Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Tempo de resposta de um controlador eletrônico em sistemas de aplicação a taxas variáveis em pulverizações agrícolas

Raniére Rodrigues Vieira

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Piracicaba
2013

Raniére Rodrigues Vieira
Engenheiro Agrônomo

Tempo de resposta de um controlador eletrônico em sistemas de aplicação a taxas variáveis em pulverizações agrícolas

Orientador:
Prof. Dr. **CASIMIRO DIAS GADANHA JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Piracicaba
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Vieira, Raniére Rodrigues
Tempo de resposta de um controlador eletrônico em sistemas de aplicação a taxas variáveis em pulverizações agrícolas / Raniére Rodrigues Vieira.- - Piracicaba, 2013.
78 p: il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Agricultura de precisão 2. Produtos fitossanitários 3. Pulverizadores agrícolas 4. Tecnologia de aplicação I. Título

CDD 631.3
V658t

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À Deus,

Acima de tudo, pela saúde e força nos vários momentos de desafios que surgem no decorrer da vida.

Aos meus pais,

Acrísio Rodrigues de Souza e Leolina Vieira de Souza, pelo apoio, incentivo, confiança, compreensão em mim depositada, além do amor e belo exemplo de vida que vocês são. Obrigado por serem essas pessoas maravilhosas que fazem toda a diferença na minha vida.

Aos meus irmãos,

Rosiane Rodrigues Vieira e Acrísio Rodrigues de Souza Júnior, pelo companheirismo, carinho, amizade, e chateação durante nossa caminhada rumo ao desconhecido. Obrigado por fazerem da vida uma constante brincadeira, vocês são demais.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao **Prof. Dr. Casimiro Dias Gadanha Junior** pela amizade, confiança e liberdade em mim depositada para execução e concretização deste trabalho.

Agradecimento especial aos professores **Carlos Gilberto Raetano, Edgar Gomes Ferreira de Beauclair, José Paulo Molin e Rubens Angulo Filho**, pelas sugestões apresentadas no exame de qualificação.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistema: **Marcos Milan, Thiago Libório Romanelli e Tomaz Caetano Cannavam Ripoli *"in memorian"***, pelos ensinamentos.

À empresa Verion Agricultura representada pelos engenheiros agrônomos **Franz Arthur Pavlu e Marcos Nascimbem Ferra**z, por fornecerem o equipamento e auxiliarem no desenvolvimento do trabalho.

A **CAPES**, pela bolsa concedida, permitindo o desenvolvimento deste.

À **Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, por meio do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pela infraestrutura disponibilizada e oportunidade de realização do mestrado.

À **Universidade Estadual de Goiás UEG**, por meio da Faculdade de Ciências Agrárias campus de Ipameri-GO, pela formação acadêmica de qualidade.

Ao **Grupo de Extensão e Pesquisa em Tecnologia de Aplicação - GEPTA**, representados pelos graduandos **Camilo Bohórquez "Colombino"**, **Carlos R. N. Filho** "Xeid", **Kaique S. Palandi** "Kodorna", **Katia F. D. Rodrigues** "Hidrante", **Lucas K. Bobadilla** "Xãpion", **Pedro M. Hernandes Neto** "Rick", **Pedro Henrique U. Ferreira** "Soletranu" e **Marco Aurélio P. Milan** "Meninão", pela amizade, apoio e cooperação.

Aos companheiros de moradia: **Fabrício Edgar, João Victor Magda, Jonathas das Graças, Joseane Silva, Lucas Cunha, e Tiago cunha,** pelo companheirismo, amizade, dedicação e ótimos momentos em que estiveram sempre presentes.

Aos amigos e colegas de turma: **Adriano A. Anselmi, André F. Colaço, André F. Ferreira, Antônio M. Arruda Jr., Carla A. Germano, Carlos A. Z. de Souza, Cilene de Oliveira, Diego C. Soriano, Edmilson J. Mantoan, Eloy H. Karam, Evandro C. dos Santos, Edmar C. Zambianco, Erik A. Barreto Jr., Fernanda C. S. Silva, Flávio L. dos S. Teixeira, Franz A. Pavlu, Geraldo C. Zambrzycki, Giancarlo C. Rocco, Gilda B. C. Cardoso, Gustavo Portz, Hudson S. Nardi,**

Hugo J. A. Rosa, João Henrique M. Rosa, João Paulo S. Veiga, Leonan J. L. de Paula, Lucas R. do Amaral, Luciano L. Romanelli, Maria Carolina S. Andréa, Mark Spekken, Mateus Marrafon, Milton P. de Oliveira, Nelson C. Franco Jr., Neisvaldo B. dos Santos, Rafael C. Tieppo, Rafaelly S. da S. Santos, Samir E. Zaidan, Sheila T. Nascimento e Wagner Wolff, pela agradável convivência, trocas de experiências, respeito mutuo e amizade.

À **Tânia Bayer**, pela disposição, sugestões, revisões e amizade.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas: **Ângela M. D. Silva, Agnaldo F. Degaspari, Áureo S. de Oliveira, Davilmar A. D. Collevatti, Fernanda B. N. da Silva, Francisco de Oliveira, Hélio de T. Gomes, José Geraldo Gomes, Juarez R. do Amaral, Luiz Afonso da Costa e Luiz C. Camargo,** pela paciência, apoio e disposição.

A equipe da Biblioteca e da secretaria de Pós-Graduação, pelo atendimento e competência e atenção.

Aos que fizeram parte de todo processo de pesquisa tornando possível a realização desse trabalho, o meu muito obrigado por participarem desta etapa importante da minha vida.

EPÍGRAFE

“C'est quelques fois pénible de faire son devoir, mais ça ne l'est jamais autant que de ne pas l'avoir fait.”
(Dumas A.)

"Everything that man ignores, does not exist for him. To the universe, comes down on the size of your know." (Einstein A.)

“Nothing is impossible for the man who doesn't have to do it himself”
(Murphy A.)

"Pra quem tem pensamento forte o impossível é só questão de opinião"
(Chorão)

SUMÁRIO

RESUMO 11
ABSTRACT 13
RESUMEN 15
1 INTRODUÇÃO 17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19
2.1 Aplicação de produtos fitossanitários 19
2.2 Controladores eletrônicos de pulverização 22
2.3 Válvulas de controle para controladores eletrônicos de pulverização 23
2.3.1 Válvulas de controle 24
2.4 Transdutores para controladores eletrônicos de pulverização 28
2.4.1 Transdutores de fluxo 28
2.4.2 Transdutores de pressão 30
2.5 Avaliação dos sistemas de controle eletrônico de pulverizações agrícolas 33
2.5.1 Sistema de controle de taxas de aplicação 33
2.5.2 Sistema automático de controle de seção 35
2.5.3 Sistemas de aplicação a taxas variáveis 37
2.6 Tempo de resposta em controladores eletrônicos de pulverização 38
3 MATERIAL E MÉTODOS 41
3.1 Local do ensaio 41
3.2 Materiais utilizados 41
3.2.1 Bancada projetada para ensaio em laboratório 41
3.2.2 Sistema eletrônico 42
3.2.3 Sistema de aquisição de dados 49
3.2.4 Sistema hidráulico 50
3.2.5 Barra de pulverização 50
3.3 Seleção de pontas de pulverização 51
3.4 Programação do sistema eletrônico de pulverização 52
3.4.1 Controlador eletrônico de pulverização 52
3.4.2 Sistema de aquisição de dados 52
3.5 Calibrações do sistema eletrônico de pulverização 53
3.5.1 Calibração do transdutor de fluxo 53
3.5.2 Calibração do transdutor de pressão 53

3.5.3 Aferição do controlador eletrônico de pulverização 54
3.6 Metodologia 55
3.6.1 Obtenção dos dados..... 55
3.6.2 Características dos dados 57
3.6.3 Análise dos dados 58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 61
4.1 Calibração dos sensores e transdutores 61
4.1.1 Calibração do transdutor de fluxo 61
4.1.2 Calibração transdutor de pressão..... 61
4.2 Tempo de resposta em função da mudança de velocidade 62
4.3 Tempo de resposta em função da mudança de taxa de aplicação..... 64
4.4 Análise comparativa dos tempos de resposta 66
4.4.1 Tempos de resposta em função das mudanças de velocidade 66
4.4.2 Tempos de resposta em função das mudanças de taxa de aplicação 68
4.5 Exatidão do controlador eletrônico de pulverização na determinação da taxa de aplicação..... 70
5 CONCLUSÃO 71
REFERÊNCIAS 73

RESUMO

Tempo de resposta de um controlador eletrônico em sistemas de aplicação a taxas variáveis em pulverizações agrícolas

Os avanços na mecanização agrícola têm contribuído para o crescimento da produtividade agrícola do país, garantindo ao Brasil lugar de destaque na produção agrícola de alimentos, fibras e energia. A aplicação de produtos fitossanitários tem contribuído para esse aumento garantindo a proteção de plantas dentro do ciclo de produção agrícola. Controladores eletrônicos têm sido utilizados nas aplicações de produtos fitossanitários na agricultura moderna, surgindo à necessidade de estudos do seu desempenho. O tempo de resposta é o principal parâmetro, pois determina a eficiência do sistema de controle. Desta forma, objetivo deste trabalho foi estudar o tempo de resposta de um controlador eletrônico de pulverização variando as velocidades de deslocamento e taxas de aplicação, em baixas, médias e altas vazões. As mudanças de velocidade de deslocamento e as de taxa de aplicação influenciaram nos tempos de resposta no controlador eletrônico de pulverização. Os tempos de resposta obtidos do controlador eletrônicos de pulverização para mudanças de velocidade e taxa de aplicação variaram de 2 a 9 e 1,5 a 8 segundos respectivamente. A exatidão do sistema de controle eletrônico de pulverização para as mudança de velocidade foi de ± 2% e para as mudanças de taxas de aplicação de ± 4%. O controlador eletrônico de pulverização obteve menor tempo resposta em altas vazões e maiores velocidades.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Produtos fitossanitários; Pulverizadores agrícolas; Tecnologia de aplicação

ABSTRACT

Response time of an electronic controller in variable-rate application systems in agricultural sprays

Advances in agricultural mechanization contributed to the growth of productivity in the country farms, leading Brazil to a significant position in the agricultural production of food, fibre and energy. A fraction of these results had been ensured by employment of plant protection products within the cycle of agricultural production. In this context, electronic controllers have been used in spraying applications and creating a demand for studies of their performance. Response time in actual applications is a key parameter determining the efficiency of the control system. The objective of this work was to study the response time of an electronic controller of: varying displacement speeds, spraying, and application rates; working at low, medium and high flows. Influences in the response time were found for speed changes and the application rates in spray electronic controller. Ranging from 2 to 9 and 1.5 to 8 seconds respectively. The accuracy of electronic spray control system for gear change was up to 2% and to changes in application rates up to 4%. Time responses for the electronic controller were lower for high flow rates and speeds.

Keywords: Precision agriculture; Plant protection products; Agricultural sprayers; Application technology

RESUMEN

Tiempo de respuesta de un controlador electrónico en sistemas de aplicación de tasas variables en pulverizaciones agrícolas

Los avances en la mecanización agrícola han contribuido en el crecimiento de la productividad agrícola del país, garantizando a Brasil un lugar destacado en la producción agrícola de alimentos, hebras y energía. La aplicación de productos fitosanitarios ha contribuido para ese aumento garantizando la protección de plantas dentro del ciclo de producción agrícola. Los controladores electrónicos han sido utilizados en las aplicaciones de productos fitosanitarios en la agricultura moderna, surgiendo la necesidad de estudios de su desempeño. El tiempo de respuesta es el principal parámetro, pues determina la eficiencia del sistema de control, por lo que el objetivo del trabajo fue estudiar el tiempo de respuesta de un controlador electrónico de pulverización variando las velocidades de desplazamiento y tasas de aplicación, en bajas, medias y altos de volumen. Los cambios de velocidad de desplazamiento y de tasa de aplicación influenciaron los tiempos de respuesta en el controlador electrónico de pulverización. Los tiempos de respuesta obtenidos del controlador electrónicos de pulverización para cambios de velocidad y tasa de aplicación variaron de 2 a 9 y 1,5 a 8 segundos respectivamente. La exactitud del sistema de control electrónico de pulverización para los cambio de velocidad fue del ± 2% y para los cambios de tasas de aplicación del ± 4%. El controlador electrónico de pulverización obtuvo el menor tiempo de respuesta en los altos volúmenes y mayores velocidades.

Palabras clave: Agricultura de precisión; Productos fitosanitarios; Pulverizadoras agrícolas; Tecnología de aplicación

1 INTRODUÇÃO

Os avanços na mecanização agrícola têm contribuído significativamente para o crescimento da produção agrícola, garantindo ao Brasil lugar de destaque na produção agrícola de alimentos, fibras e energia. Outro fator que tem contribuído para aumento da produção agrícola é o uso de produtos fitossanitários, fundamentais na proteção de plantas. Porém, seu uso deve ser feito de maneira criteriosa, de forma a causar o mínimo impacto ambiental. O número de aplicações de produtos fitossanitários, têm tornado a pulverização agrícola a principal fator de aumento do custo de produção, pois é a única maneira de exercer controle efetivo nos ciclos de produção agrícolas.

O mercado nacional de produtos fitossanitários na safra 2011/2012, consumiu cerca de 827 mil toneladas, movimentando quase 8,5 bilhões de dólares destacando o Brasil como segundo maior consumidor, perdendo apenas para os Estados Unidos. Esses números equivalem a 10 kg de produto fitossanitário por hectare, sendo mais utilizados os herbicidas com 49%, fungicidas com 21%, inseticidas 21% e outras substâncias 9% (FREITAS JR., 2013).

A aplicação de produtos fitossanitários exige muitos cuidados especiais, o que favorece o surgimento de novas pesquisas. Mesmo diante de uma crescente inovação tecnológica, a ocorrência de erros nas aplicações continua sendo um desafio nas aplicações de produtos fitossanitários.

Nos pulverizadores agrícolas convencionais o operador é responsável pela definição da pressão e velocidade de deslocamento do sistema de aplicação com base na taxa de aplicação recomendada, além da manutenção das mesmas, sendo os principais fatores de erros nas aplicações. Assim os sistemas de aplicação convencionais dependem diretamente da habilidade dos operadores, que enfrentam o obstáculo de manterem a velocidade constante e acionarem o fechamento e abertura das seções durante a operação.

Os pulverizadores agrícolas, usados para aplicações de produtos fitossanitários necessitam de maior eficácia na aplicação atingindo o alvo e seguindo às taxas recomendações contidas nos rótulos dos produtos fitossanitários. Atualmente, o uso de pulverizadores autopropelidos permitem uma maior autonomia e capacidade operacional nas aplicações, pois possuem maiores reservatórios, barras de pulverização e permitem o uso de altas velocidades, além de possuírem

controladores eletrônicos de pulverização que aumentam a eficácia da aplicação e a economia de produtos fitossanitários.

Os pulverizadores autopropelidos podem ser equipados com sistemas de controle eletrônicos que atuam mantendo e/ou alterando as taxas de aplicação desejadas. Esses sistemas regulam automaticamente o fluxo da barra de aplicação mantendo a taxa de aplicação recomendada. Dessa forma, o controlador eletrônico de pulverização tem a capacidade de ajustar a válvula reguladora até o momento em que a taxa de aplicação do sistema coincida com a taxa recomendada, independentemente da velocidade de deslocamento ou da faixa de pulverização. Ao contrário dos pulverizadores convencionais, onde o operador que tem a responsabilidade de manter a velocidade de deslocamento constante para que a taxa de aplicação seja uniforme.

Nesse contexto os controladores eletrônicos de pulverização se tornam uma opção para a diminuição dos erros e imprecisões ocorridos nas aplicações de produtos fitossanitários. Tais sistemas possuem mecanismos (sensores e atuadores) que atuam na correção da taxa de aplicação em função das mudanças de velocidade, de forma a proporcionar maior eficiência operacional, qualidade e facilitar o gerenciamento das operações. Dessa forma, o tempo de resposta se torna um importante fator a se analisar, no desempenho de controladores eletrônicos de pulverização, pois esses erros podem ser relacionados ao tempo de resposta de seus componentes ao identificar ou ajustar o sistema as recomendações desejadas.

O uso de controladores eletrônicos nas aplicações de produtos fitossanitários vem se tornando mais comum na agricultura moderna, surgindo uma necessidade de estudos específicos sobre tempo de resposta e seu comportamento durante a operação de aplicação.

O objetivo desse trabalho foi avaliar o tempo de resposta de um controlador eletrônico de pulverização, submetido à mudanças de velocidade de deslocamento e de taxas de aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aplicação de produtos fitossanitários

Para a obtenção de maiores produtividades nas culturas é imprescindível à adoção de práticas geradas pela tecnologia de aplicação. Este sucesso está vinculado diretamente, não apenas à escolha do produto adequado, mas também à calibração e à habilidade do operador em manuseá-lo e aplicá-lo da melhor forma durante a operação. Contudo, devido ao fato da calibração do equipamento ser efetuada a uma dada pressão e velocidades fixas, a operação não dispõe das mesmas características durante a operação. O mau uso da tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários pode acarretar grandes perdas de produtividade, ocasionadas pela reincidência de doenças, pragas ou mesmo pelo fato de não ter ocorrido o controle eficaz desejado (GADANHA JUNIOR, 2000).

Koo e Summer (1998) enfatizam que os produtos fitossanitários devem ser aplicados de forma correta, e que estes devem atingir integramente as recomendações contidas nos rótulos dos produtos. Os autores ainda relatam que muitos dos resultados insatisfatórios nas aplicações são devidos à calibração inadequada, mau funcionamento e imprecisão na velocidade de deslocamento dos pulverizadores agrícolas.

Segundo Alexander et al. (1964), Gadanha Junior (2000), Matthhews (1984), Matuo (1990), as equações básicas de calibração de pulverizadores agrícolas são baseadas na taxa de aplicação gerada pela vazão das pontas, largura útil e velocidade de deslocamento da operação, descritas pela eq. (1).

$$\mathrm{Q} = 600.\ \frac{q}{l\,.v} \qquad (1)$$

em que:

Q é a taxa de aplicação, em L ha $^{-1}$;

600 é a constante de conversão de unidades;

q é a vazão da barra de pulverização, em L min $^{-1}$;

l é a largura útil da barra de pulverização, em m;

v é a velocidade de deslocamento, em km h $^{-1}$.

