, com o acionamento do eixo do dosador por meio de um motor elétrico. Com atuação na tensão do motor elétrico pode-se observar que o sistema foi capaz de alterar o ponto de operação. Para a diminuição do CV se aplicou um sinal de excitação senoidal no motor elétrico variando a amplitude do sinal e a defasagem de pico de atuação à pico da taxa de aplicação do dosador. Com alimentação média constante de 12 V, o CV foi de 29,8 %. A introdução de um sinal de excitação senoidal de 4 V de amplitude e 2,98 rad de defasagem reduziu esta variação para 11,4 %. A simulação do mecanismo dosador foi um primeiro passo para se utilizar projetos de sistemas de controle. Por meio dos resultados

pode-se observar que é possível reduzir a característica oscilatória de tal equipamento, bem como tornar mais precisa a aplicação e possibilitar a utilização ATV.

Palavras chave: semeadora-adubadora, modelagem matemática, agricultura de precisão

AUGER TYPE GRANULAR FERTYLIZER DISTRIBUTOR: DYNAMIC MODEL AND SIMULATION

ABSTRACT: The seeder fertilizer applicator can operate at variable rates is necessary to adjust the metering system of fertilizer and the use of a control system, aiming to automatically modify the dosage depending on demand and correcting characteristics inherent to the type of mechanism feeder. Mathematical models can aid the design of such systems. This study aimed to mathematically model, simulate and validate the dynamic behavior of the model to propose a way to work in the angular velocity of drive shaft helical feeder of fertilizer in order to reduce the CV of the application rate. The response of the model was the mass flow of fertilizer, according to the constructive features (internal and external diameter of the helix and thread pitch), density of fertilizer, fill factor, position of the end of the helix in relation to the discharge duct and the entry model that is angular velocity of the drive shaft of the applicator. Was simulated, using the MATLAB application, the flow of fertilizer resulting in four different angular velocities of activation of 2.93, 5.03, 7.33 and 14.66 rad s⁻¹. The model was able to generate significantly close to the actual values. The greater the angular velocity of the drive shaft of the auger, the better the fit of the model. The adjustment coefficient ranged between 89.9 % and 95.4 % for speeds of 2.93 and firing of 14.66 rad s⁻¹ respectively. Subsequently, the model was used to construct a system of control, open loop, with the drive shaft of the feeder through an electric motor. With activities in the tension of the electric motor can be seen that the system was able to change the operating point. To decrease the CV applied a sinusoidal excitation signal to the engine by varying the electrical signal amplitude and delay of peak performance at peak application rate of the injector. With constant average power of 12 V, the CV was 29.8 %. The introduction of a sinusoidal excitation signal of 4 V amplitude and 2.98 rad delay reduced this variation to 11.4 %. The simulation of the metering system was a first step to use control system projects. Through the

results we can see that it is possible to reduce the oscillatory behavior of such equipment, as well as more precise application and enable use VRT.

key-words: no till drill, modeling, precision agriculture

3.1 INTRODUÇÃO

Na implantação das culturas de grãos no Brasil são amplamente utilizadas máquinas do tipo semeadora-adubadora, especialmente no plantio direto, as quais dosam e aplicam o fertilizante granular diretamente no sulco. Normalmente os dosadores são constituídos por um helicóide flutuante que tem a função de dosar e transportar uma quantidade pré-definida de fertilizante. A aplicação de fertilizantes efetuada com as semeadoras-adubadoras convencionais é realizada baseando-se na necessidade média de nutrientes para uma determinada cultura. Já, segundo Werner et al.2007, quando se considera a necessidade localizada devem ser utilizadas técnicas de Aplicação a Taxas Variadas (ATV). Com a ATV, pode se reduzir a quantidade aplicada, além de proporcionar um maior rendimento na cultura (OLIVEIRA et al, 2008). A utilização da ATV só pode se dar, em grande escala, por meio de máquinas capazes de alterar, com a devida acurácia o ponto de operação conforme a demanda localizada.

Cappelli et al. (2000) estudando a possibilidade de se adaptar os dosadores helicoidais comerciais para aplicação em ATV, controlando-se a taxa de aplicação por meio da velocidade angular do eixo de acionamento, notaram que estes dispositivos apresentam uma variação em torno da média da taxa de aplicação de fertilizante e que esta característica, inerente aos dosadores helicoidais, resultava em uma aplicação desuniforme de fertilizante no sulco, que poderia ser expressa pelo coeficiente de variação (CV) da taxa de aplicação. Yu et al. (2006) durante o desenvolvimento de um controlador para ser utilizado em um dosador helicoidal para aplicação de a taxas variáveis notou que o CV da taxa de aplicação é praticamente independente da velocidade angular do eixo de acionamento do dosador, e, portanto, não depende da taxa média de aplicação de fertilizante. Estes resultados também foram observados por Gish et al. (2010). Estes trabalhos comprovam os resultados obtidos por Cappelli et al.

(2000) e mostram que o CV da taxa de aplicação, conseqüentemente a uniformidade na distribuição do fertilizante, não poderia ser melhorada simplesmente por meio do controle da velocidade angular do eixo do dosador.

Os dosadores helicoidais em princípio operam como transportadores de material. Atuando-se na velocidade angular do eixo obtém-se, como conseqüência, uma taxa de aplicação do produto. Quando se opera com eficiência volumétrica parcial, seu enchimento não é total, e, portanto, o material quando é arrastado, devido ao atrito com a superfície interna do tubo transportador, se adensa na superfície do helicóide que o empurra, formando vazios que tornarão sua aplicação desuniforme. O atrito do material contra o helicóide faz com que seja deslocado no sentido do giro, no entanto, isto não afeta de forma relevante a qualidade da aplicação.

Os resultados apresentados por Cappelli et al. (2000), Yu et al. (2006) e Gish et al. (2010) permitem concluir que sendo a variação na taxa de aplicação de fertilizante uma característica inerente à concepção física dos dosadores helicoidais, não pode ser melhorada alterando-se seus parâmetros de projeto sem mudanças na sua concepção de operação, nem tão pouco, pela introdução de um sistema de controle atuando linearmente na velocidade angular do eixo de acionamento do mecanismo dosador.

Uma inovação no projeto dos dosadores helicoidais de fertilizantes utilizados no Brasil foi a introduzida pela empresa Agromac Indústria e Comércio de Equipamentos Agrícolas Ltda. O modelo desenvolvido foi denominado Fertisystem e a inovação constituiu-se, basicamente, na introdução de uma câmara com um anteparo visando melhorar a característica oscilatória na aplicação de fertilizante. Uliana et al. (2005) compararam o dosador convencional com o desenvolvido pela Fertisystem e observaram que o mecanismo modificado apresentou uma redução no CV da distribuição de fertilizante. Goettems et al. verificaram que o CV médio para este tipo de dosador foi de 25,4 %. Estes estudos mostram que a variação da taxa de aplicação, proveniente da característica inerente ao mecanismo dosador helicoidal, foi reduzida, porém ainda continua elevada.

Os estudos realizados mostram que a causa da variação da taxa de aplicação encontra-se no intervalo de tempo necessário para a realização de uma rotação completa do eixo do dosador (período) e que sua correção necessita de uma atuação mais complexa por parte do

sistema de controle. A diminuição do CV da taxa de aplicação e, portanto, a atenuação da desuniformidade, pode ser realizada variando-se a velocidade angular do eixo de acionamento durante um ciclo de rotação do helicóide.

Diversos trabalhos já foram realizados objetivando o desenvolvimento de sistemas de controle aplicados a dosadores de fertilizante, porém desprezando a característica do mecanismo dosador e atuando somente no controle baseado no erro da velocidade angular de acionamento do dosador. Umezu e Cappelli (2006) visando o controle da taxa de aplicação de fertilizante utilizaram um controlador PID atuando em uma válvula proporcional de fluxo hidráulico alterando, assim, a velocidade angular do motor hidráulico utilizado para o que acionava o eixo do dosador. Para definir a taxa aplicada se utilizou uma relação linear entre a velocidade angular do eixo de acionamento e a vazão mássica média do dosador. O ajuste dos parâmetros do controlador foi feito por meio do segundo método de Ziegler-Nichols. Tola et al. (2008) desenvolveram um sistema de controle utilizando uma caixa de engrenagem variável. O sistema de controle desenvolvido foi do tipo proporcional e a atuação do controlador era feita por meio de um motor elétrico que atuava a posição da alavanca da caixa de engrenagem e, conseqüentemente, na taxa de aplicação. Jafari et al. (2010) utilizaram um sistema controle que atuava em um motor elétrico de corrente contínua para o acionamento do dosador de sementes em ATV. Este tipo de motor tem a capacidade de alterar rapidamente a velocidade angular do eixo e os elementos do sistema são de fácil instalação e atuação, se comparado aos atuadores instalados em sistemas de controle hidráulico ou mecânicos, como os utilizados por Umezu e Cappelli (2006) e Tola et al. (2008), respectivamente.

Para o desenvolvimento de um sistema de controle, mais complexo, que atue não somente no controle da velocidade angular do eixo de acionamento do mecanismo dosador, mas que também observe sua característica oscilatória, faz-se necessário o desenvolvimento de um modelo suficientemente ajustado ao sistema físico real para que se possa realizar simulações com diferentes estratégias de controle sem a necessidade de testes com sistema físico real. Estes modelos também podem auxiliar no ajuste dos parâmetros do controlador (KIM et al., 2008).

O objetivo deste trabalho é descrever matematicamente a dinâmica de um dosador de fertilizante granular helicoidal, simular e validar seu comportamento e propor uma forma de

atuação na velocidade angular de acionamento do eixo do dosador helicoidal com a finalidade de reduzir o CV da taxa de aplicação.

3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO

O modelo proposto tem por finalidade simular o fluxo de massa de fertilizante instantâneo na saída de um dosador de fertilizante helicoidal em função de suas características construtivas, da posição angular do helicóide em função de ponto de descarga de fertilizante e da velocidade angular do eixo de acionamento do dosador. A entrada do modelo é a velocidade angular do eixo de acionamento do helicóide e sua saída é a taxa de aplicação instantânea, conforme ilustrado na Figura 26.

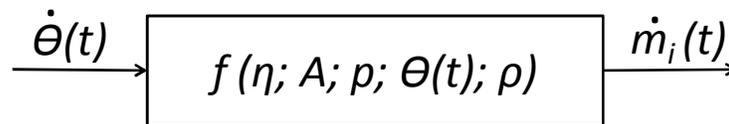


Figura 26. Diagrama de blocos do modelo proposto

Em que:

$\theta(t)$ é a posição angular do helicóide em rad; $\dot{\theta}(t)$ é a velocidade angular do helicóide em rad s^{-1} ; η é a eficiência de transporte; A é a área útil do helicóide em m^2 ; p é o passo do helicóide em m; ρ é a densidade do fertilizante utilizado em kg m^{-3} ; e \dot{m}_i é a vazão mássica instantânea em kg.s^{-1} .

Nas simulações foram utilizados quatro níveis de velocidade angular do helicóide $2,72 \text{ rad s}^{-1}$ (26 min^{-1}), $5,23 \text{ rad s}^{-1}$ (50 min^{-1}), $7,33 \text{ rad s}^{-1}$ (70 min^{-1}) e $14,66 \text{ rad s}^{-1}$ (140 min^{-1}). Villibor et al. (2008), observaram que a altura do reservatório não influencia significativamente na taxa de aplicação e Furlani et al. (2008) mostram que foi inconclusiva a significância deste fator na taxa de aplicação. Camacho-Tamayo et al. (2009) apresentam um modelo matemático da taxa de aplicação média fornecida por um dosador helicoidal que correlaciona a velocidade angular e despreza a altura como fator relevante na taxa de aplicação esperada. Este modelo mostra uma relação linear entre a taxa de aplicação e a velocidade

angular do eixo do dosador helicoidal. Também observam que a eficiência de transporte (η), que é função dos parâmetros construtivos e do tipo de fertilizante utilizado, pode ser considerada constante ao longo do tempo.

3.3 MODELO MATEMÁTICO

No modelo matemático descrito por Martins (1999), a vazão mássica de um dosador helicoidal flutuante é função da velocidade angular do eixo, da área útil de deslocamento, do passo da rosca do helicóide e da densidade do fertilizante, conforme a Equação 1.

$$\dot{m}_m = \eta A p \dot{\theta} \rho \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

\dot{m}_m é a vazão mássica média do dosador em kg s^{-1} ; $\dot{\theta}$ é a velocidade angular média do eixo de acionamento em rad s^{-1} ; A é a área útil do helicóide em m^2 ; p é o passo da rosca do helicóide; ρ é a densidade do fertilizante em kg m^{-3} .

A área útil de deslocamento é calculada segundo a Equação 2 e a eficiência do mecanismo de transporte é dada pela relação entre a vazão mássica real e vazão mássica teórica (Equação 3).

$$A = \pi (R^2 - r^2) \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

R é o raio externo do helicóide em m ; r é o raio interno do helicóide em m .

$$\eta = \frac{\dot{m}_r}{A p \dot{\theta} \rho} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

\dot{m}_r é a vazão mássica média medida em kg s^{-1} .

Observa-se que este modelo se limita à taxa de aplicação média, ou seja, não considera a variação da taxa de aplicação ao longo do tempo. Para ser utilizado em sistemas de ATV, o modelo deve levar em consideração que há uma variação na taxa de aplicação durante um giro do helicóide, como observado por Cappelli et al. (2000). Essa variação se dá em função do fator de enchimento do transportador, relacionado com sua eficiência (η) por meio da Equação 4, e pela posição da extremidade do helicóide em relação ao ponto de descarga do dosador.

$$f = (1 - \eta) \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

f é o fator adimensional de enchimento.

A oscilação na taxa de aplicação durante um giro do helicóide ocorre devido ao arraste do material, que o concentra próximo ao helicóide, deixando um volume vazio no transportador. De acordo com a Equação 4, o fator de enchimento torna-se nulo quando o dosador estiver completamente cheio ($\eta=100\%$). Somente nesta condição a vazão do dosador será constante ao longo do tempo. Nota-se, ainda, que quanto menor for a eficiência de transporte mais oscilante será a aplicação de fertilizante. Normalmente, para dosadores do tipo helicoidal, a eficiência de transporte não depende da velocidade angular do eixo do helicóide, já que, como observado por Camacho-Tamayo et al. (2009), a taxa de aplicação se comporta de forma linear em função da velocidade angular do eixo de acionamento. No mesmo trabalho observa-se que os fatores que influenciam a eficiência do transporte são associados às características físicas do fertilizante, tais como a densidade e o ângulo de talude, bem como, pelas características construtivas do mecanismo dosador.

Para a construção do modelo matemático considerou-se que a faixa de vazão mássica fornecida pelo dosador é dada pela razão entre a mínima e máxima vazão observada experimentalmente, Equação 5.

$$K = \frac{\dot{m}_{min}}{\dot{m}_{max}} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

\dot{m}_{min} é a vazão mínima observada em kg ha^{-1} ; \dot{m}_{max} é a vazão máxima observada em kg ha^{-1} .

Considerando-se que a variação da vazão se dá em torno de uma determinada vazão média (Equação 1), associada a uma componente oscilatória do tipo senoidal, cuja amplitude é definida pelo fator de enchimento (Equação 4) e normalizado-se pela faixa de vazão mássica observada (Equação 5) pode-se equacionar a variação de massa aplicada a cada instante de tempo em função da velocidade angular e da posição do helicóide.

$$\dot{m}_i(t) = K (A p \eta \rho) \dot{\theta}(t) \left\{ \frac{1}{K} + [f \text{sen}(\theta(t))] \right\} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

\dot{m}_i é a vazão mássica instantânea fornecida pelo dosador em kg s^{-1} ; $\dot{\theta}(t)$ é a velocidade angular instantânea em rad s^{-1} ; $\theta(t)$ é a posição angular da extremidade do helicóide em função do ponto de saída do fertilizante em rad.

A Equação 6 é, portanto, o modelo matemático proposto para descrever a vazão mássica instantânea de fertilizante em função da velocidade angular de acionamento do eixo do mecanismo dosador.

3.3.1 Validação e Simulação

Para a simulação do modelo se utilizou o programa de matemática computacional MATLAB. Os dados experimentais foram obtidos utilizando-se o sistema de medição de vazão mássica de fluxo contínuo proposto por Martins (1999) e Cappelli et al. (2000), conforme ilustra a Figura 27. No sistema utilizou um medidor de vazão composto de uma célula de carga com capacidade nominal de 4,9 N acoplado a um amplificador de corrente contínua e a um sistema de aquisição de sinais. A célula de carga foi montada sob um anteparo com inclinação de 45° , por onde escoava o fluxo de fertilizante, conforme ilustra a Figura 3.

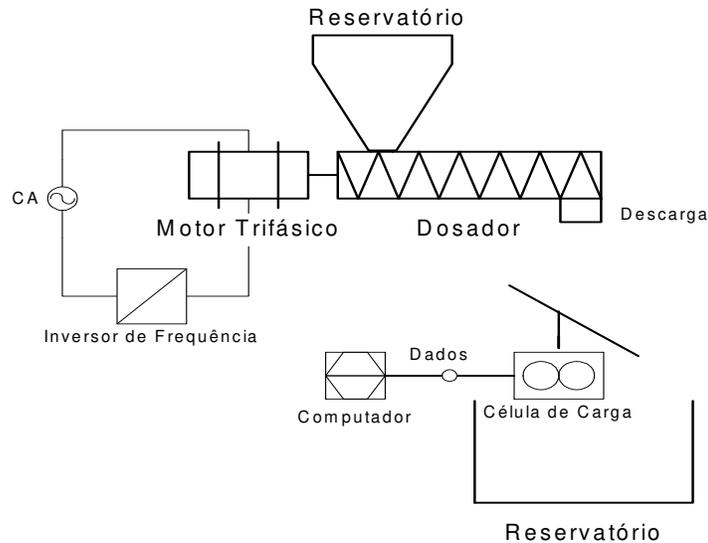


Figura 27. Diagrama esquemático do sistema de medição da vazão mássica

Foram realizados quatro ensaios para diferentes velocidades angulares do eixo do dosador de fertilizante: $2,72 \text{ rad s}^{-1}$ (26 min^{-1}), $5,23 \text{ rad s}^{-1}$ (50 min^{-1}), $7,33 \text{ rad s}^{-1}$ (70 min^{-1}) e $14,66 \text{ rad s}^{-1}$ (140 min^{-1}). Em cada ensaio foram realizadas três repetições. Inicialmente, selecionou-se a rotação desejada até a estabilização do fluxo de fertilizante, posteriormente foi acionado o sistema de coleta de dados durante dez segundos, com uma taxa de aquisição de 10 Hz. O tipo de fertilizante utilizado foi a mistura 4-20-20, com densidade aparente de $1,13 \text{ g mm}^{-3}$, ângulo de talude de $0,70 \text{ rad}$ (40°) e diâmetro médio ponderado dos grânulos de 2,13 mm.

Os dados foram filtrados em pós-processamento, com a finalidade de se eliminar ruídos no sinal amostrado. A Figura 28 mostra os resultados obtidos em cada ensaio, bem como as respectivas vazões mássicas médias no período de aquisição de dados.

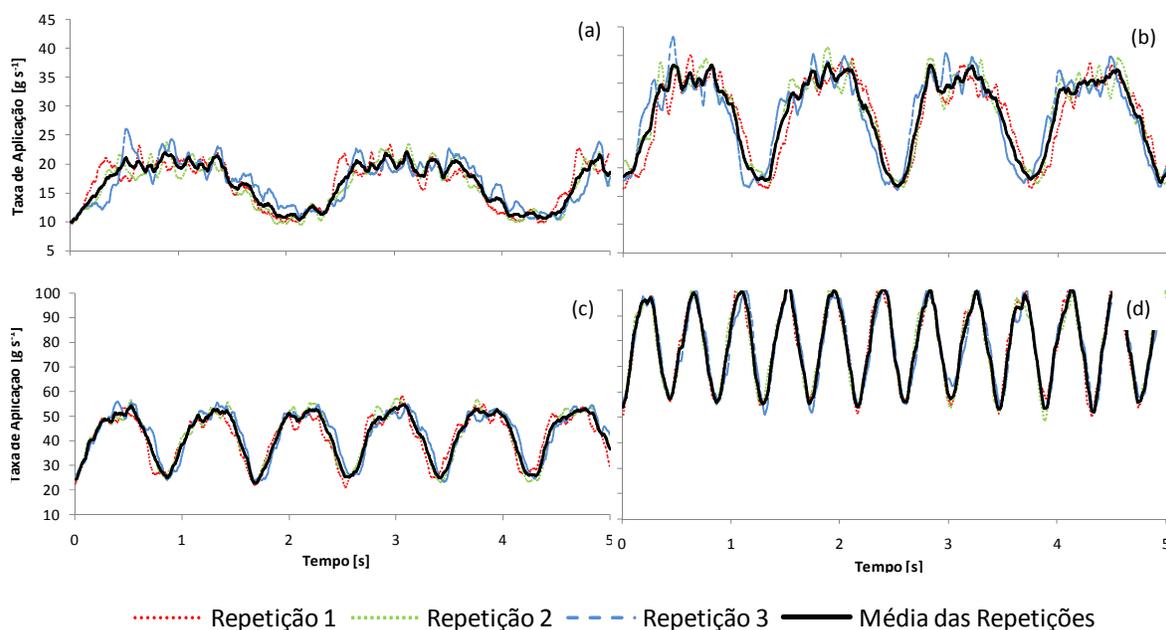


Figura 28. Taxa de aplicação de fertilizante em função do tempo em função do tempo (a) $2,72 \text{ rad s}^{-1}$ (26 min^{-1}); (b) $5,23 \text{ rad s}^{-1}$ (50 min^{-1}); (c) $7,33 \text{ rad s}^{-1}$ (70 min^{-1}); e (d) $14,66 \text{ rad s}^{-1}$ (140 min^{-1})

Os resultados obtidos nos experimentos são mostrados na Tabela 3. Observa-se que a eficiência de transporte variou entre 14,1 % e 15,3 % e que não apresentam diferença estatisticamente significativa. O CV da taxa média de aplicação variou entre 19,2 % e 22,7 %, assemelhando-se aos resultados obtidos por Goettems et al. (2010), utilizando um mecanismo dosador helicoidal semelhante (CV = 25,0 %).

