

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA
FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO DE UM CONTROLADOR DE FLUXO COM DGPS
PARA MÁQUINAS DE PULVERIZAÇÃO**

WELLINGTON PEREIRA ALENCAR DE CARVALHO

Engenheiro Agrônomo

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para a obtenção do título de
Doutor em Agronomia – Programa de
Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Janeiro - 2003

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA
FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**DESEMPENHO DE UM CONTROLADOR DE FLUXO COM DGPS
PARA MÁQUINAS DE PULVERIZAÇÃO**

WELLINGTON PEREIRA ALENCAR DE CARVALHO

Orientador: Prof. Dr. Ulisses Rocha Antuniassi

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Campus de
Botucatu, para a obtenção do título de
Doutor em Agronomia – Programa de
Energia na Agricultura.

BOTUCATU – SP

Janeiro – 2003

Aos meus pais Vanildo e Bernardina Pereira Alencar de Carvalho, minha gratidão e aos queridos irmãos Ivanildo, Ivan , Ivo, Heloisa e Ivânia e aos eternos Wilson e Washington (in memorian).

Especial e com todo o carinho, a minha esposa Myriane Stella Scalco e minha filha Lílian Scalco Alencar de Carvalho que tanto sentiram pela minha ausência.

Aos operadores aeroagrícolas que fazem desta máquina além do sonho de voar, um instrumento de produção agrícola

A todos aqueles que fazem da terra e da amizade uma dádiva de Deus.

DEDICO

Com certeza o espaço dedicado aos agradecimentos por maior que fosse, seria muito pequeno para que eu pudesse retribuir todo o meu muito obrigado. Muitos momentos se passaram neste período do curso, mas serão as recordações das alegrias e saudades que levarei comigo e que permanecerão em minha mente, e assim que eu as quero lembrá-las.

Agradeço :

- Ao Professor Doutor Ulisses Rocha Antuniassi, do Departamento de Engenharia Rural da FCA-UNESP, pela orientação, atenção, dedicação, compreensão e respeito.
- Aos colegas de cursos. Carolina A.S.Queiróz, Francisco Faggion, Edmilson R. da S. Ruiz, Renildo R. Mion, Marco A. Gandolfo, Renato L. Rezende, Zulema N. Figueiredo, Caetano H. Grossi e Maurício J. de Leon, Paulo R.A.da Silva , A.Renan A. B. da Silva, A. Salvador, D.Mahl e E.Tanaka.
- Especial aos amigos Moisés da Silva Nery “Baiano” pelo companheirismo e amizade durante os trabalhos nessa árdua missão, e que com sua alegria e dedicação, nos animava para seguir sempre em frente e ao Dante Antonio Basso e Antonio Carlos da Silva pelo apoio e ajuda.
- Aos Professores e demais funcionários do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, representados pela chefia através do Professor Manoel Alves de Faria e ao Reitor da Universidade Federal de Lavras – UFLA, Professor Fabiano Ribeiro do Valle, por acreditarem na minha contribuição futura a nossa Universidade e, em especial aos Professores da área de Máquinas e Mecanização Agrícola Nilson Salvador, Tomás de Aquino Ferreira, Fábio Moreira da Silva, Gilmar Tavares, Carlos Eduardo Silva Volpato, e a Pesquisadora Maria Cristina C.Tourino pelo apoio e estímulo ao meu trabalho.
- Aos Professores do Departamento de Engenharia Rural da FCA/UNESP, em destaque Professores Sérgio Hugo Benez, Sérgio, José Armando Furlani Jr, Carlos Antônio Gamero (Diretor da FCA) Antônio de Pádua Sousa pela atenção e amizade.

- Ao Professor Kléber Pereira Lanças (Coordenador do Curso) pela sua especial atenção, e aos funcionários Benedito Fernando Camargo, Mauri T. da Silva, Silvio S. S. Scolastici, pelo apreço e amizade conquistada.
- Aos Professores do Departamento de Produção Vegetal da FCA/UNESP, Carlos Gilberto Raetano e Edivaldo Domingues Velini, pela amizade conquistada.
- A Seção de Pós-Graduação da Faculdade de Ciências Agronômicas da FCA/UNESP, em Botucatu, através da Marilena do Carmo Santos, Marlene Rezende de Freitas e Jaqueline de Moura Gonçalves, pela atenção e cordialidade.
- Aos funcionários do CINAG (FCA/UNESP), Wilson Roberto de Jesus pelo apoio nas análises estatísticas, Hosana M.S.C.Bis, Eleni A. C.Rocha, Fernando J.Z. Tamburo, Jayme L.Filho e Amauri J.M.Vieira, Ozana M.Herrera, Jayme L.Filho, pela cordial atenção.
- Aos funcionário(a)s da Biblioteca Prof. Paulo Carvalho de Mattos (FCA/UNESP), Maria Inês A. e Cruz, Maria do Carmo, Denise M. N. de Assis, Marli Leão, Maria A. M. Alho, Célia R. Inoue, Hellen S. Sato e Ermete Nibi Neto pela cordial atenção.
- Ao Prof. Casimiro Dias Gadanha Júnior do Departamento de Engenharia da Esalq-USP pela amizade e sugestões ao trabalho.
- Ao Prof. Suedêmio de Lima e Silva da Universidade Oeste do Paraná pelo apoio na programação dos sistemas de coleta de dados.
- Aos diretores da Empresa Aeropel Aviação Agrícola e aos Cmtes Ubiraci Emilio Plotsch e João Reichert, bem como sua família pela calorosa atenção para que os ensaios pudessem ser realizados na Cidade de São Borja/RS, além de toda a equipe de pilotos e mecânicos da empresa pelo apoio nas instalação dos equipamentos e vôos realizados.
- Ao Cmte Cláudio Patta e a direção do grupo Granja Guará localizada na Cidade de Uruguaiana/RS pela cessão das instalações e aeronave em prol da atividade aeroagrícola do país.

- Ao Cmte Gianluca Possamai da empresa Pontual pelo empréstimo do sistema DGPS e controlador de fluxo utilizados na primeira versão da bancada de ensaios.
- Aos diretores Wilson e Luis Boris da Empresa Travicar pelo empréstimo das válvulas de controle, e sistemas Y, instaladas na bancada de ensaios e ao Eng. Fabiano Zaccarelli e Manoel Casado da Indústria Aeronáutica Neiva e Zanoni pelo suporte de mangueira da válvula de abastecimento necessários nos ensaios de laboratório.
- Ao Engº Eduardo Araújo pelas dicas operacionais do uso do fluxômetro em campo, e pelo serviços prestados a aviação agrícola.
- Aos eternos mestres e amigos Engºs. José Carlos Christofolletti e Marcos Monteiro Vilela e a quem devo meus primeiros passos na aviação agrícola, pelo incentivo e amizade.
- Aos Engºs. Bob Rawlings e John McClure e a toda equipe da empresa Satloc Co. (USA) pelo desenvolvimento e fornecimento do software Simfly 4.4. e cabeamento específico utilizado nos ensaios, além das orientações para instalação dos equipamentos, sem o qual este trabalho não poderia ter sido realizado.
- Aos amigos Cláudia M.L.Guimarães, Augusto Ferreira de Souza, Jane L. Miguel e Rodrigo L. Rios pelo carinho dedicado a nossa família.
- Ao programa PICDT/CAPES, pelo fornecimento da Bolsa de Doutorado, a qual permitiu a manutenção e permanência para finalização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	3
3 INTRODUÇÃO	5
4 REVISÃO DE LITERATURA..	7
4.1 O controle fitossanitário e a agricultura moderna.....	7
4.2 Agricultura de Precisão.....	10
4.3 Sistema de posicionamento global (GPS).....	12
4.4 Eletrônica embarcada em equipamentos de aplicação.....	15
4.5 Atuadores para controladores de pulverização.....	22
4.6 Transdutores para controladores de pulverização.....	25
4.6.1 Transdutores de pressão.....	25
4.6.2 Transdutores de fluxo.....	28
4.6.3 Transdutores de velocidade.....	30
5. MATERIAL E MÉTODOS	32
5.1 Área Experimental.....	32
5.2 Equipamentos e materiais utilizados.....	32
5.2.1. Materiais gerais a todas as etapas dos ensaios.....	32
5.2.2. Materiais utilizados para o ensaio de acurácia do DGPS em determinações de velocidade.....	35
5.2.3. Materiais utilizados nos ensaios de desempenho do controlador de fluxo em Laboratório	36
5.2.4. Materiais utilizados nos ensaios de desempenho do controlador de fluxo em campo	38
5.3 Métodos.....	39

5.3.1	Ensaio de acurácia do DGPS em determinações de velocidade.....	39
5.3.1.1	Montagem do radar no veículo utilitário para ensaio de acurácia....	39
5.3.1.2	Montagem do DGPS no veículo utilitário	40
5.3.1.3.	Programação do sistema de aquisição de dados para os ensaios de acurácia do DGPS em determinações de velocidade.....	40
5.3.1.4	Calibração da capacidade de resposta do sensor de velocidade (radar).....	41
5.3.1.5	Procedimento do ensaio de campo para avaliação da acurácia do DGPS na determinação de velocidade.....	42
a)	Deslocamento em reta.....	42
b)	Deslocamento em curva.....	43
5.3.1.7	Delineamentos experimentais.....	44
a)	Deslocamento em reta	44
b)	Deslocamento em curva	44
5.3.2.	Ensaio de desempenho do controlador de fluxo em condições de laboratório	44
5.3.2.1	Construção da bancada suporte e instalação dos equipamentos.....	44
5.3.2.2	Simulação do DGPS a partir do Simfly	48
5.3.2.3	Utilização do conversor de frequência com controle vetorial Movidrive.....	48
5.3.2.4.	Utilização do transdutor de pressão para aferição da acurácia do controlador de fluxo na determinação das vazões.....	48
5.3.2.5.	Calibração do Transdutor de pressão.....	49
5.3.2.6.	Ensaio realizados.....	50
a)	Ensaio das características de desempenho do controlador de fluxo em função da variação na rotação de bomba.....	52
b)	Ensaio das características de desempenho do controlador de fluxo em função da variação na velocidade de vôo.....	53

5.3.2.7	Processamento dos dados.....	53
5.3.3	Ensaio de acurácia do controlador de fluxo na determinação da vazão de calda aplicada.....	57
5.3.4	Ajustes da constante de tempo de resposta do controlador de fluxo	58
5.3.5	Delineamentos experimentais.....	60
5.3.5.1	Ensaio de variação da velocidade.....	60
5.3.5.2	Ensaio de variação de rotação da bomba.....	60
5.4	Ensaio de avaliação do controlador de fluxo em condições campo.....	60
5.4.1	Pré-teste realizado em Uruguaiana/RS.....	60
5.4.2	Ensaio de avaliação do controlador de fluxo realizado em São Borja/RS.....	62
a)	Instalação do controlador de fluxo e calibração de vazão.....	62
b)	Ensaio de avaliação do controlador de fluxo em condições de vôo.....	66
5.4.3	Avaliação do controlador de fluxo instalado em um aerobarco de aplicação.	66
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	68
6.1	Acurácia do DGPS na determinação da velocidade.....	68
6.2	Desempenho do controlador de fluxo em condições de laboratório.....	70
6.2.1	Determinação das equações.....	70
6.2.2	Tempo de resposta do controlador de fluxo em função das variações de velocidade	72
6.2.3	Tempo de resposta do controlador de fluxo em função das variações de rotação da bomba.....	77
6.2.4	Acurácia do controlador de fluxo na determinação da vazão de calda aplicada.....	78
6.3	Avaliação do controlador de fluxo em condições de campo.....	82
6.3.1	Ensaio com aeronaves.....	82
6.3.2	Ensaio com aerobarco.....	85

6.4 Avaliação do desenvolvimento metodológico.....	85
6.5 Sugestão para trabalhos futuros.....	87
7 CONCLUSÕES.....	88
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICES	96

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Produção agrícola de grãos de 1995 a 2001.....	9
2 Tipos e curvas características de “algumas” válvulas de controle de fluxo, com suas respectivas aplicações.....	23
3 Comparação entre os tipos de atuadores típicos para válvulas de controle.....	24
4 Características do sistema de controle e de monitoramento de aplicação Satloc, modelo Airstar 99.5.....	34
5 Características técnicas do CR10X	34
6 Características técnicas do radar	35
7 Características técnicas do Conversor de frequência Movidrive, modelo.MCF40A Compact	38
8 Pontos de referência e tempos de resposta do controlador de fluxo em ensaios de variação de velocidade.....	54
9 Pontos de referência e tempos de resposta do controlador de fluxo em ensaios de variação da rotação da bomba de pulverização.....	55
10 Função e faixa de variação dos valores ajustáveis do algoritmo de controle do controlador de fluxo, visualizado no menu "Valve Cal".	59
11 Análise dos resultados de velocidade de deslocamento em linha reta obtidos através de diferentes metodologias (média de 5 repetições).....	69
12 Análise dos resultados de velocidade de deslocamento em curva o obtidos através de diferentes metodologias (média de 3 repetições).....	69
13 Análise de variância do tempo de resposta para o aumento da velocidade.....	74
14 Análise de variância do tempo de resposta para a diminuição da velocidade.....	75
15 Análise das interações entre vazão de calda e ajuste do controlador de fluxo para o tempo de resposta a mudanças de velocidade.....	76

- 16 Análise de variância do módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, nos instantes T0, T3 e T6, relativos aos ensaios de variação de velocidade 79
- 17 Análise das interações entre vazão e ajuste para o módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, relativos aos ensaios de variação de velocidade..... 80
- 18 Análise de variância do módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, nos instantes T0, T3 e T6, relativos aos ensaios de variação da rotação da bomba 81
- 19 Análise das interações entre vazão e ajuste para o módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, relativos aos ensaios de variação da rotação da bomba..... 82

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Croqui para estudo de simulação das linhas de vôo em condições de campo, com o uso do controlador de fluxo.....	16
2 Resposta do controlador de fluxo no controle da taxa de aplicação com variação e mudanças bruscas de velocidade em relação ao solo.....	17
3 Ação do controlador de fluxo na correção de vazão	18
4 Variação nas taxas de aplicação sem correção do controlador de fluxo.....	18
5 Curvas características de vazões inerentes de válvulas de controle. 1 – válvula globo “on-off”; 2 – válvula globo igual porcentagem; 3 – válvula borboleta; 4 – válvula esfera.....	22
6 Circuito com potenciômetro.....	26
7 Transdutor de resistência variável com foles de pressão.....	26
8 Transdutor de resistência variável com diafragma	27
9 Transdutor piezoelétrico.....	28
10 Vista geral do sistema de controle e monitoramento de aplicação, Airstar 99.5 (1) barra de luzes, (2) teclado, (3) display, (4) CPU, (5) Antena receptora DGPS.....	33
11 Vista geral : Transdutor de pressão(a) e manômetro de precisão (b).....	36
12 Conversor de frequência Movidrive	37
13 Detalhe da fixação do sensor de velocidade radar no veículo utilitário	39
14 Vista geral e interna da cabine do veículo utilitário com radar e antena DGPS.....	40
15 Sistema de aquisição de dados CR 10 X.....	41
16 Vista do local de ensaio de deslocamento em linha reta	43
17 Vista do local de ensaio de deslocamento em curva	43
18 Vista geral da bancada suporte para os ensaios e equipamentos.....	45
19: Detalhe de fixação de sensores na bancada e do transdutor de pressão (a, b). Ligação dos sensores do controlador de fluxo e comando de acionamento de	

válvula (A,B), chave seletora do modo de calibração (C), e sensor de georefenciamento de abertura de válvula (D).	45
20 Reservatório de produto utilizado durante os ensaios.....	46
21 Pontas de bicos de pulverização : OC 40 (a); 80 (b) e corpo do bico (c).....	46
22 Detalhe de instalação do transdutor de pressão e do manômetro na saída de produtos.....	47
23 Ensaio de calibração do transdutor de pressão.....	50
24 Fluxograma para determinação comparativa entre a indicações de vazões registradas pelo transdutor de pressão x controlador de fluxo com sistema de DGPS.....	51
25 Tela do programa simulador de vôo Simfly 4.4 em opção de vôo manual.....	52
26 Exemplo do critério adotado para o cálculo do tempo de resposta do sistema controlador de fluxo a mudanças de rotação na bomba de pulverização.....	55
27 Exemplo do critério adotado para o cálculo do tempo de resposta do sistema controlador de fluxo a mudanças de velocidade de vôo.....	56
28 Pré-teste do controlador de fluxo. (a,b) ensaio de vazão (c) detalhe do sensor e transdutor de pressão, (d) detalhe de instalação e manutenção do fluxômetro. Ensaio Uruguaiana/RS.....	61
29 Ensaio em São Borja/RS, instalação do controlador de fluxo (a, b) detalhe do transdutor pressão (c), calibração de vazão (d), vôo de variação de velocidade (e), coleta de dados, descarregamento de dados (f).....	62
30 Vista geral da cabine da aeronave agrícola EMB 201-A.....	63
31 Detalhe de instalação do CR 10X e CPU do Airstar 99.5 na aeronave agrícola EMB 201-A. Ensaio realizados nos Municípios de São Borja (a) e Uruguaiana/RS) (b).....	64
32 Calibração de vazão em solo, detalhe de individualização de coleta de volume nos bicos e fonte de alimentação com conversor de voltagem	65

33	Vista geral do aerobarco no ensaio na represa próxima a Usina Jupia (a); Detalhe da válvula de controle instalada no aerobarco (b).....	67
34	Representação gráfica da equação que correlaciona a vazão do sistema com a pressão, para a barra de pulverização simulada com a ponta OC40.....	71
35	Representação gráfica da equação que correlaciona a vazão do sistema com a pressão, para a barra de pulverização simulada com a ponta OC80.....	71
36	Resposta característica do controlador de fluxo alterando a pressão durante um ensaio de variação da velocidade de deslocamento, com 5 repetições, através de mudanças em degrau (variações instantâneas da velocidade).....	72
37	Resposta característica do controlador de fluxo corrigindo a pressão durante uma sequência de ensaios de variação da rotação da bomba de pulverização através de mudanças em degrau (variações instantâneas da rotação da bomba).....	77
38	Mapa da área de aplicação real gerado com o programa Mapstar. Ensaio do controlador de fluxo realizado na Cidade de São Borja - RS.....	83
39	Mapa da área de aplicação com variação da velocidade de vôo. Ensaio do controlador de fluxo realizado na Cidade de São Borja - RS.....	83
40	Gráfico característico de variação da velocidade de vôo e taxa de aplicação sem atuação do controlador de fluxo na correção da vazão.....	84
41	Gráfico característico de variação da velocidade de vôo e volume de aplicação com a manutenção da taxa de aplicação devido a atuação do controlador de fluxo.....	85

LISTA DE APÊNDICES

Apêndices	Página
1 Programa utilizado no coletor de dados modelo CR 10 X, para o ensaio comparativo entre DGPS x Radar e Cronometragem manual	97
2 Programa utilizado no coletor de dados modelo CR 10 X, para Avaliação do controlador de fluxo em condições de laboratório e campo	99

1 RESUMO

A aplicação de defensivos é uma das etapas mais importantes do processo de produção agrícola. O sucesso da atividade depende de diversos parâmetros, entre os quais destaca-se o volume de aplicação, o qual depende diretamente da velocidade de deslocamento do pulverizador. Nos sistemas convencionais, o operador precisa manter a velocidade constante para garantir uniformidade de volume aplicado ao longo da faixa. Visando maior acurácia na definição da dose aplicada e melhor qualidade geral da aplicação, os sistemas controlados eletronicamente permitem o ajuste automático do volume aplicado ao longo da área quando ocorre variação da velocidade durante a aplicação. Os objetivos do presente trabalho foram desenvolver metodologia para avaliação do desempenho de sistemas controladores de fluxo ligados a DGPS e avaliar o desempenho de um controlador de fluxo Satloc Airstar 99.5 em condições de campo e de laboratório. Para tanto foram avaliados os seguintes parâmetros: acurácia de determinação de velocidade para deslocamentos em curvas e linha reta; tempo de resposta a mudanças de velocidade; tempo de resposta a mudanças de intensidade de bombeamento e acurácia na determinação do fluxo de calda. Nos ensaios de laboratório foi utilizado um sistema de simulação dos sinais de DGPS para possibilitar o uso estático do equipamento. Nas etapas de campo e de laboratório, os valores registrados pelo controlador de fluxo foram confrontados com dados coletados através de um sensor de pressão acoplado a um coletor de dados. Os resultados mostraram que o sistema estudado possui acurácia adequada para a determinação da velocidade de deslocamento quando comparado ao

radar e a cronometragem manual, pois não houve diferença estatisticamente significativa nos valores indicados entre as metodologias, tanto para deslocamento em retas como em curvas. O tempo médio de resposta do controlador de fluxo para variações de velocidade oscilou entre 6 e 20 segundos. Variações na vazão total e nos valores de ajuste do controlador tiveram influência significativa no tempo de resposta, havendo situações onde ocorreu interação entre os fatores avaliados. Houve tendência de melhores resultados no tempo de resposta utilizando-se um ajuste para a constante do algoritmo de controle diferente do indicado pelo fabricante. O controlador de fluxo apresentou índices de erro médio abaixo de 2% em todas as condições operacionais avaliadas, proporcionando acurácia satisfatória na determinação da vazão de calda nas diferentes situações de ensaio. Em termos metodológicos, os procedimentos adotados podem ser considerados satisfatórios para os objetivos do trabalho.

Palavras-chave: controlador de fluxo, defensivos, pulverização, DGPS, tempo de resposta

PERFORMANCE OF A FLOW CONTROL SYSTEM WITH DGPS FOR SPRAYERS,

Botucatu, 2003, 100p. Tese (Doutorado em Agronomia/Programa de Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: WELLINGTON PEREIRA ALENCAR DE CARVALHO

Adviser: ULISSES ROCHA ANTUNIASSI

2 SUMMARY

Chemical application is one of the most important parts of the agricultural production process. The success of this activity depends on several parameters, including the total volume rate, which is directly related to the forward speed. On conventional systems the operator needs to keep constant speed in order to guaranty volume rate uniformity across the field. Aiming more accuracy and general quality of the application, electronic control systems allows automatic flow control against changes on forward speed. The objectives of this work were to develop methods for evaluation of flow control systems linked to DGPS and to analyze the performance of a Satloc Airstar 99.5 flow control system on laboratory and field conditions. The following parameters were evaluated: accuracy of speed measurement on curves and strait line movements; time response for changes on forward speed and pump speed; accuracy on flow rate measurement. Laboratory tests were performed using DGPS simulation software. On laboratory and field tests the flow data from the Airstar 99.5 were compared to data acquired using a pressure sensor and a data logger system. The results showed that the system was accurate to determine forward speed compared to radar and time measurement because there was no statistically significant difference for both strait lines and curves. Time response for changes on forward speed was in average between 6 and 20 seconds. Changes on the total flow rate and on the adjustment of the control algorithm constant had influence on the time response and there were cases of interaction between those factors. There was a tendency of better results on time response using a constant for the

control algorithm different from the one indicated by the manufacturer. The average error was below 2% in all the operational conditions giving good accuracy on the flow rate definition. In terms of methodology all the procedures developed for this work can be considered adequate.

Keywords: flow Control, chemicals, spraying, DGPS, time response

3 INTRODUÇÃO

A produção agrícola está intimamente ligada a expansão do agronegócio. O crescimento das áreas de plantio e, principalmente, o aumento da produtividade têm sido associados ao uso de novas tecnologias. Nos moldes atuais de produção, a aplicação dos agrotóxicos é um fator de contribuição a este aumento. Com a elevação dos custos de produção e a maior competitividade do processo de globalização das economias, além das pressões dos órgãos ambientalistas contra o uso indiscriminado dos agrotóxicos, a correta utilização nas aplicações tem exigido constante atualização e busca de informações cada vez mais aprofundadas dos meios que propiciem o depósito dos produtos nos alvos de forma eficiente e menos agressiva.

Um dos fatores que tem contribuído para aumento da produtividade na agricultura é o emprego de agrotóxicos, os quais têm se mostrado fundamentais para a proteção e preservação do potencial produtivo de culturas agrícolas. Porém, a sua utilização deve ser feita de maneira racional e criteriosa, com mínimo impacto ao ambiente. Nos últimos anos tem havido uma mudança conceitual na utilização destes insumos. No passado, a maioria dos produtos apresentavam elevada toxicidade, grande risco de contaminação e altos volumes aplicados. Hoje, as recomendações técnicas de aplicação de diversos produtos indicam cada vez mais volumes reduzidos. Estas novas formulações, além de apresentarem menor efeito residual no ambiente, permitem que sejam utilizados menores volumes no campo. Assim, a

conscientização da necessidade de preservação ambiental e a aplicação de produtos menos tóxicos e mais eficazes têm exigido um aprimoramento nas técnicas de aplicação.

A aplicação dos agrotóxicos com o uso de máquinas terrestres e aéreas exige cuidados especiais. Muitas pesquisas têm demonstrado que apesar da crescente inovação tecnológica, muitos erros ainda ocorrem nas aplicações, e uma das formas de se tentar minimizar tais erros é o emprego de sistemas avançados de controle para a pulverização.

Mesmo tendo-se todo o cuidado necessário nas calibrações, com o uso de bicos e pontas apropriadas, alterações operacionais no momento das aplicações, (como mudança na rotação da bomba, velocidade de deslocamento das máquinas, obstáculos, e outros) impedem uma maior precisão nas taxas de aplicação. Os controladores de fluxo representam uma das opções para se contornar estas imprecisões. Tais sistemas fornecem, além das indicações dos volumes aplicados, mecanismos que fazem a correção da vazão em função de variações de velocidade, proporcionando maior controle do resultado obtido na aplicação. No caso das aplicações aéreas, a adoção destes controladores de fluxo acoplados ao DGPS, possibilitando autocorreção de fluxo e seu referenciamento nas áreas aplicadas, proporciona melhoria substancial na qualidade e na facilidade de gerenciamento das operações.