Gandolfo (2001), avaliando o desempenho de pulverizadores terrestres em condições brasileiras, encontrou variações significativas que comprometem a

qualidade das aplicações. Os erros médios de taxa de aplicação foram de 86,8% entre os equipamentos analisados.

Antuniassi e Gandolfo (2001) destacam que bom funcionamento dos pulverizadores pode ser quantificado por meio de algumas falhas como: erros de calibração e falta de inspeção periódica. Os autores concluem que no estado do Mato Grosso 72,2% dos pulverizadores com mais de dois anos de uso apresentaram erros de calibração e 88,9% dos pulverizadores com três ou mais anos de uso apresentaram pelo menos uma ponta inadequada; já nos estados do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul, 96,7% dos pulverizadores apresentaram manômetros inadequados. As máquinas novas apresentam padrões de qualidade adequados. No entanto, ao terceiro anos de uso começam a apresentar problemas devido ao uso inadequado e a falta de manutenção dos mesmos, tornando-se a inspeção periódica uma necessidade quando se deseja obter uma melhor na qualidade na aplicação de produtos fitossanitários.

Silveira et al. (2006), analisando a distribuição dos tipos de pulverizadores na região de Cascavel, estado do Paraná. Relataram que em 83% dos 62 pulverizadores agrícolas avaliados, os componentes essenciais para o seu funcionamento não estavam em condições ideais de uso.

De acordo com Antuniassi, Gandolfo e Siqueira (2011), cerca de 70% dos pulverizadores brasileiros apresentaram erros significativos na calibração da taxa de aplicação. Os autores enfatizam que não basta ter técnica, mas o conhecimento adequado do conjunto de técnicas para que possa elevar sua eficácia de aplicação. Dessa maneira, a priorização dos treinamentos de operadores e técnicos responsáveis pela operação, para que possam realizar as calibrações de forma adequada e minimizar os erros que possam vir comprometer a aplicação de produtos fitossanitários.

Antuniassi e Baio (2004) descrevem fatores importantes para o sucesso das aplicações de produtos fitossanitários, considerando as relações entre o tipo de alvo a ser atingido, a forma de ação do produto fitossanitário e a técnica utilizada na aplicação. Os autores enfatizam que o uso de controladores eletrônicos nas aplicações de produtos fitossanitários, possibilitam o controle dos fatores como erros da taxa de aplicação em função das mudanças de velocidades de deslocamento no terreno e o fechamento e abertura de seções da barra de pulverização diminuindo as sobreposições na operação.

Os sistemas de controle eletrônico de pulverizações agrícolas são compostos de controlador, sensor de velocidade, sensor de fluxo, válvula reguladora, válvulas de seções, barra de pulverização e circuito hidráulico. O controle eletrônico é baseado nos sinais enviados pelos sensores de velocidade e fluxo que informam o deslocamento e a vazão real do sistema, atuando no controle efetivo da aplicação. O algoritmo do controle recebe, processa e envia os sinais de ajuste para o atuador (válvula reguladora) em função da taxa de aplicação recomendada (SHARDA et al., 2011).

O autor ainda destaca que a vazão do sistema é corrigida em função da velocidade de deslocamento, largura útil da barra de pulverização e taxa de aplicação recomendada (L ha $^{-1}$), previamente definida e inserida no controlador pelo operador. O controlador eletrônico ainda pode atuar no controle automático de seção, fechando e abrindo automaticamente as válvulas, baseados em mapas de aplicação.

Ainda sim, as aplicações de produtos fitossanitários também dependem do produto a ser aplicado, da capacidade do reservatório, dosagem recomendada e taxa de aplicação do produto, descritos na eq. 2.

$$\mathrm{Pr} = \frac{d}{Cr.Q} \tag{2}$$

em que:

Pr é a quantidade de produto fitossanitário a ser colocado no reservatório, em L ou Kg;

d é a dosagem do produto fitossanitário, em L ha $^{-1}$;

Cr é a capacidade do reservatório, em L;

Q é a taxa de aplicação, L ha $^{-1}$.

Segundo Hughes e Frost (1985), os altos custos de aplicação de produtos fitossanitários, demandam o uso de controladores eletrônicos de pulverização, pois minimizam os erros ocorridos durante a operação, elevando a eficiência dos sistemas. Os autores citam que a eficácia dos controladores eletrônicos é altamente dependente da exatidão de suas partes constituintes (sensores e atuadores), que a tendência de maiores velocidades de trabalho e redução das taxas de aplicação seja uma maior exatidão dos sistemas aplicação.

A tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários ainda é um dos pontos de estrangulamento na produção agrícola, pois há uma necessidade emergente de melhoria da eficiência nas aplicações, diminuindo gastos e evitando contaminações ambientais, melhorando o retorno econômico e se tornando mais sustentável. Dentre as etapas que compõe o processo de produção agrícola, a aplicação de produtos fitossanitários é uma das mais exigentes, pois tem que atender vários aspectos não somente ao tratamento da área cultivada, mas também a preservação ambiental (CHRISTOFOLETTI, 1999).

2.2 Controladores eletrônicos de pulverização

Os pulverizadores convencionais funcionam a partir do princípio que as aplicações realizadas são feita com pressão e velocidade de deslocamento constante na operação a qual resultará numa taxa de aplicação uniforme. No entanto, as operações de aplicação de produtos fitossanitários no campo a realidade é outra, pois a velocidade de deslocamento não é constante em função dos obstáculos e condições do terreno. Dessa maneira, quando há redução ou incremento de velocidade na operação, pode ocorrer o aumento ou a diminuição das taxas de aplicação devido à realização da calibração prévia com velocidade constante (ALEXANDER et al., 1964).

Os controladores eletrônicos surgem com intuito de minimizar a variação das taxas de aplicação no campo devido às mudanças de velocidade. Dessa forma, esses sistemas de controle permitem a compensação da variação de velocidade de deslocamento da máquina durante a operação e também oferecem grande potencial para realização de controle automático do fechamento de seções e aplicações a taxas variáveis (RASHIDI; MOHAMMADZAMANI, 2009).

Os controladores eletrônicos de aplicação são compostos de microcomputadores embutidos que possuem entradas para sensores, mapas de prescrição gerados em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), interface personalizada de comandos do usuário que por meio de hardwares e softwares calculam a taxa de aplicação necessária usando seus algoritmos internos. Os valores são calculados, traduzidos e enviados aos atuadores que ajustam as taxas de aplicação, por meio de motores hidráulicos, elétricos e pneumáticos (PRAVEEN, 2009).

Os controladores eletrônicos de pulverização agrícola são classificados de acordo com o tipo de sinal monitorado pelo controlador sendo: pressão ou vazão. O algoritmo utiliza o sinal para os cálculos e ajusta a o atuador em função da taxa de aplicação recomendada. Os sistemas baseados na pressão ajustam o atuador por meio do sinal de pressão e os sistemas baseados na vazão, ajustam o atuador por meio do sinal de vazão (SHARDA et al., 2011).

Os vários avanços tecnológicos, proporcionado pelo uso de Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS), controladores, atuadores, sensores, SIGs, adoção de técnicas de aplicação a taxas variáveis, controle automático de seção e o uso de piloto automático, vem eliminando várias fontes de erros ocorridos durante a operação, fatores esse que aumentam a eficiência dos sistemas de aplicação de produtos fitossanitários e proporcionam a implantação dos preceitos de Agricultura de Precisão (AP) (NOLTE, 2011).

Segundo Scarlett (2001) a implantação de sistemas de controle eletrônicos de pulverização podem gerar incrementos da ordem de 15 a 20% na eficiência operacional das operações agrícolas. Além de diminuir a fadiga do operador e aumentar o rendimento e qualidade da aplicação de produtos fitossanitários.

2.3 Válvulas de controle para controladores eletrônicos de pulverização

As válvulas elétricas são operadas automaticamente por um controlador eletrônico de pulverização, que atuam redirecionando a vazão, abrindo, ou fechando o fluxo do sistema de aplicação, onde tradicionalmente eram feitos pelo operador. As válvulas de controle geralmente são acionadas por meio de um motor hidráulico ou elétrico ligado a uma redução mecânica, denominado driver de acionamento da válvula que possibilitam: abertura, fechamento, desvio ou regulagem da mesma (JOHAN et al., 2004).

2.3.1 Válvulas de controle

São dispositivos mecânicos que consistem em uma restrição variável à passagem do fluido. São classificadas conforme o seu tipo de deslocamento: válvulas lineares e rotativas. Nas válvulas lineares as peças móveis vedantes exercem um movimento retilíneo, acionadas por uma haste deslizante. Já nas válvulas rotativas as peças móveis vedantes exercem um movimento de rotação, acionadas por um eixo em rotação. Geralmente são compostas por três partes: atuador, castelo e corpo (FIGUEIREDO NETO; CARDOSO, 1999).

2.3.1.1 Tipos de atuadores para válvulas de controle

Os atuadores exercem ação mecânica sobre a válvula em resposta ao sinal enviado pelo controlador eletrônico, podendo ser de dois tipos biestáveis (liga/desliga) ou contínuos, podendo realizar movimentos translacionais ou rotativos. São classificados de acordo com a ação mecânica que exercem:

a) Pneumático à mola ou diafragma;

b) Pneumático à pistão;

c) Elétrico;

d) Elétrico-hidráulico;

e) Hidráulico.

2.3.1.2 Tipos de castelo para válvulas de controle

O castelo é parte da válvula de controle que conecta do atuador ao corpo e serve de guia da haste do obturador possibilitando o movimento da válvula além de ser o responsável pela selagem contra vazamento e o meio para montagem do atuador. É uma parte sujeita à pressão do fluído e tem de satisfazer os mesmos requisitos de projeto que o corpo, pois ele prende o atuador. Contem a caixa de gaxetas e pode ainda conter a bucha de guia superior para guiar o obturador como no caso das válvulas globo convencionais que podem ser do tipo: normal, aletado, alongado ou com foles de vedação (Figura 1) (GONÇALVEZ, 2003).

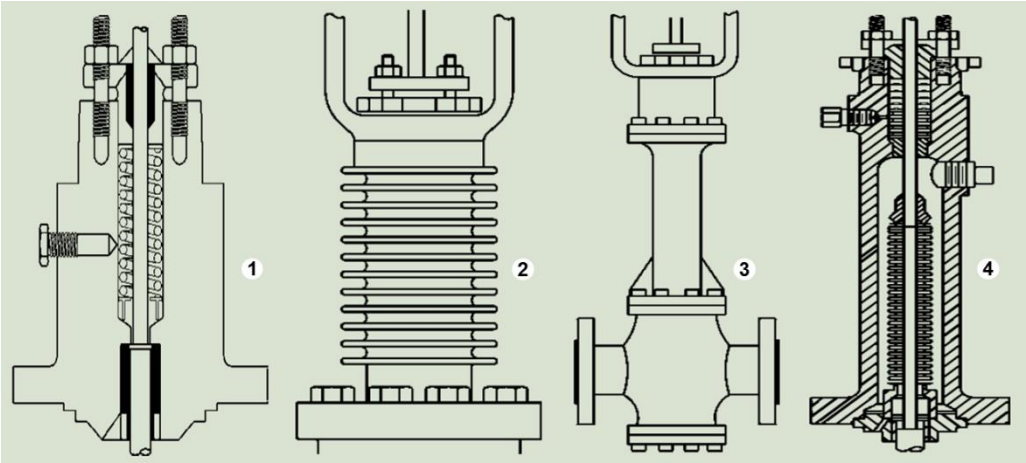


Figura 1 - Tipos de castelo: 1.normal; 2.aletado; 3.alongado; 4.foles de vedação. Fonte: Adaptado de Gonçalvez (2003)

O castelo é um subconjunto do corpo na maioria das válvulas de controle, embora existam alguns tipos de válvulas como as rotativas (borboleta, esfera e excêntrica) e a bipartida nas quais o castelo é parte integral ao corpo (GONÇALVEZ, 2003).

2.3.1.3 Tipos de válvulas de controle (corpo)

As válvulas são classificadas em função dos tipos de corpo. Define-se corpo como o conjunto de elementos fixos e móveis em contato direto com o líquido e necessitam serem produzidos de ligas ou materiais resistentes, para minimizar o desgaste por abrasão ocorrido pelo contato com o fluído, aumentando assim sua vida útil (ULSON, 2002).

Válvula globo (Figura 2) são válvulas utilizadas nos sistemas onde a perda de carga através da válvula representa a maior parte da perda de carga do sistema, com líquidos isentos de partículas em suspensão. Possuem acionamento linear, proporcionando uma boa vedação e possui obturador estaticamente não balanceado, com exatidão de 0,01% quando totalmente fechada em sua vazão máxima (FIGUEIREDO NETO; CARDOSO, 1999).

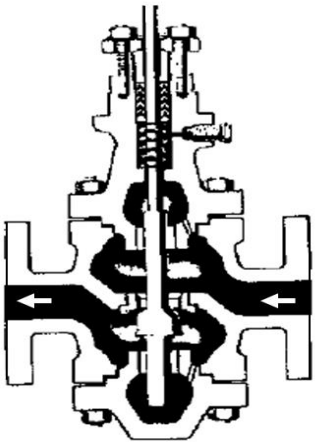


Figura 2 - Válvula globo convencional. Fonte: Adaptado de Figueiredo Neto e Cardoso (1999)

Válvulas de diafragma (Figura 3) são utilizadas em líquidos com partículas em suspensão e quando fechada possui ótima vedação, fácil manutenção e acionamento linear, porém sua curva característica muda em função das deformações no diafragma. Não apresenta uma boa característica para controle de vazão, pois possui baixa sensibilidade acima dos 30% de abertura (FIGUEIREDO NETO; CARDOSO, 1999).

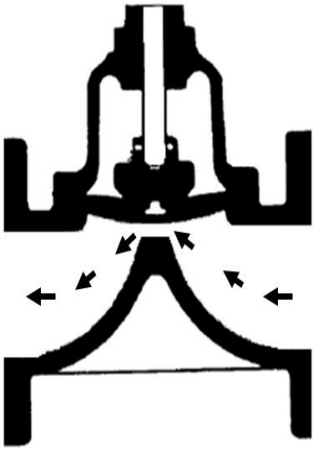


Figura 3 - Válvula tipo diafragma. Fonte: Adaptado de Figueiredo Neto e Cardoso, (1999)

Válvulas borboletas (Figura 4) consistem de um corpo tipo anel circular no interior, do qual oscila entre dois mancais um disco que faz a função do obturador.

São normalmente utilizadas em sistemas de controle de processo de pequena capacitância e banda larga proporcional, líquidos isentos de partículas em suspensão, acionamento rotativo, pouco peso e menor espaço de instalação. Sua curva característica é muito influenciada pela perda de carga da tubulação e possui um razoável controle de vazão (FIGUEIREDO NETO; CARDOSO, 1999).

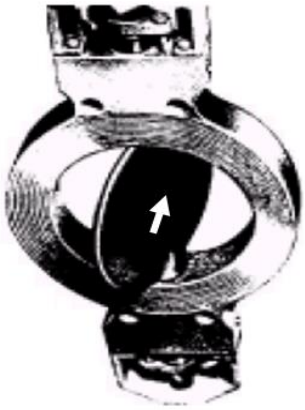


Figura 4 - Válvula borboleta. Fonte: Adaptado de Figueiredo Neto e Cardoso, (1999)

Válvulas de esfera (Figura 5) é uma válvula de controle cujo obturador é uma esfera criteriosamente vazada para permitir passagem plena ou parcial de um determinado fluído. São comumente utilizadas em operações de interrupção de fluxo, controle de sistemas com grande capacitância devido à acentuada não linearidade e líquidos isentos de partículas em suspensão. Possui acionamento rotativo e não é balanceada (FIGUEIREDO NETO; CARDOSO, 1999).

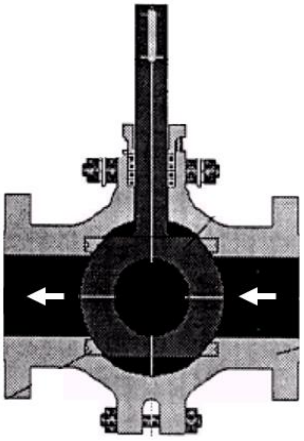


Figura 5 - Válvula de esfera. Fonte: Adaptado de Figueiredo Neto e Cardoso, (1999)

Ulson (2002) relata que maioria dos controladores eletrônicos de pulverização agrícolas utiliza válvulas de controle com atuadores elétricos, hidráulicos e pneumáticos. O autor descreve que os tempos de abertura total da válvula de controle para os atuadores hidráulicos 0,6 segundos, elétricos acima de 3,5 segundos e pneumáticos 0,3 segundos.

O autor ainda comenta que há grande necessidade de estudos aprofundados sobre as curvas características de vazão, tempo de abertura, folga nos acoplamentos mecânicos, multiplicadores de velocidades dos atuadores, além de

suas instabilidades marginais e tempo morto, sendo fatores importantes que afetam diretamente no funcionamento da válvula de controle.

2.4 Transdutores para controladores eletrônicos de pulverização

Os transdutores são sistemas que geram uma corrente elétrica de saída (sinal), proporcionais às grandezas físicas obtidas, já os sensores são as partes sensitivas dos transdutores, diretamente responsáveis pela quantidade física medida (WERNECK, 1996).

2.4.1 Transdutores de fluxo

Os transdutores de fluxo, mais utilizados em controladores eletrônicos de pulverização são os eletromagnéticos e os de turbina. Os transdutores eletromagnéticos (Figura 6) são os mais flexíveis se comparado aos demais, não exercem perda de carga do fluido mensurado e possibilita medições de produtos altamente corrosivos, fluidos com sólidos em suspensão; além de não sofrer influência da viscosidade. Porém sua restrição é o fato que o fluido tem que ser eletricamente condutivo e em alguns fluidos com propriedades magnéticas influenciam em sua exatidão (GONÇALVEZ, 2003).