Tabela 3. Resultados experimentais médios em função da velocidade angular do helicóide em rad s^{-1} entre parênteses as velocidades angulares em rotação por minuto.

Vel. Angular em rad s^{-1}	Eficiência em %	Vazão Máxima em kg s^{-1}	Vazão Mínima em kg s^{-1}	Vazão Média em kg s^{-1}	Coef. Variação em %	Intervalo de Confiança em kg s^{-1}
2,72 (26)	14,5 ^a	22,04	10,03	16,57	22,2	± 2,46
5,73 (50)	15,3 ^a	38,45	16,85	29,75	22,7	± 3,60
7,33 (70)	15,1 ^a	54,77	22,96	42,42	22,1	± 4,39
14,66 (140)	14,1 ^a	103,62	52,14	79,06	19,2	± 4,90

Valores com mesma letra não apresentam diferença significativa para teste Tukey de 95% de confiança.

A simulação do modelo proposto do dosador de fertilizante foi realizada por meio de uma ferramenta de solução simbólica do programa MATLAB. O programa obedeceu ao fluxograma apresentada na Figura 29. As variáveis independentes foram: velocidade angular do dosador; posição angular do helicóide e as propriedades geométricas do helicóide (área útil

e passo). A variável calculada foi a vazão mássica instantânea em kg s^{-1} , obtida da solução numérica da Equação 6.

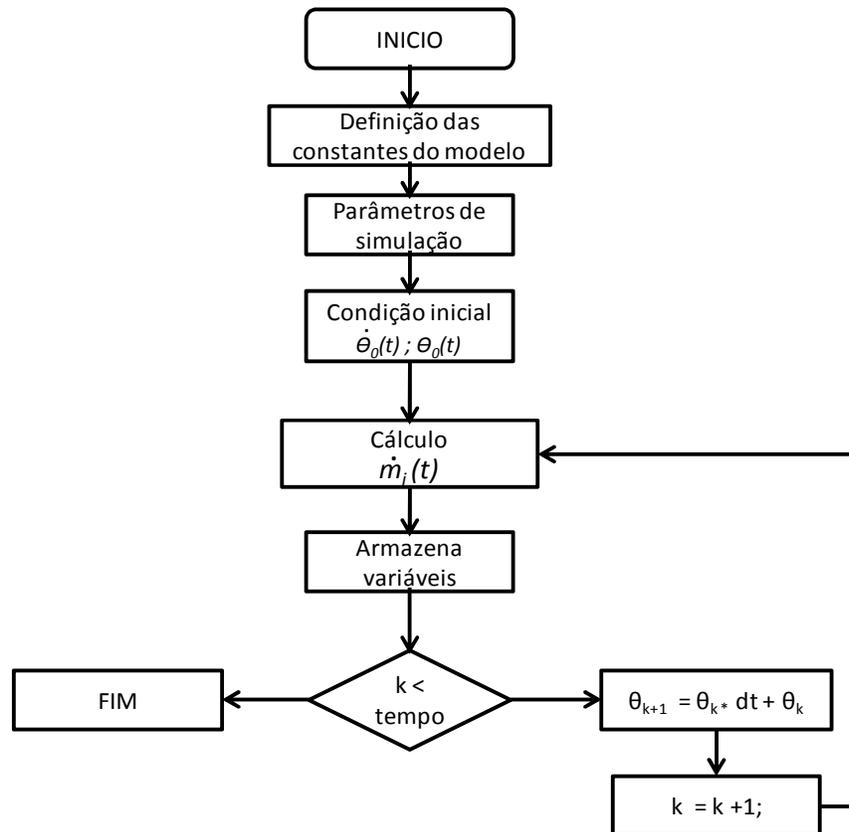


Figura 29. Fluxograma do programa de simulação do modelo proposto

Finalmente, obtiveram-se as curvas de resposta do modelo proposto, calculadas para as mesmas condições experimentais. Os dados utilizados na simulação são: raio interno 17,0 mm, raio externo 23,0 em mm, área útil 753,9 em mm^2 , passo 45 em mm.

A Figura 30 mostra as comparações dos resultados obtidos por meio do modelo matemático proposto, com os resultados experimentais para diferentes velocidades angulares de acionamento do eixo do dosador de fertilizante, bem como, os respectivos coeficientes de correlação entre as curvas experimental e simulada.

Para obtenção dos intervalos de confiança de cada ensaio se utilizou o teste de distribuição de Student para um nível de confiança de 95%.

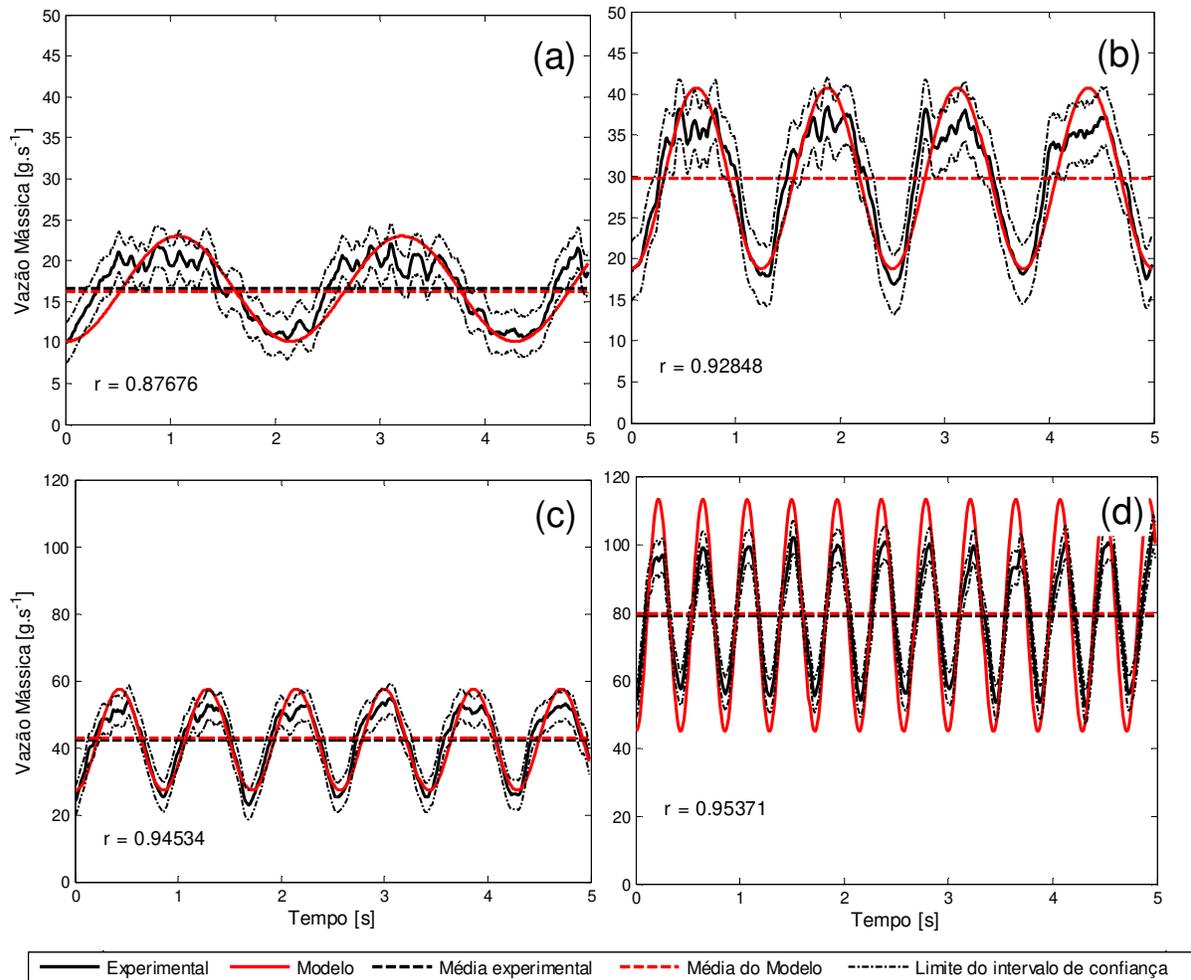


Figura 30. Comparação entre a simulação do modelo proposto e os dados experimentais; (a) velocidade angular de $2,72 \text{ rad s}^{-1}$ (26 min^{-1}); (b) rotação de $5,73 \text{ rad s}^{-1}$ (50 min^{-1}); (c) rotação de $7,33 \text{ rad s}^{-1}$ (70 min^{-1}); e (d) rotação de $14,66 \text{ rad s}^{-1}$ (140 min^{-1})

O modelo matemático proposto se mostrou preditivo e significativo para descrever o comportamento da vazão mássica instantânea de um dosador helicoidal em função dos parâmetros construtivos do equipamento e das condições de operação (velocidade angular de acionamento e posição angular do fim do helicóide em relação ao ponto de descarga). O modelo matemático proposto deve ainda ser testado em outros dosadores helicoidais para verificar a influência dos parâmetros construtivos na sua resposta.

Simulando-se a taxa de fertilizante aplicada em função do tempo, para níveis de eficiência de transporte variando entre 15 e 95 %, verifica-se que à medida que se aumenta a eficiência de transporte se reduz a desuniformidade de aplicação (Figura 31a). Nota-se, ainda,

que o fator de enchimento influi na qualidade de aplicação do insumo de forma inversa à eficiência.

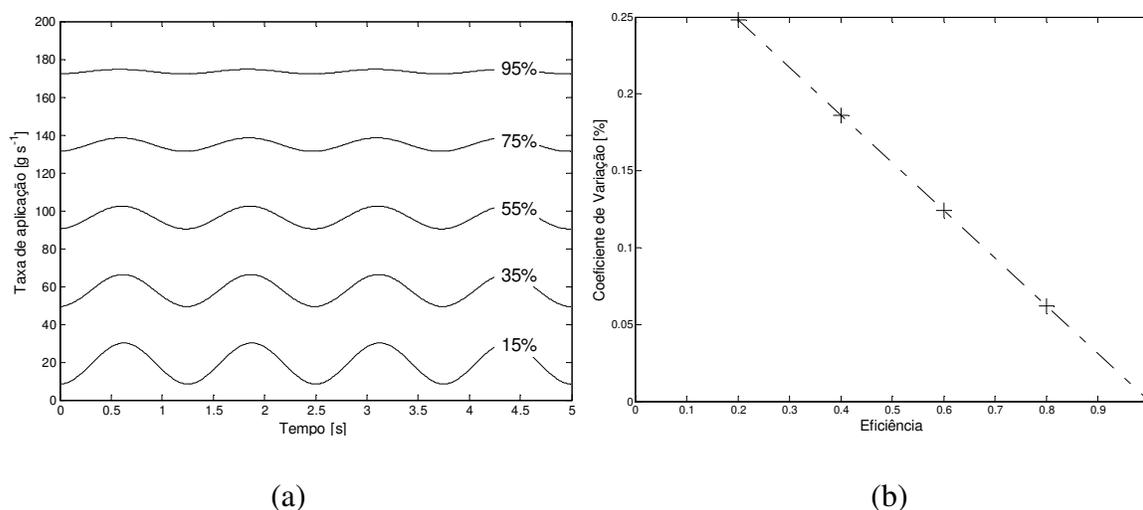


Figura 31. Resultados da simulação do modelo proposto variando-se a eficiência do dosador helicoidal (a) variação da taxa de aplicação ao longo do tempo; (b) coeficiente de variação em função da eficiência do dosador

O incremento da eficiência reduz o coeficiente de variação da taxa de aplicação, conforme mostrado no gráfico da Figura 31b. Isso se dá devido ao fator de enchimento que, conforme a Equação 6, é o responsável pela componente oscilatória do sistema, sendo, portanto, a variável que afeta diretamente a qualidade da aplicação do fertilizante no que diz respeito à uniformidade. A correção do fator de enchimento, a fim de melhorar a uniformidade de aplicação, só pode ser realizada por meio do aumento da eficiência de transporte, a qual só pode ser aumentada mediante as alterações na concepção original do dosador, como por exemplo, o re-projeto da boca de alimentação ou a introdução de um helicóide de passo variável.

Conforme se observa nos resultados obtidos por Umezu e Cappelli (2006) e Camacho-Tamayo et al. (2009), a vazão mássica média em função da velocidade angular do eixo do dosador pode ser aproximada por uma curva linear. Isto confirma que a velocidade angular do eixo de acionamento não influi na eficiência de transporte do dosador, caso contrário seria notado um fator de não-linearidade nos resultados obtidos na simulação. O CV da aplicação é função da eficiência do mecanismo de transporte, isto é, para diferentes velocidades angulares de acionamento o CV permanece constante, conforme mostra o gráfico

da Figura 31 e os resultados apresentados na Tabela 3. O mesmo pode ser afirmado para os demais fatores de projeto que não alterem a eficiência de transporte.

Como não há uma maneira simples de se obter um mecanismo de transporte helicoidal que consiga operar próximo à sua máxima eficiência, para se corrigir os efeitos negativos provocados pela característica oscilatória da aplicação realizada pelo dosador, pode-se utilizar um sistema de controle da velocidade angular do eixo do helicóide fazendo-se variar sua velocidade angular durante um ciclo de acionamento.

3.3.2 Simulação do conjunto motor-dosador

Para o projeto de um sistema de controle em malha aberta da taxa de aplicação foi construído um modelo matemático utilizando o programa MATLAB – SIMULINK. O modelo engloba o mecanismo dosador de fertilizante, um motor elétrico e o respectivo sinal de atuação. Na simulação utilizou-se o método de resolução de Dormand-Prince (ode5) no domínio do tempo, com passo fixo entre as interações de 0,001 s. O método foi utilizado com intervalo reduzido entre iterações com o objetivo de se eliminar possíveis erros provocados pelas resoluções numéricas.

Na simulação o dosador foi acionado por um motor elétrico de corrente contínua operando em malha aberta. Foi construído um gerador de sinal que tem a função de simular diferentes sinais de excitação no sistema. Este sinal passa por um conversor *Pulse-Width Modulation* (PWM) de 10 kHz que irá fornecer um sinal de tensão modulada para o acionamento do motor elétrico, como normalmente utilizado em um sistema físico real (Figura 32).

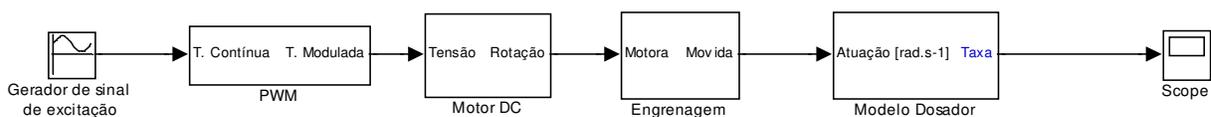


Figura 32: Diagrama de blocos da simulação do sistema em malha aberta no programa MATLAB-SIMULINK

As funções de transferência, Equações 8 e 9, representativas do motor elétrico utilizado (corrente contínua de imã permanente) foram as descritas por Fitzgerald et al. (2006).

$$G_1(s) = \frac{\Theta(s)}{V_A(s)} = \frac{K_T}{L J s^2 + (J R + L B)s + (R B + K_E K_T)} \quad \text{Equação 7}$$

$$G_2(s) = \frac{\Theta(s)}{F(s)} = - \frac{(L s + R)}{L J s^2 + (J R + L B)s + (R B + K_E K_T)} \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

$G_1(s)$ e $G_2(s)$ são as funções de transferência que representam as relações entre a velocidade angular do eixo e a tensão de armadura do motor, no primeiro caso, e o atrito seco, no segundo; $\Theta(s)$ é a velocidade angular do eixo do motor em rad s^{-1} ; $V_A(s)$ é a tensão aplicada no circuito da armadura do motor em V; $F(s)$ é uma constante representativa do atrito seco em N m; R é a resistência de armadura em Ω ; L é a indutância em H; K_E é a constante da força contra-eletromotriz em V s rad^{-1} ; K_T é a constante de torque em N m A^{-1} ; J é o momento de inércia combinado da armadura do motor e da carga em kg m^2 ; B é o atrito viscoso do motor em N m s rad^{-1} .

Como foi considerado que o motor elétrico utilizado possui comportamento ideal, o resultado final da simulação pode ser aproximado somando-se os efeitos individuais. Com isso, tem-se a Equação 10:

$$G_M(s) = G_1(s) V_A(s) + G_2(s) F(s) \quad \text{Equação 9}$$

Os parâmetros utilizados nas simulações foram os do motor elétrico da marca Motron, modelo MR210, que tem como principais características: potência nominal de 144 W, tensão de alimentação 24 V, velocidade angular máxima de $6,28 \text{ rad s}^{-1}$, R 0,36 Ω , L 28,4 mH, K_E 1,67 V s rad^{-1} , K_T 1,67 N m A^{-1} , B 0,032 N m s rad^{-1} , $F(s)$ 0,266 N m e J 0,027 kg m^2 .

As características construtivas consideradas para o dosador foram: o passo da rosca de 45 mm e a área útil do helicóide de $7,54 \cdot 10^2 \text{ mm}^2$. A densidade do fertilizante adotada foi de 1130 kg m^{-3} . A Figura 33 mostra os resultados da simulação com a excitação da tensão de armadura do motor constante durante o ciclo de acionamento e a correspondente resposta na taxa de aplicação.

Foram introduzidos dois degraus de 6 V no sinal de excitação do sistema, o primeiro após 1 s e o segundo após 4 s do início da simulação. Um pequeno atraso na resposta do sistema ocorre devido à dinâmica do motor elétrico. Como a eficiência de transporte é constante, o atraso de transporte no dosador é nulo e pode ser desprezado. Também foi desprezado o atraso de transporte decorrente da distância do ponto de saída do dosador e o local de deposição do fertilizante. Nestas condições o tempo subida do sistema foi de apenas 0,05 s, mostrando que o torque disponível no motor elétrico foi suficiente para vencer rapidamente a inércia do conjunto dosador mais fertilizante transportado. Isso corrobora os resultados obtidos por Jafari et al. (2010) que indicam a possibilidade de utilização de motores elétricos para a atuação nos sistemas de dosagem.

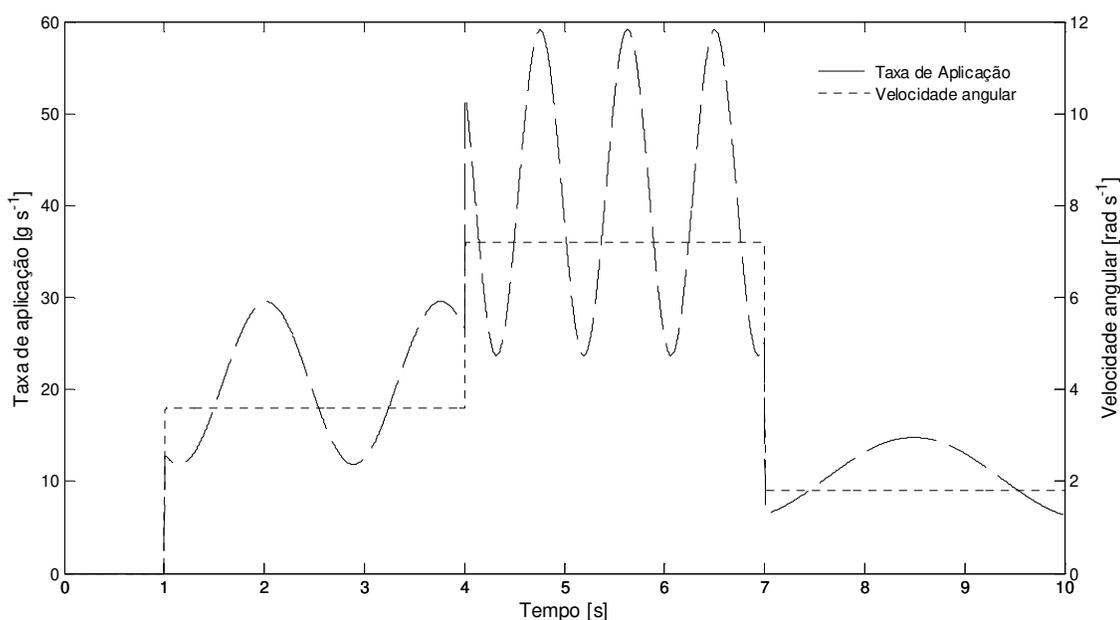


Figura 33. Simulação da taxa de aplicação em função do tempo para tensão de armadura constantes no ciclo de operação do acionamento do motor

Com a finalidade de se estudar a possibilidade da redução do CV, utilizando-se o acionamento com velocidade angular variável durante o ciclo de operação, empregou-se um gerador de sinal senoidal com a amplitude do sinal variando de 0 até 7 V o que equivale a velocidades angulares entre 0 e 4,2 rad s⁻¹ (40,1 min⁻¹), valor de referência (bias) de 12 V equivalente a 7,2 rad s⁻¹ (68,8 min⁻¹) (ponto médio de operação) e defasagem entre 2,50 à 3,14 rad (180°). Os gráficos da Figura 34 mostram os comportamentos obtidos do CV em função da amplitude e da defasagem do sinal. Analisando-se a Figura 34a observa-se que na condição

inicial, onde a atuação foi constante (amplitude nula), a característica oscilatória do dosador é mantida e o CV foi de aproximadamente 29 %. Ao se incrementar a amplitude do sinal de excitação percebe-se uma atenuação do CV até um mínimo de 12,7 %, correspondente a uma amplitude de 4 V ($2,4 \text{ rad s}^{-1}$). Isso se deve à compensação da taxa de aplicação por meio da variação da velocidade angular no ciclo de operação. À medida que a amplitude do sinal de atuação aumenta, além deste ponto de mínimo, o CV volta a aumentar já que a compensação ultrapassou seu valor máximo.