O presente trabalho teve como objetivos desenvolver metodologia para avaliação do desempenho de sistemas controladores de fluxo ligados a DGPS e avaliar o desempenho de um controlador de fluxo Satloc Airstar 99.5 em condições de campo e de laboratório, visando determinar características de tempo de resposta e acurácia na definição do fluxo de calda.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 O controle fitossanitário e a agricultura moderna

Os impactos dos agrotóxicos ao ambiente e a saúde humana começaram a ser discutidos mais intensamente no início da década de 60, de acordo com Carson, citado por Werf (1996). A cada ano, 2,5 milhões de toneladas de agrotóxicos são aplicados na agricultura mundial. No entanto, a quantidade de produtos que realmente é depositada diretamente em contato com o alvo é muito pequena. O autor, citando Pimentel, relata que diversos estudos mostram que em alguns casos menos de 0,3 % das aplicações são depositados no alvo e 99,7 % são direcionados para algum local do ambiente.

Segundo Coelho (2002), a expansão agrícola brasileira esteve sempre atrelada a questão do desenvolvimento do agronegócio no Brasil, acompanhada do crescimento da produção de grãos, iniciado em larga escala a partir de meados da década de 1960. Antes, a economia agrícola brasileira era caracterizada pelo predomínio do café e do açúcar, e a pouca importância que se dava ao projeto de se utilizar a imensa base territorial brasileira na produção de grãos. A produção de alimentos básicos, como milho, arroz e feijão era voltada para a subsistência, e os poucos excedentes dirigidos ao mercado eram insuficientes para formar uma forte cadeia do agronegócio dentro dos moldes hoje conhecidos. Moraes (2002) ressalta que na balança comercial brasileira, o agronegócio gerou um superávit de US\$ 21 bilhões em 2002.

Coelho (2002) destaca que o notável crescimento da produção de grãos, principalmente de soja, foi a força motriz no processo de transformação do agronegócio brasileiro e seus efeitos dinâmicos foram logo sentidos em toda a economia. Inicialmente, surgiu um imenso parque industrial para a extração do óleo e do farelo de soja e de outros grãos.

Para Coelho (2002), a disponibilidade de grande quantidade de farelo de soja e milho permitiu, o desenvolvimento de uma moderna e sofisticada estrutura para a produção de suínos, aves e leite, bem como a instalação de grandes frigoríficos e fábricas para a sua industrialização. Foi criado também um sistema eficiente de suprimento de insumos modernos (fertilizantes, agrotóxicos, maquinários agrícolas etc) e uma rede de distribuição que inclui desde as grandes cadeias de supermercados até os pequenos varejistas locais.

Inicialmente calcado na expansão da área cultivada, principalmente nas regiões de fronteira, a partir da década de 1990 o crescimento da produção, em bases competitivas, passou a depender cada vez mais da adoção de novas tecnologias no processo produtivo.

Ainda segundo Coelho (2002), a política agrícola adotada a partir de 1995 foi a de combinar, de forma eficiente, a utilização de instrumentos econômicos como o crédito rural e os programas de suporte à comercialização com instrumentos estruturais como a pesquisa agropecuária. O crédito rural oficial foi reformulado para estimular uma participação maior do setor privado. As dívidas anteriores foram securitizadas e a estrutura governamental de apoio à comercialização passou por profundas mudanças com a criação de instrumentos mais modernos e menos intervencionistas. Na pesquisa agropecuária foram adotadas várias medidas para torná-la mais afinada com o mercado e portanto mais objetiva em termos de áreas a serem pesquisadas e de produtos a serem desenvolvidos. Tal esforço foi decisivo para que o Brasil elevasse sua safra de grãos de 73,5 milhões de toneladas, em 1995, para 98,3 milhões de toneladas, em 2001.

A produção brasileira de grãos aumentou 32%, no período, enquanto que o crescimento da área cultivada foi de apenas 2,9%, conforme pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1. Produção agrícola de grãos de 1995 a 2001.

Produção Brasileira de Grãos (Mil Toneladas)						
	1995/96	1996/97	1997/98	1998/99	1999/00	2000/01
Algodão	761,6	524,0	763,4	923,8	1.187,4	1.521,9
Arroz	10.037,9	9.546,8	8.462,9	11.582,2	11.533,8	10.386,0
Feijão	2.992,7	2.969,0	2.206,3	2.870,8	3.079,8	2.587,1
Milho	32.644,6	36.166,8	30.187,8	32.417,2	31.640,8	41.535,2
Soja	23.189,7	26.160,0	31.369,9	30.765,0	31.886,6	37.218,3
Trigo	3.197,5	2.402,3	2.187,7	2.402,8	1.747,7	3.194,2
Outros	934,7	1.149,5	1.351,8	1.475,4	1.710,6	1.869,0
Total	73.758,7	78.918,4	76.529,8	82.437,2	82.786,7	98.311,7

Fonte : Coelho, 2002

De acordo com Cardoso & Ferreira (2002), as projeções para safra brasileira de 2003 pelo Ministério da Agricultura deverá atingir 105 milhões de toneladas, volume 6,5% superior aos 98,693 milhões de toneladas colhidas na safra 2001/02. O Ministério da Fazenda estima uma produção de 107 milhões de toneladas e empresas de consultorias apostam em uma safra ainda maior. A Agroconsult, por exemplo, prevê 110,5 milhões de toneladas, um aumento de 10,8% em relação ao período de 2001/2002. A consultoria leva em consideração os dados do mais recente levantamento do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que estimou a safra passada em 99,8 milhões de toneladas. A agropecuária vem garantindo seu bom desempenho por meio de ganhos constantes de produtividade. Na área de grãos, a produtividade cresceu 62% entre 1990 e 2002.

A aviação agrícola, de acordo com o sindicato das empresas operadoras de aviação agrícola (Sindag, 2002), foi responsável pela aplicação em 10 milhões de hectares com os produtos fitossanitários em 2002. Estes valores, no entanto, ainda são muito pequenos se comparados com os EUA, que com uma frota estimada de 6000 aviões e 400 helicópteros pulverizou uma área superior a 121 milhões de hectares em 2002. A expansão de novas fronteiras agrícolas e o aumento da produtividade agrícola brasileira

indicam a necessidade de um aumento substancial no uso de aeronaves agrícolas nas aplicações dos produtos químicos.

A evolução tecnológica da indústria tem proporcionado o surgimento de novos equipamentos, os quais são mais eficientes e possibilitam a correta avaliação e monitoramento dos volumes aplicados. Nos últimos anos a adoção destas medidas contribuíram para a implementação dos conceitos da agricultura de precisão.

4.2 Agricultura de Precisão

Mantovani et al. (1998) definem agricultura de precisão, como sendo a tecnologia cujo objetivo consiste em aumentar a eficiência, com base no manejo diferenciado de áreas na agricultura. É uma tecnologia que se encontra em constante desenvolvimento, modifica as técnicas existentes e incorpora novas técnicas, fornecendo informações aos especialistas em manejo agrícola. Integra significativamente a computação, a eletrônica e elevados níveis de controle. Os autores salientam que a agricultura de precisão não consiste simplesmente na habilidade em aplicar tratamentos que variam de um local para local, mas deve ser considerada como a habilidade em monitorar e acessar a atividade agrícola, precisamente em um nível local, devendo-se ter uma completa compreensão sobre o processo, favorecendo a aplicação de modo a atingir um determinado objetivo como uma forma de manejo sustentável.

A agricultura de precisão constitui uma ferramenta de grande potencialidade, que proporcionará ao agricultor o mapeamento do solo, de aplicação de insumos e das atividades de colheita, considerando a área de um modo diferenciado, a fim de racionalizar o uso dos insumos e o consumo de energia (Mantovani et al., 1998).

Ao contrário da agricultura tradicional, a chamada agricultura de precisão busca focar a variabilidade espacial e temporal das necessidades de aplicação de insumos durante o processo produtivo (Ulson, 2002).

Mantovani et al. (1998) destacam que alguns sensores medem o fluxo volumétrico (volume por unidade de tempo), enquanto outros medem o fluxo de massa (massa por unidade de tempo), e definem controladores como sendo dispositivos que comandam as decisões de variação da taxa de aplicação das máquinas. Neste particular, uma das fontes de

erros nos sistemas de taxa de aplicação variável é o tempo em que o sistema leva desde o momento do recebimento da informação do valor de uma nova taxa de aplicação até o momento em que o produto chega efetivamente na cultura e local desejado para aplicação.

Frost (1990) ao avaliar um sistema de aplicação do tipo taxa de aplicação variável, com água e defensivos agrícolas colocados em tanques separados, misturados em uma bomba de membrana, dosados por outra bomba e daí levados para os bicos, encontraram que o tempo de atraso variava de três a oito segundos nas aplicações terrestres. Entre as sugestões apresentadas pelos autores para a redução desse tempo de atraso em aplicadores de defensivos agrícolas, estão: aumentar a taxa de fluxo, reduzir o diâmetro da mangueira na barra de pulverização e diminuir a dependência da liberação do produto em função da velocidade de avanço da máquina.

Outra falha também bastante possível em aplicações pode ser a variabilidade da deposição do produto sobre o solo ou folhagem da cultura ou planta daninha. Koo & Summer (1998) destacam que os agrotóxicos devem ser aplicados com uma taxa correta, e que estes devem atingir satisfatoriamente os resultados contidos nos rótulos dos produtos. Salienta que muitos dos resultados insatisfatórios nas aplicações são devidos principalmente a calibração inadequada, mau funcionamento ou equipamento impróprio e imprecisão na velocidade de avanço dos pulverizadores (Cupery; Grisso et al., citados por Koo & Summer, 1998).

A agricultura de precisão, segundo Saraiva & Cugnasca (1998), representa um novo paradigma de gerenciamento agrícola, e se baseia no conhecimento e na consideração da variabilidade espacial e temporal dos fatores de produção e da própria produtividade. Neste sentido, tem sido também apontada como premissa para sua adoção com vantagens econômicas e ambientais, sendo possível aplicar em cada ponto do terreno apenas os produtos efetivamente necessários, nas quantidades e no momento especificamente determinados, além de ser um sistema integrado.

De acordo com Balastreire (1998), a agricultura de precisão está fundamentada na existência da variabilidade espacial dos fatores produtivos e na caracterização dessa variabilidade. Citando texto de Searcy, apresenta o caso de aplicações de calcário em uma única dosagem no nordeste do Texas, onde 12% da área aplicada recebeu superdosagens e 37%. Ainda, exemplifica as vantagens da aplicação localizada, com o uso de

nitrogênio na cultura de algodão no Texas, assumindo que o campo tenha 10% da área com excesso e 20% com falta de nitrogênio. Destaca ainda que a perda devida a adubação incorreta seria de US\$ 338 para uma área de 100 acres, (40,47 ha) e que mesmo que a utilização da aplicação localizada provocasse um acréscimo de custo de 50% o lucro líquido ainda seria da ordem de US\$ 1,88/acre, (US\$ 4,64/ha). Além desse retorno salienta que uma aplicação otimizada de nitrogênio poderia reduzir a possibilidade de poluição de água subterrâneas.

4.3 Sistema de posicionamento global (GPS)

Danna, citado por Rocha & Lamparelli (1998), descreve vários sistemas de marcação referencial que foram utilizados pelo homem, desde marcações com pedras, orientações por estrelas, até os sistemas atualmente empregados de posicionamento baseando-se em satélites de grande confiabilidade, chamado de Sistema de Posicionamento Global (GPS-Global Positioning System). O sistema GPS (NAVSTAR), criado pelo Departamento de Defesa dos EUA (DoD) na década de 70, tornou-se inteiramente operacional na década de 90.

De acordo com Lechner & Baumann (2000), o sistema de posicionamento global tornou-se disponível para uso na iniciativa privada em 1995, com a introdução dos sistemas NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging-Global Positioning System) e GLONASS (Globaluaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema).

O sistema NAVSTAR foi constituído por 24 satélites, sendo 3 de reserva específicos para o sistema GPS, dispostos de tal maneira que, a qualquer hora e em qualquer lugar do mundo pelo menos 4 satélites estarão disponíveis para utilização, utilizando-se de código C/A (Course Aquisition ou Clear Aquisition) e com a fase portadora (L1 e L2).

Hurn (1989) apresenta uma noção bastante clara sobre a forma de funcionamento dos sistemas de GPS (Sistema de posicionamento global), na qual discute inicialmente que a idéia básica é fundamentada no raio de ação dos satélites, através do qual é possível descobrir uma posição na terra medindo-se esta distância a partir de um grupo de satélites. Empregando receptores com exatidão da ordem de 1 nano segundo (0,000000001 s) e utilizando-se de sistemas de identidade de codificação pseudo-randômica, é possível

quantificar as distâncias. As identificações para determinação das posições, são corrigidas por meio de sinais transmitidos pelos satélites para ajuste pontual com precisão, fornecidos pelo departamento de defesa norte-americano, através do rastreamento dos equipamentos em comunicação com os satélites.

Veal et al. (2001) observa que o usuário do sistema GPS deve ter um receptor para interpretar os sinais de rádio enviados por uma constelação de satélites em órbita da terra. A interpretação destes sinais podem ser utilizados para calcular a latitude, longitude e nível (altitude) do receptor GPS. O receptor GPS pode também ser usado para a determinação de posições estacionárias ou movimento dos objetos em muitos locais do mundo durante 24 horas. Considerando os benefícios de obtenção dos dados das máquinas em movimento e da tecnologia disponível através do GPS, há a necessidade de se determinar a acurácia e a consistência do GPS. O autor salienta que resultados de acurácia do GPS em condições estáticas de florestas tem sido apresentadas, porém há poucos dados disponíveis da acurácia do GPS em condições dinâmicas dos veículos.

Danna, citado por Rocha & Lamparelli (1998), esclarece que receptores com código C/A, permitiam uma acurácia de 25 metros. Devido a política de limitar a utilização desta ferramenta implantada em 1992 pelo DoD, foi introduzido um erro proposital ao sistema, chamado de disponibilidade seletiva (AS – Selective Availability) que aumentava o erro da medida para 100 metros e que para se melhorar esta acurácia, era necessário a aplicação da chamada correção diferencial. Essas correções podiam ser ajustadas para níveis que variavam de 1 a 5 metros no código C/A e até milímetros nas fases portadoras L1 e L2.

Em maio de 2001 o governo americano suspendeu a disponibilidade seletiva. A disponibilidade seletiva consistia em um erro artificial criado pelo sistema de defesa americano, e isto motivou a criação do DGPS (sistema de posicionamento global diferencial), ampliando os níveis de precisão dos sistemas. No entanto, os sinais de correção ainda são gerados e utilizados pela grande maioria dos operadores. Apesar da retirada da disponibilidade seletiva, o sistema de GPS ainda sofre interferências devido a erros de efemérides, marcação dos horários, condições ambientais na ionosfera e troposfera, o que faz

com que os sinais diferenciais de correção ainda devam ser aplicados visando manter os altos níveis de acurácia (Satloc 2002).

Veal et al. (2001) estudando a acurácia do GPS na coleta de dados em máquinas em movimento em florestas e avaliando os efeitos de tipos de GPS, tipo de vegetação e a acurácia na velocidade das máquinas, observaram erros de posicionamento sob a copa de árvores da família das coníferas de até 6,4 m quando comparados com as coordenadas obtidas com o uso de teodolitos. Concluíram que os sinais de microondas utilizados pelo GPS podem sofrer influências pelo tipo de vegetação. Isto foi também observado por Spruce et al., citado por Veal et al. (2001). Nos ensaios de avaliação dos efeitos da retirada da disponibilidade seletiva verificaram que a desativação tem pouco efeito na acurácia de posicionamento do GPS nos dados pós processado.

Stafford (1995) esclarece que como a constelação dos satélites está em contínua mudança, a visibilidade, a posição provável e a resolução obtida varia espacialmente e temporalmente. Este efeito de geometria do satélite é expressado através de um fator denominado de diluição de precisão (DOP). Baixos valores de DOP indicam melhores geometrias. O valor de DOP pode ser calculado através do conjunto dos sinais de satélites que estão sendo recebidos. Quando há mais do que 4 satélites visíveis o valor de DOP é mínimo, o que traduzirá na melhor qualidade de referenciamento.

No início de 2002 foi lançado no mercado um novo sistema com auto correção dos sinais com o objetivo de manutenção da precisão. Este sistema, denominado de E-Dif, apresenta como característica principal, a modulação de sinais, uma redução de custos e a possibilidade de operação em regiões aonde haja ocorrências de variações de sinais.

Para superar a dependência militar no controle dos sinais de satélite, e atender o interesse crescente principalmente na área agrícola “precision farming” de acurácia e níveis de precisão nas operações da máquinas em tempo real, com acurácia de 1 cm na horizontal, 3 cm na vertical e acima de 0.1° em aquisições de 1 Hz., desde 1999, a comunidade civil europeia desenvolve um projeto de orientação espacial por satélite denominado de projeto Galileo cujo início das operações deverá ocorrer em 2008 (Lechner & Baumann, 2000).

Como exemplo da importância da acurácia do DGPS nos sistemas de aplicação de defensivos, Vetter (1996), utilizando-se uma câmara de vídeo, verificou desvios na ordem de 0,33 m do centro das faixas de aplicação em 50% das vezes nas aplicações efetuadas e de 90% em todo o tempo de pulverização.

4.4 Eletrônica embarcada em equipamentos de aplicação

Montalescot (1990) aborda que a eletrônica e a robótica tem promovido uma verdadeira revolução na agricultura e que isto tem proporcionado uma melhoria na eficiência de trabalho.

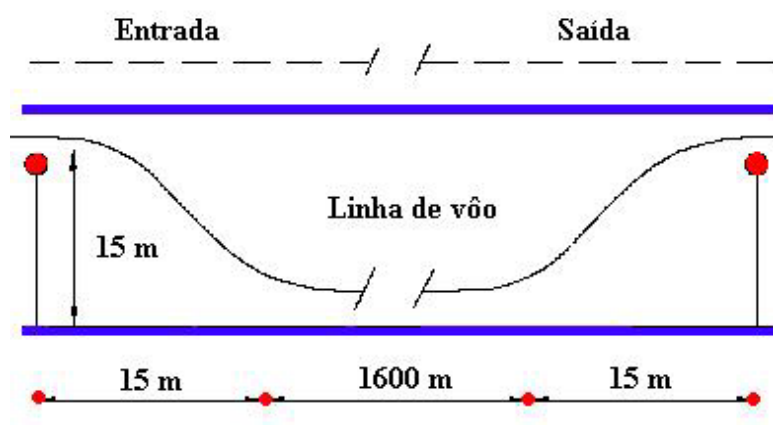
In Cho & Lee (2000), estudando operações automatizadas de pulverizadores em pomares, verificaram que os sistemas em condições de campo, podem ser automaticamente operados com desvios de até 50 cm e que a utilização conjunta do sistema DGPS, utilizada para determinação da direção de trabalho e sensores ultrassônicos para detecção de obstáculos nas operações automatizadas é satisfatória.

Estudos realizados por Al-Gaadi & Ayers (1993), sobre a eficácia de aplicação de defensivos em campo com e sem sistema de controle de aplicação mostraram que a falta de acurácia nos sistemas de aplicação sem controle ocasionaram gastos em torno de 1 bilhão de dólares em 1980 aos agricultores do Estado de Nebraska (EUA). Neste trabalho, mostraram também que as aplicações de defensivos tem sido efetuadas com taxas de aplicação ora acima, ora abaixo dos volumes requeridos, ocasionando prejuízos e contaminação ambiental.

De acordo com Steward & Humburg (2000), trabalhos desenvolvidos pelo Economic Research Service, indicavam que em 1997 somente os EUA gastaram US\$ 8,8 bilhões com os produtos químicos, e que 70% destes foram gastos com herbicidas. Ressaltam que o uso dos produtos tem representado um custo adicional no processo de produção agrícola, havendo evidências que muitos dos produtos químicos utilizados estão sendo aplicados com taxas erradas. Isto ocorre apesar do Departamento de Agricultura dos EUA (USDA), recomendar que os erros nas taxas de aplicação não devam ser superiores a 5%. Neste sentido, os autores citam que diversos pesquisadores como Rider & Dickey; Ozkan, e Grisso et al. comumente têm encontrado erros superiores a este. Steward & Humburg (2000)

consideram também o desenvolvimento de sistemas de controle eletrônico como sendo um método para redução de erros nas taxas de aplicações.

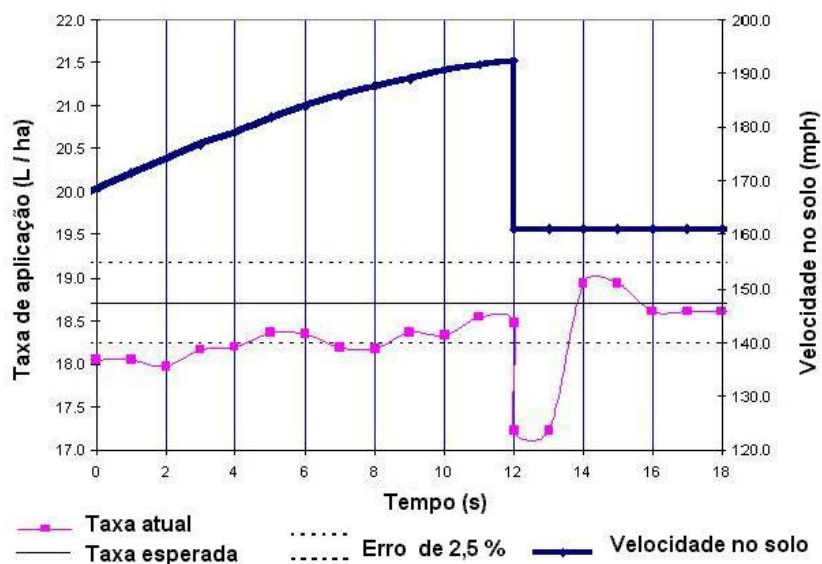
Em aplicações aéreas, Kirk & Tom (1996a) estudaram o comportamento dos níveis de aplicação de uma aeronave Cessna AgHusky em condições de aplicação em campo, com e sem a adoção de um sistema controlador de fluxo acoplado ao DGPS. O trabalho foi realizado sobre um terreno com extensão de 1600 m, tendo “obstáculos” (rampas) de 15 m no início e final de cada faixa aplicada. A aeronave foi calibrada para aplicações com taxas de 28 e 47 l/ha, sendo equipada com bicos do tipo CP, operando a 30 psi (207 kPa) e um sistema de aquisição de dados do tipo CR 21X (Campbell) programado para registros de 1 Hz. Neste trabalho, obtiveram média de erros para as taxas de aplicação nos tratamentos sem o controlador de fluxo de 9,6%, em comparação à faixa de 0 a 4,3% com o sistema controlador de fluxo em funcionamento. Ainda, a faixa de erros entre 6,4 a 14,3% ocorreu quando as taxas de aplicação foram baseadas na velocidade em relação ao solo, sem o uso do controlador (Figura 1).



Fonte: Kirk & Tom (1996)

Figura 1. Croqui para estudo de simulação das linhas de voo em condições de campo, com o uso do controlador de fluxo.

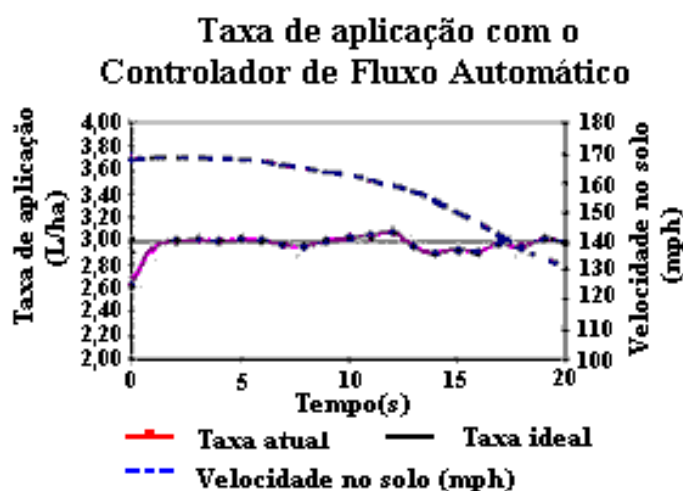
Kirk & Tom (1996a), simulando os efeitos de mudanças bruscas de velocidade na entrada e saída de áreas de aplicação, estudaram em condições de laboratório, estudaram a resposta do controlador de fluxo com DGPS (Satloc Airstar/Forestar) acoplado a um computador e a uma bomba centrífuga com vazão de 227 L/min e válvula de controle com derivação de 3 vias. Variações de velocidades em relação ao solo foram geradas e controladas através de um computador e foram introduzidas no sistema com uma amplitude sinusoidal entre 80 e 120 mph (35,8 e 53,6 m/s) em um período de 25 s. O estudo permitiu ação do controlador de fluxo na trajetória de velocidade de solo em 2 períodos completos. Mudanças de velocidade foram executadas de forma instantânea, alterando de 120 mph (53,6 m/s) para 100 mph (44,7 m/s) num terceiro período. Os resultados observados na Figura 2, mostram para mudanças bruscas de velocidade que a frequência de resposta do controlador de fluxo foi de 1,5 s para atingir a taxa de aplicação desejada, com erros de 2,5 % e de 4 s para erros inferiores a 0,5%.