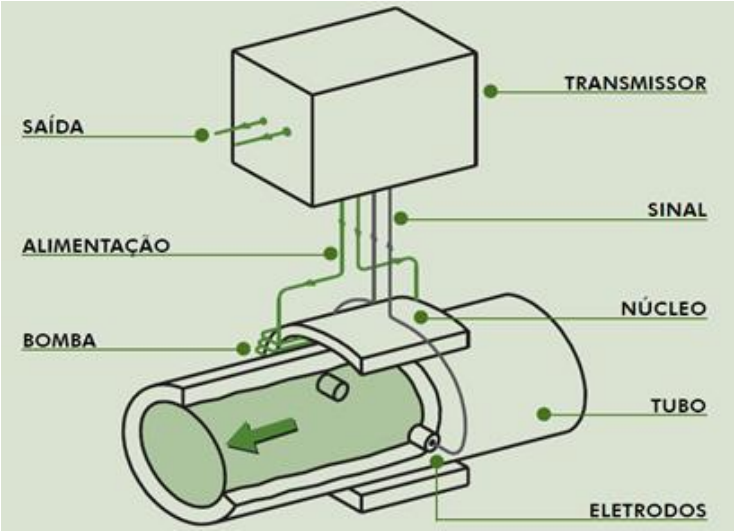


Figura 6 - Transdutor de fluxo eletromagnético. Adaptado de Gonçalvez (2003)

Os transdutores de turbina (Figura 7) são constituídos por um rotor axial montado na tubulação, sendo este rotor provido de aletas que com o movimento do fluido os fazem girar. As extremidades das turbinas são envolvidas por hastes de ferrite e a velocidade do rotor é detectada através de um transdutor eletromagnético, que relaciona pulsos com fluxo. Verifica-se então, a indução de um ciclo de tensão alternada, sendo a frequência dos pulsos gerados proporcionais à velocidade do fluido, determinado em pulsos por minuto.

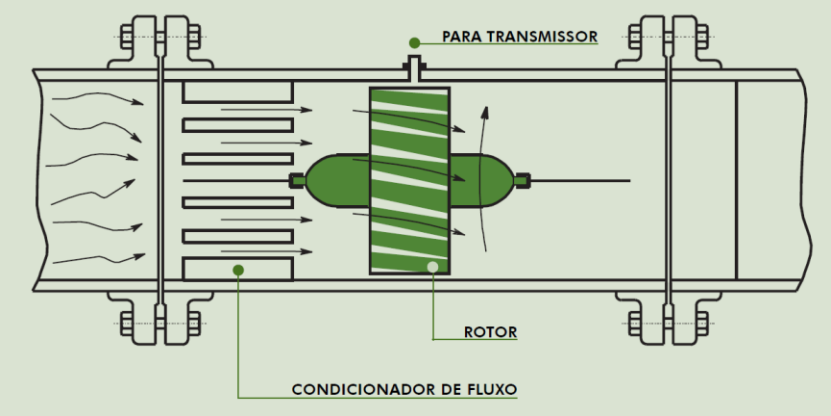


Figura 7 - Transdutor de fluxo de turbina. Adaptado de Gonçalvez (2003)

Withers et al. (1971) citados por Hughes e Frost (1985) avaliando transdutores de fluxo de turbina, encontraram exatidão de ± 0,5% e linearidade acima do limite da faixa de fluxo, com uma frequência menor do que o alegado pelos fabricantes. Porém enfatizam que o desempenho dos giros também é afetado pela viscosidade do fluido e temperatura.

Pereira, Antuniassi e Acosta (2005) avaliando dois tipos de transdutores de fluxo, descrevem que o transdutor de turbina apresentou um valor de calibração praticamente constante em toda a faixa de fluxos testados. Contudo o eletromagnético necessitou de uma equação de regressão para a definição de seus valores de calibração, visto que houve variação destes valores de acordo com alterações no regime de fluxo, notadamente nas vazões menores. Por outro lado, o de turbina, apesar de ter maior estabilidade nos pulsos emitidos nas leituras, apresentou ligeira variação entre soluções nas altas vazões, reforçando a ideia de que as equações devem ser utilizadas dentro dos limites de cada transdutor. Os autores concluem que os algoritmos de controle devem ser adaptados a cada tipo de transdutor, não sendo recomendada a substituição indiscriminada entre os tipos de sensores sem devido ajuste.

2.4.2 Transdutores de pressão

Os transdutores mecânicos indicam as pressões por meio de um ponteiro sobre uma escala onde o sensor atua diretamente em um conjunto de engrenagens movimentando o ponteiro em função da deformação ocorrida. Já nos transdutores elétricos, o sensor atua transformando a deformação ocorrida em corrente elétrica.

No controle de pulverizações agrícolas os transdutores mais utilizados são os elétricos, devido a realizarem medições dinâmicas ao longo de trajetos informando as pressões geradas em tempo real. Existem vários transdutores elétricos, porém o princípio de medição é o mesmo baseiam-se na deformação de um elemento flexível ou metálico, como tubo de Bourdon (Figura 8), diafragma (Figura 9), fole (Figura 10), etc. De forma que o movimento decorrente da deformação destes elementos é transformado em corrente elétrica possibilitando a medição da pressão. Existem vários métodos para tais medições: contato resistivo móvel (extensômetro), strain-gages, capacítivo, piezoelétrico, magnético, etc (ISMAIL et al., 1998).

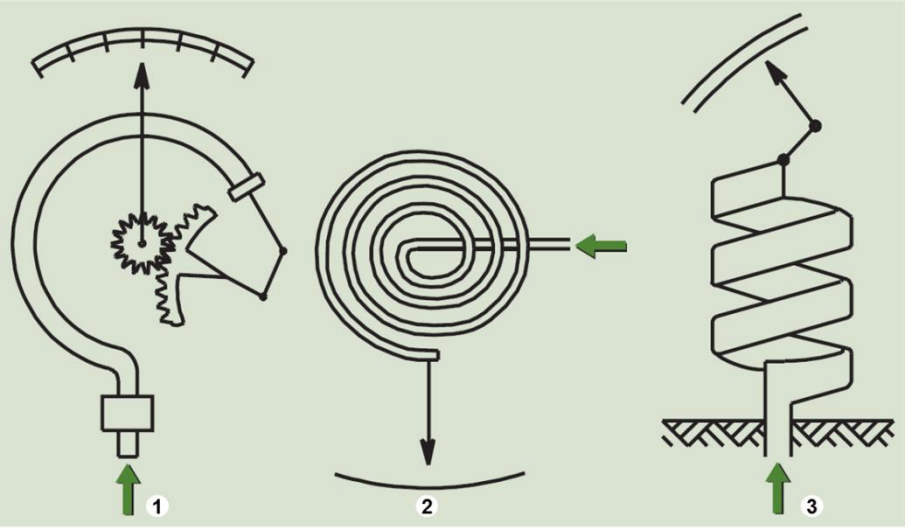


Figura 8 - Transdutor de pressão de tubos de Bourdon, (1) tipo em C, (2) espiral e (3) helicoidal. Adaptado de Gonçalvez (2003)

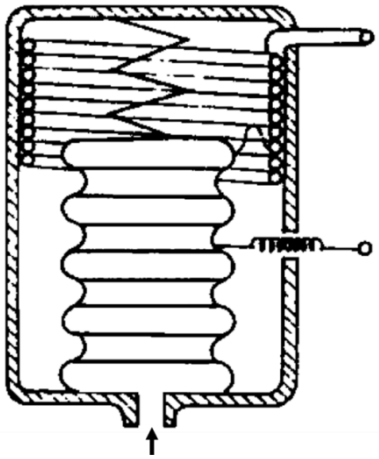


Figura 9 - Transdutor de pressão de diafragma. Adaptado de Henry et al. (1991)

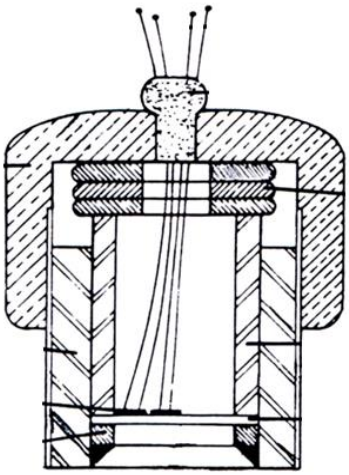


Figura 10 - Transdutor de pressão com foles. Adaptado de Ismail et al. (1998)

Segundo Werneck (1996) os transdutores convencionais em sua maioria são formados por extensômetros elétricos (Figura 11), colados no diafragma, que com a deformação do diafragma em função da pressão do líquido, atua em um dos seus lados fechado num compartimento estanque, o outro lado está em contato com a pressão atmosférica onde ficam os extensômetros elétricos que medem a deformação do diafragma, que é proporcional à pressão atuante.

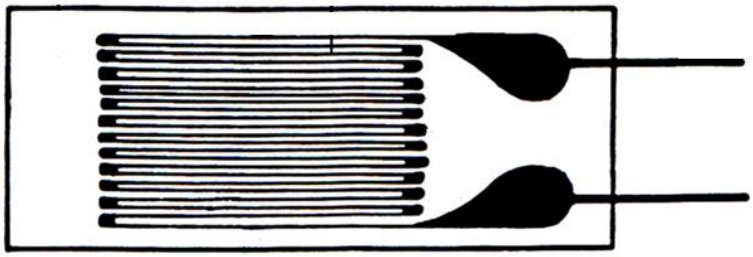


Figura 11 - Extensômetro elétrico de resistência. Adaptado de Henry et al. (1991)

O transdutor de resistência variável pode ser construído na forma de um contato que se move num fio sobre uma bobina com movimento linear ou angular, ou um contato que se move angularmente sobre um condutor sólido, como uma peça de grafite, transformando o deslocamento em um sinal elétrico (ISMAIL et al., 1998).

Segundo o Ismail et al. (1998) estes transdutores são compostos de três partes: o elemento sensor de pressão, a mola de referência e o elemento de resistência. Com os foles pode-se usar ou não molas de referência. No caso do tubo de Bourdon, ele atua tanto como elemento sensor como mola de referência. Os autores classificam os transdutores extensiométricos em faixas de pressão: baixa (até 689,5 kPa), média (689,5 a 2413,2 kPa) e alta (acima de 2413,2 kPa), sendo relacionada ao tipo de material elástico utilizado. De modo que os transdutores de foles são usados em baixas pressões e os tubos de Bourdon em altas. A maioria dos elementos de resistência são fios, porém recentemente, vem sendo utilizados, filmes de carbono, plástico condutivo e outros materiais.

Outro transdutor bastante utilizado são os piezoelétricos, (Figura 12) que utilizam cristais e quando são pressionados mecanicamente ao longo de planos específicos de tensões e produzem determinadas correntes eletrostáticas, onde o efeito oposto ocorre quando uma corrente elétrica é aplicada a um cristal provocando uma deformação no mesmo (ISMAIL et al., 1998). O autor enfatiza que a vantagem desses transdutores é a alta resolução de frequência podendo utiliza-lo até 200 Hz. Contudo o mesmo é sensível a temperatura, vibração mecânica e ruído externo, fatores estes que limitam sua faixa de utilização além de serem inadequados para a medição de pressões estáticas.

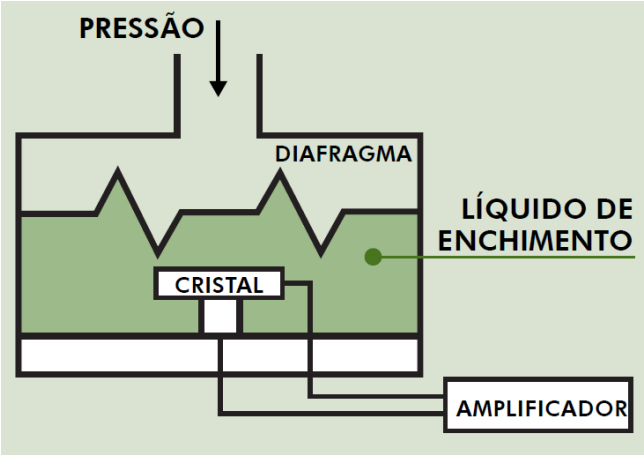


Figura 12 - Transdutor de pressão piezoelétrico. Adaptado de Gonçalvez (2003)

2.5 Avaliação dos sistemas de controle eletrônico de pulverizações agrícolas

2.5.1 Sistema de controle de taxas de aplicação

Bodria (1989) descreve que os sistemas de controle eletrônicos de pulverização são constituídos de três fases distintas: identificação, elaboração e atuação. Identificação é a fase responsável por coletar e transmitir as informações geradas pelo sistema; elaboração é a fase que recebe as informações da fase anterior, comparando-as com os parâmetros ótimos pré-determinados durante a calibração do sistema e atuação a fase que transmite aos componentes mecânicos, pneumáticos, hidráulicos ou eletrônicos o sinal para realizar as interações necessárias em virtude de restauração ou manutenção da taxa recomendada.

A exatidão dos sistemas de controle eletrônico de pulverização depende diretamente da exatidão dos sinais que recebem dos sensores. A escolha de transdutores para a medição de vazão, velocidade e pressão é um fator importante, pois estão diretamente ligados ao tempo de resposta do sistema de aplicação. Descreve também que é preferível usar o sinal de vazão em vez de calculá-la a partir do sinal de pressão. Entretanto, no uso de sensores de fluxo é importante considerar sua dependência das propriedades do fluído e sua resistência à corrosão, que podem causar erros de medição na aplicação de produtos fitossanitários (HUGHES; FROST, 1985).

Avaliando as taxas de aplicação em trabalhos de 152 operadores em Nebraska (EUA) verificaram que somente quatro operadores trabalhavam com pulverizadores que atendiam as especificações, e que mais de 90% estavam aplicando taxas acima das recomendadas, com um o coeficiente de variação entre bicos de 21,9% e destacaram que a maior fonte de erro na aplicação, foi devido às calibrações mal feitas que ocorrendo em 76,3% das situações analisadas (RIDER; DICKEY, 1982).

Ozkan (1987) desenvolveu um algoritmo de controle para avaliar a exatidão dos pulverizadores e determinar as perdas econômicas causadas por superdosagens de produtos fitossanitários. Como parâmetro o autor considerou que a taxa de aplicação não poderia variar mais que ± 5% do recomendado. Esse algoritmo de controle foi utilizado em 32 pulverizadores, onde 25 destes estavam trabalhando com taxa de aplicação fora do intervalo ideal de ± 5%. Dos 25 pulverizadores com desempenho aceitável, 44% aplicavam acima do valor

recomendado, com uma média de erro de 22,3%, enquanto 56% estavam com uma média de erro de 23% abaixo de 5%.

Um sistema de controle eletrônico de pulverização que controlava a taxa de aplicação foi desenvolvido em testado por Rockwell e Ayers (1994). O algoritmo de controle calcula a taxa de aplicação por meio dos sinais dos sensores e compara com a recomendada, enviando o sinal para o ajuste para válvula. Se a taxa de aplicação estava dentro do intervalo aceitável pré-estabelecido de ± 5%, não havia mudança, porém se a taxa estivesse fora do intervalo, o controlador enviava um sinal para o ajuste da válvula aplicando a taxa recomendada.

Segundo Rider e Dickey (1982), as instruções contidas no guia para aplicadores comerciais de produtos fitossanitários, publicados pela USEPA e USDA em 1975, recomenda-se que as variações ocorridas durante a operação das taxas de aplicações devem estar dentro do intervalo de ± 5% da taxa de aplicação recomendada.

Realizando estudos sobre os atuadores dos sistemas de controle de pulverizadores, Giles e Comino (1990) relatam que os sistemas de controle deveriam afetar somente o fluxo de calda nas pontas e não o espectro de gotas da pulverização. O uso de válvulas direcionais, a variação do fluxo pode ficar acima dos limites operacionais estabelecidos para uma determinada ponta de pulverização, alterando assim o espectro de gotas, que influencia na área de cobertura, depósito e distribuição do produto fitossanitário aplicado. Em testes de laboratório constataram que as pontas de jato cone cheio foram as mais afetadas se comparadas as de jato plano.

Salyani (1999) descreve que o fechamento dos bicos em uma seção do pulverizador após todos estarem abertos, alterou a pressão de trabalho do sistema, proporcionalmente aumentando a vazão da seção aberta. Observou-se também que os erros de pressão de uma seção comparando com todas abertas foram menos de 20%.

Gadanha Junior (2000) avaliou o desempenho de cinco sistemas de controle eletrônicos de pulverização e relatou que todos os sistemas apresentam médias homogêneas dentro do limite de variação de 5% da taxa de aplicação. O autor ainda concluiu que a utilização do sinal do sensor de fluxo contribui para menores tempos de resposta quando relacionado ao que utiliza o sinal do sensor de pressão.

Para os sistemas de injeção direta, o tempo de resposta varia em função do ponto de injeção do produto na tubulação que variam entre 2,75 e 8,84 segundos injetados antes ou nas seções da barra e quando é injetado próximo ou no bico, o tempo de resposta é reduzido para menos de 0,30 segundos (HLOBEN et al., 2006).

Praveen (2009) avaliou um controlador eletrônico de pulverização agrícola com duas configurações de válvula diferentes e pontas convencionais e de orifício variável. O autor enfatiza que os componentes dos sistemas de controle eletrônico exercem grande influência nos tempos de resposta dos sistemas, podendo sofrer variações significativas no tempo de resposta.

Carvalho e Antuniassi (2012) estudaram em condições de simulação virtual de vôo em laboratório os tempos de resposta de um controlador de fluxo com GNSS para aplicações aéreas variando de velocidade de deslocamento. Os autores descrevem uma oscilação media de 6 a 20 segundos para os valores do tempo de resposta do controlador de fluxo nas variações de velocidade e uma exatidão na aplicação menor que 2%.

2.5.2 Sistema automático de controle de seção

Os sistemas de controle automático de seção originário do termo inglês Automatic Section Control (ASC) têm sido importantes dentro dos sistemas de controle eletrônico de pulverizações agrícolas, devido à redução considerável dos desperdícios relacionados às sub e superdosagens além das aplicações desnecessárias (arremates, estradas, etc.).

Batte e Ehsani (2006) afirmam que a utilização de sistemas de ASC para pulverização pode reduzir significativamente a sobreposição, economizando produtos fitossanitários, combustível e tempo de aplicação, resultando maior rendimento operacional e evitando as sobre posições elevando consecutivamente a qualidade da aplicação.

O uso dos sistemas ASC na pulverização só foi possível graças à evolução da computação e das tecnologias de comunicação, onde os sensores e atuadores foram incorporados às máquinas agrícolas ou em aeronaves, a fim de fornecer informações úteis sobre as áreas e posteriormente atuar no controle da operação (BOSSU et al., 2008).