O CV também pode ser diminuído em função da defasagem do sinal de atuação. A Figura 34b mostra que ao se reduzir a defasagem a partir de 3,14 rad (180°) o CV diminui até um mínimo de 11,5 % à 2,98 rad ($170,7^\circ$) de defasagem. Isso se deve à compensação do atraso devido à dinâmica do motor elétrico sem, contudo, afetar consideravelmente a sincronização entre o sinal de atuação e a variação da taxa de aplicação. À medida que a defasagem torna-se menor a dinâmica do motor passa a ser compensada apenas parcialmente e o CV passa a aumentar devido à deterioração do referido sincronismo.

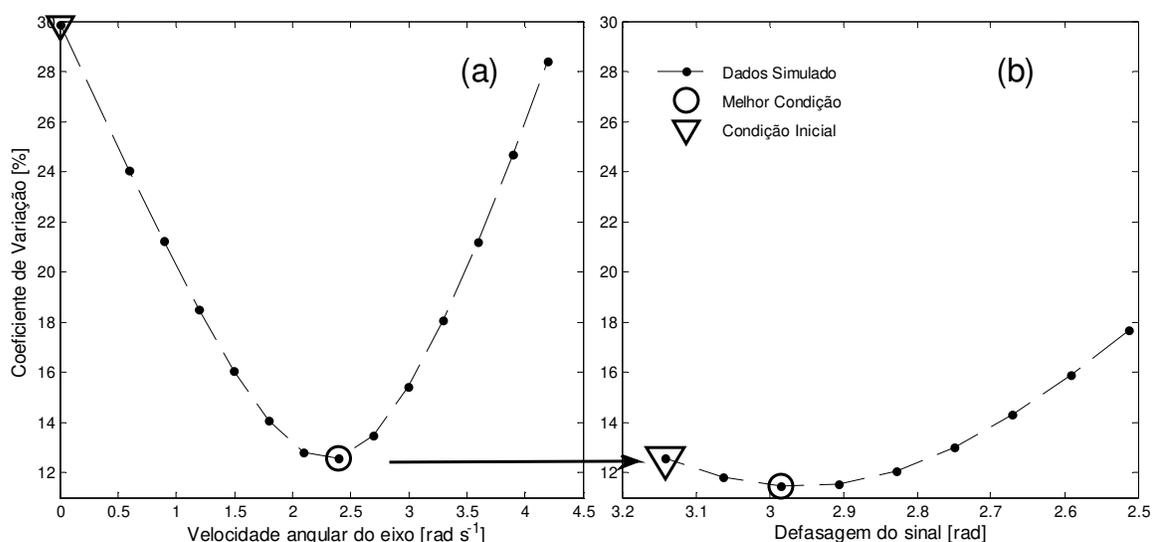


Figura 34. Simulação do conjunto motor elétrico – dosador para um sinal de acionamento senoidal. (a) CV em função da amplitude da velocidade angular de acionamento; (b) CV em função da defasagem do sinal de atuação

A curva da taxa de aplicação simulada com as condições de compensação ideais (amplitude de 4 V e defasagem 2,98 rad) apresentada na Figura 35, mostra uma composição

de dois sinais senoidais devido à associação em série do sinal senoidal de atuação e da característica intrínseca da aplicação com o dosador helicoidal.

Analisando-se a Figura 35 nota-se claramente a atenuação na variação da taxa de aplicação obtida com o acionamento da velocidade angular variável durante um ciclo de operação em relação à obtida com velocidade angular constante.

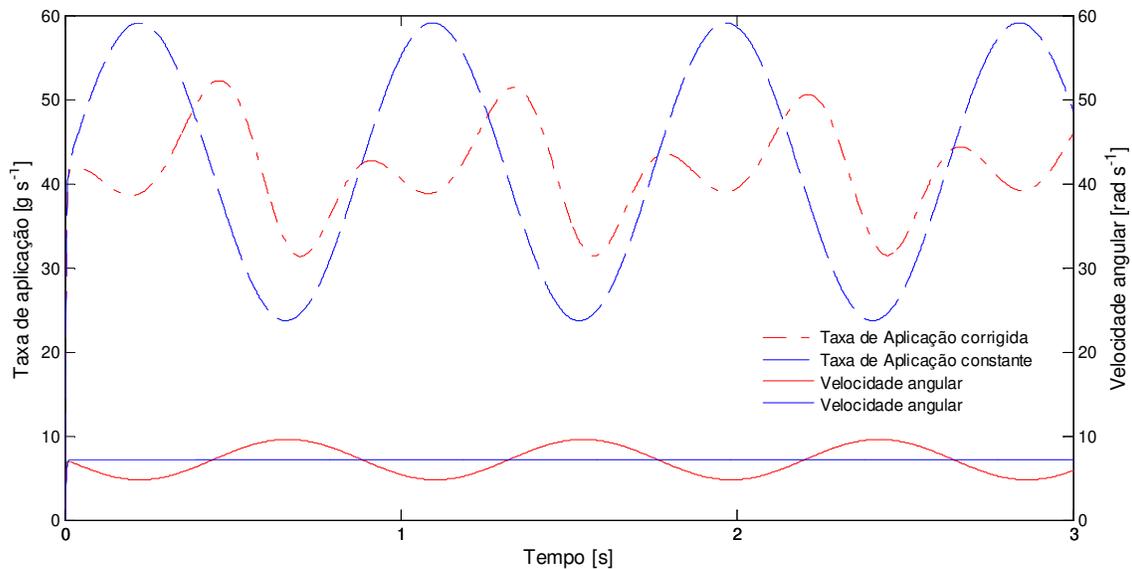


Figura 35 Simulação da taxa de aplicação em função do tempo para θ constante e θ variável no ciclo de operação

Nas simulações pode-se observar que foi possível, por meio da mudança na atuação da velocidade angular do eixo de acionamento do dosador helicoidal, reduzir o CV da taxa de aplicação de fertilizante provocada pela componente oscilatória do mecanismo dosador. Com isso, para reduzir ou mesmo anular o efeito da oscilação na aplicação de fertilizantes com o dosador helicoidal, pode-se utilizar sistemas de controle que atuem na velocidade angular do sistema de acionamento em função do erro da taxa de aplicação.

3.4 CONCLUSÕES

A variação da taxa de aplicação de fertilizantes, realizada com os dosadores helicoidais convencionais, é uma característica intrínseca destes dosadores e é função da eficiência de transporte do dosador.

A taxa de aplicação pode ser simulada utilizando-se modelos matemáticos que levem em consideração o fator de enchimento definido pela Equação 4.

O modelo matemático proposto (Equação 6) foi adequado para fins de simulação da taxa de aplicação de fertilizantes com o dosador helicoidal convencional, bem como, com o dosador conceitualmente proposto.

A uniformidade de aplicação, expressa pelo CV da taxa de aplicação, pode ser reduzida atuando-se na velocidade angular do eixo de acionamento do helicóide durante um ciclo de operação.

Atuando-se adequadamente na tensão de armadura de um motor elétrico de corrente contínua e imã permanente, pode-se variar a velocidade angular de acionamento durante um ciclo de operação do helicóide do dosador de fertilizante.

O sinal de atuação (tensão de armadura) pode se otimizado ajustando-se sua amplitude e defasagem.

A dinâmica do motor elétrico não tem influência substancial na resposta da taxa de aplicação.

3.5 BIBLIOGRAFIA

CAMACHO-TAMAYO, J. H.; BARBOSA, A. M.; PÉREZ, N. M.; LEIVA, F. R.; RODRÍGUEZ, G. A. Operational characteristics of four metering systems for agricultural fertilizers and amendments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.605-613, 2009.

CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K.; MARTINS, M. M. Avaliação do desempenho de um dosador helicoidal para aplicação de fertilizantes sólidos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.20, n.2, p130-138, 2000.

FITZGERALD A. E.; KINGSLEY JR, CHARLES; UMANS, STEPHEN D. **Máquinas Elétricas**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FURLANI, C. E. A.; SILVA, R. P. da; LOPES, A.; CORTINHAS NETO, A.; REIS, G. N. dos. Efeito do passo da helicóide e da carga no reservatório na distribuição de adubo. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35, 2006, Canoas. **Anais...** . João Pessoa: Sbea, 2005. p. 1 - 4. CD-ROM.

GISH, J. K.; FEY, E.; COLOMBARI, L. F.; BERTALUZI, D. R.; SCHWENGBER, L. Distribuição longitudinal de adubo com diferentes passos de rosca do dosador helicoidal comum de uma semeadora. In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Vitória. **Anais...** . Vitória: Sbea, 2010. p. 1 - 4. CD-ROM.

GOETTEMS, J. M.; FEY, E.; DOS REIS, G. Z.; HOFFMAN, M.; MROZINSKI, C. Distribuição longitudinal de fertilizante em sistemas dosadores helicoidais modificados de semeadoras. In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Vitória. **Anais...** . Vitória: Sbea, 2010. p. 1 - 4. CD-ROM.

JAFARI, M.; HEMMAT, A.; SADEGHI, M. Development and performance assessment of a DC electric variable-rate controller for use on grain drills. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 73, n. 1, 56-65, 2010.

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, 2008.

MARTINS, M. M. **Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos**. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, 1999.

OLIVEIRA, R. B. de; LIMA, J. S. de, XAVIER, A. C.; PASSOS, R. R.; SILVA, S. de A. SILVA, A. F. da. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.176-186, 2008.

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.

ULIANA, M. B.; FEY, E.; KUNZ, G. et al. Avaliação da uniformidade de distribuição longitudinal de adubo em semeadora adubadora utilizando rosca sem fim comum e modificada. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Canoas. **Anais...** . Canoas: Sbea, 2005. p. 1 - 4. CD-ROM.

UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L. Desenvolvimento e avaliação de um controlador eletrônico para equipamentos de aplicação de insumos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.1, p.225–230, 2006.

WERNER, V.; SCHLOSSER, J. F.; ROZIN, D.; PINHEIRO, E. D.; DORNELLES, M. E. C. Aplicação de fertilizantes a taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 658–663, 2007.

YU, J. H.; KIM, Y. J.; RYU, K. H. Development of a Controller for Variable-Rate Application of Granular Fertilizer in paddy farming. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006. Portland. **Proceedings...** . Portland: Asabe, 2006. p. 1 - 12.

Capítulo 4. SENSOR DE DESUNIFORMIDADE DE FLUXO DE FERTILIZANTE GRANULAR

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protótipo de um sensor de medição de fluxo de massa de fertilizante granular visando avaliar os parâmetros relevantes de projeto. Este sensor conta com um duto vazado na saída do dosador de fertilizante. No interior deste tubo há um êmbolo, com uma célula de carga, que se desloca que tem a função de mensurar a força exercida sobre o mesmo. Em função da posição do êmbolo pode-se definir a área de saída para o fertilizante e conseqüentemente a quantidade de fertilizante aplicado. O protótipo foi testado utilizando material grânulo plástico, com propriedades semelhantes às propriedades do fertilizante. O coeficiente de determinação do modelo, que relaciona tensão de saída célula de carga com o fluxo médio de massa, ficou em 98,86 %. Pelos ensaios se observa que o sensor foi adequado para a aplicação proposta.

PALAVRAS CHAVE: Sistemas de controle, máquinas agrícolas, adubadoras

PROJECT AND EVALUATION OF A GRANULAR FERTILIZER FLOW METER

ABSTRACT: The aim of this study was to develop a prototype of a sensor for measuring mass flow of granular fertilizer to evaluate the relevant parameters of the project. This sensor has a hollow pipe at the exit of the feeder of fertilizer. Inside this tube is a piston with a load cell, which moves that serves to measure the force exerted on it. Depending on the position of the piston can define the output area for fertilizer and therefore the amount of fertilizer applied. The prototype was tested using plastic bead material with similar properties to the properties of fertilizer. The coefficient of determination, which relates the output voltage of the load cell with the average mass flow, was 98.86 %. The tests we observe that the sensor was suitable for the proposed application.

Key-words: control systems, agriculture machines, fertilizer distributor

4.1 INTRODUÇÃO

A produção agrícola, em escala comercial, depende da reposição de nutrientes do solo. Para isso se faz necessário a utilização de fertilizantes para repor ou melhorar a fertilidade do solo com a finalidade de se obter uma produtividade economicamente viável. O custo de tal operação é um fator relevante no custo total de produção (BARBOSA NETO, 2008). Além disso, o Brasil produz somente parte do fertilizante que utiliza, aproximadamente 8,8 Mton, e importa cerca de 15,4 Mton (64 % do consumo nacional de fertilizantes) o que produz uma déficit na balança comercial neste item (ANDA, 2011).

Diversos trabalhos buscam desenvolver ou adaptar novas tecnologias aos equipamentos de aplicação de fertilizante existentes. Umezu e Cappelli (2006) projetaram um sistema de controle de rotação do eixo de um dosador de fertilizante, este controle se mostrou capaz de atuar no sistema modificando a taxa de aplicação de forma precisa que o sistema convencional. Cugatti et al. (2006) projetaram um sistema de controle e atuação no sistema hidráulico de um mecanismo de aplicação a lança de fertilizante sólido a taxas variáveis. Em ambos os casos os autores desenvolveram equipamentos capazes de atuar de maneira específica em cada local da área de atuação. Contudo, os mesmos autores se utilizaram de medidas indiretas da taxa de aplicação para elaborar as estratégias de controle utilizadas. Este tipo de estratégia pode corrigir a taxa de aplicação média, não corrigindo eventuais distúrbios ou características de aplicação do sistema mecânico utilizado. Além disso, Oliva (2000) observa que há diferença estatística entre as quantidades médias aplicadas para mesmos modelos de dosadores helicoidais flutuantes, o que mais outro fator de erro na taxa de aplicação. Com isso, torna-se relevante o desenvolvimento de sensores capazes de medir, em tempo real, a taxa de aplicação do dosador de fertilizante. Com esta informação pode-se projetar sistemas de controle, em malha fechada, que corrigem automaticamente a vazão mássica em função do ponto de operação previamente estabelecido ou por meio de mapas de aplicação. Visando a minimizar este problema diversos trabalhos foram desenvolvidos como Swisher et al. (2002) desenvolveram e avaliaram, em laboratório, um protótipo de um sensor óptico para mensurar a taxa, em número de partículas, de materiais granulares. Os componentes do sensor incluíam um gerador de laser o qual transmitia a luz através de uma

câmara trapezoidal para um grupo de elementos fotodiodos. Bem como outros projetos, não específicos para fertilizantes, foram apresentados em diversos trabalhos. Harris et al. (1997) desenvolveram um sistema de medição do fluxo de massa de grânulos. Este sistema consiste em um cone instrumentado com uma célula de carga que mede a massa depositada acima do mesmo. O fluxo de massa escoia pelos orifícios e quanto maior o fluxo de massa depositada sobre o cone, maior será a coluna de sólido. Benes e Zehnula (2000) desenvolveram um sensor de medição de fluxo de partículas sólidas, por meio de um sensor acústico. Neste sistema se correlaciona a intensidade do sinal elétrico com a quantidade de produto que passa pelo duto instrumentado. Grift e Crespi (2008) desenvolveram um sistema, para determinar o fluxo de partículas usando o método de Poisson, que consiste na medição de intervalos de tempo que não é detectada a passagem de produto pelo sensor e intervalos com produto detectado, e com isso determinar a quantidade de produto que passou pelo sensor.

Neste sentido se justificam pesquisas em instrumentos de medição, em tempo real, da quantidade de fertilizante aplicado pelo dosador. O objetivo deste trabalho foi desenvolver um protótipo de um sensor de medição de fluxo de massa de um dosador de fertilizante granular visando o desenvolvimento de sistemas de controle de aplicação mais eficientes.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O sensor desenvolvido foi baseado no sistema de medição do fluxo de massa de grânulos desenvolvido por Harris et al. (1997) que consiste em um cone vertical instrumentado com uma célula de carga que mede a massa depositada acima do mesmo e o fluxo de massa escoia por orifícios. O sistema desenvolvido neste trabalho foi montado na saída do mecanismo dosador de fertilizante e é constituído de um êmbolo instalado em uma câmara de descarga, Figura 36. O êmbolo é acoplado a uma célula de carga que tem como função medir a força que o fluxo de fertilizante exerce sobre o êmbolo. Com este dado o sistema de controle do sensor realiza a atuação em um motor de passo que faz com que o êmbolo se desloque para frente ou para trás. Sabendo que há uma relação direta entre cada pulso no motor de passo e o deslocamento do êmbolo é possível se determinar a posição do mesmo com a qual se determina a taxa de aplicação que é função da área de saída da câmara e da força exercida pelo fluxo de massa no êmbolo.

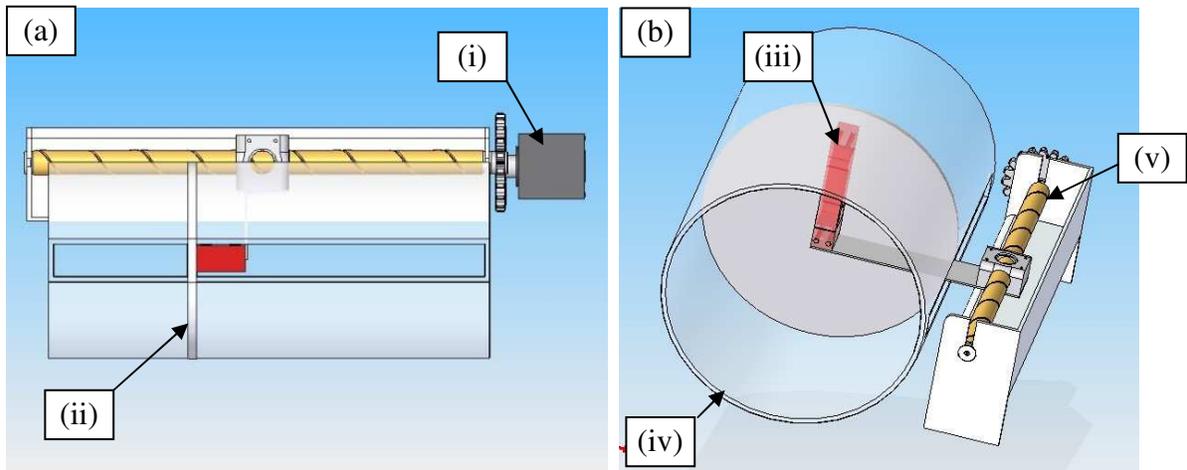


Figura 36. Esquema do mecanismo do sensor de medição de fluxo de fertilizante granular; (a) vista lateral; (b) vista em perspectiva; (i) Motor de passo; (ii) Êmbolo; (iii) Célula de carga; (iv) Câmera de descarga; (v) eixo de posicionamento

4.2.1 Protótipo do sensor de fluxo

O protótipo do sensor de fluxo de fertilizante foi montado junto a um dosador de fertilizante marca Agromac, modelo Fertisystem. Este é acionado por um motor elétrico (Motron, MR 210-120) que tem como principais características 24V de alimentação, 134W de potência e uma rotação máxima de $12,57 \text{ rad s}^{-1}$ (120 min^{-1}), Figura 37a. O embolo foi construído em acrílico de 5 mm e fica interno ao um tubo de 63,5 mm (2,5 pol.). Fixado ao embolo está uma célula de carga marca HBM, modelo PW4MC3 com capacidade máxima de 300 g e 0,05 g de fundo de escala, como ilustra a Figura 37b.