Fonte: Kirk & Tom (1996)

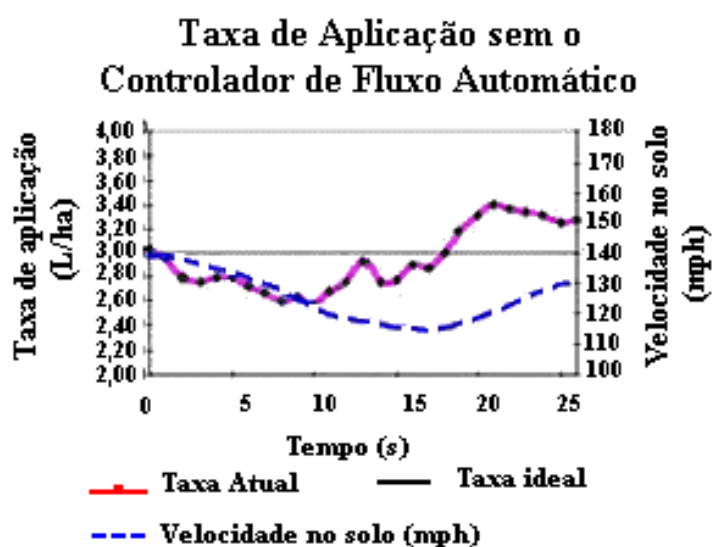
Figura 2. Resposta do controlador de fluxo no controle da taxa de aplicação com variação e mudanças bruscas de velocidade em relação ao solo.

Satloc (2002) apresenta resultados onde observa-se variações de menos (-) 1,8% entre os volumes aplicados e os pretendidos, quando o sistema de controle de fluxo está atuando e 7,2% quando o controlador de fluxo está desativado (Figuras 3 e 4).



Fonte : Satloc 2002

Figura 3. Ação do controlador de fluxo na correção de vazão



Fonte : Satloc 2002

Figura 4. Variação nas taxas de aplicação sem correção do controlador de fluxo.

Smith (2001), estudou 2 versões de sistemas controladores de fluxo para utilização em aeronaves agrícolas, um com a correção da vazão diretamente através da válvula da barra de pulverização (Autocal I) e o outro com correção indireta, através do ajuste da válvula de controle “by pass” localizada entre a bomba e a saída e entrada de líquido (Autocal II). O autor encontrou erros máximos entre 1,55% e 3,2% para o sistema Autocal I. Para o sistema Autocal II, as variações de erros foram de 0,64 a 1,60%. Neste trabalho, os resultados encontrados indicaram que o tempo gasto pelos controladores para reduzir os erros a valores inferiores a 37% foi de menos de 0,5 s.

Estudo feito por Smith citado por Smith (2001), avaliando um controlador de fluxo automático semelhante ao Autocal I, utilizando-se uma combinação de anotações de vôo e volumes atuais de aplicação com água, com 19 l/ha sobre uma área demarcada de 40 ha, revelou um erro de 0,48%. Na mesma área, uma aplicação sem o uso de controlador de fluxo resultou em erro de 7,25%.

Smith (2001) observa que a variabilidade da velocidade em relação ao solo é uma fonte de erros nas aplicações, quando as aeronaves não dispõem de controladores automáticos de fluxo. O uso dos controladores automáticos de fluxo mantém corretas as taxas de aplicação e eliminam muito destes erros. Normalmente, as aeronaves são calibradas para uma aplicação específica, combinando a velocidade de vôo em relação ao solo e a pressão de trabalho.

O ajuste da pressão na barra, típica nas aeronaves agrícolas é obtido controlando o posicionamento da alavanca de comando de abertura da válvula de controle (by pass). Nas aplicações, as aeronaves agrícolas se deslocam em alta velocidade, muito próximas ao solo, sendo impraticáveis variações da pressão de trabalho ou modificação da rotação do motor. Por esta razão, se a velocidade ou direção do vento mudar em relação ao que foi verificado durante o processo de calibração, a taxa atual de aplicação modificará, conseqüentemente.

Ainda segundo Smith (2001), diversos fatores afetam a acurácia da aplicação, incluindo a velocidade aerodinâmica, velocidade do solo, alinhamento de faixa, etc. Em aeronaves com sistemas de aplicação com bomba de acionamento eólico, mudanças na velocidade de vôo tem um efeito na rotação da bomba. Além disso, a velocidade da aeronave em relação ao solo varia consideravelmente devido ao vento. Com ou sem vento, a velocidade

do ar em torno da aeronave é igual a velocidade de vôo indicada no painel, mas o vento a favor ou contrário à direção do vôo aumenta ou diminui a velocidade em relação ao solo (vento de cauda e vento de proa modificam a velocidade de deslocamento em relação ao solo). Como exemplo, o autor discute que se uma aeronave estiver voando a 135 mph (217 km/h) e se houver um vento de proa com intensidade de 10 mph (16 km/h), a velocidade em relação ao solo será de 125 mph (201 km/h); se este vento for de cauda, então a velocidade indicada será de 145 mph (233 km/h). Esta diferença em relação ao solo, segundo o autor, causará uma diferença na aplicação de 14,8% nas taxas de aplicação entre as diferentes posições, o que reforça a idéia de se usar os controladores de fluxo automático.

Portanto, nas aplicações aéreas tradicionais, a variação na velocidade ocasiona falhas na aplicação, por isso é fundamental em aeronaves que não possuam controladores de fluxo automático que a velocidade de vôo permaneça constante, independente da direção de vento.

Smith (2001) citando Steckel et al., observa que recomendações e métodos atuais de aplicações para a proteção de plantas indicam que deva haver consistência na uniformidade da aplicação no campo e nas condições ambientais, e que pesquisas têm demonstrado que a redução nas taxas de aplicação de herbicidas podem proporcionar controle semelhante a aplicações de doses “cheias”. Em aplicações aéreas com taxas de aplicação total, feitas paralelas a direção do vento (aplicações a favor e contra o vento), sem o uso de controladores de fluxo, resultaram na redução das taxas de aplicação em 50% da área e sobretaxa no resto do campo.

Frost (1990) recomenda, ainda, que os sistemas controladores de fluxo devem compensar as mudanças na resistência de fluxo em função da restrição de válvulas, ou da variação de viscosidade dos produtos, causados por mudanças na temperatura durante o processo de aplicação.

Estudos feitos por Giles & Comino (1990) sobre os atuadores dos sistemas de controle de pulverizadores, indicam que estes deveriam afetar somente o fluxo de calda nas pontas e não o espectro de gotas ou o padrão da pulverização. Ressaltam ainda os autores que o uso de válvulas controladoras para variação do fluxo nos bicos, acima dos limites estabelecidos para uma determinada ponta, resulta em distorções no tamanho de gotas e no padrão de distribuição. Verificou-se em testes de laboratório que bicos de jato cone cheio

foram os mais afetados quando comparados aos de jato plano. Afim de se evitar tais alterações, recomendações indicam que a variação não deverá ser maior que 25% da pressão utilizada.

De acordo com Denning, citado por Giles & Comino (1990) o DMV (diâmetro mediano volumétrico) de uma pulverização produzida através da válvula “by pass” na ponta decresce de 398 para 125 μm quando ocorre um aumento de vazão da ordem de 2 para 7 l/min.

De acordo com Rider & Dickey (1982), nas instruções contidas no guia para aplicadores comerciais publicados pela USEPA e USDA em 1975, os erros nas taxas de aplicações recomendadas deveriam estar dentro do intervalo de $\pm 5\%$.

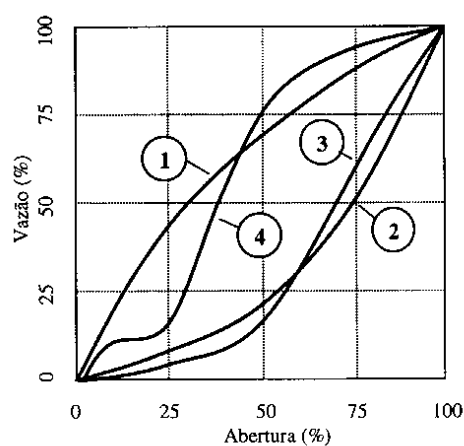
Estudando as taxas de aplicação em trabalhos de 152 operadores no Estado de Nebraska/USA, Rider & Dickey (1982) verificaram que somente 4 operadores possuíam equipamentos que atendia as especificações requeridas, e que mais de 90% estavam com os equipamentos que aplicavam taxas acima das especificadas, sendo que o coeficiente de variação médio de uniformidade entre bicos foi de 21,9%. Observaram também que a maior fonte de erro foi devido a calibração (76,3% das situações). Os autores citam que em estudos conduzidos na Inglaterra através de ADAS mostravam que metade dos cooperados apresentavam erros de aplicação maior do que 10%.

Gandolfo (2001), estudando a performance de pulverizadores terrestres nas condições brasileiras, encontrou variações significativas que comprometem a qualidade das aplicações, com erros médios de dosagem de 86,8% entre os equipamentos analisados, o que confirma a necessidade de controle apurado dos fluxos nos equipamentos.

Segundo Hughes & Frost (1985), o aumento do uso e dos custos de produtos químicos aplicados nas culturas têm demandado o emprego de aplicações monitoradas e controladas para reduzir erros de distribuição, em particular em aplicações com baixos volumes, em que ocorrem altas concentrações de ingrediente ativo. A acurácia total atingida pelos sistemas controladores é dependente da acurácia de suas partes constituintes, e a tendência de maiores velocidades e redução de volume aplicados aumentará a necessidade de maior acurácia da instrumentação.

4.5 Atuadores para controladores de pulverização

De acordo com Ulson (2002), a ação de controle de sistemas de medição de vazões eletromagnéticos está confiada a uma válvula de controle compostas de dois conjuntos básicos (corpo e atuador). O corpo das válvulas de controle é o conjunto de elementos fixos e móveis em contato direto com o produto a ser controlado. O autor salienta que conforme o arranjo construtivo desses elementos, surgem diversos tipos e características de operações. Para a utilização no sistema de controle proposto, deve-se empregar válvulas com o corpo e elementos internos endurecidos, para minimizar o desgaste por abrasão. Destaca ainda, como um dado importante numa válvula de controle o conhecimento da curva característica que relaciona a vazão e a abertura da mesma, pois demonstram afetar diretamente o comportamento e o projeto dos sistemas de controle. Também ressalta que as tais características de vazão inerentes sofrem modificações em função do sistema hidráulico ao qual está instalada, bem como do regime de escoamento do líquido e ponto de operação do sistema como um todo. A Figura 5 ilustra as características de vazão inerentes para a água a 25° C e no Quadro 2 é apresentado o campo de aplicação das principais válvulas de controle.



Fonte: Ulson (2002)

Figura 5. Curvas características de vazões inerentes de válvulas de controle. 1 – válvula globo “on-off”; 2 – válvula globo igual porcentagem; 3 – válvula borboleta; 4 – válvula esfera

Segundo Ulson (2002), os dispositivos atuadores efetuam a ação mecânica sobre a válvula em resposta ao sinal de controle emitido pelo controlador. Os atuadores podem ser biestáveis (abre-fecha) ou contínuos, podendo ambos desenvolver movimentos translacionais ou rotativos. No Quadro 3 é apresentada a comparação entre os diversos tipos de atuadores para válvulas de controle.

Quadro 2. Tipos e curvas características de algumas válvulas de controle de fluxo, com suas respectivas aplicações.

Tipos de válvula de controle	Curva característica	Aplicação e características
Globo	"On-off"	Controle de sistemas com grande capacitância; líquidos isentos de partículas em suspensão; alto custo; acionamento linear.
	Igual porcentagem	Comumente empregada nos sistemas de controle de processo de pequena capacitância e banda proporcional larga; líquidos isentos de partículas em suspensão; alto custo; acionamento linear
	Linear	São utilizadas nos sistemas onde a perda de carga através da válvula representa a maior parte da perda de carga do sistema; líquidos isentos de partículas em suspensão; alto custo; acionamento linear
Diafragma	"Saunders" ¹	Líquidos com partículas em suspensão; baixa sensibilidade acima dos 30% de abertura; curva característica muda com deformações no diafragma; alto custo; acionamento linear.
Borboleta	Semelhante à igual porcentagem	A curva característica é muito influenciada pela perda de carga da tubulação; fabricada para diâmetro acima de 2", alto custo, acionamento rotativo.
Esfera	Curva "S"	Comumente empregada nas operações de interrupção de fluxo e controle de sistemas com grande capacitância devido à acentuada não linearidade; líquidos isentos de partículas em suspensão; baixo custo; acionamento rotativo

¹ Fabricante que patenteou o dispositivo

Fonte : Ulson (2002)

Quadro 3. Comparação entre os tipos de atuadores típicos para válvulas de controle.

Vantagens	Desvantagens
Diafragma e mola	
Baixo custo; simplicidade	Grande dimensão
Manutenção simples	Necessidade de suprimento de ar
Opera sem necessidade de servoposicionador	Necessidade de interface elétrica/pneumática
Ação segura no caso de falhas	Operação lenta (abertura total: > 2,5 s)
Pistão pneumático	
Grande capacidade de torque/força	Alto custo, baixa precisão
Compacto, porém pesado	Requer servoposicionador
Operação rápida (abertura total: < 1,0 s)	Necessidade de suprimento de ar à alta pressão
Mecanicamente robusto	Necessidade de interface elétrica/pneumática
Motor Elétrico	
Baixo custo	Operação lenta (abertura total: > 3,5 s)
Grande capacidade de torque	Requer servoposicionador
Compactos, leves, grande precisão	Folgas no redutor mecânico ("backlash")
Manutenção simples e de baixo custo	Mecanicamente pouco robusto
Hidráulicos	
Grande capacidade de torque/força	Alto custo
Extremamente rápidos (abertura total: < 0,6 s)	Exige suprimento de fluido hidráulico sob pressão
Manutenção complexa e cara	Requer servoposicionador
Fonte: adaptado de Considine, por Ulson (2002)	

Ainda segundo Ulson (2002), na maioria dos equipamentos agrícolas são empregados atuadores elétricos e hidráulicos, visto que muitas destas máquinas não dispõe de suprimento de ar comprimido para o acionamento de atuadores pneumáticos. O tempo necessário para abertura total da válvula de controle varia de 0,3 a 0,6 segundos para atuadores hidráulicos e é acima de 3,5 segundos para atuadores elétricos. O autor cita também que outro aspecto importante é a folga mecânica ("backlash") nos acoplamentos mecânicos e multiplicadores de velocidades mecânicos. As consequências para o sistema de controle são as instabilidades marginais e o tempo morto demasiadamente grande se esse inconveniente não for devidamente tratado.

4.6 Transdutores para controladores de pulverização

4.6.1 Transdutores de pressão

A taxa de fluxo em uma aplicação pode ser verificada indiretamente medindo-se pressão nos bicos com o uso de transdutores, ou diretamente por medidores de fluxo. Segundo Werneck, citado por Gadanha Junior (2000) o transdutor é um sistema que produz um sinal elétrico de saída proporcional à quantidade física a ser medida e o sensor é apenas a parte sensível do transdutor, diretamente responsável pelo valor da quantidade medida.

Segundo Ismail et. al (1998), os transdutores de pressão com saída elétrica são mais adequados que os transdutores de saída mecânica, particularmente para medições dinâmicas, a longa distância, gravação e registro contínuo de pressão, etc. Existem vários tipos de transdutores elétricos e a maioria deles dependem da deformação de um elemento elástico como diafragma, fole, tubo de Bourdon ou a combinação destes. A deformação ou movimento destes elementos é transformada em saída elétrica por um ou mais métodos: contato resistivo móvel (potenciômetro), strain-gages, capacitivo, piezoelétrico, magnético e outros.

O transdutor de resistência variável é um dispositivo muito comum, o qual 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. Este dispositivo converte um deslocamento linear ou angular em um sinal elétrico; contudo, por meio do uso de métodos mecânicos, é possível converter um deslocamento, de modo que este dispositivo também possa ser útil nas medições de força e pressão, (Ismail et. al, 1998). Geralmente a mudança nas dimensões do elemento elástico é usada para movimentar o contato sobre um fio ou reostato. 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. Um transdutor de contato móvel típico é mostrado na Figura 6. O circuito do potenciômetro é usado para medir a voltagem através do reostato.

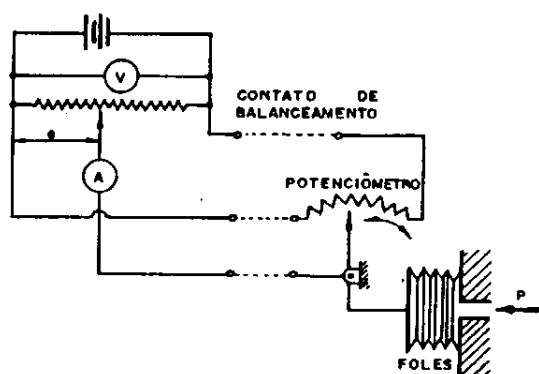


Figura 6. Circuito com potenciômetro (Fonte: Ismail et. al., 1998).

No caso de medida de pressão, o elemento sensível da resistência pode adquirir diversas formas, dependendo do arranjo mecânico. Na Figura 7. é mostrada uma unidade operada com foles de pressão acoplados a uma resistência móvel de contato.

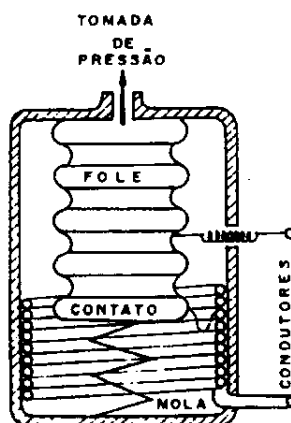


Figura 7. Transdutor de resistência variável com foles de pressão (Fonte: Ismail et. al., 1998).

Na Figura 8. é mostrada uma unidade com diafragma que altera a resistência da bobina de acordo com o valor da pressão. O tubo de Bourdon pode também ser usado como elemento sensor.

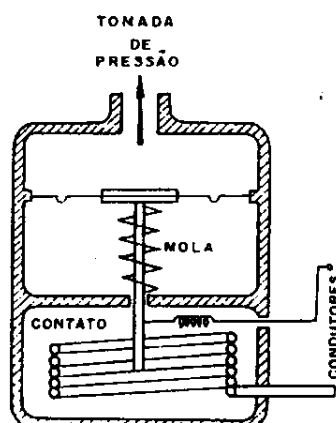


Figura 8. Transdutor de resistência variável com diafragma (Fonte: Ismail et. al., 1998).

Segundo Ismail et. al (1998), as faixas de transdutores potenciométricos podem ser classificadas como baixas (até 100 psi ou 689.5 kPa), média (de 100 a 350 psi, ou seja, de 689.5 a 2413.2 kPa) e alta (acima de 350 psi ou 2413.2 kPa). Esta classificação é relacionada ao tipo de sensor elástico utilizado. Foles e cápsulas são usadas para a faixa baixa. Os tubos de Bourdon são utilizados na faixa mais alta. Óleo de amortecimento é usado para reduzir os efeitos da vibração mecânica. A maioria dos elementos de resistência são fios mas, recentemente, filmes de carbono ou plástico condutivo estão sendo utilizados. O filme de carbono pode atingir resolução infinita, curto comprimento eliminando a necessidade de braços de contato.

Ismail et. al (1998) descrevem os transdutores piezoelétricos como baseados no fato de certos cristais quando mecanicamente pressionados ao longo de planos específicos de tensões produzir uma carga eletrostática ou voltagem no cristal e que o efeito oposto acontece quando uma carga elétrica ou voltagem é aplicada a um cristal provocando uma deformação no mesmo. A colocação de um cristal piezoelétrico entre dois eletrodos em forma de placas, quando é aplicada uma força às placas é produzida uma tensão e uma deformação correspondente. Esta deformação produzirá uma diferença de potencial na superfície do cristal, sendo este efeito denominado de efeito piezoelétrico. Os autores destacam que este tipo de transdutor exige a conexão com amplificadores de voltagem com cabos de baixa capacitância e baixo ruído. Observam que a vantagem principal destes

transdutores é sua boa resposta em frequência de até 200 Hz, sendo sensíveis a temperatura, vibração mecânica, e ao ruído externo, o que torna seu campo de ação limitado. Devido a alta impedância elétrica em baixas frequências, esses transdutores (Figura 9), são inadequados para a medição de pressão estática, entretanto podendo ser utilizados para medições de pressão estática em períodos muito curtos. Recomendam ainda que estes transdutores, são indicados para medição de transientes de pressão (medidas dinâmicas).

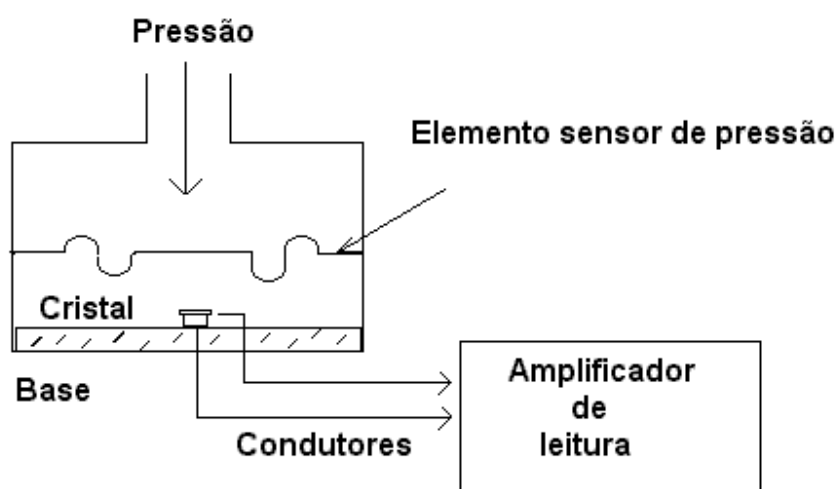


Figura 9. Transdutor piezoelétrico (Fonte: Ismail et. al., 1998).

4.6.2 Transdutores de fluxo

Há muitos tipos de transdutores de fluxo, porém alguns deles são muito complexos e caros para uso comum em máquinas agrícolas. Segundo Hughes & Frost (1985), os transdutores por diferença de pressão são os mais comuns. Seu princípio de funcionamento se baseia na manutenção constante da taxa de aplicação e a variação do fluxo no bico é proporcional a velocidade de deslocamento. Neste caso a taxa de aplicação é regulada pela variação na pressão do bico e a relação entre o fluxo e a pressão pode ser obtida pela Equação 1.

$$Q_t = C_D P^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

onde, :

Q_t = Volume total de aplicação

C_D = Coeficiente de descarga do bico

$P^{0.5}$ = Raiz quadrada da pressão no líquido.

Este tipo de transdutor mede a diferença de pressão num bico através de um orifício colocado no fluxo do fluido, podendo ser usado para medir baixos volumes e apresenta precisão na faixa de 1%. Estes medidores são afetados pelo uso (desgaste) e mudanças significativas podem ocorrer em operação.

Ainda segundo Hughes & Frost (1985), os medidores de turbina possuem um corpo que contém um rotor axial, cuja rotação é proporcional ao fluxo. 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. Os medidores de fluxo de turbinas estão comercialmente disponíveis para medir fluxos na ordem de 0,03 a 300 litros/s.

Trabalhos desenvolvidos por Withers et al., citados por Hughes & Frost (1985), estudando a performance de medidores de fluxo de turbina disponíveis no mercado na época, encontraram acurácia de $\pm 0,5\%$ e linearidade acima do limite da faixa de fluxo, com uma frequência menor do que o alegado pelos fabricantes. Destacam os autores que a performance de giros também é afetada pela viscosidade do fluido e pela temperatura. Há uma gama de medidores de fluxo disponíveis, baseados no mesmo princípio dos medidores de turbina, mas que não contém a mesma afinidade e por isso estão menos sujeitos ao mecanismo mecânico. Neste caso, os sinais são obtidos por métodos ópticos projetados, especificamente para baixas vazões de aplicação, possuindo uma linearidade de $\pm 0,5\%$ e repetibilidade de $\pm 0,05\%$.

O princípio básico operacional dos controladores de fluxo termoeletrônicos, segundo Hughes & Frost (1985), baseia-se na determinação da variação de temperatura do calor específico do fluxo através de uma seção na tubulação, comparando-se com uma constante do fluido. A desvantagem principal desta técnica é a velocidade lenta de resposta, embora Smith & Said, citados por Hughes & Frost (1985), tenham desenvolvido um controlador de fluxo termoeletrônico, com uma resposta rápida de 0,2 s para monitorar fluxos de petróleo na faixa de 0,3 a 120 ml/s com uma precisão de $\pm 3\%$ e repetibilidade excelente.

Os medidores de deslocamento positivo mais comuns usados baseiam-se no princípio de oscilação de um pistão. Sendo o pistão a única parte em movimento em uma câmara, onde nenhum líquido pode atravessar a câmara sem ativar o pistão e sem provocar um deslocamento positivo. Neste tipo de medidor, são inseridos no pistão elementos magnéticos que abrem e fecham magneticamente interruptores, fornecendo pulsos de voltagem. Os pistões podem ser rotativos ou lineares, mas medidores rotativos que incorporam engrenagens são altamente susceptíveis ao desgaste. Estes medidores apresentam precisões de $\pm 0,5\%$ para um instrumento calibrado. Ainda assim, são caros devido as altas tolerâncias industriais e projetos para obter alto desempenho em deslocamento positivos pequenos. Eles também são danificados facilmente por partículas muito pequenas de sujeira no fluido (Hughes & Frost, 1985). Ainda, segundo os autores, há diversos tipos de medidores de fluxo ultrasonicos. Um primeiro controlador de fluxo em forma de uma bolha tendo 2 transdutores presos a parede de um tubo, é capaz de medir a taxa de fluxo de líquido ou adubos orgânicos líquidos. Um feixe de pulsos ultrasonicos é transmitido para o fluido e através de sua reflexão, é observada a movimentação do fluxo. Em geral, é um excelente sistema para observação de fluxo, porém não apresenta uma alta acurácia. Um segundo modelo, utiliza-se de 2 transdutores que transmitem e recebem sinais através de um tubo e o tempo de transmissão e recepção é proporcional ao fluxo. Este medidores apresentam uma acurácia de $\pm 1\%$. Um terceiro e último sistema utiliza-se de uma correlação cruzada de feixes de ultrasom em uma curta distancia. Quando não há fluxo, o mesmo sinal transmitido é recebido, no entanto, quando há passagem de fluxo, os sinais são diferenciados. A correlação entre os sinais enviados e recebidos são transformados em velocidade.