Vogel et al. (2005) desenvolveram um sistema de controle eletrônico de pulverização, usando o sistema ASC com dois tipos de válvulas de controle, sendo

um válvula tipo borboleta e outra tipo esfera de fechamento rápido. Os autores afirmam que a zona de transição de fechamento da válvula de controle do tipo borboleta é mais suave do que a válvula tipo esfera. Os autores também concluem que nas situações em que a válvula de controle de esfera é acionada, produzem picos de vazão onde à taxa de aplicação aumenta em 150% a taxa recomendada.

Sharda et al. (2009) avaliou um sistema ASC em dois ângulos de entrada e saída de aplicação em 20° e 70° e encontraram os valores de aumento da pressão do sistema de 28% e 29%, a variação de vazão na ponta de pulverização de 19,2% a 12,4% e o tempo de resposta de 4,2 a 19,3 segundos. Os autores ainda concluem que a entrada e saída do talhão são diferentes em todas as analises e que a pressão no sistema de controle individual de bicos apresentou um aumento e queda linear na pressão de trabalho do sistema.

Luck et al. (2010a) ao estudarem um sistema ASC relataram que houve uma redução de 15,2% a 17,5% na área aplicada, baseado em mapas de aplicação e que o benefício adicional foi à redução na frequência de reabastecimento do pulverizador além de um menor desperdício de produtos durante a aplicação.

Em outro estudo, Luck et al. (2010b) relataram que adicionar ASC em pulverizadores diminui significativamente a sobreaplicação de 12,4% a 6.2%. Os resultados mostram que essa redução em áreas de cabeceiras, passando de controle manual para ASC, reflete diretamente na economia de produtos fitossanitários, além de evitar a contaminação ambiental.

Praveen (2009) analisou dois pulverizadores autopropelidos equipados com sistemas ASC um com barra de seções e outro com controle individual de bico. O autor comentou que as pontas das seções possuem um tempo de resposta de até 3,5 segundos, onde mesmo já desligadas as seções continuam funcionando, o que não ocorre no controle individual de bico, pois seu tempo de resposta e de 0,2 segundos. O tempo de resposta do fechamento geral da barra para de ambos os sistemas, foram 0,5 segundos para o sistema de seção e de 0,2 s para o controle individual de bico. O autor ainda destacou que com o incremento de velocidade e acionamento simultâneo dos sistemas ASC elevou a subdosagens e desacelerando resultou em superdosagens independentemente da tecnologia ASC utilizada.

Bennur e Taylor (2010) avaliaram o tempo de resposta de um controlador eletrônico de pulverização usando válvulas pulsantes com pontas de orifício fixo e um sistema com válvula de fechamento rápido com pontas de orifício de taxa

variável. Os autores indicaram que os tempos de resposta variaram entre 0,5 e 2,1 segundos para cada sistema, aplicando em taxas variáveis baseado em mapa de recomendação e concluem que, para cada controlador eletrônico de pulverização, o tempo de resposta varia em função da configuração estabelecida pelo fabricante dos sensores e atuadores atuam diretamente no sistema afetando o desempenho das aplicações controladas eletronicamente.

A maioria dos controladores eletrônicos de pulverização mantem a taxa de aplicação desejada durante a atuação do sistema ASC (mudança de largura útil da barra), porém existe pouco conhecimento sobre variação que ocorre quando o sistema é acionado durante a operação em campo (SHARDA et al., 2011).

2.5.3 Sistemas de aplicação a taxas variáveis

As aplicações em taxas variáveis originário do termo inglês Variable Rate Technology (VRT) ou aplicação localizada de produtos fitossanitários têm sido alvo de muitas pesquisas em virtude da economia de produtos, aumento do retorno econômico e sustentabilidade do ciclo de produção agrícola, pois racionaliza o uso de produtos fitossanitários se comparados às aplicações com taxa fixa, além da sua grande utilização na AP que vem dominado o mercado agrícola moderno (PEREIRA, 2006).

Os métodos de aplicação em taxas variáveis nas lavouras consistem em equipamentos capazes de variar espacialmente as taxas de aplicação de insumos. As variações podem ser feitas a partir de informações coletadas e centralizadas em mapas georreferenciados ou em informações provindas de sensores que permitam análises em tempo real das características da lavoura (PEREIRA, 2008).

Antuniassi (2004) descreve esses sistemas que atuam com base no princípio da variação da taxa de aplicação, onde se varia a taxa mantendo-se a concentração da calda constante. Pode ser realizado por meio de bicos múltiplos, barras de pulverização múltiplas, variação da pressão, etc. Quando se utiliza o sistema de variação da pressão nos bicos hidráulicos é importante ressaltar que não se deve ultrapassar a variação de 20% das taxas de aplicação, pois as características das pontas de pulverização utilizadas não permitem maiores variações. No sistema com múltiplos bicos a variação da taxa de aplicação é realizada por meio da comutação de bicos isolados ou em conjunto com diferentes vazões levando em conta a velocidade de deslocamento da máquina no campo.

Segundo Praveen (2009) as VRT podem ser realizadas de três formas: baseada em um SIG por meio de mapas; em tempo de real, baseado no uso de sensores; e pela combinação de ambas as técnicas mapas e sensoriamento. Os mapas de SIG para VRT são utilizados para aplicação local ou em taxas por meio de mapas de recomendação baseados no histórico espacial da área, como mapas de produtividade, mapas de solos, etc.

O desempenho de sistemas VRT com sensor em tempo real, obtém melhores resultados se comparados aos sistemas baseados em mapas. Isso implica que a seleção dos componentes usados para construir o sistema VRT tem grande impacto sobre o desempenho geral dos equipamentos citando como exemplo o atraso do receptor de GNSS afetando o desempenho dinâmico do sistema VRT. Os autores concluem que o sistema acionado por sensores em tempo real para mudança da taxa de aplicação obteve o melhor desempenho geral em função do uso das válvulas solenóides no controle do fluxo (CUGATI et al., 2006).

Os componentes dos sistemas de VRT como sensores de plantas, transdutores de fluxo, sistema de posicionamento global (GPS), sensores de velocidade, cabos, controlador eletrônico, válvulas de controle, bombas hidráulicas, interface de pulverização, terminal de console virtual, computador de bordo e o algoritmo de controle. Podem influenciar no processo, pois, operam nas entradas e saídas um do outro com nível de interdependência, vindo a ocorrer atraso no tempo de resposta, devido à característica inerente de cada componente (PRAVEEN, 2009).

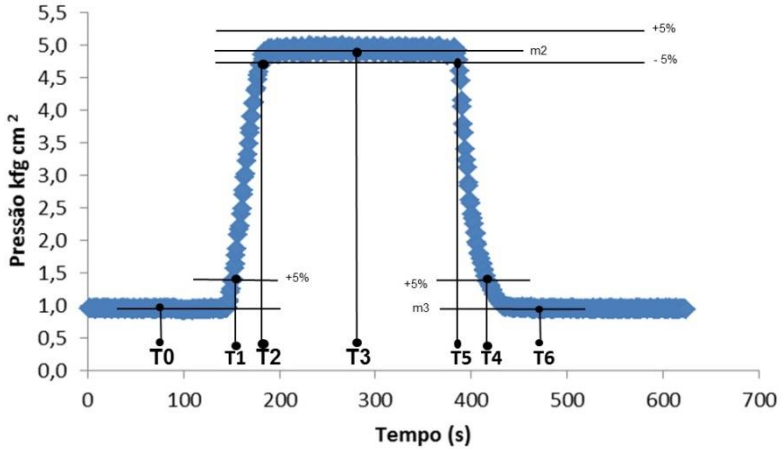
Antuniassi et al. (2012) desenvolveram um sistema de injeção direta e aplicação em taxas variáveis para ferrovias atuando com base em mapas de recomendação. Os resultados mostraram uma economia média de 20% de produtos, aumentando a eficiência operacional e elevando a eficácia do sistema em aplicações de herbicida no controle das plantas daninhas.

2.6 Tempo de resposta em controladores eletrônicos de pulverização

A adoção de sistemas de aplicação controlados eletronicamente na atualidade vem aumentando significativamente nos ciclos de produção agrícolas. A falta de informações sobre esses sistemas podem contribuir para o aumento do custo de produção em vez de minimizá-lo. Um fator importante a ser considerado quando se utiliza esses sistemas é o tempo de resposta definido por Antuniassi (1999) como o

período de tempo entre o comando de uma determinada tarefa e sua efetiva mudança de vazão nas pontas durante uma determinada operação.

Avaliando o desempenho de sistemas de controle eletrônicos de pulverização, Gadanha Junior (2000) denomina os possíveis tempos de respostas em: tempo de reação na ascendente (TRA) intervalo de T0 a T1; tempo de ação na ascendente (TAA) intervalo de T1 a T2; tempo total na ascendente (TTA) intervalo de T0 a T2; tempo de reação na descendente (TRD) intervalo de T4 a T6; tempo de ação na descendente (TAD) intervalo de T5 a T4; tempo total na descendente (TTD) intervalo de T5 a T6 apresentados na Figura 13.



T0. média da pressão antes de T0; **T1**. T0 +5%; **T2**. T3 -5%; **T3**. média da pressão; **T4**. T3 -5%; **T5**. T6 +5%; **T6**. média da pressão anterior a T6 .

Figura 13 – Curva caracteristica de desempenho do sistema. Adaptado de Gadanha Junior (2000)

Baio (2001) determinou o tempo de resposta em um sistema de aplicação localizada de produtos fitossanitários, baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas. O tempo de resposta obtido foi de 28 segundos e permitiu uma economia de 31,6% de herbicida, se comparado à aplicação em área total.

Ao estudar o tempo de resposta de um sistema de injeção direta para aplicação localizada de produtos fitossanitários, Figueiredo (2003) relatou que o tempo de resposta do sistema avaliado variou de 10 e 24 segundos e o considerou satisfatório para o ajuste do sistema na aplicação de produtos fitossanitários em taxas variáveis.

Para Anthonis, Baerdemaeker e Ramon (2006) a escolha correta do sistema de controle a ser utilizado na aplicação de produtos fitossanitários, deve-se atentar para que possuam tempos de abertura e fechamento tão baixos quanto possível,

com intuito de que possam minimizar os tempos perdidos, como o de pressurização e de estabilização do circuito hidráulico.

Kees (2008) usou um receptor de GPS fornecendo o sinal de velocidade ao controlador eletrônico de pulverização que atuava com base no fluxo, corrigindo a pressão do sistema em função da velocidade de rotação da bomba, objetivando manter a taxa de aplicação recomendada de 187,1 L ha $^{-1}$. Os resultados demostram que mesmo a velocidade de deslocamento variando de 3,2 a 9,7 km h $^{-1}$, o sistema manteve a taxa de aplicação dentro da faixa de variação de 10% da taxa recomendada.

Anglund e Ayers (2003) descrevem que o atraso de transporte em um sistema baseado na pressão foi de aproximadamente 2,0 segundos. Devido ao sinal a latência do GPS e o atraso do ajuste da válvula de controle e períodos de defasagem do transporte gerado pelo sistema de controle o tempo de resposta de injeção foi de 15 a 55 segundos.

No que diz respeito à velocidade de reação dos componentes mecânicos, o tempo de resposta depende do tipo de atuador e do ponto de injeção direta. Os ensaios de tempo de resposta de sistemas de injeção direta de doses variáveis obtiveram os tempos de 0,60 e 2,30 segundos para a injeção em sistemas com barra de seções com seis bicos de 0,35 segundos e para o sistema de injeção individual no bico (HLOBEN et al., 2006).

Segundo Reynaldo e Molin (2011), o tempo médio gasto para a mudança de posição de fechado para aberto foi em média de 0,56 segundos, e de fechado para aberto a média foi de 1,07 segundos. Os autores concluem que a configuração recomendada pelo fabricante e adotada na avaliação do sistema ASC não atende a todas as situações simuladas, sendo necessária uma configuração específica para cada velocidade de deslocamento a fim de se reduzir os desvios no ponto de abertura diminuindo as sobreposições.

Os sistemas de controle eletrônicos de pulverização podem usar uma variedade de componentes necessários no monitoramento e atuação no sistema de aplicação. Estes componentes podem variar de acordo com requisitos de aplicativos e do fabricante, entretanto, a eficácia geral do sistema, depende diretamente do desempenho dos componentes que compõe o sistema de controle eletrônico de aplicação (SHARDA, 2011).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do ensaio

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Aplicação (Figura 14), localizado no Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” Universidade de São Paulo, situado no município de Piracicaba, São Paulo, Brasil.

Figura 14 - Laboratório de Tecnologia de Aplicação ESALQ-USP Piracicaba-SP

3.2 Materiais utilizados

3.2.1 Bancada projetada para ensaio em laboratório

A bancada de ensaio foi constituída por sistema de controle eletrônico de pulverização, simulador de velocidade, base de aquisição de dados e sistema hidráulico Figura 15.

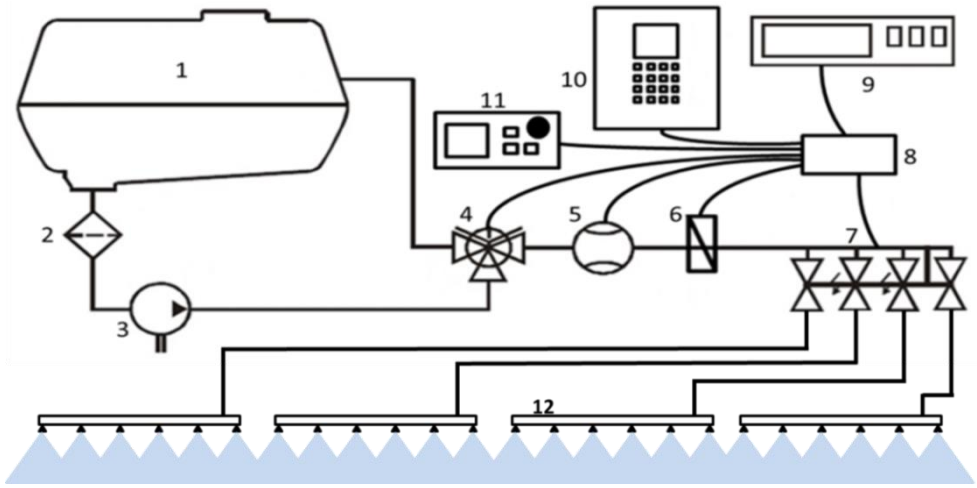


Figura 15 - Esquema de montagem do sistema de controle eletrônico de pulverização

1. reservatório; 2. filtro de sucção; 3. bomba hidráulica; 4. válvula reguladora; 5. transdutor de fluxo; 6. transdutor de pressão; 7. válvulas de seções; 8. interface de pulverização e cabos de conexão; 9. controlador eletrônico de pulverização; 10. base de aquisição de dados; 11. simulador de velocidade; 12. barra de pulverização.

O sistema de controle eletrônico de pulverização foi responsável por controlar todas as operações de aplicação; o simulador de velocidade pela geração de sinal de velocidade; o sistema de aquisição de dados por coletar as informações de velocidade, vazão, pressão e mudança de taxa de aplicação e o sistema hidráulico pelo funcionamento do circuito hidráulico de pulverização Figura 16.

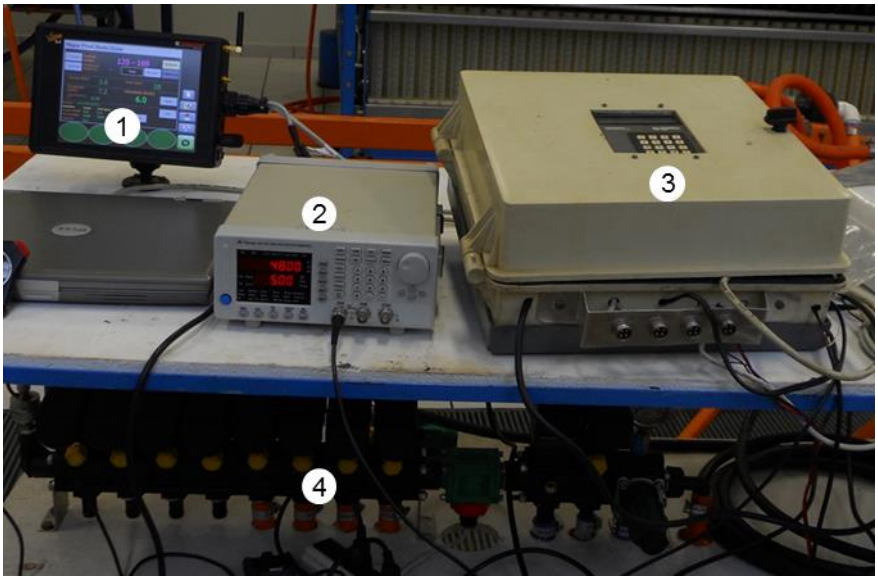


Figura 16 – Vista geral da bancada de ensaio projetada

1. controlador eletrônico de pulverização; 2. simulador de velocidade; 3. base de aquisição de dados; 4. comando eletromecânico de válvulas.

3.2.2 Sistema eletrônico

O sistema eletrônico foi composto de controlador eletrônico com algoritmo interno Vcom 8.4®, Verion Agricultura Inc. (Brasil), simulador de velocidade MFG-4221 20MHz DDS Minipa® Inc. (EUA), válvulas elétricas reguladora e de corte automático de seção Geoline, Geoline® Inc. (Italia), transdutor de fluxo com turbina axial removível de marca Polmac®, Polmac Inc. (Italia) e transdutor de pressão Teejet®, Spraying System Co (EUA) (Figura 17).

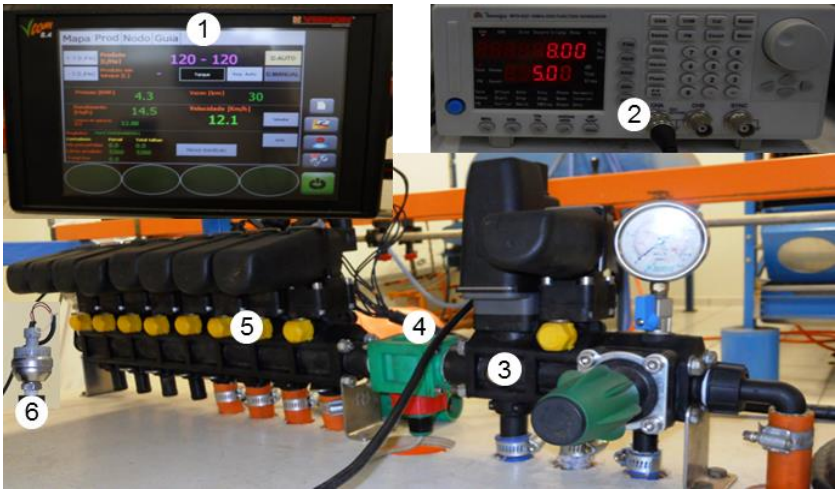


Figura 17 - Sistema eletrônico montado na bancada de ensaio

1. controlador eletrônico de pulverização; 2. simulador de velocidade 3. válvula reguladora; 4. transdutor de fluxo; 5. válvulas de seções; 6. transdutor de pressão.