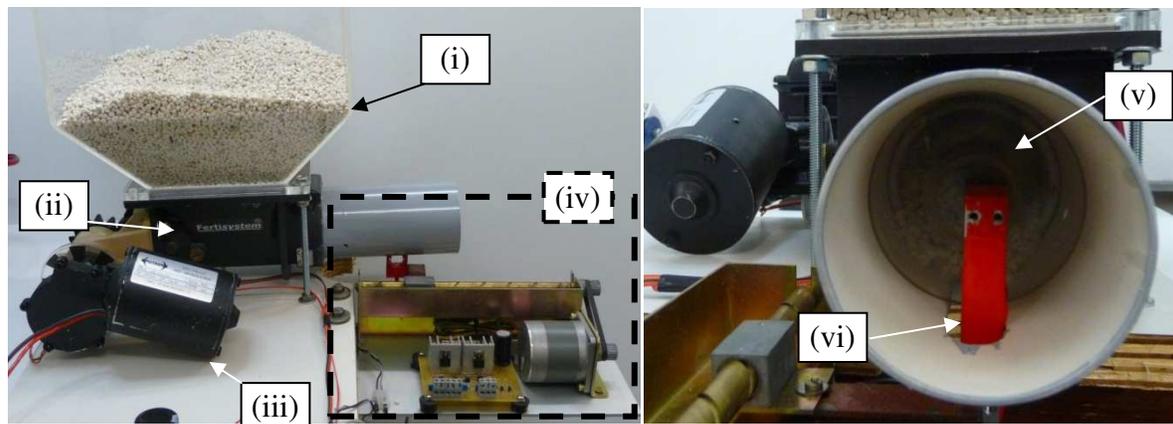


Figura 37. (a) Montagem do sensor de fluxo; (b) Detalhe do embolo e da célula de carga do sensor de fluxo de fertilizante; (i) reservatório; (ii) dosador; (iii) motor elétrico; (iv) sensor; (v) êmbolo; (vi) célula de carga

Para o deslocamento do embolo se utilizou um motor de passo marca Astrosyn, modelo 23LM-C004-04 com rotação de $1,75 \cdot 10^{-4}$ rad por pulso e alimentação de 1A por fase. O motor aciona, por meio de um sistema de engrenagens (1:1) acoplado por uma correia dentada, uma rosca de deslocamento linear com passo de 25 mm, conforme ilustra a Figura 38.

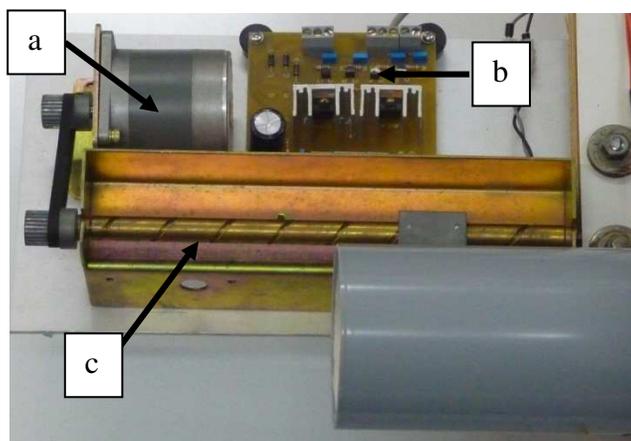


Figura 38. Detalhe do sensor de fluxo de fertilizante: (a) motor de passo; (b) *driver* de acionamento do motor de passo; (c) rosca de deslocamento linear.

4.2.2 Sistema de aquisição de dados

Para a aquisição dos dados e controle dos sistemas do protótipo foi desenvolvido um sistema supervisorio utilizando o programa Labview 8.5. As variáveis medidas são: a rotação do motor de acionamento do dosador de fertilizante, a posição do embolo e a tensão lida na célula de carga. As variáveis de atuação são a tensão de controle da rotação do motor de acionamento do dosador de fertilizante, giro e sentido do motor de passo. A Figura 36 mostra a tela do supervisorio desenvolvido.

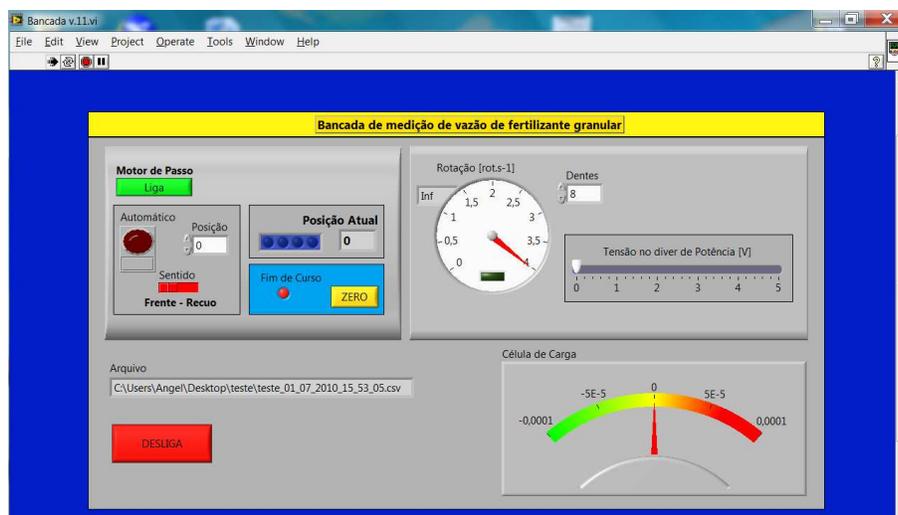


Figura 39. Sistema de aquisição de dados e controle da banca de testes

No protótipo se utilizou o sistema de aquisição de dados da marca National Instruments, modelo cDAQ – 9172, com os seguintes módulos: NI 9237 módulo de quatro entradas de sinal ponte ou meia ponte, foi utilizado para leitura e alimentação da célula de carga; NI 9401 oito canais de saídas ou entradas digitais, neste caso foram utilizadas quatro saídas para o acionamento do motor de passo; NI 9263 módulo de 4 saídas analógicas, foi utilizada para a saída do sinal de controle da tensão de acionamento do motor de corrente contínua.

4.2.3 Planejamento experimental

Davies e Desai (2008) observaram que para um fluxo contínuo de grânulos o tamanho do orifício de descarga deve ser função do diâmetro médio da partícula, para que não haja interrupção no fluxo. A equação 1 apresenta a relação entre o orifício mínimo para a descarga dos grânulos em função do diâmetro médio.

$$L_m = 2,37 * d$$

Equação 10

Em que:

L_m é a mínima largura do duto de descarga; e d é o diâmetro médio dos grânulos.

Nos experimentos foram utilizados grânulos plásticos cujas principais características são mostradas na Tabela 4, isso se deve à alta corrosividade dos fertilizantes que danificavam os equipamentos durante os procedimentos experimentais. Também tal produto mostrou, em testes preliminares, que nas mesmas condições de operação, a vazão volumétrica provocada pelo dosador não difere do encontrado por Garcia et al. (2006), que utilizou três tipos de fertilizantes granulares.

Tabela 4. Propriedades do material utilizado nos experimentos, entre parênteses desvio padrão

Densidade [g cm ⁻³]	Ângulo de Talude [°]	Diâmetro Médio Ponderado [mm]
0,50 (0,02)	40 (0,5)	2,41 (0,04)

Com os dados da Tabela 4 se pode definir as dimensões mínimas do orifício de saída, para que se garanta o fluxo de massa e para que não haja obstrução do fluxo.

Para se definir a correlação entre a taxa de aplicação e a leitura da célula de carga acoplada ao embolo foram realizados ensaios para se definir, primeiramente, a vazão mássica média pela rotação de acionamento do eixo do dosador. Para isso, se definiu como a faixa de velocidade angular de operação entre 1,57 (15 min⁻¹) e 12,56 rad s⁻¹ (120 min⁻¹) com um incremento de 3,14 rads s⁻¹ (30 min⁻¹) por ensaio. Primeiramente foi configurada a velocidade angular do ensaio, posteriormente se esperou que fluxo entrasse em regime para que o sistema de aquisição fosse acionado. Foram realizados 3 ensaios para cada velocidade angular descrita acima. Com os resultados foi obtida uma curva ajustada aos pontos experimentais. Posteriormente, para se verificar se o sensor proposto foi capaz de medir a variação da taxa de aplicação de fertilizante se realizou uma análise espectral de frequência para cada rotação de acionamento do eixo do dosador. Com isso, pode-se verificar a relação entre a frequência dominante do sinal do sensor de vazão e a rotação do eixo do dosador. Por fim, foi observada a relação entre a vazão mássica e tensão lida pelo sensor.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 40 mostra o gráfico com os resultados da vazão mássica média fornecida pelo dosador de fertilizante para diferentes rotações. Com estes pontos foi obtida uma curva por meio de uma regressão linear e as curvas de intervalos de confiança, respectivamente.

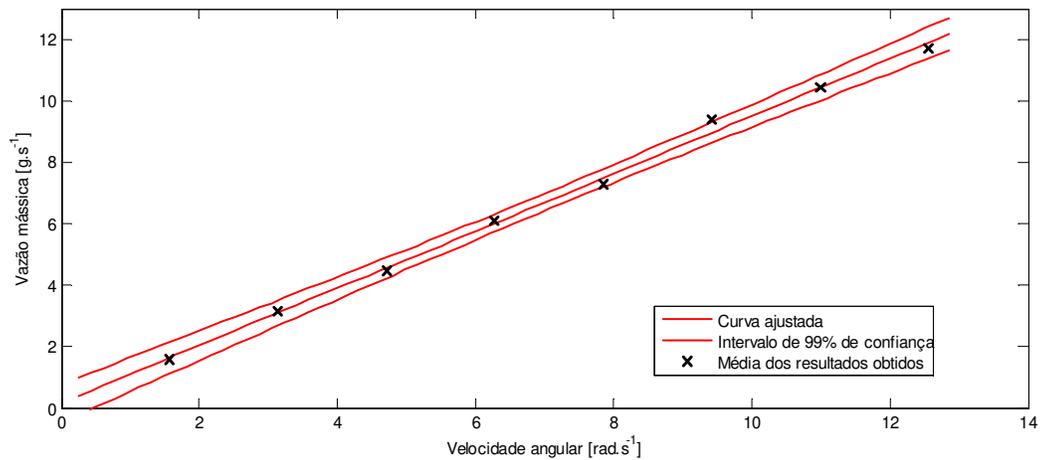


Figura 40. Vazão mássica média em função da tensão média da leitura da célula de carga

A curva ajustada é mostrada na equação a seguir.

$$\dot{m}_m = 0,9337(\pm 0,0517) \cdot \dot{\theta} + 0,1674(\pm 0,4103) \quad \text{Equação 11}$$

Em que:

\dot{m}_m é a taxa de aplicação média em kg s⁻¹; $\dot{\theta}$ é a velocidade angular do eixo de acionamento do dosador helicoidal em rad s⁻¹.

Tabela 5. Análise da variância para o ajuste do modelo linear, pelo método de mínimos quadrados

Fonte de Variação	Soma quadrática	Nº de g. l.	Média quadrática
Regressão	271,88	1	271,89
Resíduos	4,79	22	0,22
Falta de ajuste	3,83	6	0,64
Erro puro	0,95	16	0,06
Total	272,82		
% de variação explicada			99,69
% de variação explicável			99,72

O coeficiente de determinação deste modelo ficou em 99,69 % e o teste F foi válido (Tabela 6). Pode-se afirmar que o modelo (Equação 9) é preditivo para as condições do processo estudadas.

Tabela 6: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo

	F calculado	F Tabelado	Resultado
Significância	1247,60	7,95*	Significativo
Falta de ajuste	10,68	4,20**	Ajustado

Os dados tabelados para 99 % de confiança com: * $F_{1,22}$ ** $F_{6,16}$

A linearidade entre a vazão mássica e a velocidade angular do eixo de acionamento do helicóide do dosador de fertilizante vão de encontro aos resultados obtidos por Garcia et al. (2007), Camacho-Tamayo et al. (2009), para este mesmo tipo de dosador de fertilizante. Ainda, pode-se observar que os coeficientes encontrados são próximos aos obtidos por Garcia et al. (2006).

A Figura 41 mostra os resultados experimentais da densidade espectral de potência para rotações entre 3,14 e 12,56 rad s^{-1} , com um incremento de 3,14 rads s^{-1} por ensaio.

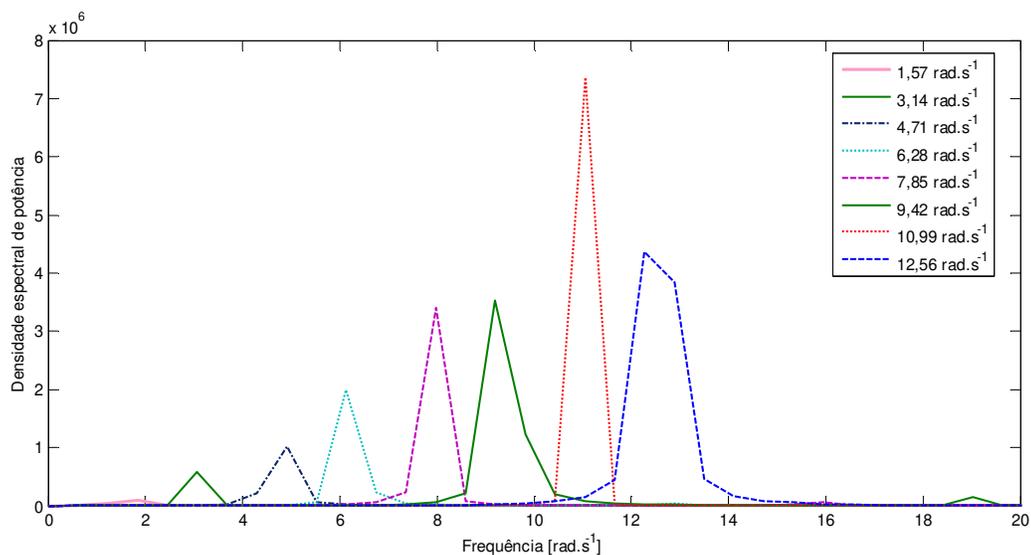


Figura 41. Análise espectral de frequência da vazão mássica para diversas rotações do eixo do dosador

A correlação entre a densidade espectral de frequência e a rotação do dosador é mostrada no gráfico da Figura 42. Observa-se uma relação linear entre a rotação do eixo do dosador e a frequência dominante do sinal do sensor de vazão, com coeficiente angular igual à

0,97 eu indica que a frequência dominante apresenta um valor próximo ao da velocidade angular de acionamento do eixo do dosador helicoidal. Coeficiente de correlação entre as variáveis é de 99,7 %.

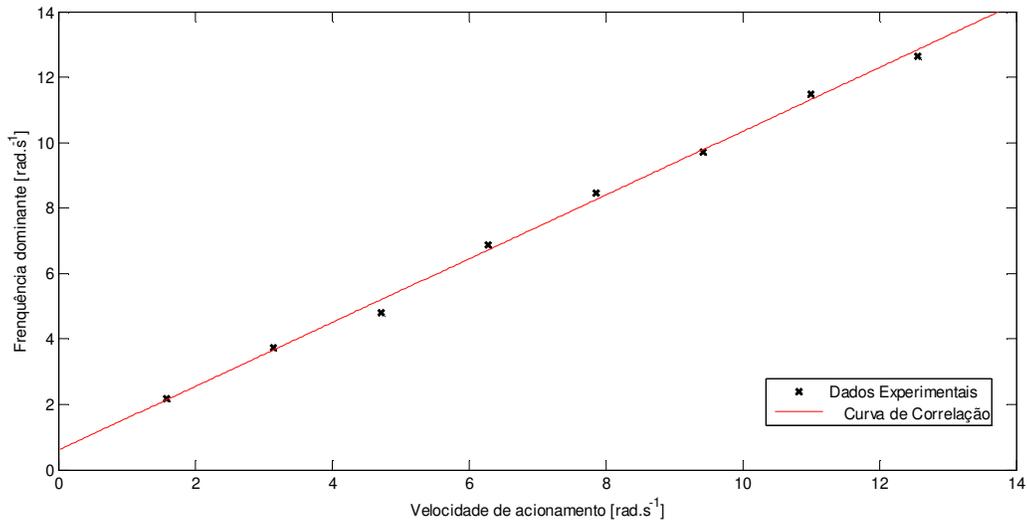


Figura 42. Frequência dominante da vazão mássica instantânea em função da rotação do eixo de acionamento do dosador

Pelos dados obtidos e mostrados no gráfico da Figura 40 pode-se obter a equação que correlaciona a taxa de aplicação com a tensão se saída da célula de carga.

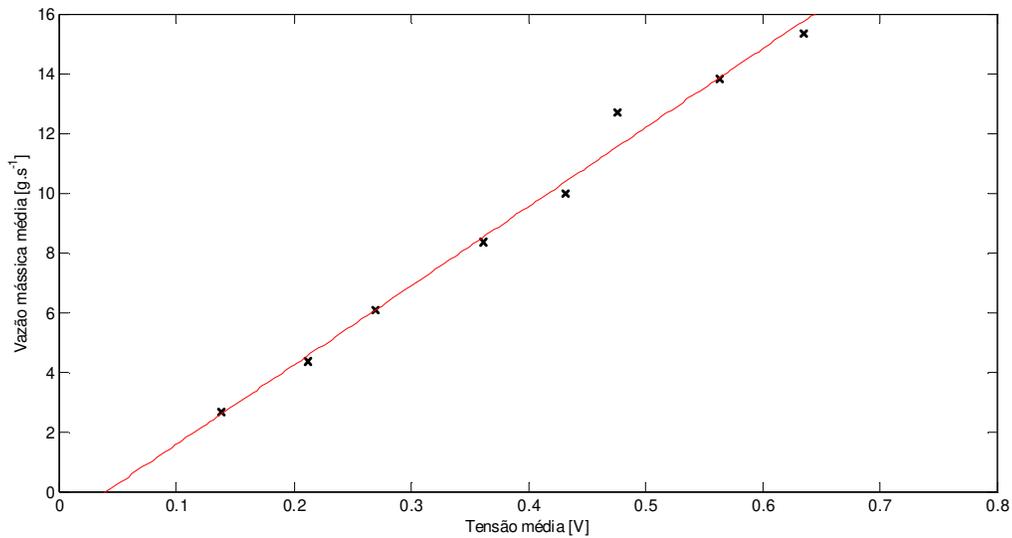


Figura 43. Tensão média observada em função da vazão

A curva ajustada é mostrada na equação a seguir.

$$\dot{m}_i = 26,47(\pm 2,84) \cdot V_{se} - 1,062(\pm 1,1877) \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

\dot{m}_i é a taxa de aplicação instantânea em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; V_{se} é a tensão lida pelo sistema de aquisição da célula de carga em V

Por meio desta equação pode-se determinar a vazão instantânea do dosador de fertilizante em função da tensão de saída do sensor. Da mesma maneira ao realizado anteriormente foi feito o teste ANOVA. O coeficiente de determinação deste modelo ficou em 98,86 % e o teste F foi válido, indicando que o modelo é preditivo.

4.4 CONCLUSÕES

Os resultados mostram que o sensor se mostra adequado para a aplicação proposta. Por meio dos testes foi possível se verificar a correlação entre a tensão obtida pela célula de carga e o fluxo de massa fornecido pelo dosador. Com isso se determinar a taxa de aplicação em tempo real do mecanismo dosador. Com a utilização do sensor de fluxo de fertilizante pode-se abrir novos caminhos de estratégias de controle de aplicação de fertilizante.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. < <http://www.anda.org.br/estatisticas.aspx>>. Acesso em 27/01/2011.

BARBOSA NETO, Mário A.. **Perspectivas de Custos de Produção Agropecuária para 2008**. Disponível em: <www.fiesp.com.br>. Acesso em: 15 jul. 2010.

CAMACHO-TAMAYO, J. H.; BARBOSA, A. M.; PÉREZ, N. M.; LEIVA, F. R.; RODRÍGUEZ, G. A. Operational characteristics of four metering systems for agricultural fertilizers and amendments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.605-613, 2009

CUGATI, S. A.; MILLER, W. M.; SCHUELLER, J. K.; SCHUMANN, A. W. Dynamic Characteristics of Two Commercial Hydraulic Flow-Control Valves for a Variable-Rate Granular Fertilizer Spreader. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006. Portland. **Proceedings...** . Portland: Asabe, 2006. p. 1 - 10.

DAVIES C.E.; DESAI M. Blockage in vertical slots: Experimental measurement of minimum slot width for a variety of granular materials. **Powder Technology**, Amsterdam, v.183, n.3 , p. 436-440, 2008.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Caracterização de um mecanismo dosador helicoidal de fertilizantes sólidos. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais...** . João Pessoa: Sbea, 2006. p. 1 - 4. CD-ROM.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Determinação do modelo matemático de um dosador de fertilizante sólido. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2007, Bonito. **Anais...** . Bonito: Sbea, 2007. p. 1 - 4. CD-ROM

GODWIN, R. J.; WOOD, G.A.; TAYLOR, J.C.; KNIGHT, S.M.; WELSH, J.P. Precision Farming of CerealCrops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 84, n. 4, p.375-391, 2003.