Segundo Hughes & Frost (1985), o sistema com ultrasom apresenta a vantagem de medir a taxa de fluxo sem ter contato com o fluido. Pode ser facilmente instalado e os custos são baixos, embora necessite de calibração para cada líquido diferente e ser afetado por turbulências como inclinação na bomba, afetando sua acurácia.

4.6.3 Transdutores de velocidade

Até recentemente as máquinas de pulverização não tinham nenhuma forma de indicação de velocidade real de solo, e os operadores das máquinas tinham somente

uma idéia da sua velocidade no solo proveniente da rotação do motor ou mecanismos de engrenagens. Para que haja um controle efetivo das taxas de aplicação a velocidade em relação ao solo deve ser conhecida. Diversos tipos de transdutores de velocidade de solo atualmente estão disponíveis para uso nas máquinas agrícolas. Há transdutores instalados nas rodas motrizes dos tratores, onde pulsos são gerados e a frequência é proporcional a rotação destas rodas. Estudos relatam que este sistema é afetado pelo afundamento da roda no solo, pelo deslizamento e especialmente se os sensores magnéticos forem montados em uma roda direcionável (Hughes & Frost, 1985).

Um dos sensores mais utilizados é o radar, que se baseia no efeito Doppler para a medida de velocidade no solo. Um sinal de baixa frequência é direcionado através de um ângulo defletido para o solo e em seguida este sinal é refletido. Pela mudança de frequência é obtida a velocidade de deslocamento no solo. A escolha de um sinal analógico ou digital de saída é disponível pelo sensor do radar. Os sensores de radar requerem uma superfície favorável de reflexão para se ter a acurácia, e é indicado para os mais diferentes sistemas (Hughes & Frost, 1985). Entretanto, Tompkins et al. (1988) apresentaram resultados onde o radar obteve menor acurácia em condições de vegetação alta.

Outro tipo de sensor largamente utilizado para determinação de velocidade em equipamentos agrícolas é o sensor magnético de roda. Antuniassi et al. (2001c) descreve um ensaio comparativo deste sistema com o radar, indicando ser importante a posição de fixação dos mesmos no trator. Segundo os autores, a indicação de velocidade tanto para sensores magnéticos de rodas como para radares pode ser significativamente influenciada nos deslocamentos em curvas, no caso dos sensores estarem instalados fora do eixo longitudinal do trator. Nestes casos, a indicação de velocidade pode ser subestimada ou superestimada dependendo do sentido da curva (para a direita ou para a esquerda).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área experimental

Os ensaios de acurácia do DGPS para determinação de velocidade e os ensaios de laboratório para avaliação do desempenho do controlador de fluxo foram realizados no Laboratório de Máquinas para Pulverização, localizado junto ao NEMPA - Núcleo de Ensaio de Máquinas e Pneus Agrícolas do Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Campus Botucatu - UNESP, Fazenda Experimental Lageado, Botucatu/SP. Os ensaios de campo para desempenho do controlador de fluxo instalado em aeronaves foram conduzidos na sede da empresa Aeropel Aviação Agrícola, situada na Cidade de São Borja/RS, e na Granja Guará, no Município de Uruguaiana/RS. O ensaio do controlador de fluxo instalado no aerobarco foi realizado na represa da Usina Hidroelétrica de Jupia (SP).

5.2 Equipamentos e materiais utilizados

5.2.1. Materiais gerais a todas as etapas dos ensaios

- Trena de 30 m;
- Baterias blindadas de 12 V;

- Fios, cabos, interruptores e conectores elétricos em geral;
- Multímetro digital modelo ET 2020A Minipa;
- Cronômetro digital;
- Softwares :
 - Airstar 99.5 (Satloc Co.);
 - MX_Shell (Sew Co.);
 - PC208W 3.2 (Campbell Scientific, Inc);
 - Planilhas MS Excel 2000 e 2002;
 - Processador de textos MS Word 2000 e 2002;
 - Programa estatístico SAS.
- Máquinas fotográficas e filmadora.
- Notebook IBM compatível.
- Sistema de controle e monitoramento de aplicação Satloc modelo Airstar 99.5 equipado com DGPS e controlador de fluxo RFM15 conforme mostrado na Figura 10 e Quadro 4.
- Sistema de aquisição de dados modelo CR10X, fabricado pela Campbell Scientific, Inc.(1997) cujas características principais são apresentadas no Quadro 5.

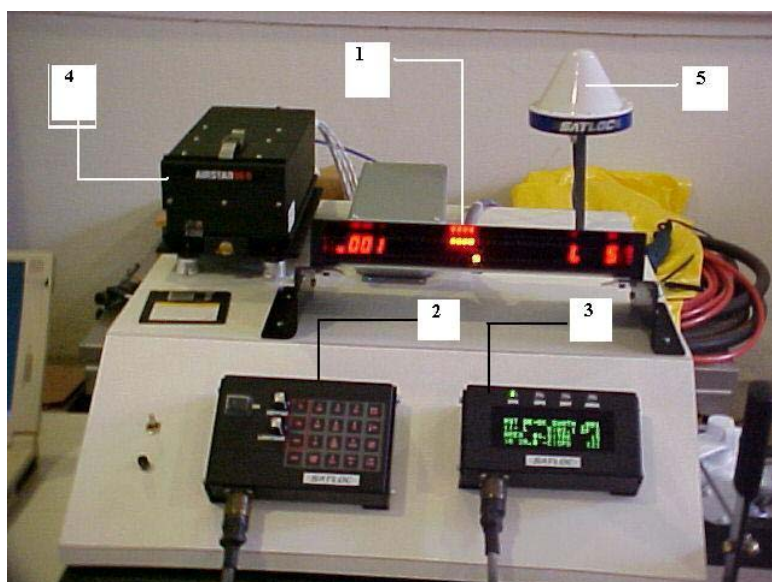


Figura 10. Vista geral do sistema de controle e monitoramento de aplicação, Airstar 99.5
(1) barra de luzes, (2) teclado, (3) display, (4) CPU, (5) Antena receptora DGPS.

Quadro 4. Características do sistema de controle e de monitoramento de aplicação Satloc, modelo Airstar 99.5 (Satloc (1996) e Agrotec (2002)).

Características	Descrição
Fabricante	Satloc
Canais e sinal de recepção de satélite	12 .Omnistar
Velocidade de atualização	Dez vezes por segundo
Precisão de georeferência em deslocamentos	Igual ou inferior a 1 metro
Opção de padrões de balizamento de voo	6
Barra de luzes externa	Com dupla indicação (linear e angular) programável;
Capacidade de armazenamento para navegação	Até 500 pontos de referência
Capacidade de armazenamento e interrupção reprogramável para lavouras	Até 100 áreas com indicação de alarme contra repetição de faixas já aplicadas e somatório de área em tempo real;
Capacidade de registro	200 horas de gravação e dotada de função de medição e cálculo de área pré e pós-aplicação
Integração	Programa - Mapstar for Windows V 1.6.2.1, (Satloc Co) e ao controlador de vazão fluxômetro

Quadro 5. Características técnicas do CR10X (Fonte: Campbell Scientific Inc., 1997).

Características do modelo CR10X	Descrição
Fabricante	Campbell Scientific, Inc.
Entrada de canais analógicos	6. diferenciais e 12 não diferenciais
Canais contadores de pulso	02.
Portas de controle digital	8 (voltagem 0,1 a 5 V)
Resolução analógica	$\pm 5 \mu V$
Faixa de temperatura estendida ($^{\circ}C$)	-25 a 50
Memória RAM	128 Megabyte
Dimensões	19.81. x 8,89 x 3.81 cm
Voltagem	9,6 a 16 V
Acurácia	$\pm 0,02 \%$
Acuracidade do relógio	$\pm 0,000023 s$

5.2.2. Materiais utilizados para o ensaio de acurácia do DGPS em determinações de velocidade

- Cones plásticos para sinalização;
- Perfilados e barras metálicas, parafusos e porcas;
- Transferidor em acrílico para ângulos de pulverização marca Spraying Systems;
- Veículo utilitário Ford F 350, ano/modelo 2000/2001, com um furgão de 3,50 m de comprimento, 1,90 m de altura e 2,20 m de largura.
- Monitor de pulverização marca Dickey John modelo DJCCS 100.
- Sensor de velocidade tipo radar DjRVS II, cujas especificações técnicas são descritas no Quadro 6;

Quadro 6. Características técnicas do radar (Dickey John Co).

Características	Descrição
Fabricante	Dickey-John
Modelo	DjRVS II
Faixa de velocidade	0,4 a 70,8 km/h;
Acurácia	$\leq \pm 3\%$ para 0,4 a 3,2 km/h - $\leq \pm 1\%$ para 3,2 km/h a 70,8 km/h ;
Resposta	≤ 200 ms;
Atraso na resposta da chave de comando entre ligar e desligar	≤ 305 mm de distância percorrida ;
Alimentação	+9 à +16 VDC (volts em corrente contínua), intensidade de corrente ≤ 0.6 A
Sinal de saída:	freqüência selecionável de ondas quadradas proporcional à velocidade. 44.7 hz/mph (1 pulso/cm)
Freqüência microondas (nominal):	24.125 GHz $\pm$ 25 MHz (-1MHz/ °C);
Tamanho total:	10 x 10 x 31.1 cm
Ângulo de fixação	35° $\pm$ 5°

Fonte : Manual técnico Dickey John (s.d.)

5.2.3 Materiais utilizados nos ensaios de desempenho do controlador de fluxo em Laboratório:

- Base de ferro para suporte do conjunto bomba centrífuga e motor;
- Baldes plásticos com capacidade de 10 litros;
- Conexões hidráulicas, abraçadeiras e suportes para mangueiras;
- Bancada suporte dos equipamentos dos ensaios;
- Bico com pontas OC – 40 e OC-80;
- Cilindro de CO₂;
- Proveta de precisão de 1000 ml e 500 ml;
- Reservatório de água com capacidade de 600 L;
- Sacos plásticos;
- Mangueiras semi-flexíveis de alta pressão;
- Suporte de mangueiras e manômetro;
- Suporte de fixação para barra de luzes, antena DGPS, teclado e display;
- Transdutor de pressão com sensor piezorresistivo, marca IOPE, modelo CPC-9800, com limite operacional entre 0-10 bar, com precisão inferior a 0,5%, com sinais de saída de 0 a 5 V e nível de precisão do sinal menor que 0,1 % e alimentação de 15-30 VCC. (Figura 11 a)
- Manômetro de precisão marca Salcas, com escalas entre 0-220 psi (0 a 10.5337 kPa) com divisões de 2 psi (0,5 kPa) e nível de precisão $\pm 0,5 \%$. (Figura 11 b);

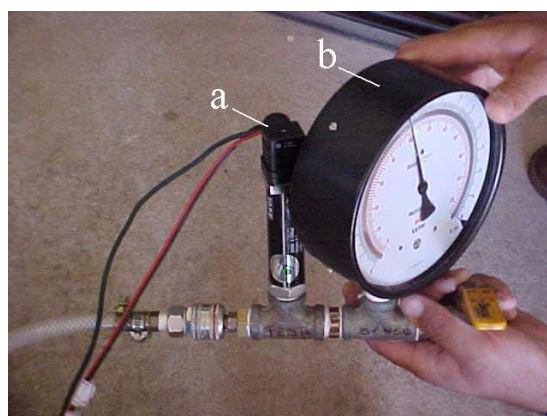


Figura 11. Vista geral : Transdutor de pressão (a) e manômetro de precisão (b)

- Balança eletrônica, marca Marte, modelo AS 5500, com capacidade máxima para 5000 gramas, e sensibilidade de 0,1 gramas;
- Computadores:
 - 3 computadores IBM PC compatível;
 - 1 computador notebook IBM PC compatível.
- Bomba centrífuga marca Schneider, dotada de motor elétrico trifásico WEG modelo ME 2250V 5 CV com 2 estágios, com diâmetros de sucção de 1 ½” e 1” para recalque, com capacidade de pressão máxima de 67 mca e 8 m de altura de sucção, possibilitando vazões de 19,6 a 10,0 m³/h;
- Softwares : Simfly 4.4 (Satloc), Mx_Shell Movitools 2.3;
- Cabo serial RS 232, desenvolvido especificamente para este ensaio pela SATLOC
- Estabilizadores de voltagem e Nobreak;
- Conversor de frequência Movidrive modelo, MCF40A Compact, marca SEW do Brasil, (Figura 12) cujas características estão apresentadas no Quadro 7.

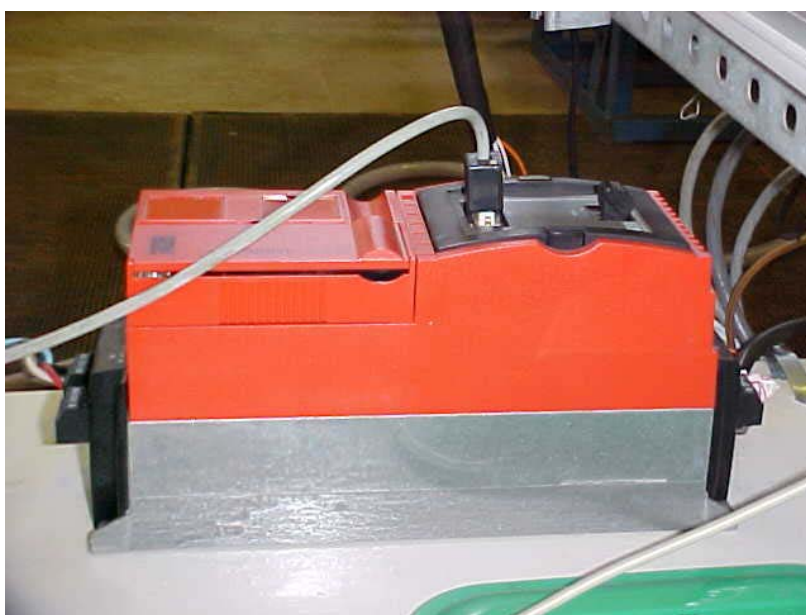


Figura 12. Conversor de frequência Movidrive

Quadro 7. Características técnicas do Conversor de frequência Movidrive, modelo.MCF40A Compact (Sew do Brasil): catálogo do fabricante.

Características	Descrição
Corrente de saída p/230 V	16,0 A
Corrente de entrada P230	14,2 A
Frequencia de entrada 50-60	+ - 5% Hz
Frequencia de saída	0-400 Hz
Potencia do motor const	3,70 Kw
Potencia do motor quad	5,50 KW
Proteção IP	20
Temp. Ambiente	0-50 Graus
Tensão de entrada	3 x 200-240 + - 10 % V
Faixa de trabalho	-5000 - 0 - + 5000 rpm
Resolução	0,2 rpm

5.2.4. Materiais utilizados nos ensaios de desempenho do controlador de fluxo em campo

- Aeronaves agrícolas EMB-201 A, com 300 HP de potência, passo de hélice variável, dotadas de sistema de navegação SATLOC modelo Airstar 99.5, bomba centrífuga acionada hidraulicamente e barras com perfil aerodinâmico. A aeronave PT-UDG foi equipada com bicos de jato cônico (marcas Travicar e Spraying. Systems), Spraying. Systems(1998), enquanto a aeronave PT-GYJ foi equipada com bicos CP (CP Nozzles Co);
- Carrinho transportador de bateria;
- Conjunto de anemômetro e psicrômetro;
- Conjunto moto-bomba para abastecimento de aeronaves;
- Conversor de bateria 12V para 110V;
- Sistema de radio comunicação UHF terra – ar.
- Aerobarco para aplicação de herbicidas, descrito por Velini et al. (2002) e Antuniassi et al. (2002b).

5.3 Métodos

5.3.1 Ensaio de acurácia do DGPS em determinações de velocidade

5.3.1.1 Montagem do radar no veículo utilitário para ensaio de acurácia

O radar foi fixado sobre uma barra porta ferramenta instalada na parte frontal do pára-choque dianteiro do veículo utilitário, presos à estrutura do veículo utilitário, o que proporcionou estabilidade ao conjunto conforme (Figura 13). Toda a cablagem foi conduzida para o interior da cabine veículo.

Após testes iniciais, optou-se pela colocação do suporte de barra de rodas na parte frontal do caminhão para que o sistema DGPS e o radar pudessem estar no mesmo alinhamento de visada e coleta dos dados.

Nesta posição o radar apresentou um ângulo de projeção em relação à superfície do solo de 35° , obedecendo assim as especificações de instalação contidas no catálogo.



Figura 13. Detalhe da fixação do sensor de velocidade radar no veículo utilitário.

5.3.1.2 Montagem do DGPS no veículo utilitário

Visando o gerenciamento na condução das operações e facilidade de manuseio, todos os componentes foram acondicionados no interior da cabine do veículo utilitário, permanecendo ao alcance dos operadores. (Figura. 14a).

A antena do sistema DGPS foi instalada na parte superior frontal do veículo utilitário, local livre de qualquer possível interferência ou sombreamento dos sinais (Figura. 14b).

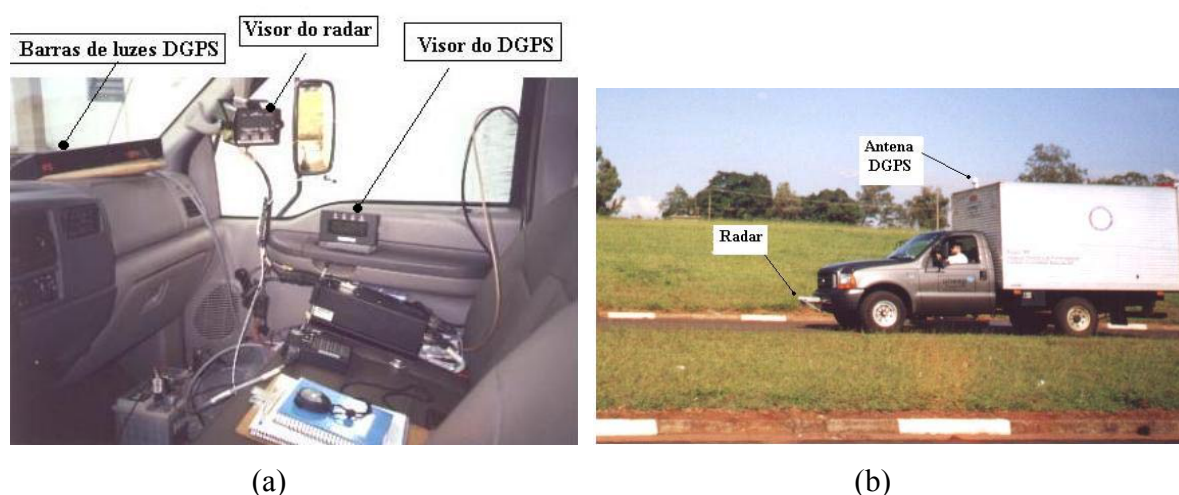


Figura 14. Vista geral e interna da cabine do veículo utilitário com radar e antena DGPS

5.3.1.3 Programação do sistema de aquisição de dados para os ensaios de acurácia do DGPS em determinações de velocidade

Para monitorar e gravar continuamente os sinais gerados e enviados pelo radar, utilizou-se o sistema de aquisição de dados CR10X (Figura 15), com frequência de aquisição de 1 Hz. Para esta finalidade utilizou-se um canal contador de pulso.

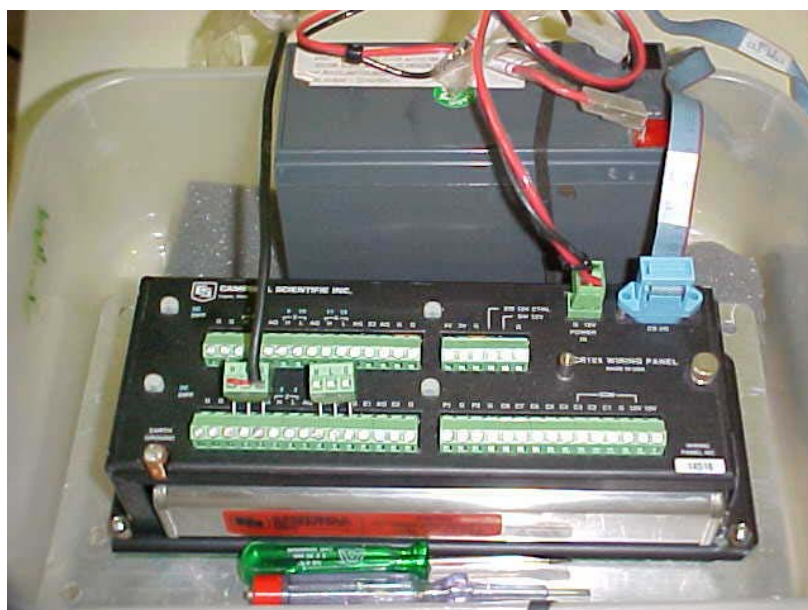


Figura 15. Sistema de aquisição de dados CR 10 X

As instruções de programa foram inseridas no sistema de aquisição com o auxílio de um computador operando-se o software PC208W 3.2. No apêndice 1 e 2 encontram-se o detalhamento do desenvolvimento dos programas de coleta de dados para o sistema de aquisição.

5.3.1.4 Calibração do sensor de velocidade (radar)

Para a calibração do sensor de velocidade, a frequência de saída do radar foi captada por um canal de pulsos do sistema de aquisição de dados. O manual do fabricante especifica que a distância a ser percorrida para a calibração do radar deve ser de 122 m. Durante o processo de calibração, o valor constante é alterado de maneira diretamente proporcional à distância percorrida. Considerando-se o tempo gasto, contado pelo próprio controlador, o sistema calcula a velocidade correta de deslocamento, indicando-a no visor do radar.

Atendendo estes requisitos, em uma área plana de asfalto liso e trajeto em linha reta, realizou-se a calibração do radar utilizando-se as velocidades de 7; 10; 16; 24 e

33 km/h, referendada de acordo com a cronometragem dos tempos de deslocamento as marcas de referência. Este procedimento foi realizado com 3 repetições.

5.3.1.5. Procedimento do ensaio de campo para avaliação da acurácia do DGPS na determinação de velocidade.

O sistema de aquisição foi programado para monitorar e registrar a velocidade a partir do início do deslocamento do veículo utilitário, assim como a CPU do Airstar 99.5 foi programada para registrar a velocidade instantânea fornecida pelo DGPS numa frequência de 1 Hz. Foi demarcado um trecho de 150 m, com o uso de cones (orientação referencial), dispondo-os no início, no meio e fim da parcela. Para que houvesse a estabilidade do movimento de deslocamento do veículo utilitário, durante cada repetição, o início do movimento do veículo ocorreu 10 m antes do ponto de cronometragem, sendo que 5 metros antes deste marco aferia-se à velocidade. Para determinação da velocidade os deslocamentos foram realizados em linha reta e em curva.

a) Deslocamento em reta.

No mesmo local utilizado para a calibração do radar (Figura 16) foi demarcada uma extensão de 150 m, executando-se 4 repetições a 5 velocidades de deslocamento (7; 15; 23; 27 e 33 km/h).

Durante as repetições, somente 10 m após a passagem do ponto final demarcado o deslocamento era interrompido pelo condutor, com a redução de velocidade do veículo.



Figura 16. Vista do local de ensaio de deslocamento em linha reta

b) Deslocamento em curva

O trajeto foi demarcado no solo com o uso de giz branco, correspondendo a um círculo com raio de 11,15 m. (Figura. 17). Nas laterais externas, 5m afastados deste círculo, foram distribuídos cones de sinalização, demarcando-se 2 pontos (denominados de pontos A e B), que serviram de referencial para as cronometragens.

O ensaio de deslocamento em curva foi realizado com 3 velocidades de deslocamento (7; 15 e 23 km/h) com 4 repetições.



Figura 17. Vista do local de ensaio de deslocamento em curva

5.3.1.7 Delineamentos experimentais

a) Deslocamento em reta

Adotou-se o delineamento com parcelas subdivididas no esquema 4x3x5, com 4 repetições, sendo 3 parcelas (cronometragem manual, radar e DGPS) e 5 sub-parcelas (velocidades de 7,0; 15,0; 23,0; 27,0 e 33,0 km/h).

b) Deslocamento em curva

Adotou-se o delineamento com parcelas subdivididas em esquema 4x3x3, com 4 repetições, sendo 3 parcelas (cronometragem manual, radar e DGPS) e 3 sub-parcelas (velocidades de 7; 15 e 23 km/h).

5.3.2 Ensaios de desempenho do controlador de fluxo em condições de laboratório

5.3.2.1. Construção da bancada suporte e instalação dos equipamentos

Com a finalidade de abrigar o conjunto dos equipamentos utilizados nos ensaios em condições de laboratório, e proporcionar estabilidade às tubulações de entrada e saída junto ao controlador de fluxo, atendendo os pré-requisitos previstos no seu manual de instalação, e proporcionar confiabilidade na execução dos comandos de acionamento da válvula de controle de aplicação “by pass” direcionando o fluxo ao controlador de vazão em condições estáveis, construiu-se uma bancada suporte, conforme mostrado na Figura 18.



Figura 18. Vista geral da bancada suporte para os ensaios e equipamentos

Na parte superior desta bancada foram afixados o controlador de fluxo, a válvula de controle “by pass” e haste de comando, antena receptora do sinal DGPS, a barra de luzes, display e o teclado, além dos comandos de acionamento do controlador de fluxo.