3.2.2.1 Controlador eletrônico de pulverização

O controlador Vcom 8.4 (Figura 18), é um computador com software de pulverização que controla a vazão de até três produtos. Realiza o monitoramento de aplicações, acionamento do sistema de controle automático de seções, barra de orientação para o operador e uso de piloto automático. Também armazena as informações monitoradas durante a operação, com intuito de gerar mapas georreferenciados das operações realizadas e gestão remota em tempo real (VERION AGRICULTURA, 2010).

Figura 18 – Controlador eletrônico de pulverização, Vcom 8.4 Verion® e acessórios

1. controlador eletrônico de pulverização; 2. suporte de fixação 3. memória flash; 4. receptor GNSS; 5. interface de pulverização.

Características técnicas do controlador: tela tátil de 8,4” colorida; chave liga e desliga; entradas CAN Bus e RS232; saídas USB para memória flash; antena de

Wireless; gabinete de alumínio; GNSS incorporado; sistema operacional Windows CE; softwares compatíveis para estrada virtual; gestão de frota; e operações agrícolas. Acessórios: suporte de fixação; memória flash de 32 Gb; fonte de alimentação; cabos de conexão; e interface eletrônica para pulverização de oito seções. O equipamento possui um display com 4 telas que fornecem informações sobre as operação, deslocamento, além de calibrações e configurações de todo o sistema (VERION AGRICULTURA, 2010).

3.2.2.2 Simulador de velocidade

O simulador de velocidade foi composto por um Gerador de função MFG-4221 20MHz DDS Minipa® (Figura 19), que foi responsável pelo envio de sinal contínuo de alto desempenho, simulando o sinal enviado pelo sensor de velocidade ao controlador eletrônico de pulverização, gerando as velocidades operacionais de campo desejadas. As características técnicas do Gerador de função MFG-4221 20MHz DDS Minipa® seguem na Tabela 1.

Figura 19 - Gerador de função MFG-4221 20MHz DDS Minipa®

Tabela 1 - Informações técnicas do Gerador de função MFG-4221 20MHz DDS Minipa®

Características	Descrição
Fabricante	Minipa Inc.
Modelo	MFG-4221 20MHz DDS
Canais de saída de pulso	2
Formas de ondas	16 tipos
Frequência de onda dos canais	Senoidal
Resolução de frequência	20 mHz
Frequência	50 a 60 Hz
Faixa de temperatura	0 a 40 ºC
Dimensões	10,5 x 22,0 x 32.5 cm
Tensão de alimentação	100 a 240 V ac
Exatidão	± 0,00005 %
Estabilidade	± 0,000005 h^{-1}

Fonte: Minipa Electronics (2009)

3.2.2.3 Comando eletromecânico de válvulas

O comando eletromecânico de válvulas utilizado foi composto de válvula reguladora mecânica, manômetro analógico tipo tubo de Bourdon de latão, válvula elétrica “ON/OFF”, válvula elétrica reguladora, transdutor de fluxo, oito válvulas elétricas de seções e entrada para transdutor de pressão (Figura 20).

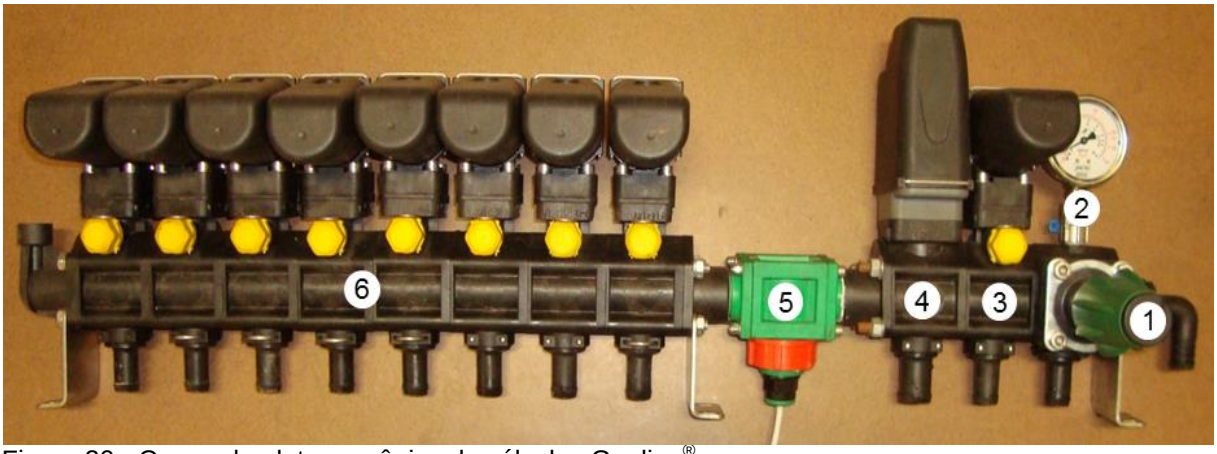


Figura 20 - Comando eletromecânico de válvulas Geoline®

1. válvula reguladora mecânica; 2. manômetro analógico de latão; 3. válvula elétrica de corte geral; 4. válvula elétrica reguladora; 5. transdutor de fluxo; 6. conjunto de válvulas elétricas de seções.

Para a realização dos ensaios, algumas partes do comando eletromecânico de válvulas foram isoladas, não atuando no sistema como a válvula reguladora mecânica e nas quatro últimas válvulas de controle de seções. O manômetro foi utilizado apenas para a verificação da pressão do circuito hidráulico, tornando-se uma forma de monitorar a pressão do sistema durante o ensaio. A verificação da pressão foi realizada no início, meio e fim de cada ensaio comparando a pressão do manômetro com a informada pela base de aquisição de dados, assim que, não foi observada nenhuma alteração significativa das pressões verificadas.

3.2.2.4 Válvula reguladora

A válvula reguladora utilizada (Figura 21) foi uma válvula elétrica tipo esfera, de regulagem volumétrica, com deslocamento rotativo, modelo NGR 024S Geoline®, com vazão de 150 L min $^{-1}$ pressão máxima de trabalho de 4000 kPa, com adaptador de saída de 25 mm e tensão de alimentação de 12 V dc (GEOLINE TECOMEC, 2013).

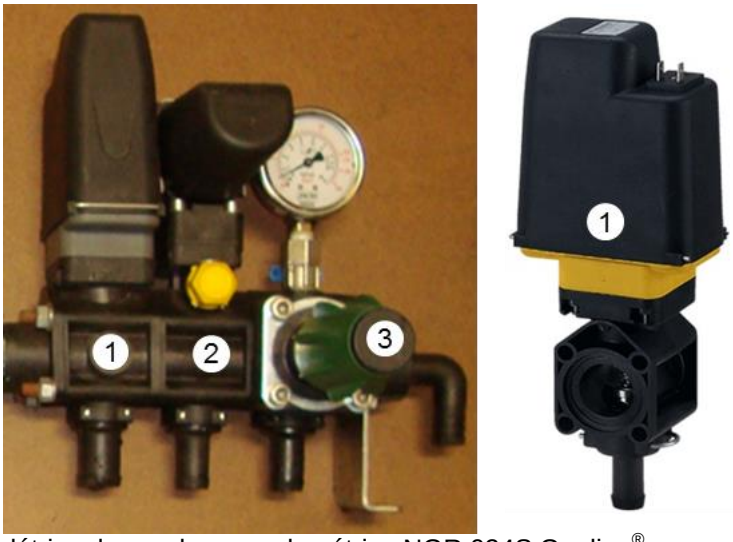


Figura 21 - Válvula elétrica de regulagem volumétrica NGR 024S Geoline®

1. válvula elétrica reguladora; 2. válvula elétrica de corte geral; 3. válvula reguladora mecânica.

3.2.2.5 Válvulas de seções

As válvulas de seções utilizadas (Figura 22) foram válvulas elétricas tipo esfera “ON/OFF”, com deslocamento rotativo, modelo NGR 011 Geoline®, com vazão de 45 L min $^{-1}$ a pressão máxima de trabalho de 2000 kPa, com adaptador de saída de 25 mm e tensão de alimentação de 12 V dc (GEOLINE TECOMEC, 2013).

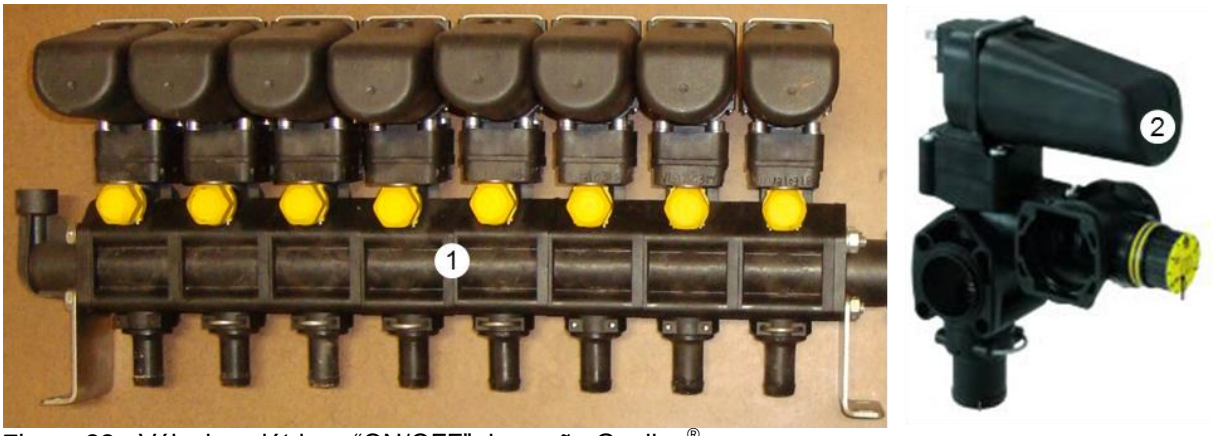


Figura 22 - Válvulas elétricas “ON/OFF” de seção Geoline®

1. conjunto de válvulas elétricas de seções; 2. válvula elétrica de corte de seção.

3.2.2.6 Sensores

3.2.2.6.1 Transdutor de fluxo

O transdutor de fluxo utilizado (Figura 23) foi do tipo com turbina axial removível, modelo IXEF-ZC Polmac®, aletas de cerâmicas com eixo de zafira, pressão máxima de trabalho de 5000 kPa e capacidade de leitura de fluxo de 0 a 100 L min^{-1} e tensão de alimentação de 12 V dc (POLMAC, 2012). O sinal é enviado em forma de pulsos gerados pela turbina, sendo necessária uma curva de calibração que será inserida em um algoritmo de medição de vazão para informar os volumes obtidos durante a operação. As características técnicas do transdutor estão descritas na Tabela 2.

Figura 23 - Transdutor de fluxo de turbina axial removível IXEF-ZC Polmac®

1. turbina axial de cerâmica; 2. corpo com falanges removíveis; 3. transdutor de fluxo.

Tabela 2 - Informações técnicas do transdutor de fluxo IXEF-ZC Polmac®

Características	Descrição
Fabricante	Polmac Inc.
Modelo	IXEF-ZC
Faixa de leitura	0 a 100 L min^{-1}
Faixa de trabalho	0 a 5000 kPa
Tensão de alimentação	12 V dc
Sinal de saída	4 a 20 mA
Exatidão	± 3%

Fonte: Polmac (2012)

3.2.2.6.2 Transdutor de pressão

O transdutor de pressão utilizado (Figura 24) foi do tipo diafragma, modelo Teejet 300 psi Spraying System®, com faixa de leitura de 0 a 2000 kPa e tensão de alimentação de 12 V dc (SPRAYING SYSTEM, 2011). Enviando sinal em forma de corrente elétrica (mA), sendo necessária uma curva de calibração que será inserida em um algoritmo de medição de pressão. As características técnicas do transdutor estão descritas na Tabela 3.

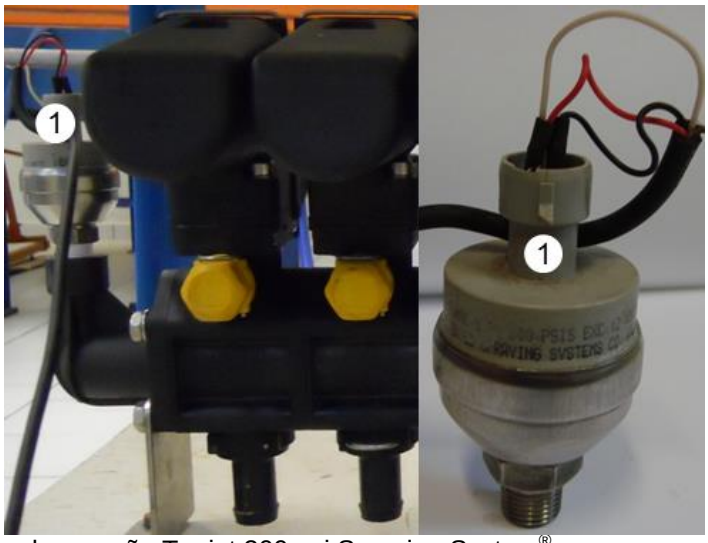


Figura 24 - Transdutor de pressão Teejet 300 psi Spraying System®

1. transdutor de pressão.

Tabela 3 - Informações técnicas do transdutor de pressão Teejet 300 psi Spraying System®

Características	Descrição
Fabricante	Spraying System Co.
Modelo	Teejet 300 psi
Tipo	Sensor de pressão de diafragma
Faixa de trabalho	0 a 2000 kPa
Tensão de alimentação	12 V dc
Sinal de saída	4 a 20 mA
Linearidade	0,09%

Fonte: Spraying System (2011)

3.2.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado (Figura 25) foi composto por um “Datalogger” modelo CR10X Campbell Scientific®, que recebia os sinais e armazenava as informações geradas nas operações por meio da interface de pulverização e cabos conectores do sistema de aplicação. A base de aquisição de dados foi programada para ler quatro canais recebendo os respectivos sinais gerados pelos sensores, sendo canal 1. velocidade; 2. vazão; 3. pressão; e 4. sinal de mudança de taxa de aplicação. A frequência de coleta dos dados do sistema de aquisição foi de 8 Hz, o que equivale a uma coleta a cada 125 milésimos de segundos por informação monitorada. As características técnicas da base de aquisição de dados estão descritas na Tabela 4.

Figura 25 - “Datalogger” CR10X Campbell Scientific®

Tabela 4 - Informações técnicas do “Datalogger” CR10X Campbell Scientific®

Características	Descrição
Fabricante	Campbell Scientific, Inc.
Modelo	CR10X
Entrada de canais analógicos	6 diferenciais e 12 não diferenciais
Canais contadores de pulso	2
Portas de controle digital	8 (0,1 a 5 V)
Resolução analógica	± 5 µV
Faixa de temperatura estendida	25 a 50 ºC
Memória RAM	128 Megabyte
Dimensões	19.81. x 8,89 x 3.81 cm
Tensão de alimentação	9,6 a 16 V dc
Exatidão	± 0,02 %
Exatidão do relógio	± 0,000023 s

Fonte: Campbell Scientific (1997)

3.2.4 Sistema hidráulico

O sistema hidráulico utilizado (Figura 26) foi composto de reservatório em fibra vidro com capacidade de 2000 L; bomba hidráulica de êmbolos modelo JC-75 Jacto®, com capacidade de recalque de 75 L min $^{-1}$ na pressão de 3432 kPa e rotação a 540 rpm; filtro de sucção com válvula de fechamento rápido; mangueiras de sucção; e de alta pressão. O conjunto de acionamento da bomba hidráulica foi composto de motor elétrico trifásico com potência de 7,5 cv a 1740 rpm e mecanismo de transmissão de polia e correia.

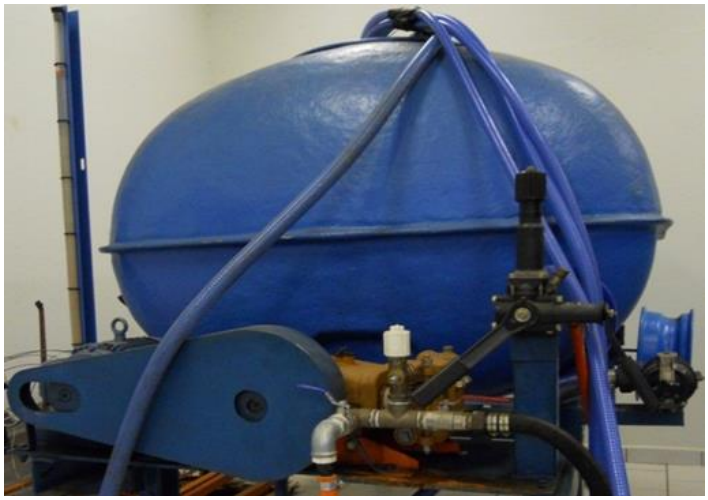


Figura 26 - Vista geral do sistema hidráulico

3.2.5 Barra de pulverização

A barra de pulverização utilizada (Figura 27) foi composta de quatro seções com filtros de linha, em barra úmida, espaçamento de 0,5 m, porta bicos duplo, correspondendo a uma faixa de aplicação de 12 m, simulando uma barra de pulverização agrícola comercial.

Figura 27 - Vista geral da barra de pulverização

3.3 Seleção de pontas de pulverização

Foram utilizados três tipos de pontas de pulverização, devido à necessidade de se obter uma maior faixa de trabalho do equipamento, de forma a submeter o controlador eletrônico de pulverização às condições operacionais de aplicação de produtos fitossanitários.

Na seleção das pontas de pulverização consideraram-se três faixas de vazão utilizando para a obtenção das mesmas três pontas diferentes. As faixas de vazão adotadas foram: baixa, média, alta. Considerando, espectro de gotas, velocidade de trabalho e vazão das mesmas. As restrições de uso das pontas, como velocidade de deslocamento e taxa de aplicação, foram seguidas de acordo com o manual do fabricante.