GOETTEMS, J. M.; FEY, E; DOS REIS, G. Z; HOFFMAN, M.; MROZINSKI, C. Distribuição longitudinal de fertilizante em sistemas dosadores helicoidais modificados de semeadoras. In: IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010, 9., 2010, Vitória. **Anais...** . Vitória: Sbea, 2010. p. 1 - 4. CD-ROM

LAN Y.; ZHANG, S.; LI, W.; HOFFMANN, W.C.; MA, C. Variable Rate Fertilization for Maize and its Effects Based on theSite-specific Soil Fertility and Yield. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 2008., 2008, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** . Foz do Iguaçu: Sbea, 2008. p. 1 - 10. CD-ROM.

SOGAARD, H. T.; KIERKEGAARD, P. Yield reduction resulting from uneven fertilizer distribution. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 37, n. , p.1749-1752, 1994.

UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L. Desenvolvimento e avaliação de um controlador eletrônico para equipamentos de aplicação de insumos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p.225-230, 2006.

WORRELL, E.; MEULEMAN, B.; BLOK, K. Energy savings by efficient application of fertilizer. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, vol. 13, pp. 233-250,1995

Capítulo 5. CONTROLE *FUZZY* DE UM DOSADOR DE FERTILIZANTES COM ACIONAMENTO ELÉTRICO

RESUMO: Este trabalho apresenta o desenvolvimento, simulação e implementação de um sistema baseado em lógica *fuzzy* para controlar a taxa de aplicação de um dosador de fertilizante helicoidal. O controlador foi desenvolvido na ferramenta “*Fuzzy Logic Toolbox*”, do programa MatLab. Na simulação, realizada em linguagem SIMULINK – MatLab, se utilizou o modelo matemático de um dosador helicoidal, que foi acionado por um motor elétrico de corrente contínua. A variável manipulada foi a tensão aplicada na carcaça do motor elétrico e as variáveis de entrada foram: o erro e o desvio do erro da taxa de aplicação atual e o taxa requerida, além da velocidade e o desvio da velocidade de deslocamento do equipamento. Também foi simulado o conjunto em malha aberta para comparar com os resultados obtidos com o sistema de controle. Pelas simulações se observou que o sistema de controle foi capaz de acompanhar mudanças no ponto de operação sem apresentar erro em regime. Posteriormente a estratégia de controle foi implementada em uma bancada de testes e os resultados mostram que o controlador proposto se mostrou adequado.

Palavras chave: adubadora, máquinas agrícolas, adubo

Development and simulation of a *fuzzy* control system for a fertilizer distributor with electric drive

ABSTRACT: This paper presents the design, simulation and implementation of a system based on fuzzy logic to control the rate of application of a fertilizer injector coil. The controller was developed in "Fuzzy Logic Toolbox" Matlab program. In the simulation we used the mathematical model of a helical feeder, which was driven by an electric motor current. This process was simulated in SIMULINK language - Matlab. The manipulated

variable was the voltage applied to the electric motor housing and the input variables were the error and deviation of the error rate of current application and the required fee, plus the speed and deviation of the velocity of the equipment. Also the set was simulated in open loop to compare the results with the control system. For the simulations we observed that the control system was able to track changes in operating point without showing error in the scheme. Subsequently the control strategy was implemented on a test bench, the results show that the proposed controller is adequate.

Key words: fertilizer applicator, agricultural machinery, fertilizer

5.1 INTRODUÇÃO

A integração de sistemas mecânicos com sensores que fornecem informações sobre a operação do sistema e atuadores capazes de corrigir eventuais falhas no processo ou mudança de condições de operação vem sendo cada vez mais utilizados em diversos equipamentos (ISERMANN, 2009). Sistemas de controle que são utilizados em máquinas agrícolas normalmente são do tipo convencional, como os utilizados por Umezu e Cappelli (2006), YU et al. (2006), Tola et al. (2008). Contudo, como estes processos normalmente são não-lineares, os requisitos do projeto podem não ser satisfeitos quando métodos de controle convencional, baseados em modelos lineares do processo, são utilizados. Em máquinas agrícolas essa prática é incipiente, com poucas pesquisas na área, como nos trabalhos de Mazlounzadeh et al. (2008) e Craessaerts et al. (2010) que utilizaram sistemas de controle avançados. Dentre os sistemas de controle avançados o controle *fuzzy* tem se mostrado amplamente utilizado. Diversos autores listam como vantagens do sistema de controle *fuzzy*, tais como: no caso de perturbações e mudanças na dinâmica do processo o mecanismo de ajuste pode modificar a característica do controlador e pode ser ajustado para diferentes pontos de operação de sistemas não-lineares.

Rigatos (2009) relata que controladores convencionais têm um desempenho não adequado para o controle de motores de corrente contínua, quando há alteração na dinâmica ou carga do motor. Pravadalioglu (2005) desenvolveu um sistema de controle *fuzzy* do tipo PI para o controle de um motor de corrente contínua. A atuação do sistema de controle manipula

o *duty cycle* de um PWM que controla a tensão aplicada na carga armadura do motor. Coelho et al. (2003) projetaram um sistema de controle *fuzzy* aplicado a um protótipo de processo em balanço horizontal composto de dois ventiladores acionados por dois motores DC e o objetivo do controlador era garantir que a balança permanecesse em equilíbrio atuando em um dos ventiladores, enquanto o outro ventilador provocava distúrbios no sistema. Posteriormente Callai et al. (2007), utilizaram os conceitos e o mecanismo proposto por Coelho et al. (2003) para elaborar uma estratégia de controle *fuzzy* – adaptativa mostrando o desempenho do controlador. Isso se observa em diversos trabalhos em que a lógica *fuzzy* foi a base de controle para a inserção de novas técnicas de controle. Com a finalidade de tornar o controlador mais rápido ou reduzir possíveis erros. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um controlador *fuzzy*, simular e implementar tal sistema para regular a taxa de aplicação de fertilizante de um dosador helicoidal em função das demandas de entrada do sistema.

5.2 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O sistema de controle proposto, conforme ilustra a Figura 44, tem a função controlar a taxa de aplicação de fertilizante. A variável manipulada foi a tensão de controle que por sua vez altera a tensão aplicada na armadura de um motor elétrico de corrente contínua. Com isso, a rotação do motor elétrico é alterada e conseqüentemente a taxa de aplicação. A variável medida foi a taxa de aplicação na saída do dosador e a velocidade de deslocamento do equipamento. Ambas alimentaram o controlador para definir o valor do sinal de controle.

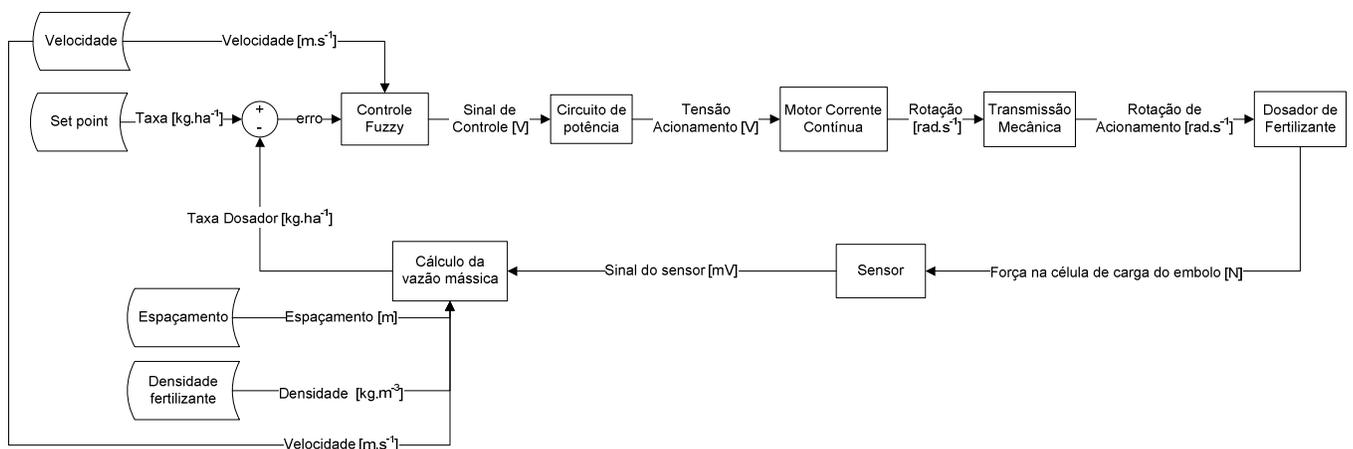


Figura 44. Diagrama de blocos do sistema de controle proposto

Os modelos matemáticos utilizados nos subsistemas mostrados na Figura 44 foram determinados conforme descrito a seguir.

O modelo matemático do dosador de fertilizante utilizada no modelo descreve a variação de massa aplicada a cada instante de tempo em função da velocidade angular e da posição do helicóide do dosador.

$$\dot{m}_i(t) = K (A p \eta \rho) \dot{\theta}(t) \left\{ \frac{1}{K} + [f \text{ sen}(\theta(t))] \right\} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

\dot{m}_i é a vazão mássica instantânea do dosador em $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$; η é a eficiência de transporte; A é a área útil da seção transversal do helicóide em m^2 ; p é o passo da rosca do helicóide em m ; θ é a posição angular da extremidade do helicóide em relação ao ponto de descarga em rad ; $\dot{\theta}$ é a velocidade angular do helicóide em rad s^{-1} ; f é o fator de enchimento; K relação entre máxima e mínima vazão observada [pode ser aproximada para 0,5]; ρ é a densidade do fertilizante em kg m^{-3} .

Os parâmetros referentes ao dosador de fertilizante e que foram utilizados na simulação são mostrados na Tabela 7. Estes se referem a um dosador de fertilizante marca Agrimaq, modelo Fertisystem. Nos testes foram utilizados grânulos plásticos em substituição ao fertilizante. Isso se deve à alta corrosividade dos fertilizantes que danificavam os equipamentos elétricos e a instrumentação durante os procedimentos experimentais.

Tabela 7. Dados obtidos do dosador de fertilizante Fertisystem – Agrimaq e dados utilizados na simulação do dosador

Passo da rosca [mm] (pol)	Raio externo [mm]	Raio interno [mm]	Área útil [mm ²]	Densidade do fertilizante [kg m ⁻³]	Espaçamento entre linhas [m]
19,04 (3/4)	25,0	15,0	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,50	0,5

Para o caso do motor elétrico de corrente contínua, se considerou que a máquina de corrente contínua utilizada é ideal, isto é, a comutação é linear devido à proximidade das

escovas, força magneto-motriz não tem efeito sobre o fluxo e a saturação magnética é desprezada, conforme descrito por Fitzgerald et al. (2006).

Para descrever o modelo se dividiu a parte elétrica e mecânica do motor elétrico. Nos motores elétricos de corrente contínua, controlados por armadura, a velocidade é controlada pela tensão de armadura, conforme a equação a seguir.

$$v_A = R \cdot i_A + L \cdot \frac{di_a}{dt} + K_E \cdot \theta \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

v_A é a tensão aplicada no circuito da armadura em V; R é a resistência de armadura em Ω ; i_A é a corrente de armadura em A; L é a indutância em H; t é o tempo em s; v_g é a força contra-eletromotriz gerada em V; K_E é a constante da força contra-eletromotriz em V s rad⁻¹.

O acoplamento da parte elétrica e mecânica à corrente de campo, no motor de corrente contínua, é mantida constante. Neste caso, o fluxo também é constante e o torque torna-se diretamente proporcional à corrente de armadura.

$$K_T \cdot i_A = J \cdot \frac{d\theta}{dt} + B \cdot \theta + F \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

J é o momento de inércia combinado da armadura do motor e da carga em kg m²; B é o atrito viscoso do motor em N m s rad⁻¹; θ é a velocidade no eixo do motor em rad s⁻¹; F é o atrito seco em N m.

Com o modelo matemático que representa o conjunto motor e carga, determinaram-se as funções de transferência do sistema aplicando-se a Transformada de Laplace nas equações diferenciais (12) e (13).

$$G_1(s) = \frac{K_T}{LJ s^2 + (JR + LB)s + (RB + K_E K_T)} \quad \text{Equação 15}$$

$$G_2(s) = - \frac{(L \cdot s + R)}{LJ s^2 + (JR + LB)s + (RB + K_E K_T)} \quad \text{Equação 16}$$

Como inicialmente foi considerado que o motor elétrico utilizado foi do tipo ideal e o sistema como linear, o comportamento global pode ser aproximado somando-se os efeitos. Com isso, tem-se:

$$G_M(s) = G_1(s) \cdot V_A(s) + G_2(s) \cdot F \quad \text{Equação 17}$$

Os dados referentes ao motor elétrico utilizado nos ensaios experimentais são apresentados na Tabela 8. Para obtenção dos parâmetros foram utilizados os seguintes equipamentos: multímetro digital (Minipa, ET-2507) um gerador de sinais marca Aligent, modelo 33220A e um osciloscópio (Aligent, DSO6032A). Os procedimentos são descritos por Cappelli e Umezu (2010).

Tabela 8: Parâmetros obtidos experimentalmente do modelo matemático do motor de corrente contínua

R [Ω]	L [mH]	K_E [V s rad ⁻¹]	K_T [N m A ⁻¹]	B [N m s rad ⁻¹]	F_d [N m]	J [kg m ²]
0,36	28,4	1,666	1,666	0,032	0,266	0,027

O modelo do mecanismo de transmissão é mostrado na equação 17. Este modelo se refere a um conjunto de engrenagem ideal.

$$\frac{\theta_a}{r_a} = \frac{\theta_b}{r_b} \quad \text{Equação 18}$$

Em que:

θ_a e θ_b são a velocidade angular do eixo de entrada e saída, respectivamente em rad s⁻¹; r_a e r_b são os raios das engrenagens motora e movida em mm.

O momento de inércia do conjunto foi introduzido no modelo do motor elétrico, assim este parâmetro não foi considerado neste modelo.

5.2.1 Estratégia de controle

De acordo com Pinheiro (2000), as teorias de controle clássico e moderno apresentam limitações tanto em processos de alta complexidade e não-lineares, o que vem de encontro à necessidade de controlar um mecanismo dosador de fertilizante que possui uma característica de aplicação não linear (GARCIA et al., 2010).

O sistema de controle proposto é composto por dois controladores *fuzzy* proporcional integral (PI) em paralelo, cada um com duas variáveis de entrada e uma de saída. As variáveis de entrada são definidas pelas equações a seguir.

$$e(k) = y_r(k) - y(k) \quad \text{Equação 19}$$

$$de(k) = e(k) - e(k - 1) \quad \text{Equação 20}$$

Em que:

y_r é o sinal de entrada de referência; $y(k)$ é o sinal medido; $e(k)$ é o erro entre o sinal de entrada e o sinal medido; $de(k)$ é o desvio do erro.

O sinal de atuação é fornecido por:

$$U(s) = u(k) \times \left(K_c + K_i \times \frac{1}{s} \right) \quad \text{Equação 21}$$

Em que:

$U(s)$ é a atuação no processo; $u(k)$ é o sinal de atuação do controlador *fuzzy*; K_c é o ganho proporcional da saída do sinal de atuação; K_i é o ganho integral da saída do sinal de atuação.

Os sinais de atuação de ambos os controladores foram somados para gerar a atuação no motor elétrico, conforme ilustra a Figura 45. Esta estrutura foi adotada devido à facilidade de manipulação dos ganhos de cada variável na atuação em detrimento a um controlador de quatro entradas e uma saída. Além disso, com a divisão em dois controladores *fuzzy* pode-se diminuir o número total de regras que foram utilizadas no sistema de controle, com isso tornando o sistema menos complexo e aumentando a velocidade da atuação.

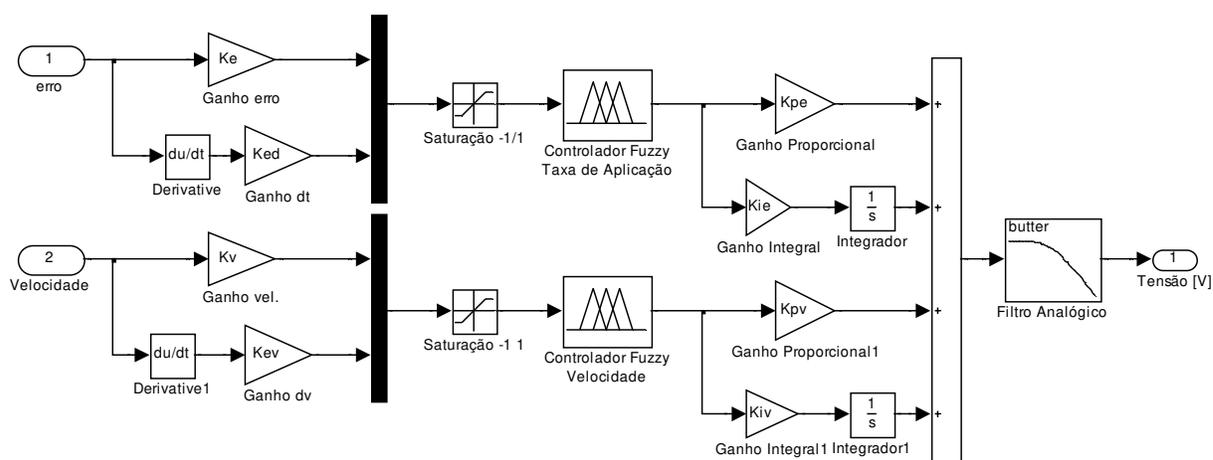


Figura 45. Sistema de controle da taxa de aplicação de fertilizante proposto

As entradas duas variáveis, erro da taxa de aplicação e velocidade de deslocamento da máquina, além da derivada das mesmas. No controlador usaram-se discursos de entrada e saída normalizados, conforme recomendado por Yager e Filev (1994). Com isso, as entradas possuem limitadores de -1 à 1. Na entrada se utilizou três funções de pertinência para cada variável de entrada, este número reduzido busca à simplificação no número de regras do controlador, isto é, diminuição do número de regras de inferência. Na saída utilizaram-se cinco funções de transferência para uma atuação mais suave, conforme recomendado por Shaw e Simões (2007).

5.2.2 Simulações

O modelo matemático do conjunto composto do mecanismo dosador de fertilizante, motor elétrico e sistema de controle foram simulados utilizando o programa MatLab – SIMULINK. A lógica do controlador foi programada com o auxílio do “*Fuzzy Logic*

Toolbox”, do programa MatLab. Na simulação utilizou-se o método de resolução de Dormand-Prince (ode5) no domínio do tempo, com passo fixo entre as interações de 0,001 s. Se optou por este método e com o passo entre interações reduzido com o objetivo de se reduzir possíveis erros provocados pelas resoluções numéricas. O método de defuzzificação utilizado foi o centróide, devido principalmente à sua propriedade em fornecer saídas *fuzzy* que provocam ações suaves de controle.

5.2.3 Avaliação

Os testes seguiram as recomendações da norma ASABE EP367.2 JAN01 – “*Guide for Preparing Field Sprayer Calibration be revised to include procedures for assessing the quality of application for rate changes*”. Os principais pontos a serem avaliados em equipamentos de aplicação a taxas variadas por esta norma são:

1. Tempo de resposta do controlador;
2. Erro em regime;
3. Capacidade de resposta à distúrbios de velocidade ou taxa de aplicação.

Para se verificar a capacidade de aplicação a taxas variadas a norma sugere a utilização de uma curva, conforme ilustra a Figura 46, com a variação do sinal de excitação do sistema de aplicação. Com isso pode-se determinar a capacidade de adaptação do sistema de controle proposto.

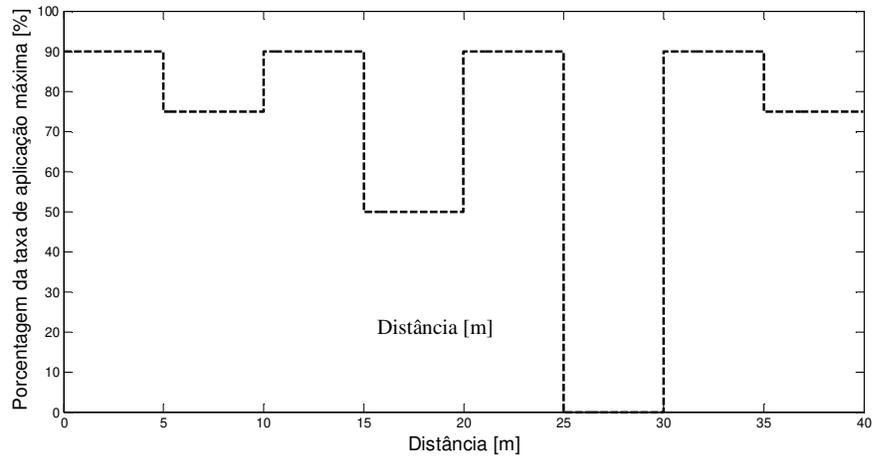


Figura 46. Esquema de sinal de excitação do sistema para avaliar sistemas de controle para ATV (adaptado de SCOTT et al., 2002).

Nas simulações foram introduzidos sinais de distúrbios na velocidade de deslocamento do equipamento. Em um processo real de aplicação há uma variação da velocidade de deslocamento do equipamento provocado principalmente pelo escorregamento do pneu do trator. Esta variação da velocidade de deslocamento foi introduzida na simulação na forma de um sinal aleatório com variação média de $0,1 \text{ m s}^{-1}$, este valor é próximo aos obtidos experimentalmente por Baldo (2010).