O sensor de fluxo e válvula de comando do controlador de fluxo do Airstar 99.5, interligados a CPU do sistema, foram afixados na parte superior da bancada através de abraçadeiras, de forma a manter uma tubulação estável e em linha reta. (Figura 19)

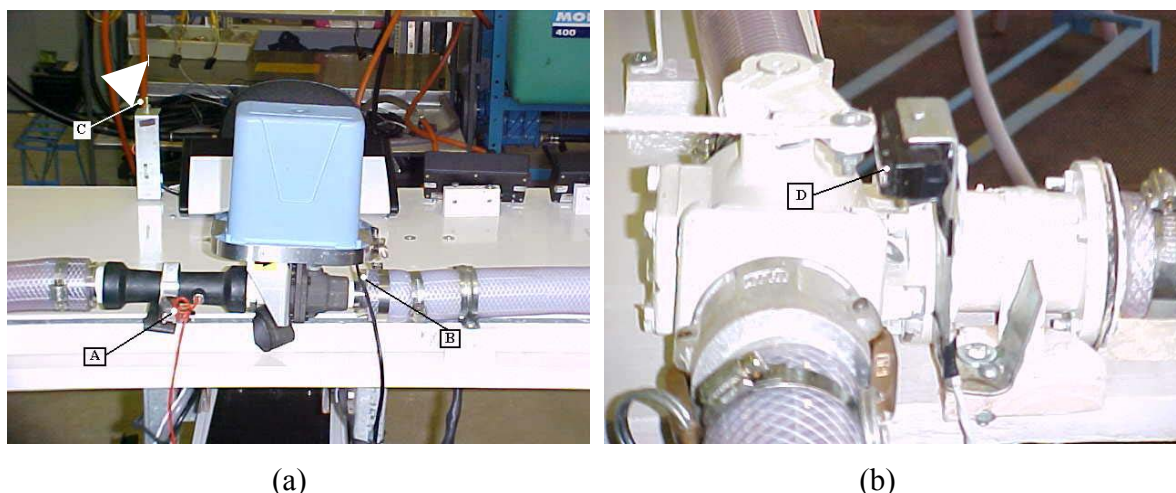


Figura 19. Detalhe de fixação de sensores na bancada e do transdutor de pressão (a, b).
Ligação dos sensores do controlador de fluxo e comando de acionamento de válvula (A,B), chave seletora do modo de calibração (C), e sensor de georeferenciamento de abertura de válvula (D).

Como reservatório de água foi utilizado um tanque com capacidade de 600 litros, o qual foi mantido constantemente com um volume mínimo de 50% de sua capacidade (Figura 20).



Figura 20. Reservatório de produto utilizado durante os ensaios.

Para atender diferentes níveis de vazão e de pressão de trabalho necessários aos ensaios, ao invés das barras das aeronaves agrícolas e respectivos bicos, foram selecionadas e usadas pontas de alta vazão do tipo OC 40 e OC 80 (Figura 21), as quais foram colocadas na saída de uma mangueira, presa através de suportes junto ao tanque do pulverizador.



(a)



(b)



(c)

Figura 21. Pontas de bicos de pulverização : OC 40 (a); 80 (b) e corpo do bico (c).

Na parte inferior da bancada foram afixadas a CPU do sistema Airstar 99.5, cabeamentos, conversor de frequência e baterias de alimentação.

Para o acionamento do circuito de pulverização foi utilizada uma bomba centrífuga modelo ME 2250V de 5 CV com 2 estágios para vazões até o limite de 19,6 m³/h.

O transdutor de pressão utilizado para monitorar a pressão foi fixado próximo ao bico de pulverização (Figura 22) usado para simular o conjunto de bicos de uma barra de uma aeronave agrícola, através da coleta de dados no CR 10 X, o qual foi programado para uma frequência de aquisição de 8 Hz.



Figura 22. Detalhe de instalação do transdutor de pressão e do manômetro na saída de produtos

Solidário a alavanca de aplicação “by pas”, foi afixado o sensor de abertura e fechamento dos pontos de aplicação (Figura 19 b, item D). Em aeronaves agrícolas este tipo de sensor geralmente encontra-se acoplado na alavanca de aplicação ou no sistema de comando de acionamento da bomba. Em ambas situações (laboratório ou nas próprias

aeronaves), é fundamental a existência deste tipo de sensor para que haja o referenciamento das posições de abertura e fechamento da aplicação.

5.3.2.2. Simulação do DGPS a partir do Simfly

O software simulador dos sinais de DGPS (Simfly 4.4) foi acionado a partir de um computador IBM-PC, o qual foi conectado à CPU do Airstar 99.5 através de um cabo serial.

Uma das características do programa Simfly 4.4 é o de criar uma situação virtual de recepção de satélites, e esses sinais possibilitam a simulação de vôos de aplicação. Para tanto a antena do DGPS do Airstar 99.5 foi desativada, e o cabeamento de ligação do receptor a CPU foi direcionado para a conexão com o Simfly 4.4 através da RS 232.

5.3.2.3. Utilização do conversor de frequência com controle vetorial Movidrive

O conversor de frequência Movidrive modelo MCF40A foi parametrizado por técnicos da empresa fabricante e foi utilizado para acionamento da bomba centrífuga de pulverização, através do software PC_Shell, a partir de um computador IBM-PC.

5.3.2.4. Utilização do transdutor de pressão para aferição da acurácia do controlador de fluxo na determinação das vazões.

O controlador de fluxo do sistema Airstar 99.5 estima a vazão através dos sinais recebidos de um fluxômetro de turbina, e usa esta informação tanto para determinar o volume de calda aplicada (L/ha) como para corrigir este volume no caso de variações de velocidade. Em termos metodológicos, optou-se por instrumentar o sistema de pulverização com um sensor de pressão e determinar uma equação de correlação entre pressão e fluxo, de maneira a aferir a acurácia com que o controlador determina o fluxo real. Além disso, o sensor de pressão também foi utilizado para monitorar a variação de pressão no sistema de pulverização nos ensaios de tempo de resposta, oferecendo um parâmetro simples para sua determinação.

5.3.2.5. Calibração do Transdutor de pressão

A calibração do transdutor de pressão foi realizada avaliando-se 9 pressões na faixa de 41,37 a 965,27 kPa, com 4 repetições. Para tanto foi utilizado um manômetro de precisão analógico marca Salcas, com escalas entre 0-220 psi (0 – 1516,85 kPa), com divisões de 2 psi (13,7895 kPa) e nível de precisão de $\pm 0,5 \%$. Os mesmos foram conectados a uma tubulação pneumática alimentada por um cilindro de gás carbônico, por meio de uma válvula controladora de pressão. (Figura 23).

Após os ensaios de calibração, os valores registrados no CR10X foram transferidos com o auxílio do programa PC208W 3.2, e os dados originários gerados com extensão.dat foram convertidos para a extensão.xls através da planilha eletrônica MS Excel.

Comparando-se os valores de tensão registrados pelo coletor de dados e os indicados pelo manômetro analógico de precisão, foi obtida a equação de calibração do transdutor, a qual foi aplicada nos ensaios de avaliação do controlador de vazão.

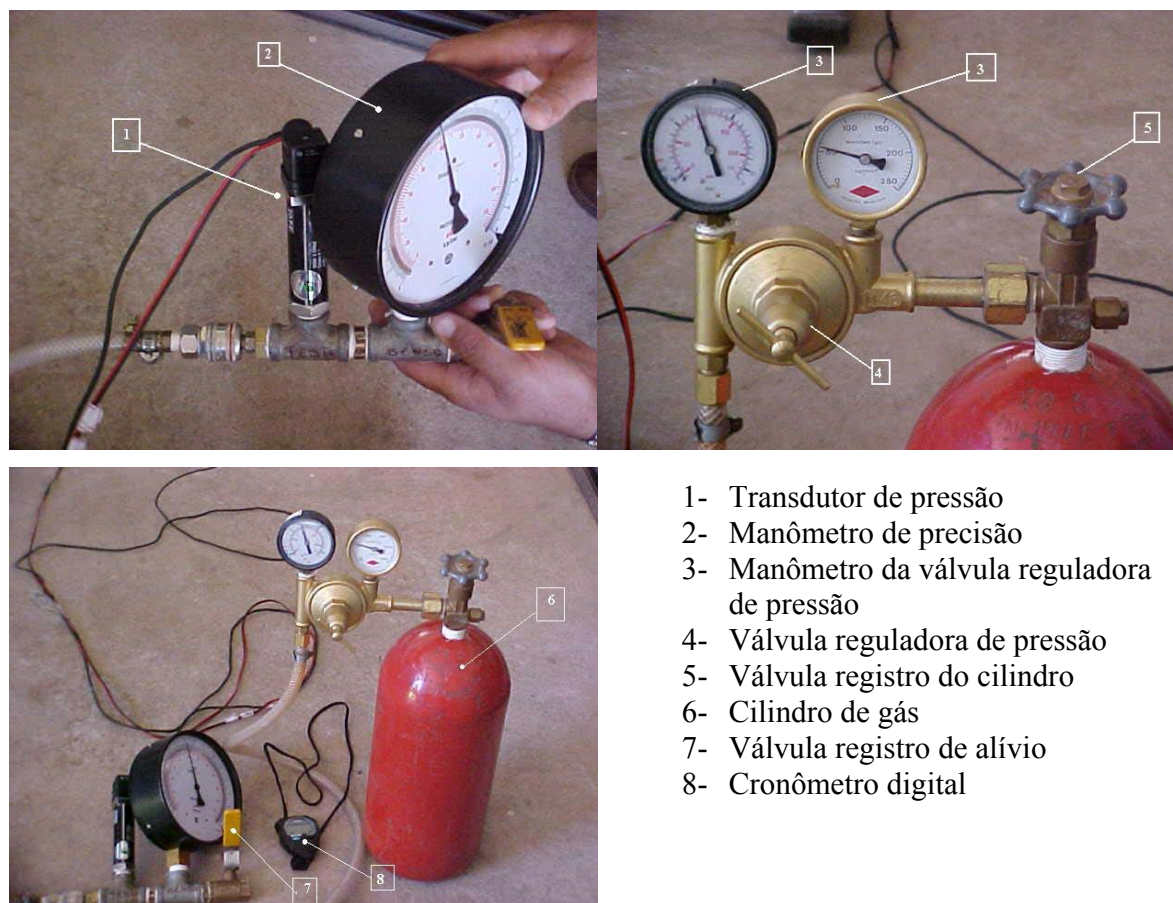


Figura 23. Ensaio de calibração do transdutor de pressão

5.3.2.6. Ensaio realizado

Os ensaios conduzidos em laboratório para avaliação do controlador de fluxo seguiram a rotina apresentada no fluxograma geral, conforme a Figura 24.

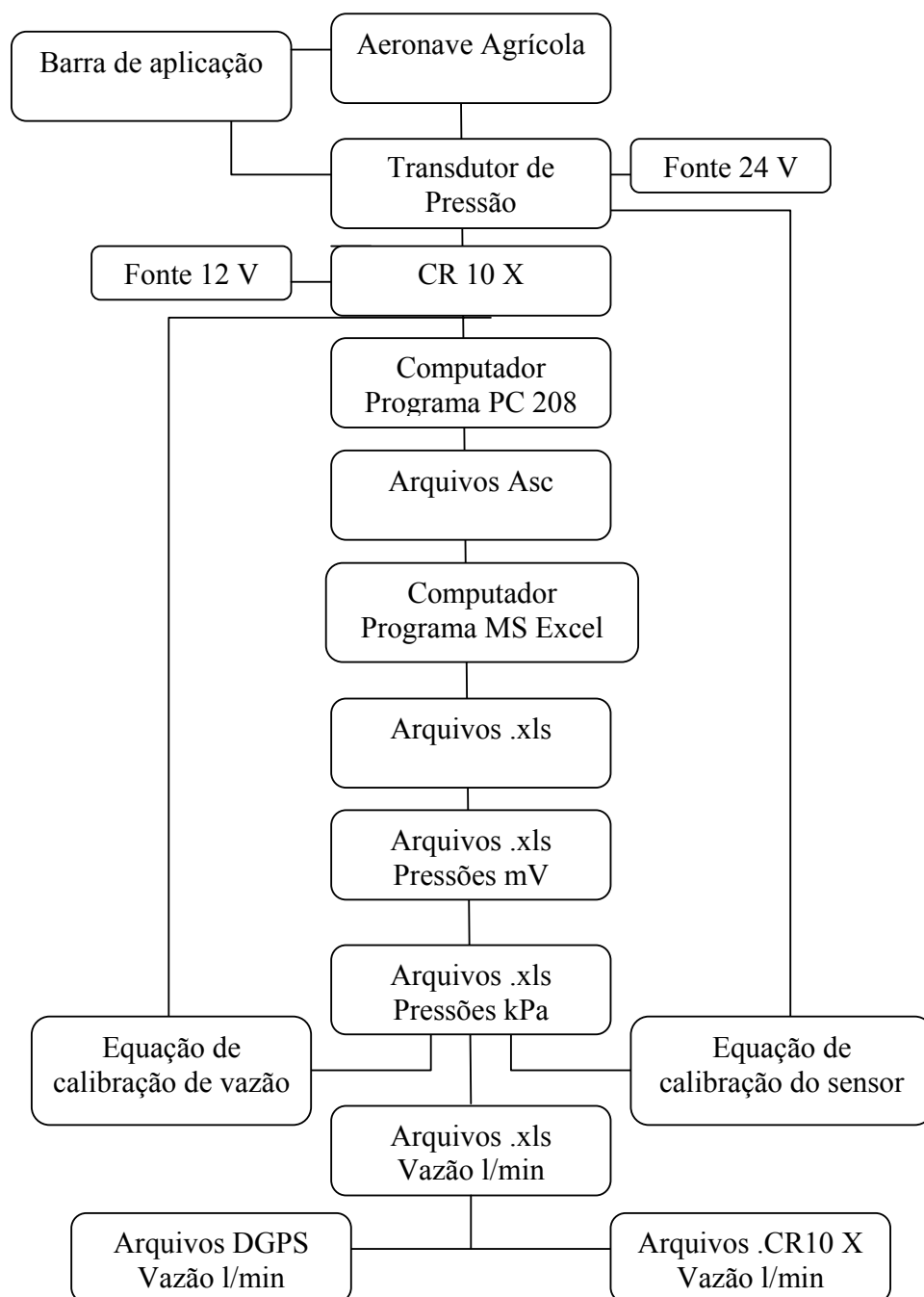


Figura 24. Fluxograma para determinação comparativa entre as indicações de vazões registradas pelo transdutor de pressão x controlador de fluxo com sistema de DGPS.

O sistema Satloc 99.5 foi programado para operar com faixa de deposição de 15m e volume de calda de 4 ou 8 L/ha.

O Simfly 4.4. foi programado para simular vôos com velocidade inicial de 55,57 m/s e comprimento de faixa de 999.9 km. Este procedimento visou fornecer um longo tempo de vôo simulado em linha reta, oferecendo condições de realização dos ensaios. (Figura 25).

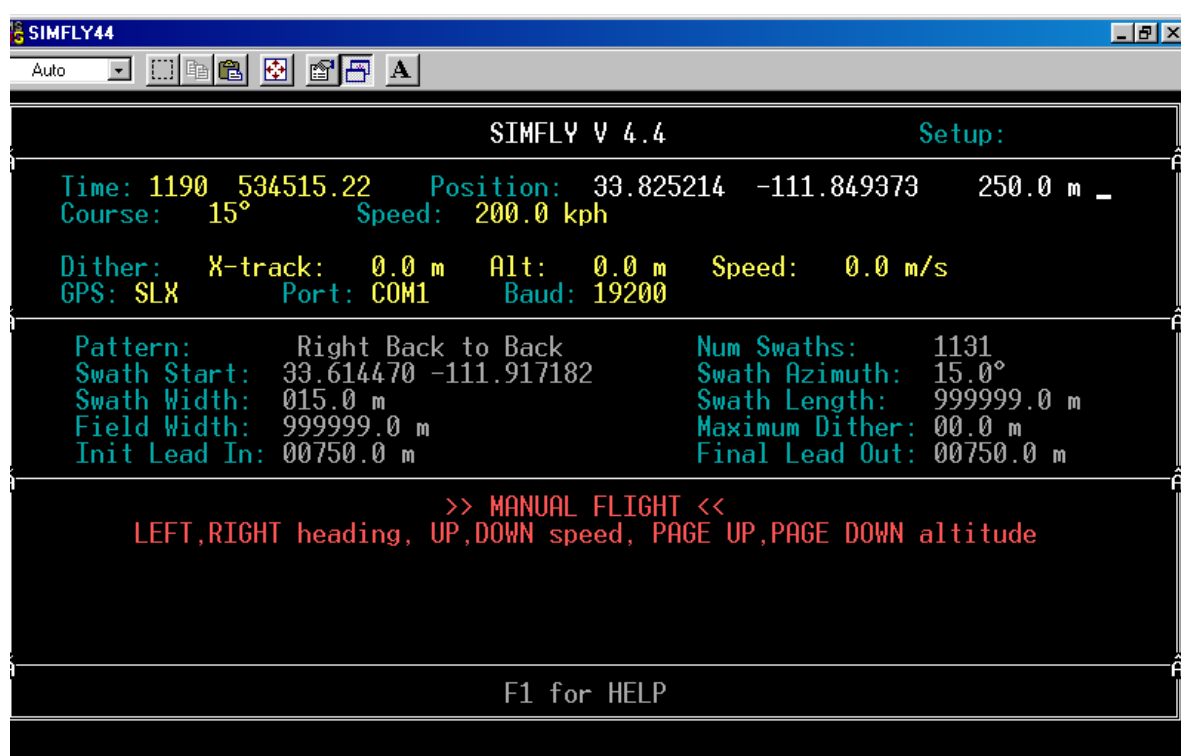


Figura 25. Tela do programa simulador de vôo Simfly 4.4 em opção de vôo manual.

a) Ensaio das características de desempenho do controlador de fluxo em função da variação na rotação de bomba

Nos ensaios de avaliação do controlador de fluxo com variações na rotação da bomba de pulverização, foram utilizadas rotações nominais de 2800 e 3320 rpm no

motor de acionamento, com o objetivo de avaliar o tempo de resposta para correção do volume de aplicação em função das variações na rotação da bomba.

Durante os ensaios, os valores de pressão foram monitorados e gravados em tempo real pelo sistema de aquisição de dados CR10X. Concomitantemente, os dados relativos ao controlador de fluxo, registrados no próprio controlador, foram armazenados no cartão PCMCIA. Neste ensaio a velocidade de vôo simulada foi mantida constante em 164 km/h. (45,6 m/s).

b) Ensaio das características de desempenho do controlador de fluxo em função da variação na velocidade de vôo

O tempo de resposta para correção da pressão de acordo com a variação de velocidade de deslocamento foi avaliado simulando-se mudanças de velocidade através de comandos executados no Simfly 4.4. Para esta situação, a rotação da bomba centrífuga de pulverização foi mantida constante a 3360 rpm.

5.3.2.7 Processamento dos dados

Ao final de cada ensaio o sistema foi desligado e os dados contidos no cartão alojados na CPU do airstar 99.5 foram transportados para o computador contendo o programa MAPSTAR. Os arquivos com extensão .log foram convertidos para a extensão.asc e gravados em um diretório para leitura no Excel. O mesmo procedimento foi seguido com os dados gerados pelo transdutor de pressão (arquivos.dat), armazenados no CR 10X.

No presente trabalho foi utilizada a planilha MS Excel para leitura desses arquivos (.asc e .dat) e execução dos cálculos dos tempos de resposta.

Nos ensaios realizados em laboratório, os instantes onde ocorriam mudanças de velocidade de vôo (através dos comandos aplicados no Simfly 4.4) e na rotação da bomba (PC_Shell) foram definidos por T0, T3 e T6.

Para as condições de avaliação do controlador de fluxo submetido a variações na velocidade de vôo, T0 representa o momento onde a velocidade iniciada como padrão em 164 km/h passa para 200 km/h. T3 define o instante em que ocorre a redução da

velocidade de 200 para 164 km/h e T6 representa o instante final da realização do ensaio. O intervalo entre as ações de T0, T3 e T6 foi de 60 segundos.

Nas condições de ensaio envolvendo a alteração na rotação da bomba de pulverização, o instante T0 representa o momento da mudança de rotação de 2800 para 3360 rpm., T3 indica a passagem de 3360 para 2800 rpm e T6 indica o instante final do ensaio.

Nas Figuras 26 e 27, os pontos de referência T0 a T6 representam os instantes onde foram demarcados os valores de pressão que referenciam o cálculo do tempo de resposta do controlador de fluxo. Considerando-se a proporcionalidade entre a pressão e o fluxo e adotando-se como aceitáveis os desvios de até 5% da dose desejada, calculou-se o tempo de resposta de acordo com o procedimento descrito nos Quadros 8 e 9.

Quadro 8. Pontos de referência e tempos de resposta do controlador de fluxo em ensaios de variação de velocidade.

Pontos de referência no tempo de ensaio	Valor da pressão nos instantes demarcados
T0	Média de pressão nos 2 segundos anteriores ao instante T0
T1	Pressão 5% maior que em T0
T2	Pressão 5% menor que em T3
T3	Média de pressão nos 2 segundos anteriores ao instante T3
T4	Pressão 5% menor que em T3
T5	Pressão 5% maior que em T6
T6	Média de pressão nos 2 segundos anteriores ao instante T6
Componente do tempo de resposta	Descrição do cálculo para obtenção do tempo de resposta
RAV	Tempo de reação para elevação da pressão após aumento da velocidade (T1 - T0)
AAV	Tempo de ação para elevação da pressão após aumento da velocidade (T2 - T1)
TAV	Tempo total para elevação da pressão após aumento da velocidade (T2 - T0)
RDV	Tempo de reação para redução da pressão após diminuição da velocidade (T4 - T3)
ADV	Tempo de ação para redução da pressão após diminuição da velocidade (T5 - T4)
TDV	Tempo total para redução da pressão após diminuição da velocidade (T5 - T3)

Quadro 9. Pontos de referência e tempos de resposta do controlador de fluxo em ensaios de variação da rotação da bomba de pulverização.

Pontos de referência no tempo de ensaio	Valor da pressão nos instantes demarcados
T0	Média de pressão nos 2 segundos anteriores ao instante T0
T1	Pressão 5% maior que em T0
T2	Pressão 5% maior que em T3
T3	Média de pressão nos 2 segundos anteriores ao instante T3
T4	Pressão 5% menor que em T3
T5	Pressão 5% maior que em T6
T6	Média de pressão nos 2 segundos anteriores ao instante T6
Componente do tempo de resposta	Descrição do cálculo para obtenção do tempo de resposta
RAB	Tempo de reação para reajuste da pressão após aumento da rotação da bomba (T1 - T0)
AAB	Tempo de ação para reajuste da pressão após aumento da rotação da bomba (T2 - T1)
TAB	Tempo total para reajuste da pressão após aumento da rotação da bomba (T2 - T0)
RRB	Tempo de reação para reajuste da pressão após redução de rotação da bomba (T4 - T3)
ARB	Tempo de ação para reajuste da pressão após redução de rotação da bomba (T5 - T4)
TRB	Tempo total para reajuste da pressão após redução de rotação da bomba (T5 - T3)

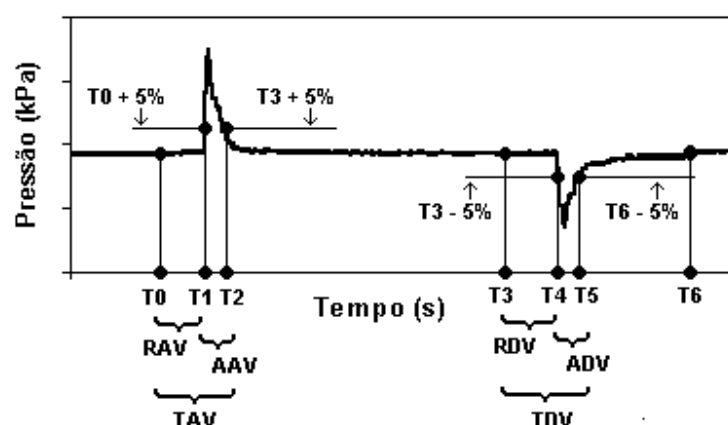


Figura 26. Exemplo do critério adotado para o cálculo do tempo de resposta do sistema controlador de fluxo a mudanças de rotação na bomba de pulverização.

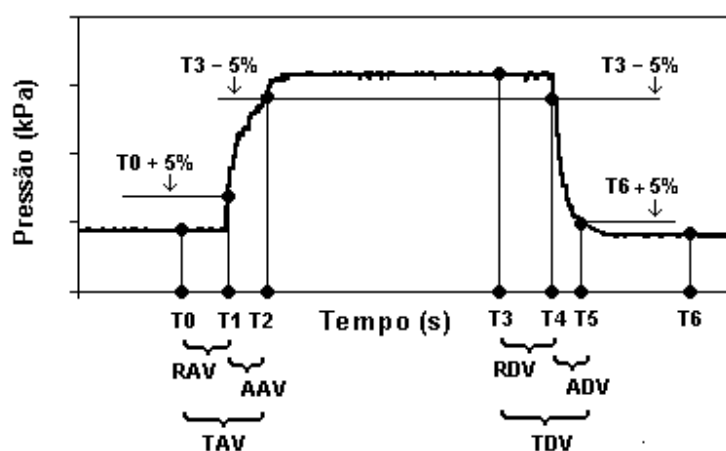


Figura 27. Exemplo do critério adotado para o cálculo do tempo de resposta do sistema controlador de fluxo a mudanças de velocidade de voo.

Nos ensaios para determinação do tempo de resposta a mudanças de velocidade (Quadro 8), a atuação do controlador de fluxo visa aumentar ou diminuir a pressão de pulverização para corrigir o fluxo de maneira proporcional ao aumento ou redução de velocidade. Assim, entre os instantes T0 e T3, o aumento de velocidade provoca um aumento de pressão, o qual ocorre em duas etapas (tempo de reação e tempo de ação). O tempo de reação representa o período entre a solicitação da mudança e o instante em que a pressão efetivamente começa a variar, ultrapassando o limite de 5% da pressão inicial. O tempo de ação corresponde ao período necessário para levar a pressão até 95% do novo valor desejado (pressão necessária para que o fluxo seja proporcional à nova velocidade). No caso da redução de velocidade, o processo se repete entre T3 e T6, contabilizando-se os mesmos tempo de reação e ação.