As pontas utilizadas foram Teejet, Spraying System®, do modelo XR com ângulo de aspersão de 110º ambas produzindo jato leque plano padrão de uso amplificado (Figura 28).

Figura 28 - Pontas de pulverização XR 11002, 11004 e 11006 Teejet Spraying System®

Para a baixa vazão utilizou-se a ponta XR 110 02 que produz uma faixa de espectro de gostas de fina a média e vazão nominal de 0,72 L min $^{-1}$, sendo montada em uma barra de pulverização de quatro seções, com espaçamento entre bicos de 0,5 m, largura útil de 12 m e vazão nominal da barra de pulverização de 17,28 L min $^{-1}$. As faixas de velocidade e taxa de aplicação foram de 5 a 8 km h $^{-1}$ e 50 a 150 L ha $^{-1}$ (SPRAYING SYSTEM, 2011).

Para a média vazão utilizou-se a ponta XR 110 04 que produz uma faixa de espectro de gostas de fina a grossa e vazão nominal de 1,44 L min $^{-1}$, sendo montada em uma barra de pulverização de quatro seções, com espaçamento entre bicos de 0,5 m, largura útil de 12 m e vazão nominal da barra de pulverização de

34,56 L min $^{-1}$. As faixas de velocidade e taxa de aplicação foram de 10 a 18 km h $^{-1}$ e 50 a 200 L ha $^{-1}$ (SPRAYING SYSTEM, 2011).

Para a alta vazão utilizou-se a ponta XR 110 06 que produz uma faixa de espectro de gostas de média a grossa e vazão nominal de 2,16 L min $^{-1}$, sendo montada em uma barra de pulverização de quatro seções, com espaçamento entre bicos de 0,5 m, largura útil de 12 m e vazão nominal da barra de pulverização de 51,84 L min $^{-1}$. As faixas de velocidade e taxa de aplicação foram de 16 a 25 km h $^{-1}$ e 50 a 350 L ha $^{-1}$ (SPRAYING SYSTEM, 2011).

3.4 Programação do sistema eletrônico de pulverização

3.4.1 Controlador eletrônico de pulverização

A programação do controlador eletrônico consistiu na entrada de dados por meio do software de aplicação, seguindo as seguintes etapas: escolha da ponta, verificação da vazão (código Visi-Flow), determinação e simulação da velocidade de trabalho, medição da vazão na barra de pulverização, calibração do transdutor de fluxo com auxílio do contador de pulsos do software, inserindo os valores de vazão coletada e tipo ponta utilizada, aferição final da vazão da barra de pulverização.

Após a calibração do transdutor de fluxo, o sistema foi recalibrado, seguindo os mesmos passos citados anteriormente. Porém, foram inseridas as médias das vazões reais obtidas, não sendo utilizado o código de cores predeterminado no software, de modo a evitar erros de arredondamento na calibração do sistema de controle eletrônico de pulverização.

3.4.2 Sistema de aquisição de dados

Os quatro canais de entrada do sistema de aquisição de dados foram programados para monitorar os sinais de velocidade e vazão a partir de um sinal digital em forma de pulso e a pressão a partir de um sinal analógico em forma de corrente elétrica. O simulador de velocidade envia pulsos simulando um sensor, o transdutor de fluxo emitia os pulsos em função do deslocamento da turbina, o transdutor de pressão enviava corrente elétrica em função da variação de pressão do sistema hidráulico. A frequência de coleta para a aquisição de dados do sistema foi de 8 Hz, ou seja, a cada 0,125 segundos era realizada cada coleta, armazenando-se em torno de 480 dados por minuto, em arquivos formato de texto (txt).

3.5 Calibrações do sistema eletrônico de pulverização

3.5.1 Calibração do transdutor de fluxo

A calibração do transdutor de fluxo foi realizada com um auxílio do controlador eletrônico de pulverização montado na bancada de ensaio projetada e conectado a um sistema de aquisição de dados que realizava as leituras dos sinais e as armazenava respectivamente para a geração da curva e equação de calibragem do mesmo.

3.5.1.1 Procedimento de calibração do transdutor de fluxo

O procedimento de calibração foi realizado da seguinte forma: inseriam-se no controlador eletrônico os valores de vazões pré-determinadas iniciando em 5 L min $^{-1}$, em uma escala ascendente de 5 em 5 chegando a vazão máxima de 70 L min $^{-1}$. A partir da vazão máxima se realizava o mesmo procedimento em escala descendente ate a vazão mínima de 5 L min $^{-1}$, ambos realizados quatro repetições. Os valores de vazões eram inseridos no controlador eletrônico, com intervalo de 2 minutos para a estabilização da barra de pulverização. O tempo de coleta estabelecido foi de 1 minuto, realizadas em todas as pontas da barra de pulverização, com o auxílio de baldes e posteriormente pesadas conforme norma ISO/DIS 5682-1. Com os volumes foi possível obter as curvas e equações de calibração do transdutor de fluxo por meio do programa Microsoft Excel®.

3.5.2 Calibração do transdutor de pressão

A calibração do transdutor de pressão foi realizada com um auxílio de um aferidor hidráulico de manômetro por peso morto, conectado a um sistema de aquisição de dados. Os valores de pressão gerados por meio da pressurização do circuito hidráulico de acordo com as cargas de pressão exercida pelo aferidor hidráulico de peso morto realizava-se as leituras da corrente elétrica gerada e anotava-se os valores em planilhas do programa Microsoft Excel®, onde obtiveram-se as curvas e equações de calibração do transdutor de pressão (Figura 29).

Figura 29 - Aferidor hidráulico de manômetro por peso morto e base de aquisição de dados

3.5.2.1 Procedimento de calibração do transdutor de pressão

O procedimento de calibração consistia em colocar anéis de aço inox padrões de massas correspondentes em determinada área gerando uma escala de pressão, por meio de uma bomba hidráulica, pressurizava-se o circuito hidráulico até ultrapassar a marca de estabilização, posteriormente com auxílio de uma válvula de ajuste fino se despressurizava o sistema chegando à marca de equilíbrio, dessa maneira, anotava-se a corrente elétrica gerada informada no sistema de aquisição de dados. As pressões foram realizadas iniciando em 50 kPa numa escala ascendente de 50 a 50 chegando na pressão máxima de 2000 kPa. A partir da pressão máxima se realizava o mesmo procedimento em escala descendente até a pressão mínima de 50 kPa, com quatro repetições. Posteriormente os dados foram exportados para planilhas do programa Microsoft Excel®, onde se obtiveram as curvas e equações de calibração do transdutor de pressão.

3.5.3 Aferição do controlador eletrônico de pulverização

Após a calibração do equipamento instalado na bancada de ensaio realizou-se a aferição do conjunto de pulverização com intuito de se verificar a exatidão do sistema em funcionamento e verificar as características das pontas de pulverização relacionadas às faixas de velocidade e pressões nominais recomendadas pelo fabricante. A vazão real (figura 30) foi obtida a partir da média de coletas realizadas em todas as pontas da barra de pulverização, com tempo de coleta de um minuto, sendo pesadas em uma balança analítica de acordo com a norma ISO/DIS 5682-1.

A média de vazão em cada modelo de ponta foi calculada com auxílio do programa Microsoft Excel®. As médias obtidas foram inseridas no controlador eletrônico evitando possíveis ocorrências de arredondamento e valores pré-fixados no algoritmo de controle do controlador eletrônico de pulverização.

Os pulsos do transdutor de fluxo também foram aferidos e comparados com os valores obtidos pelo sistema de aquisição de dados.

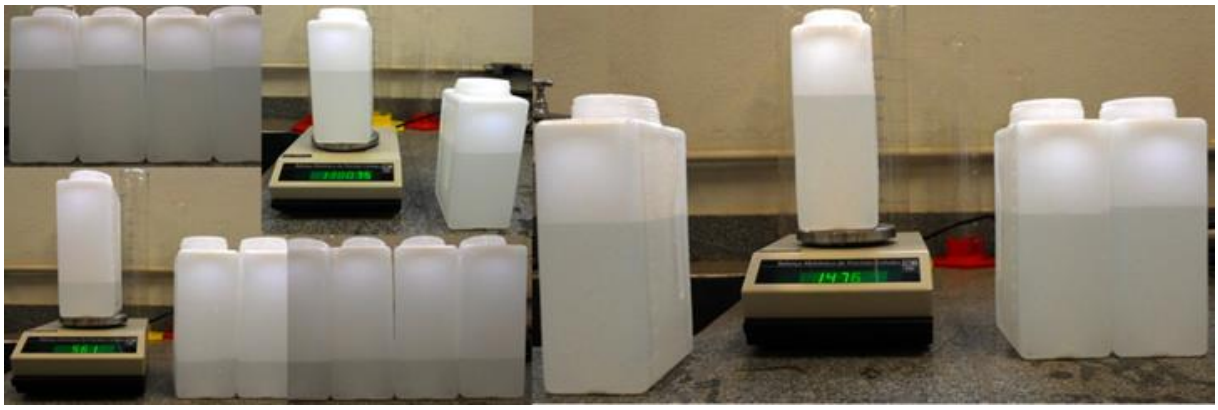


Figura 30 - Pesagem da vazão real da barra de pulverização

3.6 Metodologia

3.6.1 Obtenção dos dados

Realizaram-se em laboratório simulações durante a operação com o objetivo de se obter o tempo de resposta de um controlador eletrônico de pulverização. As mudanças realizadas foram na velocidade de deslocamento e nas taxas de aplicação. Foi necessário estabelecer um intervalor de trinta segundos de modo a garantir a estabilização da pressão do sistema para a coleta de dados dos ensaios realizados (Figura 31).

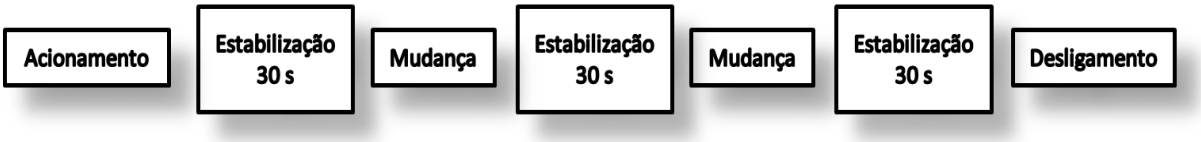


Figura 31 - Esquema do procedimento de coleta dos dados

A primeira simulação realizada foi o de mudança de velocidade objetivando aproximar ao máximo das condições operacionais de campo ocorridas durante a aplicação de produtos fitossanitários. As mudanças foram feitas com intervalos em escala de dois para dois (2:2); quatro para quatro (4:4); e seis para seis (6:6) km h^{-1} (Figuras 32, 33 e 34), de forma ascendente e descendente. A taxa de aplicação foi fixada em 120 L ha^{-1}, mesma taxa de aplicação utilizada em todas as mudanças de

velocidade independente das pontas utilizadas. A faixa de velocidade de trabalho das pontas de pulverização de acordo com o fabricante é de 5 a 25 km h $^{-1}$.

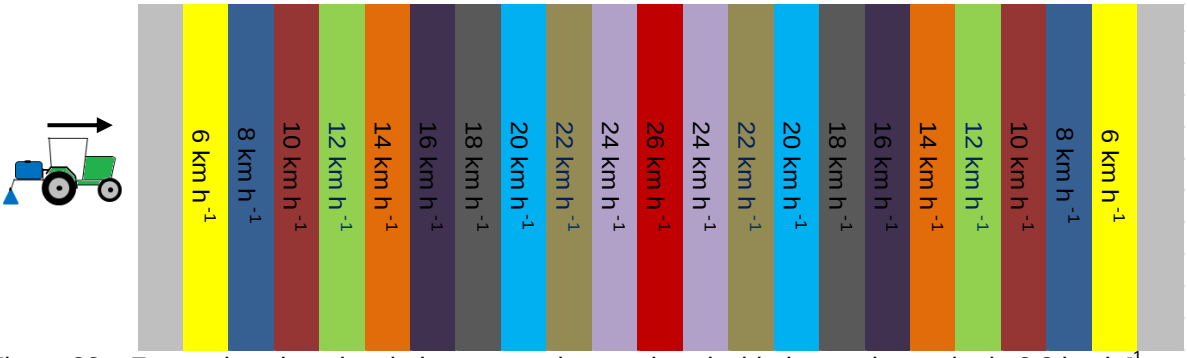


Figura 32 – Forma de coleta dos dados nas mudanças de velocidade com intervalo de 2:2 km h $^{-1}$

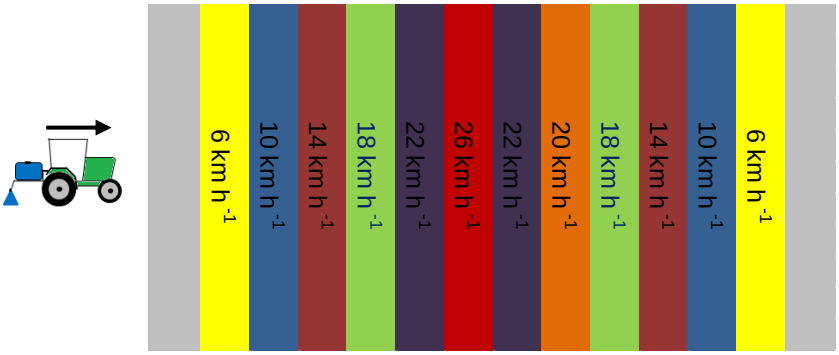


Figura 33 – Forma de coleta dos dados nas mudanças de velocidade com intervalo de 4:4 km h $^{-1}$

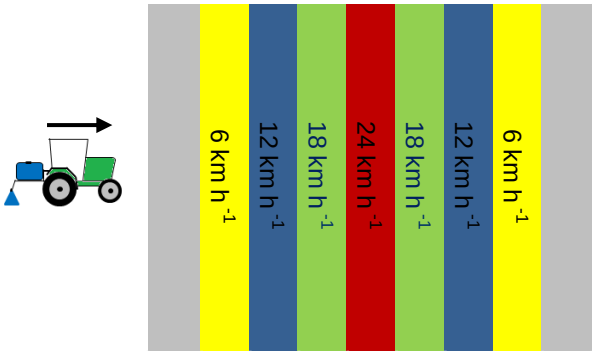


Figura 34 – Forma de coleta dos dados nas mudanças de velocidade com intervalo de 6:6 km h $^{-1}$

A segunda simulação realizada foi a mudança das taxas de aplicação nas faixas de 50 a 350 L ha $^{-1}$, com intervalo de mudança de 50 L ha $^{-1}$, de forma ascendente e descendente, nas velocidades fixadas em: 10, 15, 20 e 25 km h $^{-1}$ (Figura 35). Tais velocidades foram determinadas por representarem as faixas de velocidade de trabalho a campo dos pulverizadores agrícolas autopropelidos.

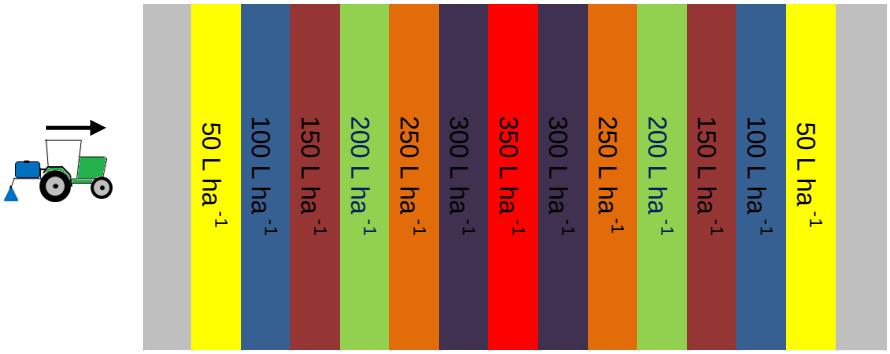


Figura 35 – Forma de coleta dos dados em função mudança de taxas de aplicação com intervalo de 50 L ha $^{-1}$ nas velocidades de 10, 15, 20 e 25 km h $^{-1}$

A coleta de dados foi realizada com controlador eletrônico montado na bancada projetada para o ensaio. O sistema de aquisição monitorava e armazenava os sinais emitidos pelos sensores ao controlador. Essas informações consistiam em: dia julino, hora/minuto, segundos, velocidade, vazão, pressão e marcador de mudança de taxa de aplicação.

O tempo de resposta do controlador eletrônico de pulverização foi determinado por meio da relação de variação de pressão do circuito hidráulico, para as análises descritas acima. Iniciava-se a processo em um regime estabilizado, ocorria à mudança e se estabilizava em outro regime de pressão, gerando uma curva de transição de pressão que possibilitou estimar o intervalo de tempo da mudança de regime em um dado momento, resultando no tempo de resposta.

3.6.2 Características dos dados

O comportamento típico da pressão durante a mudança de velocidade de deslocamento é descrito por curvas de mudanças em degrau. Essas variações da pressão durante o ensaio representam a curva de resposta gerada em função dos ajustes realizados pelo controlador com da mudança de velocidade. Dessa forma, as transições das curvas representam exatamente o tempo de resposta do controlador, a qual pode ser quantificada pelo modelo proposto no trabalho.

As curvas são caracterizadas por possuírem dois estágios (regimes), um antes e outro após as mudanças de velocidades e taxas de aplicação, ambas ocorrendo de forma suave, em cada regime os valores e a variância são estáveis. Assim, o formato da curva que os dados descrevem possuem modelos não lineares sigmoidais, em formato de “S”, com quatro parâmetros, pois possuem duas

assíntotas horizontais com transição suave, fazendo com que o modelo seja adequado para a estimação do tempo de resposta do controlador eletrônico de pulverização.

3.6.3 Análise dos dados

Os dados foram analisados por meio do ajuste de um modelo não linear logístico com quatro parâmetros, que se adequou a características dos dados coletados e possibilizou o cálculo dos tempos de resposta ascendentes e descendentes do sistema de controle eletrônico de pulverização.

3.6.3.1 Modelo não linear logístico

O modelo não linear logístico com quatro parâmetros utilizado para a modelagem dos dados, é caracterizado por possui um formato de “S”, e duas assíntotas horizontais, dado pela parametrização demonstrada pela eq. (3).

$$Y = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^p} \tag{3}$$

em que:

Y é a pressão do circuito hidráulico, em kPa;

x é o tempo, em s;

A_1 é o valor inicial (assíntota inferior), ou seja, o valor mínimo da variável Y;

A_2 é o valor final (assíntota superior), ou seja, o valor máximo da variável Y;

x_0 é o centro, ou seja, valor de x quando $Y = (A_1 + A_2)/2$ (ponto de inflexão);

p é relacionado com a taxa de crescimento (ascendente) da variável Y.