5.2.4 Teste operacional

Para a validação do sistema de controle montou-se uma bancada de testes constituída de um dosador helicoidal na marca Agrimaq, modelo Fertisystem com helicóide de 19,05 mm (3/4”). O sistema de controle foi desenvolvido no programa MatLab – SIMULINK e para a interface *software-hardware* utilizou-se a placa de aquisição de dados marca National Instruments, modelo USB-6009 .

Para implementação do sistema de controle, utilizou-se a mesma estrutura de estratégia controle utilizada na simulações, conforme ilustra a Figura 47. Foram adicionados ao programa blocos de aquisição de dados, da ferramenta “*Data Aquisition Toolbox*” para a entrada dos valores lidos pelo sensor de fluxo de massa e um bloco de saída analógica que envia ao circuito de potência o sinal de controle que atua na tensão de armadura do motor elétrico.

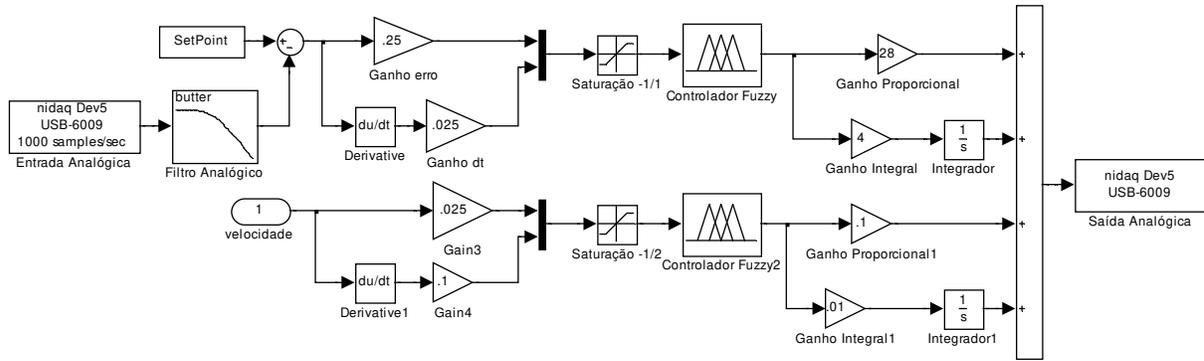


Figura 47. Programa do sistema de controle *fuzzy* proposto

A configuração da interface do sistema de controle proposto com a bancada de testes foi realizada utilizando-se uma placa de aquisição NI-6009 da National Instruments. Esta placa possui 8 entradas e 2 saídas analógicas com taxa de aquisição máxima de 10 mil amostras por segundo, com uma resolução de 11 bits. A Figura 62 mostra o esquema de montagem da bancada de testes com o sistema de controle proposto.

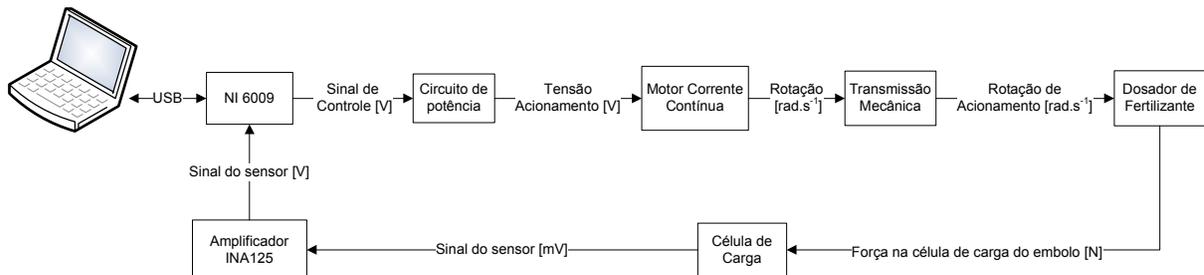


Figura 48. Esquema da interface do sistema de controle e da bancada de testes

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As funções de pertinência foram construídas conforme ilustrados nas Figura 49 e Figura 50. Na Figura 49a se observa que as funções de pertinência foram concentradas próximo ao erro nulo a fim de se obter um melhor ajuste próximo ao ponto de operação.

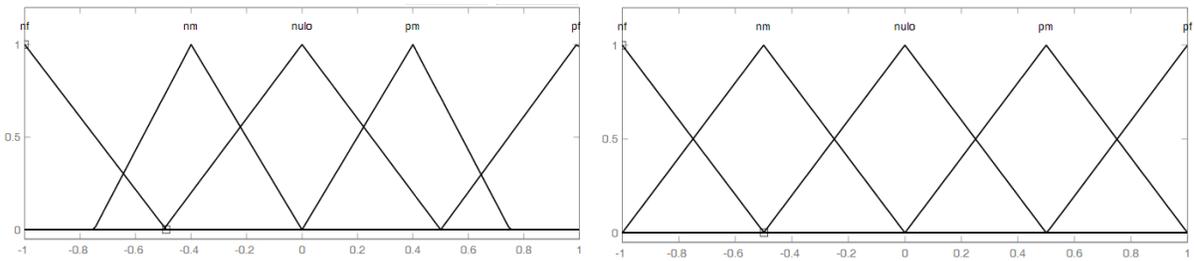


Figura 49. Funções de pertinência para as variáveis de entrada, erro e desvio do erro da taxa de aplicação;
(a) erro da taxa de aplicação; (b) variação do erro da taxa de aplicação

A Figura 50 mostra as funções de pertinência de entrada do controlador *fuzzy* de velocidade de deslocamento e erro da velocidade de deslocamento. A velocidade de deslocamento foi normalizada para valores absolutos de 0 até 2 m s^{-1} .

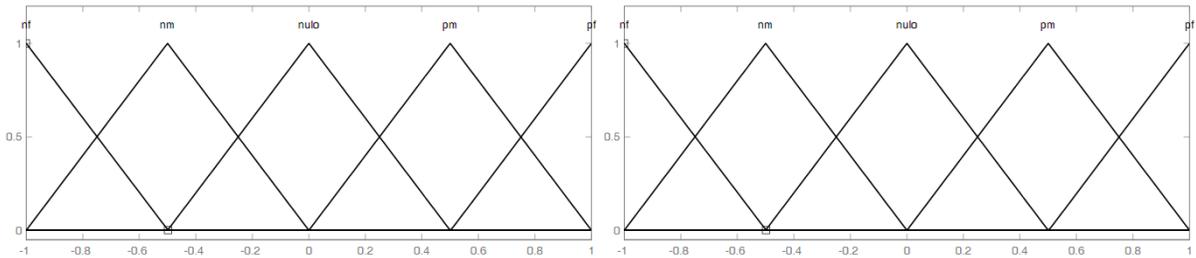


Figura 50. Funções de pertinência para as variáveis de entrada, erro e desvio do erro da taxa de aplicação;
(a) velocidade de deslocamento; (b) variação da velocidade de deslocamento

A variável de saída contou com sete funções de pertinência em ambos os controladores, com o objetivo de tornar a atuação mais suave a pequenas variações nas variáveis de entrada, Figura 51.

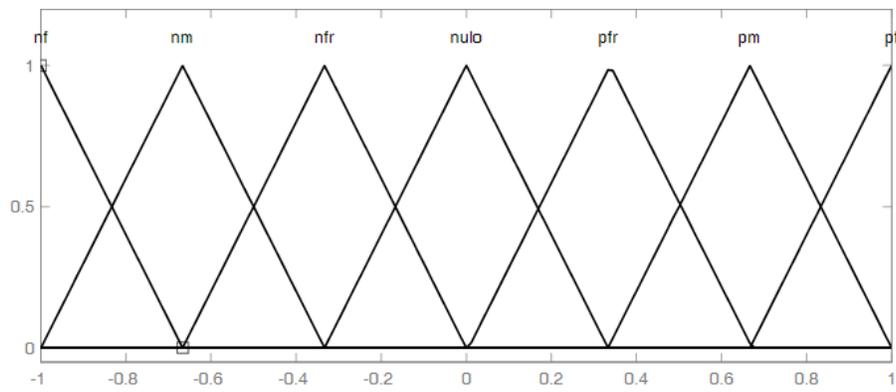


Figura 51. Funções de pertinência para variável de saída, atuação no motor elétrico

Os conjuntos de regras que relacionam as condições de entrada e definem a atuação no sistema foram definidos pela observação do comportamento do modelo em função das variáveis de entrada. A Tabela 9 e a Tabela 10 mostram as combinações das regras de inferências implementadas no controlador *fuzzy*.

Tabela 9. Regras de inferências para o erro e derivada do erro da taxa de aplicação de fertilizante. Onde as funções de pertinência são definidas como negativo forte (NF), negativo médio (Nm), Nulo (N), positivo médio (Pm) e positivo forte (PF) e a atuação é definida como: negativa forte (Pf), negativa média (Pm), negativa fraca (Pfr), nula (N), positiva fraca (Pfr), positiva média (Pm), positiva forte (Pf).

Erro					
Desvio do erro	Nf	Nm	N	PM	PF
Nf	Pf	Pf	Pm	Pfr	Pfr
Nm	Pf	Pf	Pm	N	Nfr
N	Pm	Pm	N	Nm	Nf
PM	Nm	Nfr	Nfr	Nf	Nf
PF	Nfr	Nfr	Nm	Nf	Nf

Tabela 10. Regras de inferências para a velocidade e a variação da velocidade de deslocamento do equipamento. Onde as funções de pertinência são definidas como negativo forte (NF), negativo médio (Nm), Nulo (N), positivo médio (Pm) e positivo forte (PF) e a atuação é definida como: negativa forte (Pf), negativa média (Pm), negativa fraca (Pfr), nula (N), positiva fraca (Pfr), positiva média (Pm), positiva forte (Pf).

Erro					
Desvio do erro	Nf	Nm	Nulo	PM	PF
Nf	Nf	Nm	Nfr	N	Pm
Nm	Nm	Nfr	N	Pfr	Pm
Nulo	Nfr	N	Pfr	Pm	Pf
PM	N	Pfr	Pm	Pm	Pf
PF	Pfr	Pm	Pm	Pf	Pf

A Figura 52 apresenta a superfície gerada pelo *Toolbox fuzzy* do MatLab. Esta superfície é gerada a partir das funções de pertinências e das regras de inferências. Nestas

superfícies é importante se observar que não há regiões com variações abruptas de atuação em função das entradas do controlador, isso garante uma atuação suave em função da variação dos parâmetros de entrada.

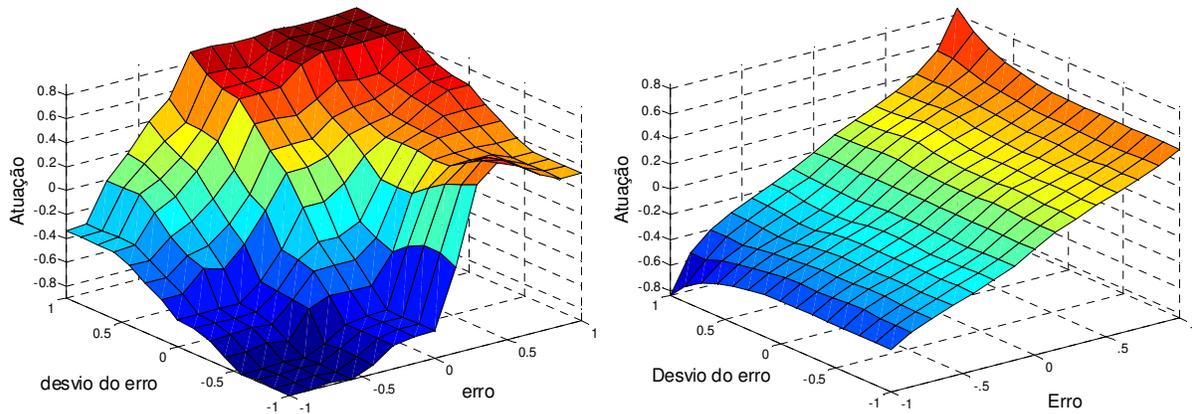


Figura 52. Superfície gerada pelo toolbox *fuzzy* do MATLAB para o controle da taxa de aplicação. (a) Superfície de atuação em função do erro e variação do erro da taxa de aplicação na atuação; (b) Superfície de atuação em função do erro e variação do erro da velocidade na atuação

Para se comparar os resultados obtidos com a simulação do sistema de controle se montou um modelo utilizando o programa MatLab – SIMULINK que simula o mecanismo dosador, acionado por um motor elétrico operando em malha aberta, conforme ilustra a Figura 53.

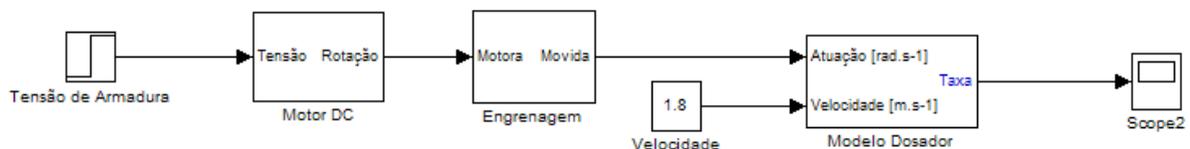


Figura 53: Simulação do sistema composto dosador e motor elétrico em malha aberta

A Figura 54 mostra a sistema de controle *fuzzy* associado com o modelo matemático do motor de corrente contínua e o modelo do dosador de fertilizante. Nesta, foi construído um gerador de sinal que tem a função de simular diferentes sinais de excitação ao sistema.

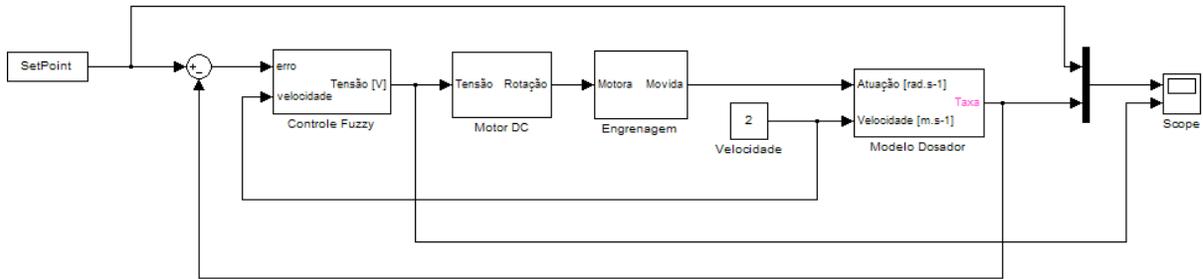


Figura 54: Diagrama de blocos (MatLab – Simulink) do sistema de controle fuzzy

No subsistema de *Controle Fuzzy* são implementadas as lógicas de controle *fuzzy* no bloco *Controlador Fuzzy*, conforme ilustra a Figura 55. Além disso, neste subsistema se encontram os ganhos de entrada e saída para cada variável. Por fim, foi utilizado um filtro de passa baixas, do tipo Butterworth de primeira ordem com frequência de corte de $25,13 \text{ rad s}^{-1}$, para atenuar um ruído produzido por erros da resolução numérica da simulação.

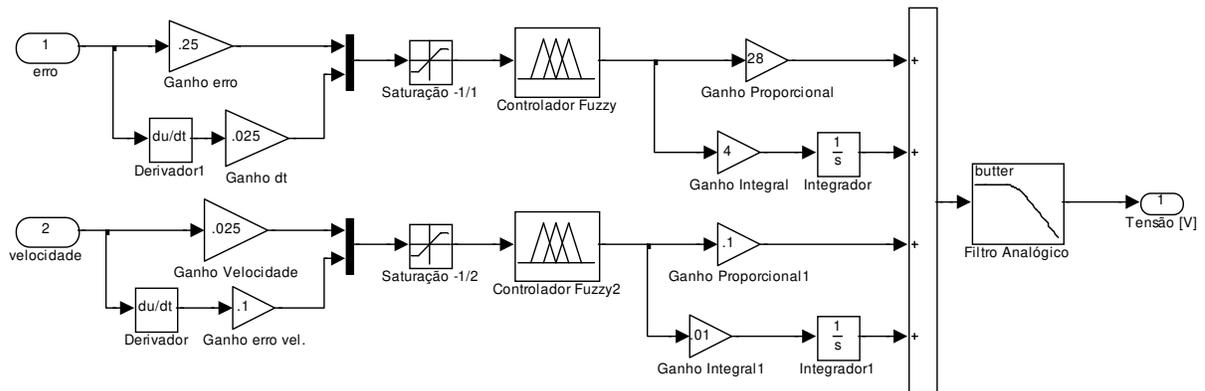


Figura 55: Diagrama de blocos (MatLab – Simulink) do subsistema de controle e de atuação do dosador de fertilizante

A Tabela 11 mostra os parâmetros de ganho utilizados nos sistemas de controle *fuzzy* proposto, tanto para o erro da taxa de aplicação quanto para a velocidade de deslocamento do equipamento.

Tabela 11. Coeficientes do controlador *fuzzy*

Entrada				Saída			
Erro da taxa de aplicação		Velocidade		Atuação no Erro		Atuação Velocidade	
Ganho	Ganho da variação	Ganho	Ganho da variação	Ganho	Ganho integral	Ganho	Ganho integral
0,25	0,025	0,025	0,1	28	4	1,25	0,01

O subsistema do modelo do motor elétrico foi construído conforme ilustra a Figura 56.

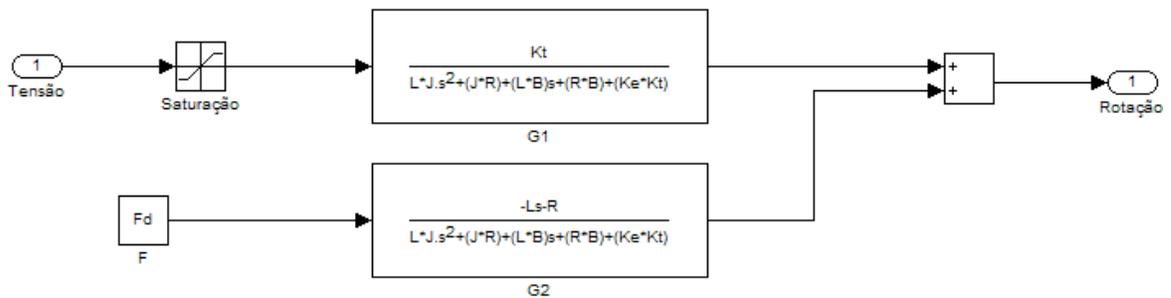


Figura 56: Diagrama de blocos (MatLab – Simulink) do subsistema do modelo do motor elétrico

O modelo do dosador de fertilizante foi descrito em linguagem SIMULINK, conforme ilustra a Figura 57. Pelo diagrama de blocos pode-se observar que as entradas do sistema são a velocidade angular do eixo de acionamento do dosador (rad s^{-1}) e a velocidade de deslocamento do equipamento (m s^{-1}). A saída do modelo é a taxa de aplicação (kg ha^{-1}).

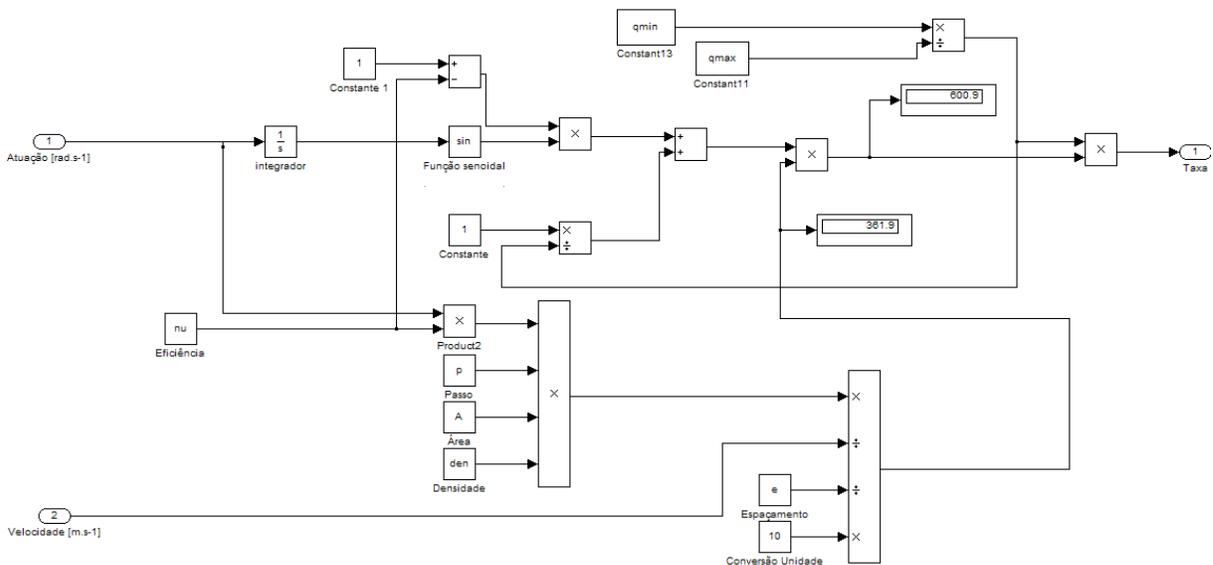


Figura 57: Diagrama de blocos (MatLab – SIMULINK) do subsistema do modelo do dosador de fertilizante

5.3.1 Simulação do sistema de controle

Os gráficos da Figura 58 mostram os resultados da simulação do sistema de controle. No gráfico da Figura 58a é mostrado o SetPoint da taxa de aplicação. No instante 0,5 s é aplicado um degrau na taxa de aplicação que passa de 0 para 200 kg ha⁻¹. No resultado da simulação, em malha aberta, pode-se observar que a característica oscilatória do mecanismo dosador é mantida, pois neste sistema de controle a atuação na tensão de armadura do motor elétrico é constante para cada valor de saída requerido, conforme ilustra a Figura 58b. Quando o controlador *fuzzy* é incorporado pode-se notar que a característica oscilatória do mecanismo dosador é anulada e a taxa de aplicação segue o *setpoint* estabelecido. Também se observa que o tempo de subida do processo é de cerca de 0,37 s, isso ocorre devido à dinâmica do motor elétrico que aciona o mecanismo. A Figura 58b mostra a atuação do controlador *fuzzy* para manter a taxa de aplicação no *setpoint* estabelecido.