No caso dos ensaios de mudança da rotação da bomba de pulverização do equipamento (Quadro 10), o controlador atua no sentido de manter a pressão sempre no mesmo nível, independentemente da maior ou menor intensidade de bombeamento. De maneira análoga ao ensaio de mudança de velocidade, a ação do controlador também foi dividida em tempo de reação e tempo de ação, mantendo-se o critério de aceitação de variações da ordem de 5% do valor desejado de pressão.

5.3.3. Ensaio de acurácia do controlador de fluxo na determinação da vazão de calda aplicada

A acurácia do controlador de fluxo na determinação da vazão de calda foi avaliada pela comparação entre os valores obtidos a partir do sensor de pressão e os valores registrados pelo Airstar 99.5 no cartão de memória.

Para a obtenção de valores de vazão a partir dos dados de pressão foram determinadas equações de correlação entre pressão e vazão para cada uma das pontas utilizadas na simulação da barra de aplicação.

Para a ponta OC 80 foram realizadas amostragens de vazão com 6 valores de rotações da bomba (3600; 2871; 2668; 2243; 1858 e 1500 rpm) correspondendo ao intervalo de pressão de trabalho entre 93,09 a 555,31 kPa, com 5 repetições. Para a coleta das vazões utilizando-se a ponta OC 40, foram executados 11 valores de rotação na bomba (3600; 3300; 3000; 2900; 2850; 2800; 2700; 2500; 2000; 1500 e 1000 rpm) correspondendo a um intervalo de pressão de trabalho entre 41,36 a 626,06 kPa, com 5 repetições. O ajuste da constante da válvula de controle foi mantido para todas as situações de vazão em 0213 (valor básico recomendado pelo fabricante), e os dados de pressão foram coletados no CR10X através do transdutor de pressão.

Durante os ensaios para determinação da vazão, antes de cada sessão de coleta, era esperado um intervalo de tempo entre 10 a 15 segundos para estabilização do fluxo nas mangueiras.

Os volumes de calda coletados nos baldes plásticos foram transferidos individualmente para um novo balde, previamente aferido e tarado, e com o uso da balança de precisão foram pesados, sendo os valores convertidos em volume.

Este processo permitiu uma maior agilidade e precisão na indicação dos volumes das coletas, em substituição às provetas.

Os dados obtidos de vazão para cada tipo de ponta foram agrupados, e as indicações de tensão emitidas pelo transdutor de pressão foram convertidos em kPa com a aplicação de sua equação de calibração. Em seguida os dados foram processados com o uso do programa Excel, gerando-se as equações de vazão para a ponta OC 40 e para a ponta OC 80.

Para os ensaios de laboratório, os dados utilizados na comparação dos valores de vazão entre o Airstar 99.5 e o sensor de pressão foram obtidos do mesmo conjunto de valores usados nos ensaios de tempo de resposta. Para tanto, valores de pressão nos instantes T0, T3 e T6 foram transformados em vazão, utilizando as equações de correlação entre vazão e pressão, e os mesmos foram comparados com valores registrados pelo Airstar 99.5 nos instantes correlatos. Esta comparação foi possível, pois os relógios internos de todos os componentes utilizados (Airstar 99.5, CR10X e os computadores) foram sincronizados antes do início dos ensaios.

As comparações foram realizadas calculando-se o valor percentual do registro do Airstar 99.5 com relação ao valor obtido a partir do sensor de pressão.

5.3.4 Ajustes da constante de tempo de resposta do controlador de fluxo

Nos vários ensaios realizados, avaliou-se a influência da variação do valor da constante de ajuste do tempo de resposta do controlador. Esta constante corresponde a 4 dígitos cujos valores são selecionáveis via software no painel do controlador de fluxo. A função de cada número é apresentada no Quadro 10.

Quadro 10. Função e faixa de variação dos valores ajustáveis do algoritmo de controle do controlador de fluxo, visualizado no menu "Valve Cal".

Dígito	Nome	Função	Faixa de variação
1º	Valve backlash	Controla o tempo do primeiro pulso de correção depois que uma mudança na direção de correção da vazão é detectada. 1 - pulso curto; 0 - sem pulso. Obs.: recomendado valor 0 para este controlador de baixa vazão.	0 a 1
2º	Valve speed digit	Controla o tempo de resposta da válvula de controle. 9 - lenta; 0 - rápida. Obs.: o uso de ajuste para válvula muito rápida pode causar oscilação da vazão.	0 a 9
3º	Brake point digit	Ajusta o ponto em que a válvula de controle começa a "brecar" para evitar superdosagem ou subdosagem, após uma mudança. Este dígito representa a porcentagem de desvio da vazão desejada. Obs.: 0 = 5%; 1 = 10%; 9 = 90%.	0 a 9
4º	Dead band digit	Faixa de diferença aceitável com relação ao valor desejado de vazão em que o algoritmo não realiza o processo de controle. Obs.: 1 = 1%; 9 = 9%.	1 a 9

(Fonte: manual Satloc,1996). Valor básico sugerido pelo fabricante = 0213

Dada a grande quantidade de combinações possíveis optou-se, em função de razões práticas, por restringir as alternativas a serem estudadas. Assim, os testes de tempo de resposta foram desenvolvidos, inicialmente, utilizando-se os seguintes valores:

0213: valor básico sugerido pelo fabricante;

0013: valor básico alterando-se o segundo dígito para o mínimo (resposta muito rápida);

0913: valor básico alterando-se o segundo dígito para o máximo (resposta muito lenta);

0203: valor básico alterando-se o terceiro dígito para o mínimo (brecar a 5%);

0293: valor básico alterando-se o terceiro dígito para o máximo (brecar a 90%);

0211: valor básico alterando-se o quarto dígito para o mínimo (permitir faixa de 1%);

0219: valor básico alterando-se o quarto dígito para o máximo (permitir faixa de 9%).

Após a realização dos primeiros ensaios em laboratório, observou-se que parte destas combinações não resultavam em condições operacionais viáveis (algumas delas inibiam a ação de controle do equipamento). Assim, optou-se por utilizar apenas 4 ajustes, para os quais o controlador apresentou atividade normal de controle. Os ajustes selecionados foram: 0213, 0013, 0203 e 0211.

5.3.5 Delineamentos experimentais

5.3.5.1 Ensaio de variação da velocidade

Adotou-se o delineamento experimental com parcelas subdivididas no esquema 2 x 4, com 5 repetições, sendo 2 parcelas (taxas de aplicação de 4 e 8 L/ha) e 4 sub-parcelas (ajustes da constante do controlador: 0213, 0013, 0203 e 0211).

5.3.5.2 Ensaio de variação de rotação da bomba

Adotou-se o delineamento experimental com parcelas subdivididas no esquema 2 x 4, com 4 repetições, sendo 2 parcelas (taxas de aplicação de 4 e 8 L/ha) e 4 sub-parcelas (ajustes da constante do controlador: 0213, 0013, 0203 e 0211).

5.4 Ensaio de avaliação do controlador de fluxo em condições campo

5.4.1 Pré-teste realizado em Uruguaiana/RS

Os ensaios de avaliação do controlador de fluxo em condições de vôo, realizados na Município de Uruguaiana/RS, foram em parte cancelados em função das condições meteorológicas inadequadas durante o período, o que comprometeu a aquisição dos dados e desta forma serviram somente como pré-teste, visando familiarização das operações do sistema na aeronave e coleta de dados.

Neste trabalho foi utilizada uma aeronave agrícola, prefixo PT-UDG, dotada de motor de 300 HP, onde foram instalados 46 pontas de jato cônico, do tipo D8-45 (disco e core) (Travicar e Spraying Systems) e posteriormente 38 bicos pulverizadores ajustáveis Casm Plast.

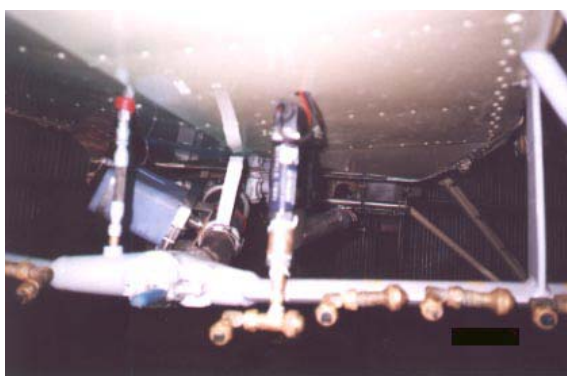
Operando-se a aeronave com uma rotação no motor a 2450 rpm, executou-se determinações de volumes através da individualização das vazões das pontas nas secções iniciais, médias e finais da barra, bem como junto a fuselagem, no sistema denominado “Y”. Posteriormente, foram efetuadas tentativas de aplicação em voo. Porém, as condições meteorológicas impediram a continuidade dos trabalhos, optando-se pela suspensão dos ensaios (Figura 28).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 28. Pré-teste do controlador de fluxo. (a,b) ensaio de vazão (c) detalhe do sensor e transdutor de pressão, (d) detalhe de instalação e manutenção do fluxômetro.

Ensaio Uruguaiana/RS

5.4.2 Ensaio de avaliação do controlador de fluxo realizado em São Borja/RS

a) Instalação do controlador de fluxo e calibração de vazão

O controlador de fluxo foi instalado em uma aeronave agrícola Ipanema modelo EMB 201-A prefixo PT-GYJ, dotada de motor de 300 HP e bomba centrífuga acionada hidraulicamente. A seguir, foi instalada uma barra com perfil aerodinâmico, posicionada abaixo do bordo de fuga, contendo 34 bicos do tipo CP, ajustados para obtenção de gotas médias e posição de orifício personalizado utilizadas nas condições da empresa.

De maneira semelhante ao realizado em Uruguaiana, executou-se determinações dos volumes de aplicação através da individualização das vazões das pontas nas secções inicial, média e final de cada lado da barra, bem como junto a fuselagem (Figura 29).

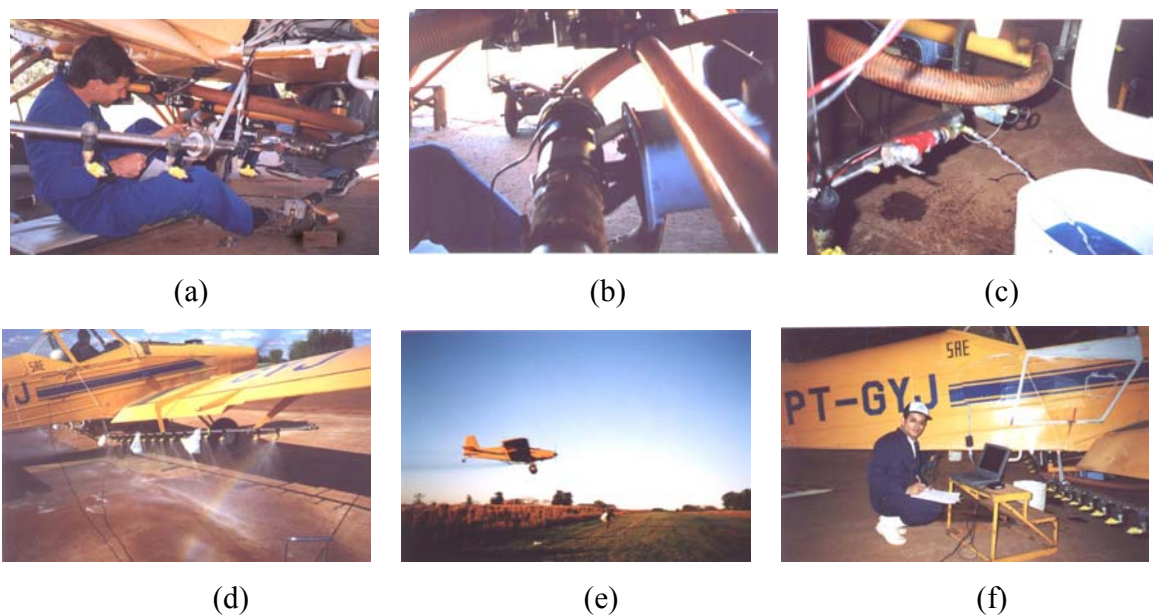


Figura 29. Ensaio em São Borja/RS, instalação do controlador de fluxo (a, b) detalhe do transdutor pressão (c), calibração de vazão (d), vôo de variação de velocidade (e), coleta e descarregamento de dados (f)

Posteriormente, optou-se pela técnica de calibração por diferença de nível no tanque, para maior precisão na determinação do fluxo total dos bicos, pois foi

observada grande variação de volume entre eles. Com o uso de uma fita adesiva colada e referenciada, junto à seção média interna do visor do tanque de produtos (hopper), foram feitos registros de consumo, empregando-se provetas graduadas e baldes, com a adição de volumes conhecidos pela tampa de abastecimento de produtos sólidos da aeronave, até se atingir a marcação de referencia inicial. Este procedimento foi realizado em três pressões de pulverização (220,63; 179,26 e 151,69 kPa). Para evitar as variações decorrentes da ação de abrir e fechar o sistema de aplicação, todas as barras permaneceram previamente cheias de líquido, resultado da realização prévia de ajuste de posicionamento da alavanca de comando “by pass”. (Figura 30). Uma vez ajustada (posicionada e travada com o batente dianteiro regulável), a aeronave foi desligada e em seguida efetuou-se a marcação do nível inicial de volume. Após esta operação, novamente o motor da aeronave foi acionado e o início da cronometragem para verificação da vazão somente ocorreu quando o regime de rotação do motor atingiu a indicação de 2450 rpm, e a bomba centrífuga de pulverização foi acionada.

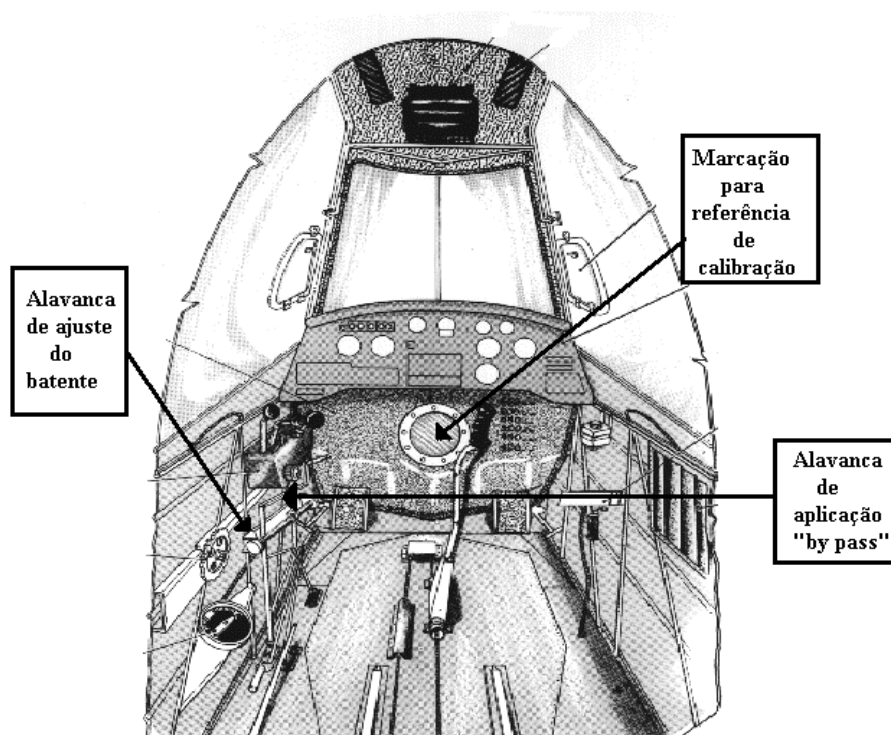


Figura 30. Vista geral da cabine da aeronave agrícola EMB 201-A (Imagem fornecida pela Embraer/Neiva)

Após cada cronometragem, com o motor desligado, esperou-se um tempo para estabilização da calda no interior do tanque e completou-se o volume até o ponto indicado de referencia. Este procedimento foi conferido por um observador posicionado no interior da cabine da aeronave.

O sistema de aquisição de dados e as baterias de alimentação foram colocados em duas caixas plásticas forradas com mantas de espuma presas internamente a chapas metálicas, e estas acondicionadas e fixadas no compartimento de bagagens da aeronave, ao lado da CPU do sistema DGPS (Figura 31).

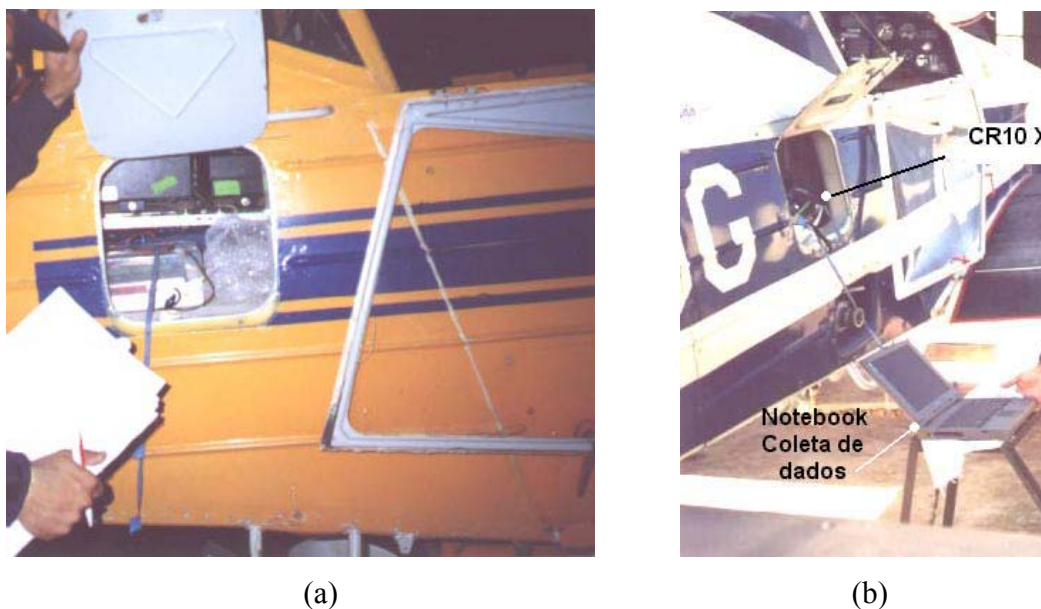


Figura 31. Detalhe de instalação do CR 10X e CPU do Airstar 99.5 na aeronave agrícola EMB 201-A ensaios realizados nos Municípios de São Borja (a) e Uruguaiana/RS) (b).

Durante estas amostragens de vazão, foi instalado na cabine da aeronave um notebook conectado ao CR10X, o que permitia visualizar em tempo real os sinais oriundos do sensor, principalmente nos ajustes prévios de pressão, com o intuito de se verificar na tela do computador os gráficos que eram formados com a indicação de possíveis alterações de pressões. Assim, se necessário, a aquisição de dados era interrompida durante o

ensaio. Para que se evitasse qualquer possibilidade de perda de carga e conseqüente sinal no computador, este foi alimentado com uma fonte externa acoplada a uma bateria de 12 v, cujos terminais estavam conectados a um transformador de voltagem de 12 para 110 V (Figura 32).



Figura 32. Calibração de vazão em solo, detalhe de individualização de coleta de volume nos bicos e fonte de alimentação com conversor de voltagem.

Antes da execução de todas as medições, foram ajustados os relógios internos do notebook e do CR 10X com os horários indicados no display do sistema DGPS, momento também em que foram feitas verificações dos níveis de carga das baterias (24V do sensor e 12 V do CR 10x) com auxílio de um multímetro digital.

Após coletados individualmente os volumes de aplicação para cada pressão de trabalho, os dados armazenados no CR 10X foram posteriormente transferidos para arquivos no notebook (Figura 31b).

Com o auxílio da planilha eletrônica Excel, os dados de vazão foram associados aos dados registrados pelo transdutor de pressão para a determinação da equação de vazão em função da pressão.

b) Ensaio de avaliação do controlador de fluxo em condições de vôo

Para a avaliação do controlador de fluxo nos ensaios a campo foram coletados dados em duas situações de vôo. A primeira correspondeu à coleta de dados durante um vôo para aplicação de defensivos em uma cultura de trigo com 166,9 ha, de onde foram escolhidas 12 faixas para análise dos dados. A segunda coleta ocorreu em um vôo de simulação de aplicação onde o piloto foi instruído a variar a velocidade da aeronave durante a aplicação, visando alterar propositalmente as condições de fluxo de calda. Para este teste foram realizadas duas faixas totalizando 9,2 km de comprimento.

A coleta dos dados para avaliação da acurácia foi realizada da mesma maneira que nos ensaios de laboratório, utilizando-se os valores obtidos no conjunto CR10X e sensor de pressão e os valores registrados pelo Airstar 99.5. Em ambas situações a válvula de acionamento elétrico do controlador de fluxo, foi pré-programada para o ajuste 0213.

Da mesma maneira ocorrida nos ensaios de vazão, após o pouso, os arquivos resultantes da aquisição de dados armazenados no CR10X e no cartão PCMCIA da CPU do DGPS, foram transferidos com o auxílio dos programas PC208W 3.2 e MAPSTAR para o notebook e posteriormente com o uso da planilha eletrônica MS Excel, foram processados para a obtenção das características de desempenho do controlador de fluxo.

5.4.3 Avaliação do controlador de fluxo instalado em um aerobarco de aplicação

O sistema Airstar 99.5 foi avaliado em condições de campo instalado em um aerobarco para aplicação de herbicidas em ambientes aquáticos (Figura 33). O ensaio foi realizado na represa próxima à usina de Jupiá (CESP - Companhia Energética de São Paulo), na divisa entre São Paulo e Mato Grosso do Sul. Para tanto, o sistema foi programado para aplicar 200 L/ha, com ajuste do algoritmo 0213 (valor básico recomendado pelo fabricante). A instrumentação e os procedimentos de coleta de dados foram os mesmos aplicados para os ensaios com a aeronave.

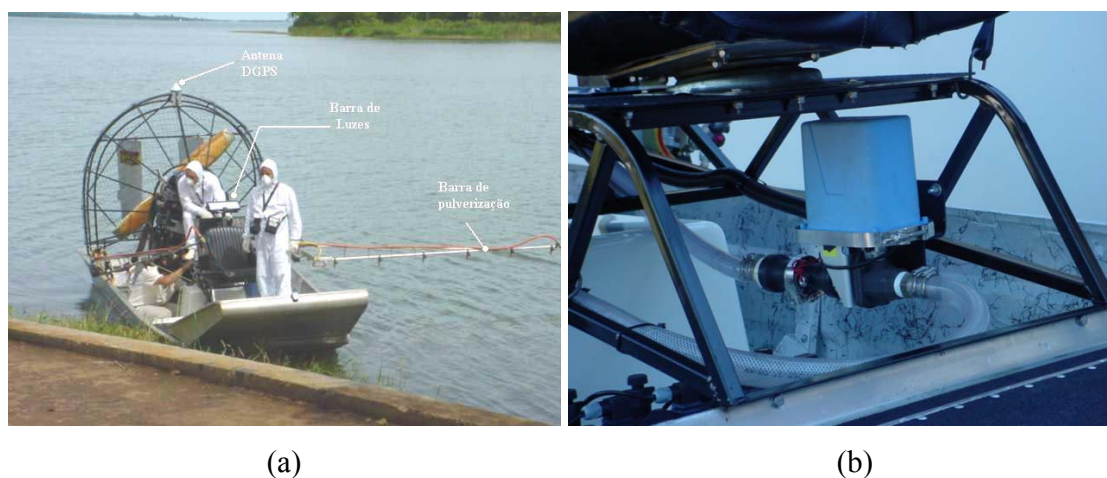


Figura 33. Vista geral do aerobarco no ensaio na represa próxima a Usina Jupia (a); detalhe da válvula de controle instalada no aerobarco (b).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Acurácia do DGPS na determinação da velocidade

Nos ensaios de determinação da velocidade, a cronometragem foi utilizada como referência absoluta, enquanto o radar foi utilizado para oferecer um parâmetro de comparação relativo a um sensor convencionalmente utilizado para a determinação de velocidade em controladores de fluxo. Do ponto de vista prático, a vantagem do uso do DGPS se refere a não dependência com relação à interação entre sensor e tipo de superfície, já que o radar pode apresentar diferenças de desempenho em função do tipo de superfície. Neste sentido, Tompkins et al. (1988) apresentaram resultados onde o radar obteve menor acurácia em condições de vegetação alta. Além disso, o DGPS não está sujeito aos erros inerentes aos sensores com referência no solo posicionados em apenas um dos lados do trator, como descrito por Antuniassi et al. (2001a).

No Quadro 11 são apresentados os resultados da análise de variância dos resultados de cada uma das metodologias para determinação da velocidade de deslocamento em linha reta. Observa-se que não houve diferença significativa entre os métodos, com baixo valor de desvio padrão em todas as velocidades testadas. O mesmo pode ser observado no Quadro 12, no qual são apresentados os resultados para o deslocamento em curva. Considerando o posicionamento do radar e da antena do DGPS na projeção do eixo longitudinal do veículo, ambas as determinações estão livres da influência do sentido de rotação (curva para a direita ou esquerda), conforme descrito por Antuniassi (2001a).

Quadro 11 Análise dos resultados de velocidade de deslocamento em linha reta obtidos através de diferentes metodologias (médias de 5 repetições).

Método	Velocidade observada (km/h)	Desvio padrão	Erro (%) em relação à cronometragem
Cronometragem	7,28	0,0783	-
	15,03	0,0608	-
	23,06	0,2235	-
	26,87	0,1296	-
	33,13	0,8646	-
Radar	7,29	0,0741	0,1
	15,04	0,1055	0,1
	23,11	0,1878	0,2
	27,00	0,1520	0,5
	33,50	0,6338	1,1
DGPS	7,30	0,0499	0,2
	15,03	0,1245	0,0
	23,12	0,1950	0,2
	27,06	0,1630	0,7
	33,65	0,6097	1,6

Quadro 12. Análise dos resultados de velocidade de deslocamento em curva o obtidos através de diferentes metodologias (médias de 3 repetições).