Observação: Foi utilizada a mesma parametrização do modelo para o ajuste da curva na descendente, porém o parâmetro p foi alterado por $-p$.

3.6.3.2 Cálculo do tempo de resposta

O principal motivo da adoção dessa parametrização do modelo de regressão não linear logístico de quatro parâmetros foi devido à simetria em relação ao seu ponto de inflexão (x_0). Dessa forma, o tempo de resposta para as diferentes mudanças, foi calculado pela eq. (4).

$$\hat{TR} = 2(\hat{x}_0 - C) \tag{4}$$

em que:

$\hat{TR}$ é o tempo de resposta, em s;

$\hat{x}_0$ é o ponto de inflexão estimado, em s;

C é uma constante dada pelo momento exato que foi feita a variação.

Observação: Foi estabelecido que o início das mudanças para todos os cálculos seriam no ponto $C = 10$ segundos.

3.6.3.3 Intervalo de confiança para o tempo de resposta

Os intervalos de confiança das estimativas dos parâmetros do modelo proposto são calculados, assintoticamente, segundo Draper e Smith (1998), pela eq. (5).

$$IC_{(1-\alpha)\%}\left(\underset{\sim}{\hat{\beta}}\right): \ \underset{\sim}{\hat{\beta}} \pm Z_{\alpha/2} \times \sigma_{\underset{\sim}{\hat{\beta}}} \tag{5}$$

em que:

$\underset{\sim}{\hat{\beta}}$ é o vetor de estimativas dos parâmetros do modelo ajustado;

$Z_{\alpha/2}$ é o quantil da normal padrão para um p-valor de $\alpha/2$.

$\sigma_{\underset{\sim}{\hat{\beta}}}$ é o vetor de desvios padrão das estimativa do parâmetros.

Assim, temos que a variância do tempo de resposta é dada pela eq. (6 e 7).

$$\sigma^2_{TR} = Var\left[2(\hat{x}_0 - C)\right] \tag{6}$$

$$\sigma^2_{TR} = 2^2\left[Var\left(\hat{x}_0\right) - Var\left(C\right) - 2Cov\left(\hat{x}_0, C\right)\right] \tag{7}$$

Mas, como C é constante, temos a eq. (8).

$$\sigma^2_{\hat{TR}} = 4Var\left(\hat{x}_0\right) \tag{8}$$

Logo, a variância do tempo de resposta é proporcional à variância da estimativa do parâmetro $\hat{x}_0$, portanto, o intervalo de confiança para o tempo de resposta pode ser calculado de maneira análoga à eq. (9), ou seja:

$$IC_{(1-\alpha)\%}(\hat{TR}): \ \hat{TR} \pm Z_{\alpha/2} \times \sigma_{\hat{TR}} \tag{9}$$

Quando os intervalos de confiança para os tempos de resposta se sobrepõe, temos que tais tempos de resposta são iguais para um nível de confiança estabelecido de 95%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração dos sensores e transdutores

4.1.1 Calibração do transdutor de fluxo

A equação 10 e a Figura 36 representam a calibração do transdutor de fluxo. O coeficiente de correlação encontrado R^2 = 0,99 demostra a precisão do transdutor utilizado na determinação da vazão do sistema de controle eletrônico de pulverização.

$$S = 0{,}7622 + 2{,}7237.V\ (R^2 = 0{,}99) \tag{10}$$

em que:

S é o sinal, em número de pulsos;

V é a vazão, em L min $^{-1}$.

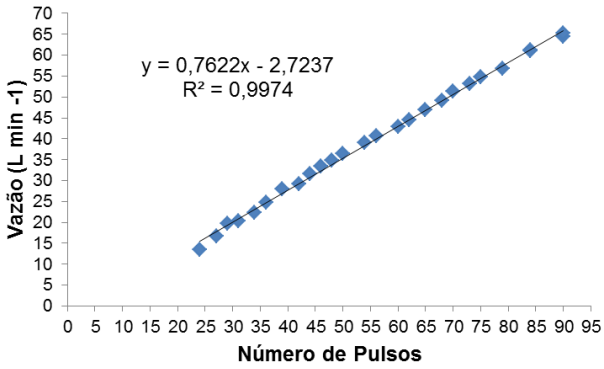


Figura 36 - Curva de calibração do transdutor de fluxo

4.1.2 Calibração transdutor de pressão

A equação 11 e a Figura 37 representam a calibração do transdutor de fluxo. O coeficiente de correlação encontrado R^2 = 1 demostra a precisão do transdutor utilizado na determinação da vazão do sistema de controle eletrônico de pulverização.

$$St = 0{,}0132 + 5{,}5019.P\ (R^2 = 1) \tag{11}$$

em que:

St é o sinal, em mA;

P é a pressão, emkPa.

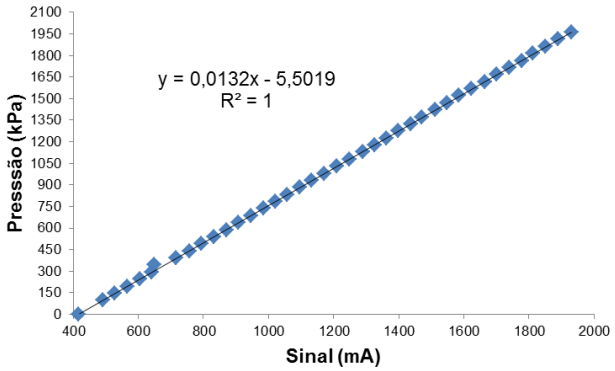


Figura 37 - Curva de calibração do transdutor de pressão

4.2 Tempo de resposta em função da mudança de velocidade

Nas Tabelas 5, 6 e 7 estão descritos os Tempos de Resposta (TR) do sistema de controle eletrônico de pulverização e as Distâncias Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação (DA) em decorrência das mudanças de velocidade nas aplicações com baixas, médias e altas vazões.

Os valores descritos na Tabela 5 são os TR e as DA na Ascendente e Descendente respectivamente (TRA, TRD e DAA, DAD) em função da mudança de velocidade na faixa de 5 a 8 km h $^{-1}$ nas aplicações de baixas vazões do sistema.

Tabela 5 – Tempos de resposta em função das mudanças de velocidades em baixas vazões

Baixa vazão					
Intervalos de mudanças	Velocidade (km h $^{-1}$)	TRA (s)	TRD (s)	DAA (m)	DAD (m)
2:2	6 - 8 - 6	7,24	4,47	16	7
2:2	8 - 10 - 8	3,88	3,23	11	7
4:4	4 - 8 - 4	8,45	5,53	19	6
4:4	8 - 12 - 8	5,41	4,65	18	10
6:6	6 - 12 - 6	8,84	4,91	29	8

TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente

A Tabela 6 apresenta os resultados do TRA, DAA e TRD, DAA para aumento da velocidade na faixa de 8 a 18 km h $^{-1}$ para o ajuste da taxa de aplicação de médias vazões.

Tabela 6 – Tempos de resposta em função das mudanças de velocidades em médias vazões

Média vazão					
Intervalos de mudanças	Velocidade (km h $^{-1}$)	TRA (s)	TRD (s)	DAA (m)	DAD (m)
2:2	8 - 10 - 8	4,11	2,49	11	6
2:2	10 - 12 - 10	4,03	4,08	13	11
2:2	12 - 14 - 12	2,46	3,23	10	11
2:2	14 -16 - 14	2,83	2,99	13	12
2:2	16 - 18 - 16	2,08	2,66	10	12
4:4	8 - 12 - 8	6,43	4,45	21	10
4:4	12 - 16 - 12	3,25	3,83	14	13
4:4	16 - 20 - 16	3,20	3,63	18	16
6:6	6 - 12 - 6	6,93	4,31	23	7
6:6	12 - 18 - 12	4,42	4,16	22	14

TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente

Na Tabela 7 os valores apresentados são os TRA, TRD, DAA e DAD para as mudanças de velocidade na faixa de 14 a 24 km h $^{-1}$ em altas vazões de aplicações.

Tabela 7 – Tempos de resposta em função das mudanças de velocidades em altas vazões

Alta vazão					
Intervalos de mudanças	Velocidade (km h $^{-1}$)	TRA (s)	TRD (s)	DAA (m)	DAD (m)
2:2	14 - 16 - 14	3,26	2,75	14	11
2:2	16 - 18 - 16	2,45	2,89	12	13
2:2	18 - 20 - 18	3,20	2,69	18	13
2:2	20 - 22 - 20	2,16	2,64	13	15
2:2	22 - 24 - 22	2,58	2,48	17	15
2:2	24 - 26 - 24	2,91	3,35	21	22
4:4	16 - 20 - 16	3,73	3,47	21	15
4:4	20 - 24 - 20	2,88	2,95	25	16
6:6	18 - 24 - 18	3,56	3,20	24	16

TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente

Os TRA obtidos variam de 2,0 a 8,5 e TRD de 2,5 a 5,5 segundos. De modo comparativo, Gadanha Junior (2000) avaliando cinco sistemas de controle eletrônico de pulverização destaca que o de melhor desempenho apresentado em seus estudos foi o intervalo do TRA de 13 a 19 segundos e o TRD de 15 a 20 segundos em função das mudanças de velocidade.

De acordo com Carvalho e Antuniassi (2012) o tempo total de resposta para aumento de velocidade foi significativamente maior para as menores vazões. Assim os resultados apresentados para as mudanças de velocidade seguem o mesmo

padrão citado pelos autores. O TR também foi menor para as vazões médias e altas, se relacionados aos TR obtidos em baixas vazões.

Mesmo que o controlador demonstre bom desempenho nas aplicações que demandam médias e altas vazões, é necessária uma readequação do sistema de controle de pulverização, pois atualmente existe uma tendência em reduzir as taxas de aplicação.

Nas Tabelas 5, 6 e 7 apresentadas observa-se que o aumento de velocidade contribui para a diminuição do tempo de resposta, pois os incrementos de velocidade resultam em menores tempos de respostas em ambas às vazões utilizadas no ensaio. Resultados estes, similares aos obtidos por Gadanha Junior (2000).

Ao relacionar os resultados de TRA e TRD descritos nas Tabelas 5, 6 e 7 observa-se que os TRA são maiores que os TRD, e podem ser relacionados à ação da válvula reguladora, que para aumentar ou diminuir a pressão do sistema encontra-se ou não resistência do fluido resultando em um menor TRD relacionado ao TRA. Neste sentido, Gadanha Junior (2000), Figueiredo e Antuniassi (2006) e Carvalho e Antuniassi (2012) também obtiveram diferenças nos TR, onde os TRD são menores que os TRA.

4.3 Tempo de resposta em função da mudança de taxa de aplicação

Os resultados apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10 a seguir são os TRA, TRD, DAA e DAD as mudanças de taxa de aplicação com baixas, médias e altas vazões, nas velocidades de deslocamento de 10, 15, 20 e 25 km h $^{-1}$ utilizadas no ensaio do sistema de controle eletrônico de pulverização.

Na Tabela 8 estão descritos os valores dos TRA e TRD e as DAA e DAD em função das mudanças das taxas de aplicação na faixa de 50 a 150 L ha $^{-1}$ nas velocidade de 10 e 15 km h $^{-1}$ em aplicações de baixas vazões.

Tabela 8 – Tempos de resposta em função das mudanças de velocidades em baixas vazões

Baixa vazão					
Velocidade (km h $^{-1}$)	Taxa (L ha $^{-1}$)	TRA (s)	TRD (s)	DAA (m)	DAD (m)
10	50 - 100 - 50	6,00	4,99	17	14
10	100 -150 - 100	3,77	3,50	10	10
15	50 - 100 - 50	8,10	4,21	34	18

TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente

Os valores apresentados na Tabela 9 são os TRA e TRD e as DAA e DAD em função da mudança de taxa de aplicação na faixa de 50 a 200 L ha $^{-1}$ nas velocidades de 10, 15, 20 e 25 km h $^{-1}$ em aplicações de médias vazões.

Tabela 9 – Tempos de resposta em função das mudanças de velocidades em médias vazões

Média vazão					
Velocidade (km h $^{-1}$)	Taxa (L ha $^{-1}$)	TRA (s)	TRD (s)	DAA (m)	DAD (m)
10	100 - 150 - 100	4,68	3,2	13	9
10	150 - 200 - 150	2,50	2,4	7	7
15	50 - 100 - 50	4,14	3,41	17	14
15	100 - 150 - 100	3,24	2,62	14	11
20	50 - 100 - 50	5,52	2,71	31	15
25	50 - 100 - 50	4,49	3,17	31	22

TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente

A Tabela 10 apresenta os valores dos TRA e TRD e as DAA e DAD em função da mudança de taxa de aplicação na faixa de 50 a 350 L ha $^{-1}$, nas velocidade de 10, 15, 20 e 25 km h $^{-1}$ em aplicação de altas vazões.

Tabela 10 – Tempos de resposta em função das mudanças de velocidades em baixas vazões

Alta vazão					
Velocidade (km h $^{-1}$)	Taxa (L ha $^{-1}$)	TRA (s)	TRD (s)	DAA (m)	DAD (m)
10	150 - 200 - 150	2,84	2,40	8	7
10	200 - 250 - 200	2,42	1,78	7	5
10	250 - 300 - 250	2,42	1,86	7	5
10	300 - 350 - 300	1,80	2,02	5	6
15	100 - 150 - 100	3,99	3,31	17	14
15	150 - 200 - 150	2,20	2,50	9	10
20	100 - 150 - 100	3,10	2,80	17	16
25	50 - 100 - 50	4,51	3,10	31	22

TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente

As Tabelas 8, 9 e 10 apresentam os resultados dos TRA que variam de 2,0 a 8,0 e TRD de 1,5 a 5,0 segundos. Comparando os dados obtidos pelo melhor sistema de controle eletrônico de pulverização avaliado por Gadanha Junior (2000), cujo intervalo do TRA foi de 14 a 20 segundos e o TRD de 16 a 26 segundos, em função das mudanças de taxa de aplicação. Pode-se observar que os TRA e o TRD foram significativamente inferiores aos encontrados pelo autor.

Figueiredo e Antuniassi (2006) avaliaram um sistema de controle eletrônico de injeção direta e descreveram um intervalo do TRA de 19,5 a 22,5 segundos e o TRD de 6,5 a 9 segundos em função das mudanças de velocidade. Os TR obtidos pelos autores são menores que os citados por Gadanha Junior (2000), porém, são maiores que os obtidos nos ensaios.

Rietz et al. (1997), Figueiredo e Antuniassi (2006), utilizaram como parâmetro uma diretriz do BBA (Centro Federal de Pesquisas da Alemanha), que define que os valores de desvios da taxa de aplicação não devem exceder 10%, dentro de 5 segundos após a mudança realizada, quando o objetivo é a manutenção das taxas de aplicação constantes.

Dessa forma, o TRD do sistema de controle eletrônico de pulverização avaliado está dentro do parâmetro estipulado pela diretriz. No entanto, o TRA excede em 60% o parâmetro informado pela mesma. Nesse sentido, o tempo de resposta do sistema de controle eletrônico de pulverização não é adequado seguindo esse parâmetro. Porém, os tempos de resposta médios do sistema avaliado são consideravelmente menores se comparados aos citados nas literaturas consultadas.

4.4 Análise comparativa dos tempos de resposta

4.4.1 Tempos de resposta em função das mudanças de velocidade

Os tempos de resposta e as distâncias de ajuste da taxa de aplicação médios, ascendentes e descendentes do controlador eletrônico de pulverização em função das mudanças de velocidade e seus respectivos desvios padrões (DP) e coeficientes de variação (CV), estão descritos nas Tabelas 11, 12 e 13.

A Tabela 11 apresenta os resultados dos tempos de resposta para as mudanças de velocidades. Os valores encontrados oscilaram, entre 2,0 e 8,8 segundos para os TRA e de 2,5 e 5,5 segundos para o TRD. Os CVs foram de 18 a 44% nos TRA e 12 a 19% nos TRD respectivamente.

Tabela 11 – Média dos tempos de resposta para as mudanças de velocidade

	Baixa vazão		**Média vazão**		**Alta vazão**	
	TRA (s)	TRD (s)	TRA (s)	TRD (s)	TRA (s)	TRD (s)
Média	7,24	4,65	3,64	3,73	2,91	2,89
Máximo	8,84	5,53	6,93	4,45	3,73	3,47
Mínimo	3,88	3,23	2,08	2,49	2,16	2,48
DP	2,09	0,84	1,61	0,70	0,52	0,34
CV*	29	18	44	19	18	12

*valores em porcentagem (%); TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

De maneira comparativa, Carvalho e Antuniassi (2012) realizaram ensaios de tempo de resposta em laboratório e obtiveram variações entre 6 e 20 segundos, enquanto que as variações dos TR obtidos neste trabalho foram de 3 a 8 segundos, valores duas vezes menores se comparados aos valores citados pelos autores. As pontas de baixa vazão foram responsáveis pela maior variação do TR obtido nas condições do ensaio, uma vez que as médias e altas vazões não tiveram variação significativa se comparada a de baixas vazões.

Na Tabela 12 estão descritos as distâncias de ajuste de taxa de aplicação média para as mudanças de velocidades. Os valores encontrados variaram entre 10 e 29 m para os DAA e de 6 a 22 m para o DAD. Os CVs variaram de 26 a 38% nos DAA e 21 a 27% nos DAD respectivamente.

Tabela 12 – Médias de distância de ajuste da taxa de aplicação para as mudanças de velocidade

	Baixa vazão		**Média vazão**		**Alta vazão**	
	DAA (m)	DAD (m)	DAA (m)	DAD (m)	DAA (m)	DAD (m)
Média	18	7	14	11	18	15
Máximo	29	10	23	16	25	22
Mínimo	11	6	10	6	12	11
DP	7	2	5	3	5	3
CV*	38	21	37	27	26	21

*valores em porcentagem (%); DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

Observa-se que o tempo de resposta foi destacadamente maior para as baixas vazões gerando maior distância de ajuste da taxa de aplicação, outro fator que influenciou no aumento da DA nas médias e altas vazões foram às altas velocidades de deslocamento. Contudo, calculando a média das DA ocorridas em todas as vazões resultará em 13,8 m sofrendo uma pequena variação relacionada às médias gerais.