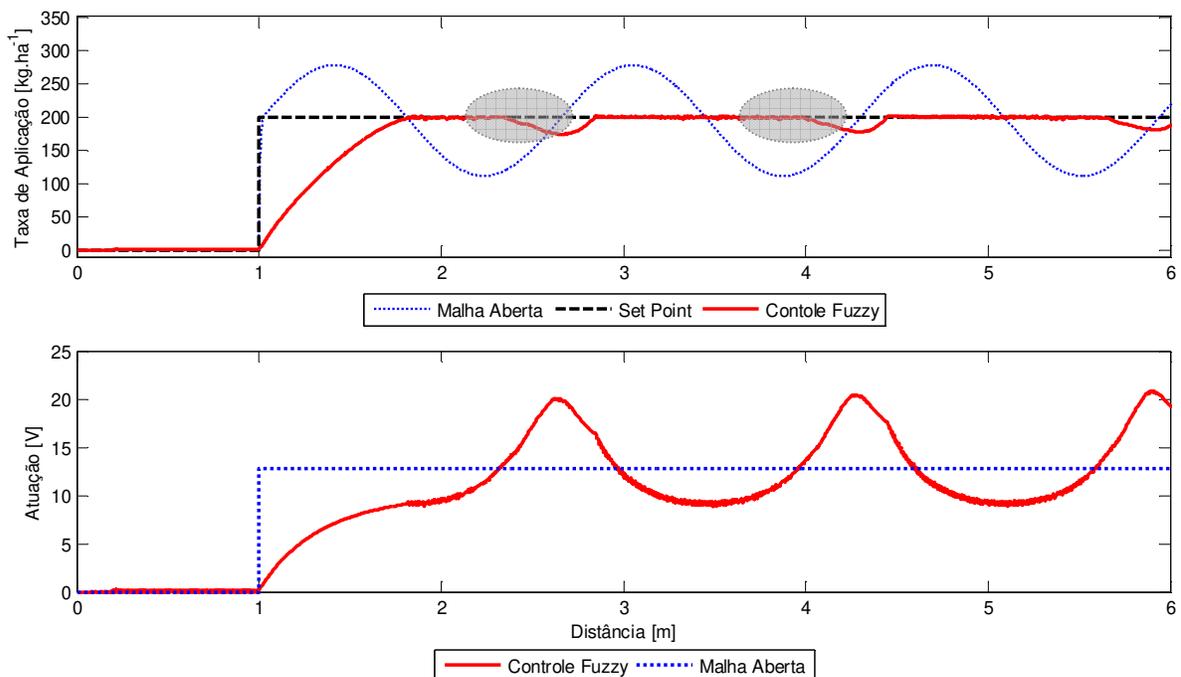


Figura 58. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante

Ainda na Figura 58 pode-se observar que em determinados instantes há uma queda na taxa de aplicação isso se deve ao fato de que pela posição do helicóide, mesmo com a máxima

atuação no motor elétrico (24 V) o dosador não é capaz de manter a taxa de aplicação no valor estabelecido. Isso indica que o mecanismo dosador atua em uma faixa próxima ao valor limite de aplicação.

O gráfico da Figura 59 mostra a resposta do sistema de controle frente a um degrau, linha preta tracejada, pode-se observar que o sistema de controle foi capaz de atenuar o efeito da variação de velocidade de deslocamento do equipamento. O sistema em malha aberta, também se adaptou a variação da velocidade, isso mostra que a dinâmica do motor elétrico foi rápida o suficiente para corrigir tal efeito.

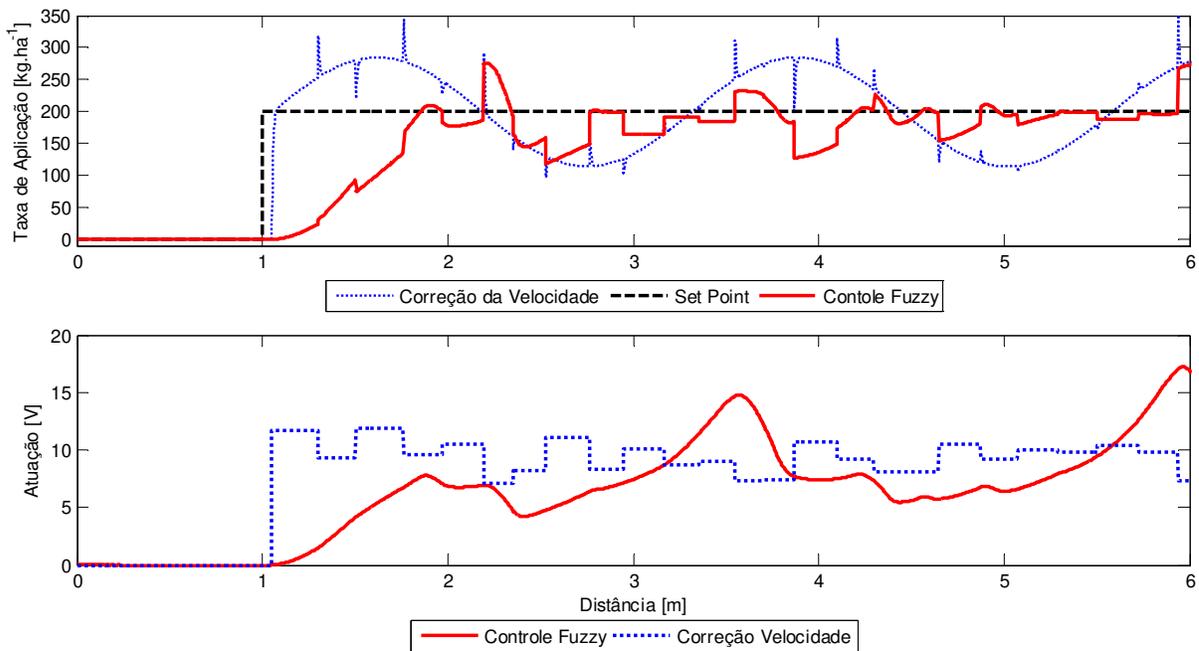


Figura 59. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante com variação de velocidade

Por fim, foram realizadas simulações para a taxa de aplicação para múltiplos degraus. A Figura 60 e a Figura 61 mostram os resultados obtidos sem e com variação da velocidade de deslocamento do equipamento, respectivamente.

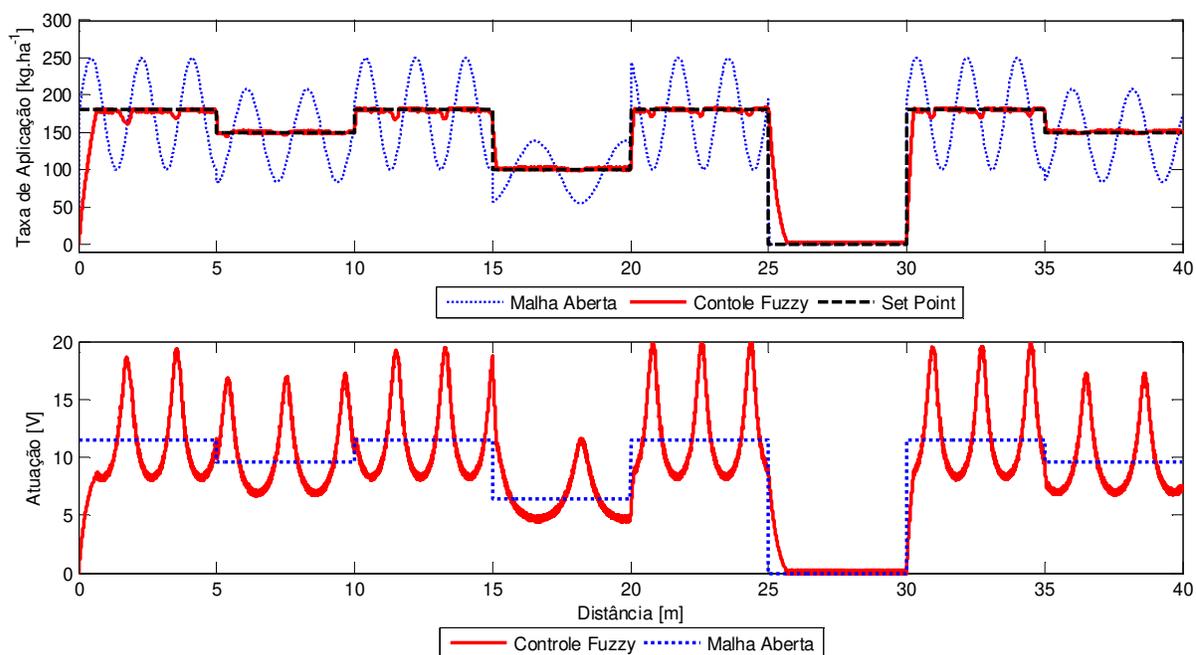


Figura 60. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante com múltiplos degraus na taxa de aplicação

Na Figura 60 se observa que o sistema de controle proposto consegue se adaptar às variações bruscas no valor do *setpoint*. Também nota-se que há uma visível melhora na variação da taxa de aplicação se comparado ao sistema que opera em malha aberta. A Tabela 12 mostra a taxa de aplicação média em kg ha^{-1} , o desvio padrão da taxa de aplicação, o coeficiente de variação em % e o erro médio em kg ha^{-1} , para todo período, com o mesmo ponto de operação e o período quando a taxa de aplicação entra em regime de operação, isto é, o intervalo de tempo após a taxa de aplicação atingir o ponto de operação pela primeira vez.

Tabela 12. Resultados da simulação do dosador de fertilizante com sistema de controle proposto.

Taxa aplicação [kg.ha^{-1}]	Todo Período				Em Regime			
	Média	Desvio	Coef. Variação	Erro	Média	Desvio	Coef. Variação	Erro
			[%]	[kg.ha^{-1}]	[kg.ha^{-1}]		[%]	[kg.ha^{-1}]
180	170,56	30,49	17,88	9,44	179,15	1,37	0,76	0,85
150	150,41	2,55	1,70	-0,41	150,10	0,94	0,63	-0,10
180	179,75	2,50	1,39	0,25	180,15	0,95	0,53	-0,15
100	101,89	7,37	7,24	-1,89	100,90	0,91	0,90	-0,90
180	175,22	14,49	8,27	4,78	180,02	2,67	1,48	-0,02
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180	167,95	32,38	19,28	12,05	178,07	9,58	5,38	1,93
150	150,63	2,03	1,35	-0,63	150,60	0,99	0,66	-0,60

Pelos dados mostrados na Tabela 12 verifica-se que o coeficiente de variação da taxa de aplicação ficou entre 0,53 e 5,38 %, com coeficiente médio de 1,29 %, quando a distribuição entra em regime. Já quando foi considerado o transiente esta variação ficou entre 2,03 e 32,38 %, sendo que o menor valor do coeficiente de variação foi verificado quando houve um menor degrau do ponto de operação.

De forma análoga ao ocorrido na simulação anterior o sistema conseguiu atenuar as oscilações provocadas pela variação da velocidade de deslocamento. A Figura 61 mostra o resultado de tais simulações.

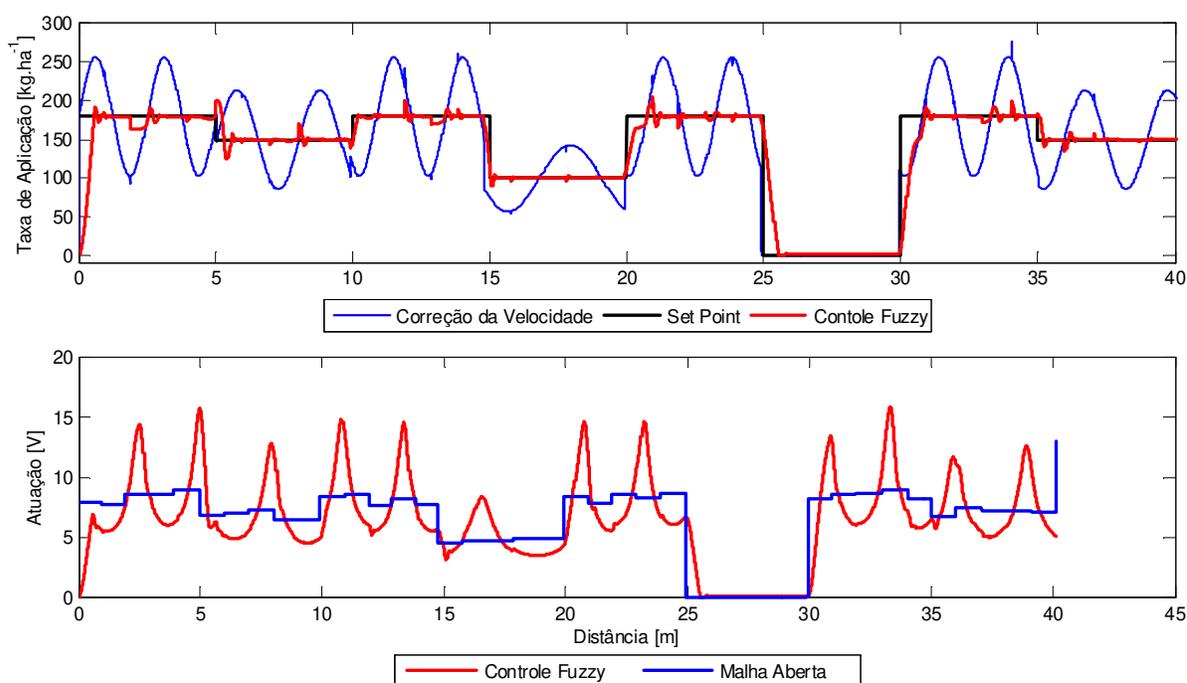


Figura 61. Gráfico da simulação do sistema de controle fuzzy do dosador de fertilizante com múltiplos degraus na taxa de aplicação e variação na velocidade de deslocamento

A Tabela 13 mostra a análise dos resultados obtidos pela simulação de múltiplos degraus com distúrbios na velocidade de deslocamento do equipamento.

Tabela 13. Resultados da simulação do dosador de fertilizante com sistema de controle proposto com distúrbios na velocidade de deslocamento do equipamento.

Todo Período					Em Regime			
Taxa aplicação	Média	Desvio	Coef. Variação	Erro	Média	Desvio	Coef. Variação	Erro
	[kg.ha ⁻¹]		[%]	[kg.ha ⁻¹]	[kg.ha ⁻¹]		[%]	[kg.ha ⁻¹]
180	164,46	40,11	24,39	15,54	177,20	6,33	3,57	2,80
150	151,73	11,48	7,57	-1,73	150,29	3,42	2,27	-0,29
180	178,34	7,69	4,31	1,66	179,75	4,42	2,46	0,25
100	102,69	11,01	10,72	-2,69	100,60	0,72	0,72	-0,60
180	175,29	14,98	8,55	4,71	179,53	5,58	3,11	0,47
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180	166,06	38,72	23,31	13,94	178,14	9,14	5,13	1,86
150	150,50	4,96	3,30	-0,50	150,03	2,55	1,70	-0,03

Na Tabela 13 observa-se que o coeficiente de variação da taxa de aplicação ficou entre 0,72 e 5,13 %, com coeficiente médio de 2,37 %, quando a distribuição entra em regime. Já quando foi considerado o transiente esta variação ficou entre 3,30 e 24,39 %, sendo que o menor valor do coeficiente de variação foi verificado quando houve um menor degrau do ponto de operação. Também se pode verificar que não houve diferença significativa entre as médias da taxa de aplicação com o sistema de controle operando com ou sem distúrbios.

Os resultados dos parâmetros do sistema de controle simulado foram de 0,27 s para o tempo de resposta de, o erro médio em regime foi de 0,37% e o sistema mostrou-se capaz de corrigir a taxa de aplicação frente a possíveis distúrbios.

5.3.2 Implementação do sistema de controle

Após a implementação do sistema de controle se construiu um gráfico, apresentado na Figura 62. Neste, pode-se observar que o sistema de controle foi capaz de acompanhar as mudanças no ponto de operação, bem como minimizar a oscilação da taxa de aplicação provocada pela característica dosadora do mecanismo dosador. A Figura 62a mostra o sinal obtido pelo sensor de fluxo sem filtro. Posteriormente, este sinal foi filtrado para se reduzir o ruído do conjunto de dados. Para se reduzir os ruídos inseridos na leitura dos dados provenientes da célula de carga, projetou-se um filtro do tipo butterworth passa baixa de primeira ordem com frequência corte de 2 Hz, esta foi definida em função da máxima

velocidade angular do motor elétrico que é igual a $6,28 \text{ rad.s}^{-1}$. Considerou-se como ruído frequências superiores a esta. A Figura 62b mostra o sinal filtrado.

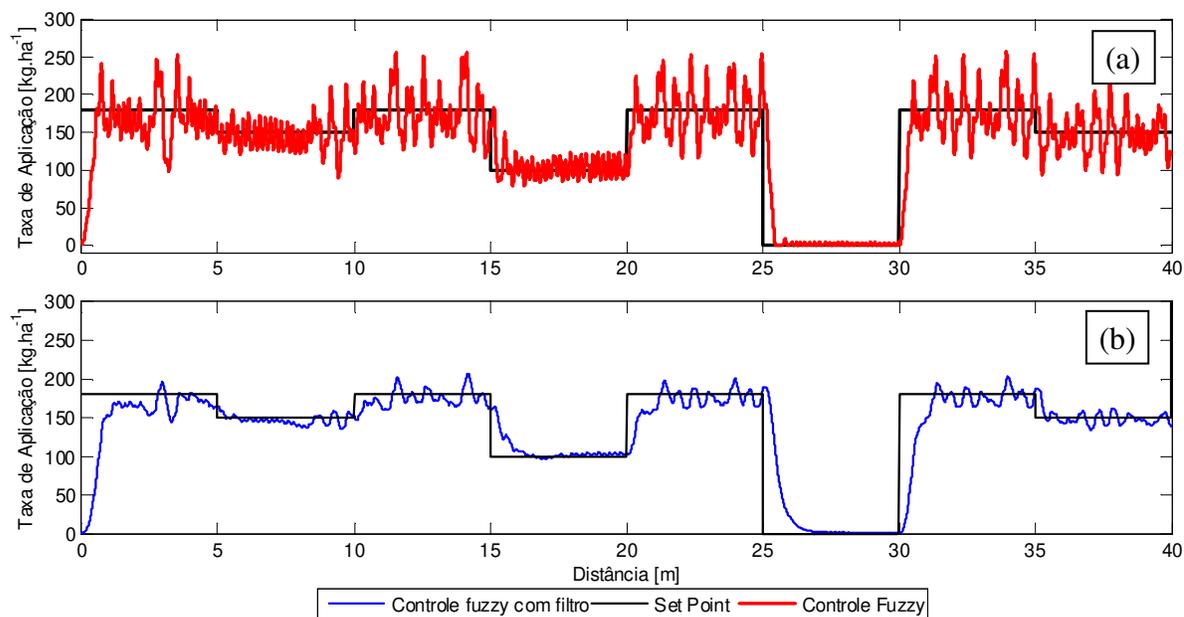


Figura 62. Gráfico da taxa de aplicação fornecida pelo dosador de fertilizante com sistema de controle proposto

A Tabela 14 mostra a análise dos resultados obtidos experimentalmente de múltiplos degraus com distúrbios na velocidade de deslocamento do equipamento.

Tabela 14. Resultados da simulação do dosador de fertilizante com sistema de controle proposto com distúrbios na velocidade de deslocamento do equipamento.

Taxa aplicação [kg.ha ⁻¹]	Todo Período				Em Regime			
	Média	Desvio	Coef. Variação	Erro	Média	Desvio	Coef. Variação	Erro
	[kg.ha ⁻¹]		[%]	[kg.ha ⁻¹]	[kg.ha ⁻¹]		[%]	[kg.ha ⁻¹]
180	147,80	47,96	32,45	32,20	163,38	17,92	10,97	16,62
150	146,73	6,25	4,26	3,27	145,78	5,65	3,88	4,22
180	174,16	12,00	6,89	5,84	176,08	10,89	6,19	3,92
100	108,02	15,54	14,39	-8,02	103,24	5,59	5,41	-3,24
180	168,91	19,49	11,54	11,09	174,21	10,99	6,31	5,79
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180	156,40	47,30	30,24	23,60	171,63	16,88	9,84	8,37
150	150,18	10,29	6,85	-0,18	148,11	6,68	4,51	1,89

Na Tabela 14 observa-se que o coeficiente de variação da taxa de aplicação ficou entre 4,25 e 32,45 %, com coeficiente médio de 13,33 % quando a distribuição entre em regime. Já quando se foi considerado o transiente esta variação ficou entre 3,88 e 10,97 %, sendo que o menor valor do coeficiente de variação foi verificado quando houve uma menor alteração do ponto de operação.