Método	Velocidade observada (km/h)	Desvio padrão	Erro (%) em relação à cronometragem
Cronometragem	7,06	0,1897	-
	9,86	0,0946	-
	15,01	0,1626	-
Radar	7,14	0,1654	1,0
	9,94	0,0883	0,8
	15,01	0,2142	0,0
DGPS	7,12	0,1509	0,7
	9,89	0,1882	0,3
	15,00	0,1702	-0,1

A ausência de diferença significativa entre os métodos e os baixos valores de desvio mostram que o DGPS é confiável para determinação de velocidades baixas, mesmo considerando trajetos em curvas de pequeno raio, como no ensaio realizado. Neste sentido, vale ressaltar que o equipamento em questão foi desenvolvido inicialmente para trabalhar em

aeroneves agrícolas, onde as velocidades são muito superiores (maiores 160 km/h, em muitos casos). Este fato é importante pois, considerando a acurácia de posicionamento do DGPS utilizado (até 1 metro, segundo o fabricante), haveria possibilidade de maior erro para menores velocidades, dada a relatividade da escala entre o erro de 1 metro e o espaço percorrido por unidade de tempo, quando comparadas velocidades maiores e menores.

6.2 Desempenho do controlador de fluxo em condições de laboratório

6.2.1 Determinação das equações

A equação de calibração do transdutor de pressão (Equação 2) mostra, através de seu valor de R^2 , que o método utilizando o sensor apresentou acurácia satisfatória na determinação da pressão de pulverização a partir da tensão.

$$T = 14,65 P + 473,75 \quad (R^2 = 0,9998) \quad (2)$$

Onde:

T = Tensão no transdutor de pressão (mV)

P = Pressão (kPa)

Para facilitar os ensaios de variação das condições operacionais (velocidade e rotação da bomba) em diferentes níveis de vazão (4 e 8 L/ha), as barras de pulverização foram simuladas a partir do uso de pontas OC 40 e OC 80, respectivamente. A Equação 3 (Figura 34) representa a proporcionalidade entre a vazão e a pressão de pulverização para a ponta OC 40, enquanto a Equação 4 (Figura 35) representa a mesma informação para a ponta OC 80. Em ambos os casos, o uso das pontas OC possibilitaram equações com valores adequados de acurácia, com resultados semelhantes aos apresentados por Figueiredo (1999) e Gadanha Junior (2000). De posse destas equações e da pressão estimada pela tensão do sensor foi possível determinar a vazão do sistema de pulverização a cada instante dos ensaios.

$$V = 0,9792 \sqrt{P} + 1,6551 \quad (R^2 = 0,9988) \quad (3)$$

Onde:

V = Vazão (L/min)

P = Pressão (kPa)

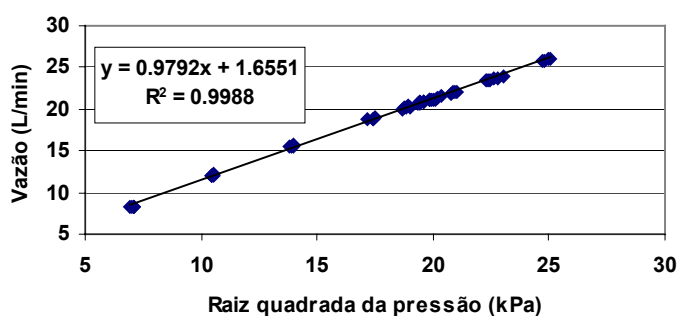


Figura 34. Representação gráfica da equação que correlaciona a vazão do sistema com a pressão, para a barra de pulverização simulada com a ponta OC 40.

$$V = 1,7632 \sqrt{P} + 1,5547 \quad (R^2 = 0,9995) \quad (4)$$

Onde:

V = Vazão (L/min)

P = Pressão (kPa)

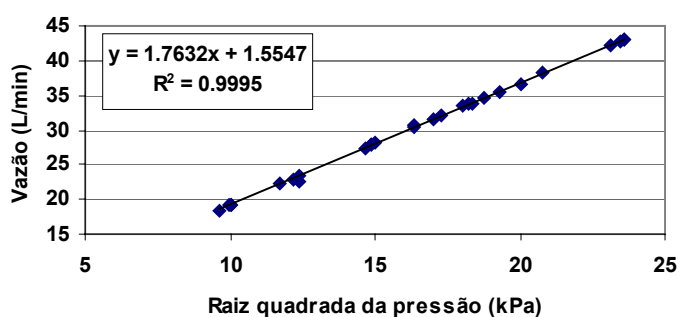


Figura 35. Representação gráfica da equação que correlaciona a vazão do sistema com a pressão, para a barra de pulverização simulada com a ponta OC 80.

6.2.2 Tempo de resposta do controlador de fluxo em função das variações de velocidade

O comportamento típico da pressão durante um ensaio de variação da velocidade de deslocamento através de mudanças em degrau (variação instantânea da velocidade) é apresentado na Figura 36. Cada elevação ou redução de pressão representa a resposta a um estímulo instantâneo do controlador pela variação da velocidade simulada. Assim, as regiões de baixa pressão representam simulações de baixa velocidade, e sendo o inverso verdadeiro. As pequenas variações de inclinação e duração das oscilações representam exatamente a variabilidade de resposta do controlador, a qual pode ser quantificada pela análise de variância dos ensaios. No caso da Figura 36 observam-se 5 oscilações, as quais representam 5 repetições de um determinado ensaio.

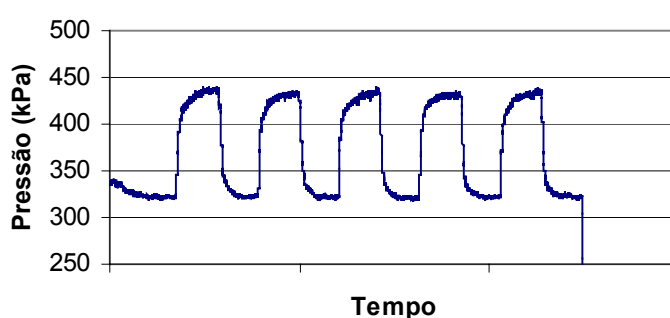


Figura 36. Resposta característica do controlador de fluxo alterando a pressão durante um ensaio de variação da velocidade de deslocamento, com 5 repetições, através de mudanças em degrau (variações instantâneas da velocidade).

O Quadro 13 apresenta os resultados do tempo de resposta para aumento da velocidade. Os valores encontrados oscilaram, em média, entre 6 e 20 segundos, dependendo do ensaio. Vale ressaltar que as variações instantâneas de velocidade tipo “degrau” ocasionam tempos de resposta maiores do que as variações suavizadas, (testes em rampas, por exemplo). Por outro lado, as variações em degrau podem ser consideradas melhores para oferecer um parâmetro comparativo entre diferentes sistemas. Para efeito comparativo, entretanto, Kirk & Tom (1996b) realizaram ensaios de tempo de resposta com

variação em degrau de um sistema controlador Satloc Airstar/Foreststar e obtiveram tempo de resposta de apenas 1,5 segundos para atingir $\pm 2,5\%$ de erro, enquanto nos resultados deste trabalho o menor valor obtido para alcançar $\pm 5\%$ de erro foi 4 vezes maior (aproximadamente 6 segundos). Neste caso, porém, não há referência dos autores quanto a possíveis variações na constante de ajuste do controlador.

Assim sendo, considerando as mudanças instantâneas de velocidade (degrau), observa-se que não houve interação entre a vazão e o ajuste do controlador no tempo total de resposta para aumento de velocidade (TAV). No caso da vazão, TAV foi significativamente maior para a menor vazão. Nos ajustes, TAV foi maior para o ajuste recomendado pelo fabricante (0213), com diferença estatisticamente significativa com relação aos demais. Este fato mostra que, para as condições de baixa vazão que foram utilizadas neste trabalho, haveria necessidade de reprogramar o equipamento para utilizar ajuste diferente daquele indicado como básico no manual de instruções. Neste sentido, Figueiredo (1999) e Gadanha Junior (2000) também obtiveram diferenças nos tempos de resposta em diferentes níveis de vazão para ensaios de controladores de fluxo.

Quadro 13. Análise de variância do tempo de resposta para o aumento da velocidade.

Vazão	Ajuste	TAV (s)	AAV (s)	RAV (s)
4	0213	15,03	10,77	4,30
4	0013	9,63	7,45	2,18
4	0203	8,60	5,70	2,90
4	0211	10,70	8,22	2,48
8	0213	11,55	8,98	2,58
8	0013	8,98	6,40	2,58
8	0203	6,43	3,60	2,83
8	0211	8,23	5,90	2,33
Médias: Vazão				
4		10,99 a	8,04	2,96
8		8,78 b	6,22	2,58
Médias: Ajuste				
	0213	13,29 a	9,88 a	3,44
	0013	9,30 b	6,93 b	2,38
	0203	7,52 b	4,65 b	2,87
	0211	9,46 b	7,06 b	2,40
Valores de F		Pr > F	Pr > F	Pr > F
Vazão		7,05 0,0290	4,58 0,0647	3,38 0,1032
Ajuste		9,11 0,0003	10,03 0,0002	4,13 0,0171
Vazão x Ajuste		0,53 0,6686	0,17 0,9177	3,54 0,0297
CV (%)		25,74	29,96	28,03

TAV = Tempo total para elevação da pressão após aumento da velocidade, AAV = Tempo de ação para elevação da pressão após aumento da velocidade, RAV = Tempo de reação para elevação da pressão após aumento da velocidade. Em cada análise, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Não houve interação entre os fatores no tempo de ação para o aumento de velocidade. Na análise dos fatores, houve diferença significativa apenas para os ajustes, onde o tempo de resposta foi significativamente maior, novamente, para o ajuste padrão 0213.

Em todas as análises do tempo de resposta para a diminuição da velocidade (Quadro 14) houve interação entre os fatores.

Quadro 14. Análise de variância do tempo de resposta para a diminuição da velocidade.

Vazão	Ajuste	TDV (s)	ADV (s)	RDV (s)
4	0213	10,28	7,17	3,10
4	0013	10,30	8,97	1,33
4	0203	7,55	4,87	2,68
4	0211	16,03	13,70	2,33
8	0213	11,85	6,88	4,98
8	0013	8,88	5,47	3,40
8	0203	7,95	4,85	3,10
8	0211	20,25	17,10	3,15
Médias: Vazão				
4		11,04	8,68	2,36
8		12,23	8,58	3,66
Médias: Ajuste				
	0213	11,07	7,03	4,04
	0013	9,59	7,22	2,37
	0203	7,75	4,86	2,89
	0211	18,14	15,4	2,74
Valores de F		Pr > F	Pr > F	Pr > F
Vazão		2,47 0,1544	0,02 0,8975	26,92 0,0008
Ajuste		86,15 0,0001	87,68 0,0001	12,56 0,0001
Vazão x Ajuste		5,85 0,0038	8,08 0,0007	3,84 0,0222
CV (%)		13,30	18,16	21,41

(*) TDV = Tempo total para redução da pressão após diminuição da velocidade, ADV = Tempo de ação para redução da pressão após diminuição da velocidade, RDV = Tempo de reação para redução da pressão após diminuição da velocidade. Em cada análise, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

No Quadro 15 são apresentados os resultados das análises de interações entre os fatores nos ensaios de tempo de resposta para alteração de velocidade. No caso do RAV, observa-se que o tempo de resposta foi destacadamente maior para a vazão menor no ajuste 0213. Não houve diferença entre os ajustes na vazão maior, ocorrendo o mesmo entre as vazões nos demais ajustes (a excessão do ajuste do 0213). Este fato mostra que o ajuste 0213 realmente não é adequado para vazões muito baixas. Vale ressaltar que Gadanha Junior e Antuniassi (2001) também obtiveram interações entre o tempo de resposta de controladores e o nível de vazão na aplicação.

Quadro 15. Análise das interações entre vazão de calda e ajuste do controlador de fluxo para o tempo de resposta a mudanças de velocidade

Ajuste dentro de Vazão		RAV (s)	TDV (s)	ADV (s)	RDV (s)
0213	4	4.30 a	10.28 b	7.17 b	3.10 a
0013	4	2.18 b	10.30 b	8.97 b	1.33 b
0203	4	2.90 a b	7.55 b	4.87 c	2.68 ab
0211	4	2.48 b	16.03 a	13.70 a	2.33 ab
0213	8	2.58 a	11.85 b	6.88 b	4.98 a
0013	8	2.58 a	8.88 b	5.47 b	3.40 b
0203	8	2.83 a	7.95 b	4.85 b	3.10 b
0211	8	2.33 a	20.25 a	17.10 a	3.15 b
Vazão dentro de Ajuste					
0213	4	4.30 a	10.28 a	7.17 a	3.10 b
0213	8	2.58 b	11.85 a	6.88 a	4.98 a
0013	4	2.18 a	10.30 a	8.97 a	1.33 b
0013	8	2.58 a	8.88 a	5.47 b	3.40 a
0203	4	2.90 a	7.55 a	4.87 a	2.68 a
0203	8	2.83 a	7.95 a	4.85 a	3.10 a
0211	4	2.48 a	16.03 b	13.70 b	2.33 a
0211	8	2.33 a	20.25 a	17.10 a	3.15 a

RAV = Tempo de reação para elevação da pressão após aumento da velocidade, TDV = Tempo total para redução da pressão após diminuição da velocidade, ADV = Tempo de ação para redução da pressão após diminuição da velocidade, RDV = Tempo de reação para redução da pressão após diminuição da velocidade. Em cada análise, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Os resultados para o TDV mostram que não houve diferença entre os ajustes para as vazões estudadas, com exceção do ajuste 0211, onde o tempo de resposta foi menor para a vazão mais baixa. Entretanto, destaca-se o menor tempo de resposta para o ajuste 0203 em todas as comparações. No caso do ADV, o ajuste 0203 apresentou o melhor resultado nas duas vazões, apesar de não haver diferença significativa com o 0013 e o 0213 na vazão maior. Ainda, destaca-se os tempos de resposta maiores obtidos pelo ajuste 0211. Os resultados do RDV mostram, em geral, que o ajuste básico 0213 apresentou o pior resultado, notadamente na vazão mais alta.

Em termos gerais, os tempo totais de resposta para aumento e diminuição de velocidade (TAV e TDV) mostram que o melhor ajuste foi o 0203. Comparando-se com o 0213, a modificação no ajuste correspondeu ao 3º dígito, o qual é responsável pelo ponto em que a válvula começa a brear (início do controle) após uma

mudança. No 0213, o 3º dígito tem valor 1, que corresponde a 10% de desvio permitido, enquanto no 0203, o 3º dígito vale 0, o que indica 5% de variação. Apesar do valor não ter ligação direta com o tempo de resposta da válvula (2º dígito), observou-se que a redução deste limite de desvio melhorou o tempo de resposta do equipamento para as mudanças instantâneas de velocidade.

6.2.3 Tempo de resposta do controlador de fluxo em função das variações de rotação da bomba

O comportamento típico do controlador durante um ensaio de variação da rotação da bomba de pulverização, através de mudanças em degrau (variação instantânea da rotação) é mostrado na Figura 37. Cada elevação ou redução repentina da pressão representa a alteração do bombeamento, que é seguida da ação do controlador para restabelecer a pressão inicial. A diferença no valor de pressão entre os patamares antes e depois de uma alteração indica a faixa de variação entre o valor desejado e o valor obtido na ação de controle, a qual pode ser variável em função das mudanças dos valores de ajuste do algoritmo de controle.

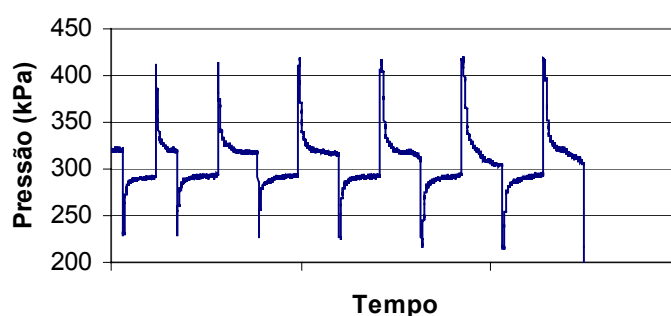


Figura 37. Resposta característica do controlador de fluxo corrigindo a pressão durante uma sequência de ensaios de variação da rotação da bomba de pulverização através de mudanças em degrau (variações instantâneas da rotação da bomba).

O tempo de resposta para as variações de rotação da bomba não pode ser analisado em função da falta de consistência dos valores obtidos nos ensaios. Para as várias combinações de vazão e ajuste, houve grande variabilidade nos tempo obtidos, assim como em muitos dos ensaios o controlador não apresentou atividade de controle. Este fato mostra que o controlador foi dimensionado para responder melhor às mudanças de velocidade do que às variações de intensidade de bombeamento. No caso dos testes realizados no laboratório, as variações de intensidade de bombeamento podem ter sido muito elevadas, causando a inconsistência da atividade de controle, inviabilizando a análise dos resultados.

Do ponto de vista prático, a maioria das situações vincula as alterações de bombeamento às mudanças de velocidade, notadamente nos equipamentos terrestres, onde a bomba é acionada pela tomada de potência (TDP) e a alteração de velocidade se dá na mesma marcha (Figueiredo, 1999). Mudanças de velocidade sem alteração do bombeamento ocorrem, por exemplo, quando da troca de marchas, mantendo-se a rotação.

No caso das aeronaves agrícolas, as mudanças abruptas ocorrem nas entradas e saídas dos campos (início e término das faixas), segundo Kirk & Tom (1996a). No caso das bombas de acionamento eólico, bombeamento e velocidade variam ao mesmo tempo, mas pequenas alterações de bombeamento podem ocorrer no caso de variações de velocidade do vento. Para as bombas de acionamento hidráulico, a rotação da bomba é constante, independente da velocidade, pois a mesma é acionada pelo motor, o qual permanece em rotação constante durante o voo.

6.2.4 Acurácia do controlador de fluxo na determinação da vazão de calda aplicada

Os resultados de acurácia nos ensaios de variação da velocidade (Quadro 16) demonstraram que em todas as condições de trabalho o controlador apresentou erros reduzidos, com valores das médias dos fatores inferiores a 2 % (os dados apresentados são valores absolutos de erro, desprezando-se o sinal, ou seja, podem ser tanto positivos ou negativos). Como parâmetro comparativo, Kirk & Tom (1996b) obtiveram valores entre 0 e 4,3% para avaliações semelhantes; Smith (2001) observou valores de erro de até 3,2% e Satloc (2002) apresentou valor de erro médio igual a 1,8%.

Quadro 16. Análise de variância do módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, nos instantes T0, T3 e T6, relativos aos ensaios de variação de velocidade.

Vazão	Ajuste	T0 (%)	T3 (%)	T6 (%)
4	0213	1,83	0,74	1,55
4	0013	1,54	0,32	2,22
4	0203	1,01	0,63	1,09
4	0211	1,08	0,80	1,21
8	0213	0,81	1,57	0,74
8	0013	1,39	1,92	1,41
8	0203	1,21	1,93	1,34
8	0211	1,08	2,05	1,06
Médias: Vazão				
4		1,37	0,62 b	1,51
8		1,12	1,87 a	1,14
Médias: Ajuste				
	0213	1,32	1,16	1,14
	0013	1,46	1,12	1,81
	0203	1,11	1,28	1,21
	0211	1,08	1,42	1,13
Valores de F		Pr > F	Pr > F	Pr > F
Vazão		2,32 0,1663	82,14 0,0001	9,03 0,0169
Ajuste		2,88 0,0567	1,82 0,1702	5,42 0,0055
Vazão x Ajuste		6,39 0,0024	2,38 0,0951	3,48 0,0314
CV (%)		26,95	25,52	33,46

T0: instante onde a velocidade é alterada de 164 km/h para 200 km/h; T3: instante onde a velocidade é alterada de 200 para 164 km/h; T6: instante final do ensaio. Em cada análise, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Para os pontos T0 e T6, a interação entre ajuste e vazão (Quadro 17) mostrou que na vazão maior não houve diferença entre os ajustes, enquanto na vazão menor houve tendência de maior acurácia no ajuste 0203. Comparando-se as vazões dentro de cada ajuste, observou-se que apenas no ajuste 0213 ocorreu diferença significativa, com melhor resultado para a vazão maior. Entretanto, vale ressaltar que, independentemente da ocorrência de diferenças significativas nas análises, todos os valores observados podem ser considerados adequados.

Quadro 17. Análise das interações entre vazão e ajuste para o módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, relativos aos ensaios de variação de velocidade.

Ajuste dentro de Vazão		T0 (%)	T6 (%)
0213	4	1.83 a	1.55 ab
0013	4	1.54 ab	2.22 a
0203	4	1.01 b	1.09 b
0211	4	1.08 b	1.21 b
0213	8	0.81 a	0.74 a
0013	8	1.39 a	1.41 a
0203	8	1.21 a	1.34 a
0211	8	1.08 a	1.06 a
Vazão dentro de Ajuste			
0213	4	1.83 a	1.55 a
0213	8	0.81 b	0.74 a
0013	4	1.54 a	2.22 a
0013	8	1.39 a	1.41 a
0203	4	1.01 a	1.09 a
0203	8	1.21 a	1.34 a
0211	4	1.08 a	1.21 a
0211	8	1.08 a	1.06 a

T0: instante onde a velocidade é alterada de 164 km/h para 200 km/h; T6: instante final do ensaio. Em cada análise, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Nos resultados de acurácia para os ensaios de variação da rotação da bomba observou-se que, para T0, houve apenas significância para os ajustes, com menor erro para 0213, apesar de não haver diferença significativa para 0203 e 0211. Para T3 e T6, a análise das interações (Quadro 17) mostrou que apenas a combinação 0213 e vazão menor obteve resultado significativamente inferior (menor erro). Da mesma maneira, Figueiredo e Antuniassi (2001) obtiveram menor erro com menores vazões quando do uso de controladores de pulverização em condições de campo.

Quadro 18. Análise de variância do módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, nos instantes T0, T3 e T6, relativos aos ensaios de variação da rotação da bomba.

Vazão	Ajuste	T0 (%)	T3 (%)	T6 (%)
4	0213	0,99	0,25	1,18
4	0013	1,68	1,44	1,13
4	0203	1,37	1,69	2,24
4	0211	1,49	1,38	1,78
8	0213	1,26	1,29	0,92
8	0013	2,40	1,53	1,89
8	0203	1,35	1,58	1,50
8	0211	0,88	1,21	0,86
Médias: Vazão				
4		1,38	1,19	1,58
8		1,48	1,40	1,30
Médias: Ajuste				
	0213	1,13 b	0,77	1,05
	0013	2,04 a	1,48	1,51
	0203	1,36 ab	1,64	1,87
	0211	1,19 ab	1,30	1,32
Valores de F		Pr > F	Pr > F	Pr > F
Vazão		0,06 0,8162	0,47 0,5194	2,32 0,1786
Ajuste		3,75 0,0297	13,30 0,0001	2,84 0,0669
Vazão x Ajuste		1,63 0,2175	7,45 0,0019	3,40 0,0405
CV (%)		42,92	22,52	40,25

T0: instante da mudança de rotação de 2800 para 3360 rpm; T3: instante da mudança de rotação de 3360 para 2800 rpm; T6: instante do final do ensaio. Em cada análise, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Quadro 19. Análise das interações entre vazão e ajuste para o módulo das diferenças percentuais entre os valores de fluxo de calda indicado pelo Airstar 99.5 e calculado pelos dados de pressão, relativos aos ensaios de variação da rotação da bomba.

Ajuste dentro de Vazão		T3	T6
4	0213	0,25 b	1,18 a
4	0013	1,44 a	1,13 a
4	0203	1,69 a	2,24 a
4	0211	1,38 a	1,78 a
8	0213	1,29 a	0,92 a
8	0013	1,53 a	1,89 a
8	0203	1,58 a	1,50 a
8	0211	1,21 a	0,86 a
Vazão dentro de Ajuste			
4	0213	0,25 b	1,18 a
8	0213	1,29 a	0,92 a
4	0013	1,44 a	1,13 a
8	0013	1,53 a	1,89 a
4	0203	1,69 a	2,24 a
8	0203	1,58 a	1,50 a
4	0211	1,38 a	1,78 a
8	0211	1,21 a	0,86 a

T3: instante da mudança de rotação de 3360 para 2800 rpm; T6: instante do final do ensaio. Em cada análise, as médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

6.3 Avaliação do controlador de fluxo em condições de campo

6.3.1 Ensaios com aeronaves

Em São Borja, houve a possibilidade de coletar dados em dois vôos de aplicação. No primeiro, a coleta ocorreu durante a aplicação comercial de fungicidas sobre uma cultura de trigo, com área tratada de 166,94 ha (Figura 38). No segundo vôo, o piloto foi instruído a simular aplicações (com água) realizando variação da velocidade de deslocamento. Neste caso, a área tratada (Figura 39) resultou em 13,55 ha.