Os Tempos de Resposta Totais Ascendentes (TRTA), Tempos de Resposta Totais Descendentes (TRTD), as Distâncias de Ajuste Totais Ascendentes (DATA) e as Distâncias de Ajuste Totais Descendentes (DATD) médios de aplicação para as mudanças de velocidades estão descritos na Tabela 13. Os valores TRTA variaram entre 2,0 e 8,8 e o TRTD de 2,4 a 5,5 segundos. Os valores médios totais das DATA encontrados variaram de 10 a 29 e de para as DATD de 6 a 22 m, com respectivos CVs de 58 e 26% nos TRTA e TRTD e de 30 a 34% nas DATA e DATD.

Tabela 13 – Médias dos TRT e as DAT para as mudanças de velocidades

	Média Total (s)		**Média Total (m)**	
	TRTA	TRTD	DATA	DATD
Média	3,41	3,29	17	12
Máximo	8,84	5,53	29	22
Mínimo	2,08	2,48	10	6
DP	1,98	0,85	5	4
CV*	58	26	30	34

*valores em porcentagem (%); TRTA = Tempo de Resposta Total Ascendente; TRTD = Tempos de Resposta Total Descendente; DATA = Distância Percorridas para o Ajuste Total da Taxa de Aplicação na Ascendente; DATD = Distância Percorrida para o Ajuste Total da Taxa de Aplicação na Descendente; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

4.4.2 Tempos de resposta em função das mudanças de taxa de aplicação

Os tempos de resposta e as distâncias de ajuste médios nas ascendentes e descendentes para as taxas de aplicação do controlador eletrônico de pulverização e seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação, estão descritos na Tabelas 14, 15 e 16.

A Tabela 14 apresenta os TRA e TRD, ocorridos nas mudanças de taxas de aplicação para as baixas, médias e altas vazões. Os CVs das vazões variam entre 25 a 36% no TRA e de 13 a 23% no TRD, onde o menor CV obtido foi na média vazão.

Tabela 14 – Médias dos tempos de resposta para as mudanças de taxa de aplicação

	Baixa vazão		**Média vazão**		**Alta vazão**	
	TRA (s)	TRD (s)	TRA (s)	TRD (s)	TRA (s)	TRD (s)
Média	6,00	4,21	4,32	2,94	2,63	2,45
Máximo	8,10	4,99	5,52	3,41	4,51	3,31
Mínimo	3,77	3,50	2,50	2,43	1,80	1,78
DP	2,17	0,75	1,08	0,39	0,92	0,57
CV*	36	18	25	13	35	23

*valores em porcentagem (%); TRA = Tempo de Resposta Ascendente; TRD = Tempos de Resposta Descendente; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

As distâncias de ajuste da taxa de aplicação do sistema em baixas, médias e altas vazões, para as mudanças de taxas de aplicação estão descritas na Tabela 15. As oscilações médias das distancias de ajuste da taxa de aplicação entre as baixas e altas vazões foram de 9 a 17 m DAA e de 9 a 14 m para as DAD.

Tabela 15 – Médias de distância de ajuste para as mudanças de taxa de aplicação

	Baixa vazão		**Média vazão**		**Alta vazão**	
	DAA (m)	DAD (m)	DAA (m)	DAD (m)	DAA (m)	DAD (m)
Média	17	14	15	13	9	9
Máximo	34	18	31	22	31	22
Mínimo	10	10	7	7	5	5
DP	12	4	10	5	9	6
CV*	72	28	65	43	104	71

*valores em porcentagem (%); DAA = Distância Percorridas para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Ascendente; DAD = Distância Percorrida para o Ajuste da Taxa de Aplicação na Descendente; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

Os resultados apresentados na Tabela 16 demonstram os tempos de resposta totais e as distâncias de ajuste totais médios de aplicação nas ascendentes e descendentes em função da mudança das taxas de aplicação nas velocidades de 10, 15, 20 e 25 km h $^{-1}$. Os TRTA e os TRTD médios foram 3,8 e 2,8 segundos e as DATA e as DATD foram 14 e 11 m respectivamente. Assim que a variação do TRT foi entre 5 e 8 segundos, de forma que para Figueiredo e Antuniassi (2006) avaliando os tempos de resposta em um sistema de injeção direta os resultados foram entre 8 e 22 segundos.

Tabela 16 – Médias dos TRT e as DAT para as mudanças de taxas de aplicação

	Média Total (s)		**Média Total (m)**	
	TRTA	TRTD	DATA	DATD
Média	3,8	2,8	14	11
Máximo	8,1	5,0	34	22
Mínimo	1,8	1,8	5	5
DP	1,6	0,8	10	5
CV*	43	29	72	49

**valores em porcentagem (%); TRTA = Tempo de Resposta Total Ascendente; TRTD = Tempos de Resposta Total Descendente; DATA = Distância Percorridas para o Ajuste Total da Taxa de Aplicação na Ascendente; DATD = Distância Percorrida para o Ajuste Total da Taxa de Aplicação na Descendente; DP = Desvio Padrão; CV = Coeficiente de Variação

4.5 Exatidão do controlador eletrônico de pulverização na determinação da taxa de aplicação

O intervalo de variação da taxa de aplicação nos ensaios de mudança de velocidade foi de ± 2% e para as mudanças de taxas de aplicação de ± 4%. Esses intervalos estão dentro da variação da taxa de aplicação recomendada por Rider e Dickey (1982).

O sistema de controle eletrônico demostrou exatidão satisfatória em ambos os aspectos avaliados, tanto para as mudanças de velocidade como para as taxas de aplicação e nas respectivas vazões baixas, médias e altas.

5 CONCLUSÃO

A mudança de velocidade de deslocamento influenciou nos tempos de resposta no controlador eletrônico de pulverização.

A mudança de taxa de aplicação influenciou nos tempos de resposta no controlador eletrônico de pulverização.

O tempo de resposta do controlador eletrônico de pulverização foi menor para altas vazões.

O tempo de resposta do controlador eletrônico de pulverização foi menor para os intervalos maiores de velocidade.

O modelo utilizado foi adequado para determinação do tempo de resposta.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, D.; RESTER, D.; MAYEUX, M.; THOMAS, C. Constant spray applications at varying speeds. **Lousiana Agriculture**, Lousiana, v. 7, n. 4, p. 8-9, 1964.

ANGLUND, E.A.; AYERS, P.D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator. **Applied Engineering in Agriculture,** St. Joseph, v. 19, n. 3, p. 273-282, 2003.

ANTHONIS, J.; BAERDEMAEKER, J.D.; RAMON, H. Application techniques for crop protection. **Precision Agriculture**, Michigan, v. 6, n. 5, p. 289-294, 2006.

ANTUNIASSI, U.R. **Avaliação de sistemas de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão.** 1999. 83 p. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 1999.

ANTUNIASSI, U.R.; BAIO, F.H.R. Tecnologia de aplicação de defensivos. In: VARGAS, L.; ROMAN, E.S. **Manual de manejo e controle de plantas daninhas.** Bento Gonçalves: EMBRAPA Uva e Vinho, 2004. p. 145-184.

ANTUNIASSI, U.R.; GANDOLFO, M.A. Projeto IPP. Inspeção de pulverizadores. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS. 2001, Jundiaí. **Anais...** Jundiaí: IAC, 2001. p. 83-102.

ANTUNIASSI, U.R.; GANDOLFO, M.A.; SIQUEIRA, J.L. Inspeção de pulverizadores de barras. In: ANTUNIASSI, U.R. (Ed.). **Tecnologia de aplicação para culturas anuais.** Passo Fundo: Aldeia Norte, 2011. p. 83-112.

ANTUNIASSI, U.R.; VELINI, E.D.; NOGUEIRA, H.C.; DOMINGUES, E.L. Tecnologia de aplicação em taxas variáveis para o controle de plantas daninhas em ferrovias. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO. 6., 2012, Londrina. **Anais…** Londrina: Editora Aldeia, 2012. p. 275-281.

BAIO, F.H.R. **Aplicação localizada de defensivos baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas.** 2001. 113 p. Dissertação (Mestrado em Máquinas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

BATTE, M.T.; EHSANI, M.R. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 53, p. 28-44, 2006.

BENNUR, P.J.; TAYLOR, R.K. Evaluating the response time of a rate controller used with a sensor-based, variable rate application system. **Transactions of the ASABE,** St. Joseph, v. 26, n. 6, p. 1069-1075, 2010.

BODRIA, L. L’elletronic sul trattore e sulle machine agricole. **Macchine & Motori Agricole,** Milano, v. 47, n. 4, p. 49-70, 1989.

BOSSU, J.; GÉE, C.; TRUCHETET, F. Development of a machine vision system for a real time precision sprayer. **Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis,** Barcelona, v. 7, n. 3, p. 54-66, 2008.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **CR10X micrologger operator's manual.** Logan, 1997. 49 p.

CARVALHO, W. P. A.; ANTUNIASSI, U. R. Avaliação de resposta de um controlador de fluxo com DGPS submetido à variação de velocidade de vôo em condições de vôo simulado em laboratório. **Energia na Agricultura,** Botucatu, v. 27, n. 2, p. 124-144, 2012.

CHRISTOFOLETTI, J.C. **Considerações sobre tecnologia de aplicação de agroquímicos agrícolas.** São Paulo: Teejet, n. 5, jun., 1999. 19 p.

CUGATI, S.A.; MILLER, W.M.; SCHUELLER, J.K.; SCHUMANN, A.W.; BUCHANON, S.M.; HOSTLER, H.K. Benchmarking the dynamic performance of two commercial variable-rate controllers and components. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, v. 50, n. 3, p. 795−802, 2006.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis.** 3rd ed. New York: John Wiley, 1998. 706 p.

FIGUEIREDO, Z.N. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de injeção para aplicação localizada de defensivos.** 2003. 118 p. Tese (Doutorado wmEnergia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2003.

FIGUEIREDO, Z.N.; ANTUNIASSI, U.R. Uso de controladores lógicos programáveis para ensaios de avaliação de desempenho de sistemas de controle eletrônico para pulverizadores. **Energia na Agricultura,** Botucatu, v. 21, n. 2, p. 134-146, 2006.

FIGUEIREDO NETO, E.; CARDOSO, R.S. **Instrumentação**: elementos finais de controle. Vitória: SENAI; Centro Técnico de Instrumentação Industrial Arivaldo Fontes, 1999. 84 p.

FREITAS JR., G. **Importação de agrotóxicos bate recorde**. Disponível em: <http://www.sindag.com.br/noticia.php?News_ID=2323>. Acesso em: 20 abr. 2013.

GADANHA JÚNIOR, C.D. **Avaliação do tempo de resposta de controladores eletrônicos em pulverizadores agrícolas.** 2000. 125 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2000.

GANDOLFO, M.A. **Inspeção periódica de pulverizadores agrícolas.** 2001. 92 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2001.

GEOLINE TECOMEC. **Gruppi di comando:** catalogo prodotti. Reggio Emilia, 2013. 206 p.

GILES, D.K.; COMINO, J.A. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles. **Agricultural Engineering Research,** Prague, v. 47, p. 249-267,1990.

GONÇALVES, M.G. **Monitoramento e controle.** Rio de Janeiro: SENAI, 2003. 100 p.

HENRY, Z.A.; ZOERB, G.C.; BIRTH, G.S. **Instrumentation and measurement for environmental sciences.** 3rd ed. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1991. 140 p.

HLOBEN, O.; VONDRICKA, J.; SCHULZE LAMMERS, P. Study on response time of direct nozzle injection system for variable rate application of herbicides. In: CIGR WORLD CONGRESS AGRICULTURAL ENGINEERING FOR A BETTER WORLD, 2006, Bonn, 2006. **Proceedings…**

HUGHES, K.L.; FROST, A.R. A review of agricultural spray meeting. **Agricultural Engineering Research,** Prague, v. 32, p. 197-207, 1985.

ISMAIL, K.A.R.; GONÇALVES, M.M.; BENEVENUTO, F.J. **Instrumentação básica para engenharia.** Campinas: Ed.do Autor, 1998. 470 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **5682-3:** equipment for crop protection – spraying equipment. Part 1: Test method for volume/hectare adjustment systems of agricultural hydraulic pressure sprayers. Geneva, 1997. 72 p.

JOHANN, A.L.; RUSSO, E., CAPPELLI, N. L., UMEZU, C. K. 2004**.** Desenvolvimento e avaliação de uma servo-válvula de baixo custo para a aplicação de insumos líguidos. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004 São Pedro. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2004. p. 139-145.

KEES, G. **Field evaluation of a constant-rate sprayer for ATVs and UTVs**. Missoula: USDA, Forest Service, Missoula Technology and Development Center, 2008. 18 p.

KOO, Y.M.; SUMMER, H.R. Total flow control for a direct injection sprayer. **Agricultural Engineering Research,** Prague, v. 14, p. 363-367, 1998.

LUCK, J.D.; ZANDONADI, R.S.; SHEARER, B.D.; SHEARER, S.A. Reducing pesticide over-application with map-based automatic boom section control on agricultural sprayers. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, v. 53, n. 3, p. 685-690, 2010a.

LUCK, J.D.; PITLA, S.K.; SHEARER, S.A.; MUELLER, T.G.; DILLON, C.R.; FULTON, J.P.; HIGGINS, S.F. Potential for pesticide and nutrient savings via map-based automatic boom section control of spray nozzles. **Computers and Electronics in Agriculture,** Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 19-26, 2010b.

MATTHEWS, G.A. **Pesticide application methods.** London: Longman, 1984. 335 p.

MATUO, T. **Técnica de aplicação de defensivos agrícolas**. Jaboticabal: FUNEP, 1990. 139 p.

MINIPA ELECTRONICS. **Gerador de função DDS 20MHz, MFG-4221:** manual de instruções. Houston, 2009. 93 p.

NOLTE, K.D. The integration of variable rate technologies for a soil applied herbicide in leafy green production. **Journal of Soil Science and Environmental Management ,** Yuma, v. 2, n. 6, p. 159-166, 2011.

OZKAN, H.E. Sprayer performance evaluation with microcomputers. **Agricultural Engineering Research,** Prague, v. 3, n. 1, p. 36-41, 1987.

PEREIRA, F.J.S. **Sistema de comutação de pontas na barra de pulverização para ajuste do tamanho de gotas às condições climáticas e aplicação em taxas variáveis.** 2006. 125 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

PEREIRA, F.J.S.; ANTUNIASSI, U.R.; ACOSTA, J.J.B. Avaliação da Acurácia de Fluxômetros Submetidos a Diferentes Condições Operacionais. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2005, Sete Lagoas. **Anais...** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. p. 217-222.

PEREIRA, R.R.D. **Protocolo ISO 11783:** procedimentos para comunicação serial de dados com o controlador de tarefas. 2008. 188 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

POLMAC. **CONTALITRI:** catalogo prodotti. Mirandola, 2011. 143 p.

PRAVEEN J.B. **Response time evaluation of real-time sensor based variable rate technology equipment.** 2009. 71 p. Dissertation (Masters of Science in Biosystems & Agricultural) - Oklahoma State University, Stillwater, 2009.

RASHIDI, M.; MOHAMMADZAMANI, D. Variable rate herbicide application using GPS and generating a digital management map. In: SOLONESKI, S.; LARRAMENDY, M.L. **Herbicides, theory and applications.** Hard Cover: Intech, 2009. chap. 7, p. 127-144.

REYNALDO, E.F.; MOLIN, J.P. Proposta metodológica para avaliação de controlador automático de seções e pulverização. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 111-120, jan./fev. 2011.

RIDER, A.R.; DICKEY, E.C. Field evaluation of calibration accuracy for pesticide application equipment. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, v. 25, p. 258-260, 1982.

RIETZ, S.; PÁLYI, B.; GANZELMEIER, H.; LÁSZLO, A. Performance of electronic controls for field sprayers. **Agricultural Engineering Research**, Prague, v. 68, n. 4, p. 399-407, 1997.

ROCKWELL, A.D.; AYERS, P.D. A variable rate sprayer development and avaluation. **Engenharia Agrícola,** Jaboticabal, v. 10, n. 3, p.327-333, 1994.

SALYANI, M. Spray volume rate errors in intermittent operation of hydraulic nozzles. **Applied Engineering in Agriculture,** St. Joseph, v. 15, n. 1, p. 31-34, 1999.

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

SHARDA, A. **Boom dynamics during control system response on agricultural sprayers.** 2011. 195 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - Faculty of Auburn University, Auburn, 2011.

SHARDA, A.; FULTON, J.P.; MCDONALD, T.P.; BRODBECK, C.J. Real-time nozzle flow uniformity when using automatic section control on agricultural sprayers. **Computers and Electronics in Agriculture.** Amsterdam, v. 79, p. 169–179, 2011.

SHARDA, A.; FULTON, J.P.; MCDONALD, T.P.; DARR, M.; ZECH, W.C.; BRODBECK, C.J. Real-time pressure and flow response for swath control technology. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2009, Reno. **Proceedings…** Reno: ASABE, 2009. p. 169–179.

SILVEIRA, J.C.M. da; GOMES FILHO, A.; PEREIRA, J.O.; SILVA, S.L.; MODOLO, A.J. Avaliação qualitativa de pulvarizadores da região de Cascavel, Estado do Paraná. **Science Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 4, p. 569-573, out./dez. 2006.

SPRAYING SYSTEM. **TEEJET.** Teejet technologies: catalog 50A-P. Wheaton, 2011.

ULSON, J.A.C. **Desenvolvimento de um sistema de controle inteligente a aplicação de fertilizante líquidos em taxas variáveis.** 2002. 149 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

VERION AGRICULTURA. **Vcom 8.4:** uso e manutenção. São Paulo, 2010. 20 p.

VOGEL, J.W.; WOLF, R.C.; DILLE, J.A. Evaluation of a variable rate application system for site-specific weed management. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 5, p. 725-733, 2005.

WERNECK, M.M. **Transdutores e interfaces.** Rio de Janeiro: LTC, 1996. 167 p.

WITHERS, V.I.; INKLEY, F.A.; CHETERS, D.A. Flow characteristics of turbine flowmeters. In: CONFERENCE MODERN DEVELOPMENT IN FLOW MEASUREMENT, 1971, Harwell. **Proceedings…** London: Conf. Publications, 1971. p. 305-320.