A Tabela 15 mostra os resultados da resposta obtida. Nela pode-se observar que o sistema de controle foi capaz de corrigir adequadamente o ponto de operação bem como sua capacidade de corrigir distúrbios.

Tabela 15. Parâmetros avaliados no sistema de controle proposto

Tempo de resposta [s]	Erro em regime médio [%]	Capacidade de resposta à distúrbios*
0,32	3,98	Satisfatória

* Capacidade de atenuar uma variação da velocidade de deslocamento

Ao se observar os resultados obtidos pode-se verificar que os mesmos se encontram abaixo dos observados na literatura, contudo vale ressaltar que os resultados normalmente realizaram testes operacionais e neste trabalho foram realizados testes de bancada. Tola et al. (2008) obtiveram um erro em regime de 5 %, já Kim et al. (2008) obtiveram um coeficiente de variação na taxa de aplicação em torno de 12 %.

5.4 CONCLUSÕES

A simulação do sistema de controle se mostrou relevante para a configuração e melhoria da estratégia de controle proposta, uma vez que por meio das simulações pode-se alterar tais parâmetros e visualizar a influência de cada um destes no resultado final. O sistema de controle implementado foi capaz de reduzir a característica oscilatória do mecanismo dosador, bem como acompanhar mudanças do ponto de operação ao longo do tempo.

5.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLAI, T. C.; COELHO, L. dos S.; COELHO, A. A. R. Controle nebuloso adaptativo por modelo de referência: projeto e aplicação em sistemas não-lineares. **Revista Controle e Automação**. Porto Alegre, v. 18, n. 4, p.479-489, 2007.

CAPPELLI, Nelson Luis e UMEZZU, Claudio Kiyoshi. **Teoria de controle – uma abordagem de aplicação**. 1 ed. Campinas: sem editora, 2010.

COELHO, Leandro dos Santos et al. Projeto e estudo de caso da implementação de um sistema de controle nebuloso. **Revista Controle e Automação**. Porto Alegre, v. 14, n. 1, p.20-29, 2003.

CORRÊA, I.M.; YANAI, K.; MAZIEIRO, J. V. G.; MOLINA JUNIOR, W. F. Trator agrícola equipado com pneu de baixa pressão e pneu diagonal: Desempenho comparativo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n.2, p. 64-70, 1997

CRAESSAERTS, G.; BAERDEMAEKER, J. DE; MISSOTTEN, B.; SAEYS, W. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 106, n. 2, p. 103-111, 2010.

FITZGERALD A. E.; KINGSLEY JR., CHARLES; UMANS, STEPHEN D. **Máquinas Elétricas**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

ISERMANN, R. Mechatronic systems—Innovative products with embedded control. **Control Engineering Practice**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 14–29, jan. 2008.

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.

MAZLOUMZADEH, S.M.; Shamsia, M.; Nezamabadi-pourb, H. Evaluation of general-purpose lifters for the date harvest industry based on a fuzzy inference system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 60-66, 2008.

PINHEIRO, C.A.M. **Análise e projeto de sistemas de controle fuzzy: uma abordagem no domínio da frequência**. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PRAVADALIOGLU, S. Single-chip fuzzy logic controller design and an application on a permanent magnet dc motor. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Amsterdam, v. 18, n. 7, p. 881-890, out. 2005.

RIGATOS, G. G. Adaptive fuzzy control of DC motors using state and output feedback. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 79, n. 11, p. 1579-1592, 2009.

SCOTT, A. S.; STOMBAUGH, T. S.; FULTON, J. P.; MUELLER, T. G. Considerations for Development of Variable-Rate Controller Test Standard. 2002 In: ASAE Annual International Meeting - CIGR XVth World Congress. **Proceedings...** Chicago: Asabe, 2002. p. 1 - 13.

SHAW, I. S.; SIMÕES M. G. **Controle e modelagem Fuzzy**. São Paulo: Ed. Blucher, 2007

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.

UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L. Desenvolvimento e avaliação de um controlador eletrônico para equipamentos de aplicação de insumos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p.225-230, 2006.

YAGER, R.R.; FILEV, D.P. **Essentials of fuzzy modeling and control**. Nova Yorque: Jhon Wiley and Sons, 1994.

YU, J. H.; KIM, Y. J.; RYU, K. H. Development of a Controller for Variable-Rate Application of Granular Fertilizer in paddy farming. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006. Portland. **Proceedings...** . Portland: Asabe, 2006. p. 1 - 12.

Capítulo 6. CONCLUSÕES GERAIS

Ao fim deste trabalho pode-se listar as conclusões obtidas:

1. O modelo matemático proposto, por meio da simulação, descreveu o comportamento do mecanismo dosador de fertilizante helicoidal e se mostrou significativo e preditivo representando adequadamente os resultados obtidos experimentalmente;
2. A variação oscilatória da taxa de aplicação é uma característica do dosador helicoidal, que é função da eficiência de transporte do mecanismo; fica clara a necessidade de utilização de elementos de controle que possam corrigir tal característica;
3. Mostrou-se de fundamental importância o desenvolvimento do sensor de fluxo de fertilizante para que fosse possível a implementação de um sistema de controle em malha fechada pela taxa de aplicação;
4. A simulação do sistema de controle se mostrou relevante para a configuração e melhoria do sistema de controle proposto;
5. As ferramentas de simulação se mostraram adequadas para a utilização proposta;
6. O sistema de controle implementado foi capaz de reduzir a característica oscilatória do mecanismo dosador, bem como acompanhar mudanças do ponto de operação ao longo do tempo.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFIA

ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Principais indicadores do setor de fertilizantes**. < <http://www.anda.org.br/estatisticas.aspx>>. Acesso em 27/01/2011.

AREND, L.; FORCELLINI, F. A.; WEISS, A. Desenvolvimento e testes de uma semeadora-adubadora modular para pequenas propriedades rurais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p.801-808, set./dez. 2005.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. 1.ed. São Paulo: Manole, 1987. 307p.

BARBOSA NETO, M. A.. **Perspectivas de Custos de Produção Agropecuária para 2008**. Disponível em: <www.fiesp.com.br>. Acesso em: 15 jul. 2008.

BENES, P.; ZEHNULA, K. New Design of the two-phase flowmeters. **Sensors and actuators**, Amsterdam, v. 86, p. 200-225, 2000.

CALLAI, T. C.; COELHO, L. dos S.; COELHO, A. A. R. Controle nebuloso adaptativo por modelo de referência: projeto e aplicação em sistemas não-lineares. **Revista Controle e Automação**. Porto Alegre, v. 18, n. 4, p.479-489, 2007.

CAMACHO-TAMAYO, J. H.; BARBOSA, A. M.; PÉREZ, N. M.; LEIVA, F. R.; RODRÍGUEZ, G. A. Operational characteristics of four metering systems for agricultural fertilizers and amendments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p.605-613, 2009.

CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K.; MARTINS, M. M. Avaliação do desempenho de um dosador helicoidal para aplicação de fertilizantes sólidos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.20, n.2, p130-138, 2000.

CAPPELLI, Nelson Luis e UMEZU, Claudio Kiyoshi. **Teoria de controle – uma abordagem de aplicação**. 1 ed. Campinas: sem editora, 2010.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G. de. **Primeira parte do componente específico brasil, integrante do projeto fao-ca-sard**. Londrina: Fapeagro/Iapar, 2008.

CHEN, C. L.; CHEN, P. C. Application of fuzzy logic controllers in single-loop tuning multivariable system design. **Computers in Industry**, Amsterdam, v. 17, n. 1 p. 33-41, 1991.

COELHO, J. L. D.. Ensaio & certificação das máquinas para semeadura. In: MIALHE, Luiz Geraldo. **Máquinas agrícolas ensaios & certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. p. 551-570.

COELHO, L. DOS S.; ALMEIDAY, O. DA M.; COELHO, A. A. R. Projeto e estudo de caso da implementação de um sistema de controle neuloso. **Revista Controle e Automação**. Porto Alegre, v. 14, n. 1, p.20-29, 2003.

CORRÊA, I.M.; YANAI, K.; MAZIEIRO, J. V. G.; MOLINA JUNIOR, W. F. Trator agrícola equipado com pneu de baixa pressão e pneu diagonal: Desempenho comparativo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 17, n.2, p. 64-70, 1997

CRAESSAERTS, G.; BAERDEMAEKER, J. DE; MISSOTTEN, B.; SAEYS, W. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 106, n. 2, p. 103-111, 2010.

CUGATI, S. A.; MILLER, W. M.; SCHUELLER, J. K.; SCHUMANN, A. W. Dynamic Characteristics of Two Commercial Hydraulic Flow-Control Valves for a Variable-Rate Granular Fertilizer Spreader. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006. Portland. **Proceedings...** . Portland: Asabe, 2006. p. 1 - 10.

DAVIES C.E.; DESAI M. Blockage in vertical slots: Experimental measurement of minimum slot width for a variety of granular materials. **Powder Technology**, Amsterdam, v.183, n.3 , p. 436-440, 2008.

DERDIYOK, A.; SOYSALA, B.; ARSLANB, F.; OZOGLUB, Y.; GARIP, M. An adaptive compensator for a vehicle driven by DC motors. **Journal of the Franklin Institute**, Philadelphia, v. 342, n. 3, p. 273-283, 2005.

DINTWA, E.; LIEDEKERKE, P. VAN; OLIESLAGERS, R.; TIJSKENS, E.; RAMON H. Model for Simulation of Particle Flow on a Centrifugal Fertiliser Spreader. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v.87, n.4, p.407-415, 2004.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Brasil – Expansão da Área Cultivada em Plantio Direto**. <http://www.febrapdp.org.br/pd_area_br.htm>. Acesso em 01/04/2009.

FERREIRA, M. F. OLIVEIRA, A. de; MACHADO, A. L.T.; REIS, A. V. dos; MACHADO, ROBERTO L.T. Comportamento do dosador tipo rosca sem-fim em função do nível de adubo no depósito. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais...** . João Pessoa: Sbea, 2006. p. 1 - 4. CD-ROM.

FITZGERALD A. E.; KINGSLEY JR, CHARLES; UMANS, STEPHEN D. **Máquinas Elétricas**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FILETI, A. M. F.; ANTUNESA, A. J. B; SILVA, F. V.; SILVEIRA JR., V.; PEREIRA, J.A.F.R. Experimental investigations on fuzzy logic for process control. **Control engineering practice**, Amsterdam, v. 15, n. 9, p. 1149-1160, 2007.

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

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Caracterização de um mecanismo dosador helicoidal de fertilizantes sólidos. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais...** . João Pessoa: Sbea, 2006. p. 1 - 4. CD-ROM.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Determinação do modelo matemático de um dosador de fertilizante sólido. In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2007, Bonito. **Anais...** . Bonito: Sbea, 2007. p. 1 - 4. CD-ROM

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistema eletromecânicos**. 2.ed. ver. e ampliada. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2009.

GRIFT T. E.; CRESPI C. M. Estimation of the flow rate of free falling granular particles using a Poisson model in time. **Biosystems Engineering** . v. 101, n. , pp. 36-41, 2008.

GODWIN, R. J.; WOOD, G.A.; TAYLOR, J.C.; KNIGHT, S.M.; WELSH, J.P. Precision Farming of CerealCrops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v. 84, n. 4, p.375-391, 2003.

GISH, J. K.; FEY, E.; COLOMBARI, L. F.; BERTALUZI, D. R.; SCHWENGBER, L. Distribuição longitudinal de adubo com diferentes passos de rosca do dosador helicoidal comum de uma semeadora. . In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Vitória. **Anais...** . Vitória: Sbea, 2010. p. 1 - 4. CD-ROM.

GOETTEMS, J. M.; FEY, E.; DOS REIS, G. Z.; HOFFMAN, M.; MROZINSKI, C. Distribuição longitudinal de fertilizante em sistemas dosadores helicoidais modificados de semeadoras. In: XXXIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Vitória. **Anais...** . Vitória: Sbea, 2010. p. 1 - 4. CD-ROM.

GÜNDOĞDU, Ö.; ERENTÜRK, K. Fuzzy control of a dc motor driven four-bar mechanism. **Mechatronics**, Amsterdam, v. 15, n. 4, p. 423-438, 2005.

HARRIS, B. J.; DAVIES, C. E.; DAVIDSON, J. F. The slot flow meter: a new device for continuous solids flow measurement. **Chemical Engineering Science**, Amsterdam, v. 52, n. 24, pp. 4637-4648, 1997.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 22 jul. 2010.

ISERMANN, R. Mechatronic systems—Innovative products with embedded control. **Control Engineering Practice**, Amsterdam, v. 16, n. 1, p. 14–29, 2008.

JAFARI, M.; HEMMAT, A.; SADEGHI, M. Development and performance assessment of a DC electric variable-rate controller for use on grain drills. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 73, n. 1, 56-65, 2010.

KARAYEL, D.; WIESEHOFF, M.; OZMERZI, A.; MULLER, J. Laboratory measurement of seed drill seed spacing and velocity of fall of seeds using high-speed camera system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 50, n. 2, p. 89-96, 2006.

KEPNER, R. A.; BAINER, R.; BARGER, E. L. **Principles of farm machinery**. 3. ed. Connecticut: Avi Publishing Company, 1982.

KIM, J. Y.; YANG, S. H.; RHEE, J.Y. Development of a Variable Rate Granule Applicator and Analysis of Uniformity. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2006., 2006, Portland. **Proceedings...** . Portland: Asabe, 2006. p. 1 - 10.

- 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, 2008.
- KOKO, J.; VIRIN, T. Optimization of a fertilizer spreading process. **Mathematics and Computers in Simulation**, Amsterdam, v. 79, p. 3099–3109, 2009.
- KRISHNAN, M.; FOSTERA, C. A.; STROSSERB, R. P.; GLANCEYA, J. L.; SUN, J. Q. Adaptive modeling and control of a manure spreaderfor precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 52, p. 1–10, 2006.
- LAN Y.; ZHANG, S.; LI, W.; HOFFMANN, W.C.; MA, C. Variable Rate Fertilization for Maize and its Effects Based on theSite-specific Soil Fertility and Yield. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF AGRICULTURAL ENGINEERING, 2008., 2008, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** . Foz do Iguaçu: Sbea, 2008. p. 1 - 10. CD-ROM.
- LIM, C. M. Implementation and experimental study of a fuzzy logic controller for dc motors. **Computers in industry**, Amsterdam, v. 26, n. 1,p. 93-96, 1995
- MAHL, D.; GAMERO, C. A.;SILVA, P. R. A.; YANO, E. H. Distribuição de fertilizante e de sementes de milho em função do nível de produto nos reservatórios e da velocidade de deslocamento. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35., 2006, João Pessoa. **Anais...** . João Pessoa: Sbea, 2006. p. 1 - 4. CD-ROM.
- MAHL, D. **Desempenho de semeadoras-adubadoras de milho (zea mays L.) em sistema de plantio direto.** 2002. 160 f. Dissertação (Mestre em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas - Unesp, Botucatu, 2002.
- MARTINS, M. de M. **Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos.** 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, 1999.
- MAZLOUMZADEH, S.M.; Shamsia, M.; Nezamabadi-pourb, H. Evaluation of general-purpose lifters for the date harvest industry based on a fuzzy inference system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 60-66, 2008.

MENEGATTI, F. A.; FORCELLINI F. A.; MARTIN, C. A. Avaliação de um sistema de dosagem de fertilizantes para agricultura de precisão. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 33. São Pedro: EMBRAPA/UNICAMP, jul. 2004, CD-Rom.

MIALHE, Luiz Geraldo. **Máquinas agrícolas: ensaios & certificação**. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996.

MILLER, W. M.; SCHUMANN, A. W.; WHITNEY, J. D. Evaluating variable rate granular fertilizer technologies in florida citrus. In: PROC. FLA. STATE HORT. SOC ., 117., 2004, Tampa. **Proceedings...** . Tampa: Fshs, 2004. p. 161 - 166.

OLIVA, R. A.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Máquina para aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis – adaptação de um modelo comercial convencional. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 30. **Anais...** .Foz do Iguaçu: UNIOESTE, jul. 2001, CD-Rom.

OLIVEIRA, R. B. de; LIMA, J. S. de, XAVIER, A. C.; PASSOS, R. R.; SILVA, S. de A. SILVA, A. F. da. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.176-186, 2008.

PINHEIRO, C.A.M. **Análise e projeto de sistemas de controle fuzzy: uma abordagem no domínio da frequência**. Tese (Doutorado em Automação) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

PRAVADALIOGLU, S. Single-chip fuzzy logic controller design and an application on a permanent magnet dc motor. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Amsterdam, v. 18, n. 7, p. 881-890, 2005.

RIGATOS, G. G. Adaptive fuzzy control of DC motors using state and output feedback. **Electric Power Systems Research**, Amsterdam, v. 79, n. 11, p. 1579-1592, 2009.

RUSSO, E. **Desenvolvimento de um módulo de interface para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis**. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2005.

SCARLETT, A. J. Integrated control of agricultural tractors and implements: a review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery. **Computers And Eletronics In Agriculture**, Amsterdam, v. 30, n. 1-3, p.167-191, 2001.

SHAW, I. S.; SIMÕES M. G. **Controle e modelagem Fuzzy**. São Paulo: Ed. Blucher, 2007.

Swisher, D. W.; Borgelt, S. C.; K. A. (2002) Sudduth Optical Sensor for Granular Fertilizer Flow Rate Measurement; **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers ASAE**, v. 45, n.4, p. 881-888.

SCHNEIDER, P, A. Distribuição de adubos de diferentes fórmulas em mecanismos dosadores de semeadoras-adubadoras. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 34, 2010, Canoas. **Anais...** . Canoas: Sbea, 2005. p. 1 - 4. CD-ROM.

SCOTT, A. S.; STOMBAUGH, T. S.; FULTON, J. P.; MUELLER, T. G. Considerations for Development of Variable-Rate Controller Test Standard. 2002 In: ASAE Annual International Meeting - CIGR XVth World Congress. **Proceedings...** Chicago: Asabe, 2002. p. 1 - 13.

SOGAARD, H. T.; KIERKEGAARD, P.. Yield reduction resulting from uneven fertilizer distribution. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 37, p.1749-1752, 1994.

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.

UMEZU, C. K. **Sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis**. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L. Desenvolvimento e avaliação de um controlador eletrônico para equipamentos de aplicação de insumos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p.225-230, 2006.

ULIANA, M. B.; FEY, E.; KUNZ, G. et al. Avaliação da uniformidade de distribuição longitudinal de adubo em semeadora adubadora utilizando rosca sem fim comum e

modificada. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39, 2010, Canoas. **Anais...** . Canoas: Sbea, 2005. p. 1 - 4. CD-ROM.

WEIRICH NETO, P. H.; SVERZUT, C. B.; SCHIMANDEIRO, A. Necessidade de fertilizante e calcário em área sob sistema plantio direto considerando variabilidade espacial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.338–343, 2006.

WERNER, V.; SCHLOSSER, J. F.; ROZIN, D.; PINHEIRO, E. D.; DORNELLES, M. E. C. Aplicação de fertilizantes a taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 6, p. 658–663, 2007.

WORRELL, E.; MEULEMAN, B.; BLOK, K. Energy savings by efficient application of fertilizer. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, vol. 13, p. 233-250, 1995

VILLIBOR, G. P.; RESENDE, R. C. de; PINTO, F. de A. de C.; QUEIROZ, D. M. de; LOUREIRO, D. R.; SANTOS, N. T. Evaluation of a granular fertilizer metering unit with radial flow for a punch applicator machine. In: International Conference of Agricultural Engineering. 2008, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBEA, 2008. p.1-4. CD-ROM

VILLETTE, S. et al. Centrifugal Spreading: an Analytical Model for the Motion of Fertiliser Particles on a Spinning Disc. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v.92, n.2, p. 157-164, 2005.

YAGER, R.R.; FILEV, D.P. **Essentials of fuzzy modeling and control**. New York: Jhon Wiley and Sons, 1994.

VILLETTE, S.; COINTAULT, F.; PIRON, E.; CHOPINET, B. Centrifugal Spreading: an Analytical Model for the Motion of Fertiliser Particles on a Spinning Disc. **Biosystems Engineering**, Amsterdam, v.92, n.2, p. 157-164, 2005.

YAMAMOTO, N. T.; RESENDE, R. C. de; QUEIROZ, D. M. de; SOUZA, C. M. A.; PANACHUKI, E. Efeito da velocidade de operação e uniformidade longitudinal de uma adubadora puncionadora. In: XXXV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35, 2006, João Pessoa. **Anais...** . João Pessoa: Sbea, 2006. p. 1 - 4. CD-ROM.