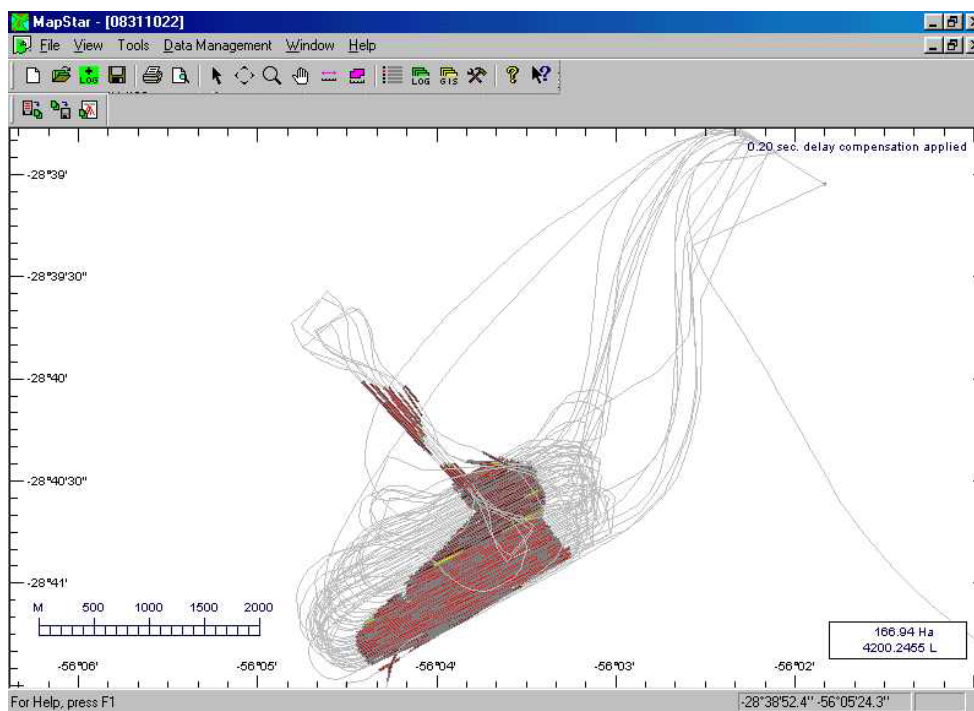


Figura 38. Mapa da área de aplicação real gerado com o programa Mapstar. Ensaio do controlador de fluxo realizado na Cidade de São Borja - RS.

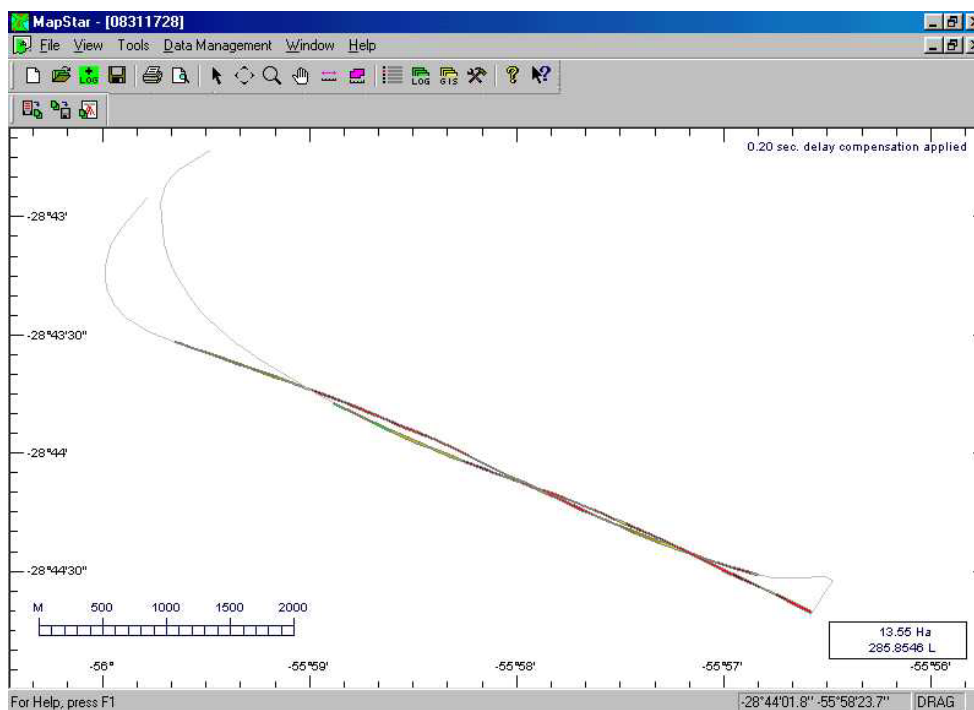


Figura 39 Mapa da área de aplicação com variação da velocidade de voo. Ensaio do controlador de fluxo realizado na Cidade de São Borja - RS.

A análise geral dos dados coletados mostrou que, por motivo desconhecido, o controlador de fluxo não estava operante. Assim, apesar de haver coleta de dados e mapeamento, o volume de calda não foi corrigido de acordo com as variações de velocidade. A Figura 40 mostra um exemplo de uma das faixas de aplicação onde houve variação da velocidade. Observa-se, neste caso, que a vazão de calda permaneceu constante, enquanto velocidade e a taxa de aplicação variaram de maneira inversamente proporcional. Assim, onde a velocidade aumentou houve menor a taxa de aplicação e vice-versa. Isto mostra que o controlador não estava habilitado.

A ausência de controle pode ser ocasionada por dois motivos. Em primeiro lugar, a chave seletora que desativa o controle para calibração em solo poderia estar acionada. Neste caso, a válvula de controle permanece travada e o sistema mantém vazão constante. Outra possibilidade é que o sistema Airstar 99.5 estivesse ajustado apenas para a função de monitoramento. Em ambos os casos, a pulverização é realizada mas não há controle automático de fluxo. Dadas as dificuldades de viabilização de novos trabalhos de campo com a aeronave, não foi possível realizar novos vôos para verificar estas hipóteses.

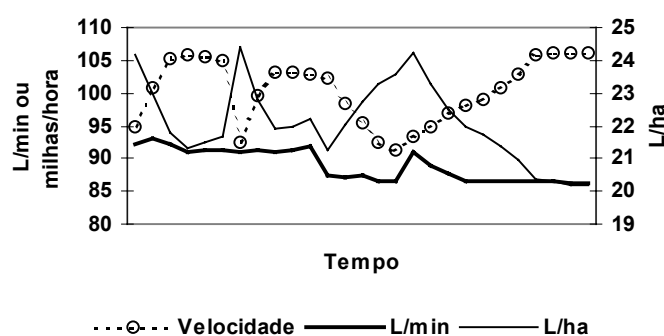


Figura 40. Gráfico característico de variação da velocidade de vôo e taxa de aplicação sem atuação do controlador de fluxo na correção da vazão.

6.3.2 Ensaio com aerobarco

Os dados coletados durante os testes de campo com o aerobarco mostraram que o controlador de fluxo atuou corretamente no ajuste do volume de aplicação, quando da variação da velocidade de deslocamento, não ocorrendo o problema operacional verificado nos ensaios com a aeronave. Observando-se a Figura 41, nota-se que o volume permaneceu, em média, próximo a 200 L/ha, enquanto velocidade e vazão variaram de maneira diretamente proporcional. Assim, quando ocorreu redução da velocidade, a vazão foi reduzida, de forma a manter a taxa de aplicação constante.

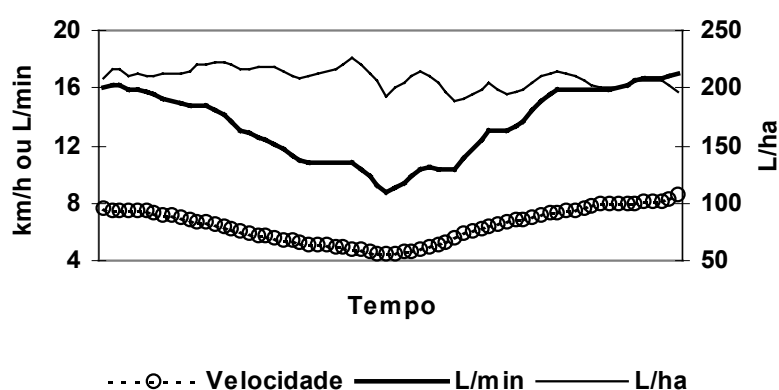


Figura 41. Gráfico característico de variação da velocidade e volume de aplicação com a manutenção da taxa de aplicação devido a atuação do controlador de fluxo.

6.4 Avaliação do desenvolvimento metodológico

A metodologia desenvolvida para a avaliação da acurácia do DGPS na determinação da velocidade de deslocamento se mostrou adequada, oferecendo resultados comparativos com métodos consagrados (radar e cronometragem) em condições operacionais variáveis (retas, curvas e em diferentes velocidades). A decisão de se realizar os ensaios sobre superfície asfáltica visou oferecer o melhor desempenho possível para as metodologias usadas como referência (radar e cronometragem), pois é sabido que a velocidade

indicada pelo radar pode sofrer influência da variação das condições superficiais (Tompkins et al., 1988). Entretanto, vale ressaltar que esta é, justamente, uma das grande vantagens do uso do DGPS para a determinação da velocidade, pois o mesmo oferece a informação sem que haja influência do tipo de superfície em que a máquina se desloca.

O uso do simulador de sinais de DGPS (Simfly) ofereceu condições satisfatórias para o ensaio do controlador em laboratório, mostrando-se ferramenta importante para avaliações estáticas de equipamentos que dependem de sinais de velocidade do DGPS. Do ponto de vista prático, seria recomendável que os sistemas baseados neste tipo de sinal de velocidade possuíssem rotinas internas para tal simulação, o que facilitaria, inclusive, os procedimentos de calibração estática dos equipamentos.

O variador de frequência (Movidrive) utilizado para definir a rotação da bomba de pulverização mostrou-se adequado para tal, facilitando a padronização dos ensaios. Dada sua versatilidade e a possibilidade de automação de rotinas via programação, considera-se tal ferramenta indispensável para estes tipos de ensaios em condições de laboratório.

A particularização dos componentes do tempo de resposta (ação, reação e tempo total) foi plenamente justificável, pois em muitas das análises houve diferenças nos níveis de significância e nas interações de fatores para os tempos de ação, reação e total. A exemplo do que foi observado por Gadanha Junior (2000), diferentes equipamentos podem apresentar variações significativas nos valores referentes a estes fatores, os quais podem, assim, ser empregados na caracterização e diferenciação entre equipamentos.

Os resultados das análises estatísticas mostraram que houve grande variação nos níveis de significância e na ocorrência de interações entre as diferentes vazões e valores de ajuste do controlador. Isto ressalta a validade metodológica da escolha destes parâmetros de avaliação. Com efeito, houve a possibilidade, inclusive, da determinação um valor de ajuste que se mostrou mais apropriado para maximizar o desempenho do controlador (ajuste 0203), quando comparado com o valor básico sugerido pelo fabricante (0213). Neste sentido, torna-se importante frisar a ausência de informação dos valores usados neste ajuste quando da publicação de resultados de outras pesquisas, como por exemplo, nos trabalhos de Kirk & Tom (1996b) e Satloc (2002).

As grandes dificuldades encontradas na viabilização dos ensaios de campo reforçam a importância de se desenvolver procedimentos padronizados de ensaios de laboratório. No caso deste trabalho, o alto custo da utilização das aeronaves e a dificuldade de disponibilização das mesmas para as atividades de pesquisa, nos momentos adequados, foram determinantes na impossibilidade de se obter resultados satisfatórios nestes ensaios.

6.5 Sugestão para trabalhos futuros

Considerando-se a tendência de melhores resultados no tempo de resposta para o ajuste 0203, sugere-se que sejam realizados novos ensaios de campo para a avaliação do desempenho do controlador considerando-se outros ajustes. No presente trabalho, os ajustes utilizados foram definidos pela variação individual de cada um dos 4 dígitos. Numa situação prática, podem ser testadas novas combinações, buscando-se otimizar os resultados.

7 CONCLUSÕES

Para as condições de realização deste trabalho são possíveis as seguintes conclusões:

- Não houve diferença estatisticamente significativa nos valores indicados de velocidade entre as metodologias utilizadas (DGPS, radar e cronometragem), tanto em retas como em curvas;
- O tempo médio de resposta do controlador de fluxo para variações de velocidade oscilou entre 6 e 20 segundos;
- Variações na vazão total e nos valores de ajuste do controlador tiveram influência significativa no tempo de resposta do controlador, havendo situações onde ocorreu interação entre os fatores avaliados;
- Houve tendência de melhores resultados no tempo de resposta utilizando-se o ajuste 0203 para a constante do controlador;
- O sistemas de controle de fluxo apresentou índices de erro médio abaixo de 2% em todas as condições operacionais avaliadas;
- As metodologias desenvolvidas e utilizadas podem ser consideradas adequadas para os propósitos do estudo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ^{1,2}

AGROTEC. Disponível em:

<<http://www.agrotec.etc.br/produtos/satloc/flowcontrol/flowcontrol.html>>. Acesso em : 13. dez. 2002.

AL-GAADI, K.A., AYERS, P.D. Monitoring controlled and non-controlled field sprayer performance. *Am. Soc. Agric. Eng. Pap.*, n.93-1049, p.1-12,1993

ANTUNIASSI, U.R., VELINI, E.D., CARVALHO, W.P.A., TANAKA, R. I. Análise e otimização de um sistema de gerenciamento de fluxo instalado em um aerobarco para aplicação de herbicidas aquáticos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 23, 2002, Gramado. *Resumos...* Londrina: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2002b. v.1, p.673

ANTUNIASSI, U. R.; FIGUEIREDO, Z.N.; GADANHA JUNIOR, C. D. Avaliação de sensores de velocidade em função do tipo de superfície e direção de deslocamento do trator. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v. 21, n. 1, p. 74-81, 2001a

¹ (1) UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA: Faculdade de Ciências Agronômicas. *Normas para elaboração de dissertações e teses*. Botucatu,1997. 35p.

² (2) BIOSIS. *Serial sources for the BIOSIS previews database*. Philadelphia, 1990. 413p.

- ANTUNIASSI, U.R., FIGUEIREDO, Z.N., GADANHA JÚNIOR, C.D. Avaliação de sensores de velocidade em função do tipo de superfície e direção de deslocamento do trator. *Eng. Agríc.*, v.21, n.1, p.74-81, 2001c.
- BALASTREIRE, L.A. Estudo de caso : uma pesquisa brasileira em agricultura de precisão. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – MECANIZAÇÃO MECANIZAÇÃO E AGRICULTURA DE PRECISÃO, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais.. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.203- 9.
- CAMPBELL SCIENTIFIC. *CR10X micrologger operator's manual*. Campbell Scientific, Inc., Logan, 1997. “não pag.”
- CARDOSO, F., FERREIRA, V. Agricultura revigora economia. Disponível em: <http://www.estadao.com.br/safra/2003/novasafra_001.htm>. Acesso em: 9. dez. 2002.
- COELHO, C. N. Produção agrícola brasileira. Disponível em: <<http://www.mre.gov.br/cdbrasil/itamaraty/web/port/economia/agric/producao/>>. Acesso em: 29. out. 2002.
- DICKEY-JOHN CORPORATION. *DjCCS 100 liquid sprayer control system: installation and operating manual*. Auburn, s.d. 45 p.
- FIGUEIREDO, Z. N. *Desempenho de sistemas de controle para pulverizadores de barras operando em condições de campo*. Botucatu, 1999. 72p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.
- FIGUEIREDO, Z. N., ANTUNIASSI, U. R. Desempenho de sistemas de controle para pulverizadores de barras operando em condições de campo *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 16, n. 4, p. 45-52, 2001

FROST, A.R. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines. *J. Agric. Eng. Res.*, v. 46, p.55-70, 1990.

GADANHA JUNIOR, C.D. Avaliação do tempo de resposta de controladores eletrônicos em pulverizadores agrícolas. Botucatu, 2000. 125p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

GADANHA JUNIOR, C. D., ANTUNIASSI, U. R. Desempenho de um controlador para pulverização em função do tipo de sensor usado para estimativa do fluxo de calda Energia na Agricultura, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 67-78, 2001

GANDOLFO, M.A. *Inspeção periódica de pulverizadores agrícolas*. Botucatu, 2001. 92p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

GILES, D. K., COMINO, J. A. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles *J. Agric. Eng. Res.*, v.47, p.249-67,1990.

HUGHES, K.L., FROST, A.R. A review of agricultural spray meeting. *J. Agric. Eng. Res.*, v.32, p.197-207, 1985.

HURN, J. *GPS: um guia para a próxima utilidade*. Trimble: Trimble Navigation, 1989. 76p.

In CHO,S., LEE,J.H. Autonomous speedsprayer using differencial global positioning system, Genetic algorithm and fuzzy control. *J.Agric. Eng. Res.* v.7,p.111-9, 2000.

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

KIRK,I.W., TOM, H.H. Precision GPS flow control for aerial spray applications. *Nat.*

Assoc. Agric. Aviat., Am.Soc.Agric.Eng. Pap., n.AA96-009, p.1-11, 1996a.

KIRK, I.W., TOM, H.H. Precision GPS flow control for aerial spray applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3,1996, Minneapolis. *Proceedings...* Minneapolis: ASA-CSSA-SSSA, ,1996b. p.815-7.

KOO,Y.M., SUMMER,H.R Total flow control for a direct injection sprayer. *Appl. Eng. Agric.*, v.14, p.363-7, 1998.

LECHNER, W., BAUMANN, S. Global navigation satellite systems. *Comput. Electron. Agric.*, v.25, p.67-85, 2000.

MANTOVANI, E.V., QUEIRÓS,D.M., DIAS, G.P. , Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA- MECANIZAÇÃO E AGRICULTURA DE PRECISÃO, 23,1998, Poços de Caldas. *Resumos...* Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. cap.4, p.109-39.

MONTALESCOT, J.B. Eletronique et rebotique une révolution pour l'agriculture, CEMAGREF. Bull. Techn. Machin. L'Équipm. Agric., n.48, p.23-31, 1990.

MORAES, A.E. Um exemplo para quem acredita no Brasil. *Folha de São Paulo*, 22. dez. 2002. p.A2, n.26926, ed..

RIDER, A.R., DICKY, E.C. Field evaluation of calibration accuracy for pesticide application equipment. *Trans. ASAE. (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.25, p.258-60, 1982.

ROCHA, J.V., LAMPARELLI, R.A.C. Geoprocessamento. In : (Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão.) In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA- MECANIZAÇÃO E AGRICULTURA DE PRECISÃO, 23,1998, Poços de Caldas. *Resumos...* Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. cap.1, p.1-25.

SARAIVA, A. M., CUGNASCA, C.E. Sistemas para agricultura de precisão : Equipamentos e programas. (In : Máquinas e operações utilizadas na agricultura de precisão.) In : CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA- MECANIZAÇÃO E AGRICULTURA DE PRECISÃO, 23,1998, Poços de Caldas. *Resumos...* Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. cap.5. p.159- 202.

SATLOC, PRECISION GPS APPLICATION . SFC/M. *Satloc flow control and monitor option kit-Technical manual*. 1996.

SATLOC, Advantage of having Automatic Flow Control: Disponível em :
<http://www.satloc.com/site_Products4_FlowControl.htm > Acesso em 26 dez.2002.

SEW. *Movidrive drive inverters system manual*. SEW, Edition 04/99, 1999. 230p.

SINDICATO DAS EMPRESAS DE AVIAÇÃO AGRÍCOLA-SINDAG. Estatística.

Disponível em : <<http://www.sindag.org.br/info/estatisticas/geral.html>>. Acesso em:
7 dez. 2002.

SMITH, L.A. Automatic flow control for aerial applications. *Appl. Eng.Agric.*, v.17, p.449-55, 2001.

SPRAYING SYSTEMS Co. Teejet: produtor de pulverização para agricultura. Wheaton, 1998. 104p. (Catálogo 46M – BR/P).

STAFFORD, J.V. Precision agriculture: sensing positioning and application machinery requirements: In: SEMINAR ON SITE SPECIFIC FARMING , KOLDKAEGAARD, Arthus, Denmark. Danish Institute of Plant and Soil Science, 1995, SP. p.10-20.
(Report, 26)

- STEWART, B.L., HUMBURG, D.S. Modeling the raven SCS-700 Chemical injection system with carrier control with sprayer simulation. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.43, p.231-45, 2000.
- TOMPKINS, F.D., HART, W.E., FREELAND, R.S., WILKERSON, J.B., WILHELM, L.R. Comparison of tractor ground speed measurement techniques. *Trans. ASAE (Am.Soc.Agric.Eng.)*, v.31, p.369-74, 1988.
- ULSON, J.A.C. *Desenvolvimento de um sistema de controle inteligente a aplicação de fertilizante líquidos em taxas variáveis*. Botucatu, 2002. 149p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista .
- VEAL, M.W., Taylor,S.E., McDonald,T.P., McLemore,D.K., Dunn,M.R. Accuracy of tracking forest machines with GPS. *Trans. ASAE (Am. Soc. Agric. Eng.)*, v.44, p.1903-11, 2001.
- VELINI, E.D., MARCONDES, D.A.S., ANTUNIASSI, U., MARTINS, D., MUSTAFA, A L. Aerobarco para levantamento de flora e aplicação de herbicidas aquáticos: desenvolvimento de um sistema de pulverização com controle eletrônico de fluxo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 23, 2002, Gramado. *Resumos...* Londrina: Sociedade Brasileira das Ciências das Plantas Daninhas, 2002. v.1, p. 706.
- VETTER, AA. Quantitate evaluation of DGPS guidance for aerial agricultural applications. *Appl. Eng. Agric.*, v.12, p.611-6,1996.
- WERF, H.M.G. Assessing the impact of pesticides on the environment Agric. Ecosyst. Environ., v.60, p.81-96, 1996.

APÊNDICES

Apêndice 1. Programa 1 aplicado ao coletor de dados CR10 X no Ensaio comparativo RADAR X DGPS X CRONOMETRAGEM manual

```
;{CR10X}
;Wel2
*Table 1 Program
  01: 1          Execution Interval (seconds)

1:  Pulse (P3)
  1: 1          Reps
  2: 1          Pulse Channel 1
  3: 1          Low Level AC, All Counts
  4: 3          Loc [ Radar      ]
  5: 1.0        Mult
  6: 0.0        Offset

2:  If (X<=>F) (P89)
  1: 3          X Loc [ Radar      ]
  2: 3          >=
  3: 1          F
  4: 10         Set Output Flag High (Flag 0)

3:  Real Time (P77)
  1: 0011       Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

4:  Sample (P70)
  1: 1          Reps
  2: 3          Loc [ Radar      ]

*Table 2 Program
  02: 0.0000     Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-
1 Pressao 1 0 0
2 Pressao__ 1 0 0
3 Radar 1 2 1
4 _____ 0 0 0
5 _____ 0 0 0
6 _____ 0 0 0
7 _____ 0 0 0
8 _____ 0 0 0
```


9	_____	0	0	0
10	_____	0	0	0
11	_____	0	0	0
12	_____	0	0	0
13	_____	0	0	0
14	_____	0	0	0
15	_____	0	0	0
16	_____	0	0	0
17	_____	0	0	0
18	_____	0	0	0
19	_____	0	0	0
20	_____	0	0	0
21	_____	0	0	0
22	_____	0	0	0
23	_____	0	0	0
24	_____	0	0	0
25	_____	0	0	0
26	_____	0	0	0
27	_____	0	0	0
28	_____	0	0	0

-Program Security-

0000

0000

0000

-Mode 4-

-Final Storage Area 2-

0

-CR10X ID-

0

-CR10X Power Up-

3

Apêndice 2. Programa 2 aplicado ao coletor de dados CR10 X no Ensaio de Avaliação do controlador de fluxo

```
;{CR10X}
;Wel2
*Table 1 Program
  01: 0.125000 Execution Interval (seconds)

1: Volt (SE) (P1)
  1: 1      Repts
  2: 15     2500 mV Fast Range
  3: 1      SE Channel
  4: 1      Loc [ Pressao  ]
  5: 1.0    Mult
  6: 0      Offset

2: Batt Voltage (P10)
  1: 3      Loc [ Bateria  ]

3: If (X<=>F) (P89)
  1: 1      X Loc [ Pressao  ]
  2: 3      >=
  3: 800    F
  4: 30     Then Do

4: Z=F (P30)
  1: 0      F
  2: 00     Exponent of 10
  3: 4      Z Loc [ Flag3    ]

5: Do (P86)
  1: 10     Set Output Flag High (Flag 0)

6: Set Active Storage Area (P80)
  1: 1      Final Storage Area 1
  2: 10     Array ID

7: Resolution (P78)
  1: 0      Low Resolution

8: Real Time (P77)
```

```

1: 0011      Hour/Minute,Seconds (midnight = 0000)

9: Sample (P70)
  1: 2      Reps
  2: 1      Loc [ Pressao  ]

10: Else (P94)

11: If (X<=>F) (P89)
  1: 4      X Loc [ Flag3    ]
  2: 1      =
  3: 1      F
  4: 0      Go to end of Program Table

12: Z=F (P30)
  1: 1      F
  2: 00     Exponent of 10
  3: 4      Z Loc [ Flag3    ]

13: End (P95)

14: If (X<=>F) (P89)
  1: 4      X Loc [ Flag3    ]
  2: 1      =
  3: 1      F
  4: 30     Then Do

15: Z=Z+1 (P32)
  1: 2      Z Loc [ Flag6    ]

16: End (P95)

*Table 2 Program
  02: 0.0000   Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-
1 Pressao  1 2 1

```

2	Flag6	1	0	1
3	Bateria	1	0	1
4	Flag3	1	2	2
5	_____	0	0	0
6	_____	0	0	0
7	_____	0	0	0
8	_____	0	0	0
9	_____	0	0	0
10	_____	0	0	0
11	_____	0	0	0
12	_____	0	0	0
13	_____	0	0	0
14	_____	0	0	0
15	_____	0	0	0
16	_____	0	0	0
17	_____	0	0	0
18	_____	0	0	0
19	_____	0	0	0
20	_____	0	0	0
21	_____	0	0	0
22	_____	0	0	0
23	_____	0	0	0
24	_____	0	0	0
25	_____	0	0	0
26	_____	0	0	0
27	_____	0	0	0
28	_____	0	0	0

-Program Security-

0000

0000

0000

-Mode 4-

-Final Storage Area 2-

0

-CR10X ID-

0

-CR10X Power Up-

3