

**AVALIAÇÃO DO TEMPO DE RESPOSTA DE UM CONTROLADOR DE FLUXO COM DGPS SUBMETIDO À VARIAÇÃO DE VELOCIDADE DE VÔO EM CONDIÇÕES DE VÔO SIMULADO EM LABORATÓRIO<sup>1</sup>**

WELLINGTON PEREIRA ALENCAR DE CARVALHO<sup>2</sup> & ULISSES ROCHA ANTUNIASI<sup>3</sup>

---

**RESUMO:** A aplicação de defensivos é uma das etapas mais importantes do processo de produção agrícola. O volume de calda pode interferir diretamente no sucesso de uma aplicação, e este parâmetro 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 das faixas de aplicação. Visando melhorar qualidade geral da aplicação e preservação dos níveis de precisão das doses aplicadas, o uso de sistemas de controle eletrônico de fluxo possibilita o ajuste automático do volume aplicado ao longo da área quando ocorre variação da velocidade durante a aplicação. O objetivo do presente trabalho foi estudar os tempos de resposta de um controlador de fluxo com DGPS para aplicações aéreas submetido à variação de velocidade de deslocamento em condições de simulação virtual de vôo em laboratório. Para tanto uma bancada de ensaios foi desenvolvida incluindo software para simulação de sinais de DGPS, o qual foi utilizado para simulação de condições de voo com variações de velocidade. Os resultados mostraram que 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.

**Palavras-Chave:** Tecnologia de aplicação, defensivos agrícolas, aplicação aérea.

---

<sup>1</sup> Parte da tese de doutorado do primeiro autor intitulada: Desempenho de um controlador de fluxo com DGPS para máquinas de pulverização.

<sup>2</sup> Professor da Universidade Federal de Lavras - UFLA – (Lavras-MG) e aluno do curso de PG Energia na Agricultura - FCA/UNESP - Botucatu/SP. E-mail: [wellingt@ufla.br](mailto:wellingt@ufla.br)

<sup>3</sup> Orientador e Professor do Departamento de Engenharia Rural - FCA/UNESP - Botucatu/SP - Brasil. E-mail: [ulisses@fca.unesp.br](mailto:ulisses@fca.unesp.br)

## EVALUATION OF RESPONSE TIMES FOR FLOW CONTROLLERS WITH DGPS SUBJECTED TO CHANGE FLIGHT SPEED IN CONDITIONS SIMULATED IN LABORATORY

**SUMMARY:** *The application of pesticides is one of the most important steps in the agricultural production process. The spray volume can directly affect application success, and this parameter is directly dependent on the displacement speed of the sprayer. In conventional systems, the operator has to maintain a constant speed to ensure uniform application along the tracks. In order to improve over application quality and preserve levels of precision for applied doses; the use of electronic flow control systems allows for automatic adjustment of volume applied over the area when there is a change in velocity during application. The objective of this research was to study the response times of a flow controller with DGPS for aerial application subjected to variations of velocity in laboratory simulated flight conditions. For this purpose, a bench test has been developed including software for simulating DGPS signals, which was used to simulate different flight speeds and conditions. The results showed the average response time from the flow controller to a change in velocity to be between 6 and 20 seconds. Variations in total flow and the controller setting had a significant influence on response time with situations where there was interaction between the factors being evaluated. There was a tendency for better response times using a constant setting for the control algorithm other than that specified by the manufacturer. The flow controller presented an average error rates below 2% in all evaluated operating conditions, providing satisfactory accuracy in determining the output of product in different test situations.*

**Keywords:** *application technology, pesticides, aerial application.*

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade agrícola tem sido associado ao uso de novas tecnologias. Nos moldes atuais de produção, a aplicação dos agroquímicos 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 destes produtos, 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.

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.

Estudos realizados por Al-Gaadi & Ayers (1993), sobre a eficácia da 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). Em pulverizações aéreas, Kirk & Tom (1996a), estudando o comportamento dos níveis de aplicação em campo com e sem a adoção de um sistema controlador de fluxo acoplado ao DGPS instalado em uma aeronave Cessna AgHusky, obtiveram média de erros para as taxas de aplicação nos tratamentos sem o controlador de fluxo de 9,6%, e uma faixa de 0 a 4,3% com o sistema controlador de fluxo em funcionamento. Obtiveram ainda, erros entre 6,4 a 14,3% quando as taxas de aplicação foram baseadas na velocidade em relação ao solo, sem o uso do controlador.

Kirk & Tom (1996a), simulando os efeitos de mudanças bruscas de velocidade na entrada e saída de áreas de aplicação, estudaram em condições de laboratório a resposta do controlador de fluxo com DGPS (Satloc Airstar/Forestar) acoplado a um computador, uma bomba centrífuga e uma válvula de controle com derivação de 3 vias. Executando variações de velocidades em relação ao solo, observaram que para mudanças bruscas de velocidade, 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 %, enquanto que este tempo subiu para 4 s quando do requerimento de erros inferiores a 0,5%.

Estudos desenvolvidos pela Satloc (2002) verificando influencia da ação dos controladores de fluxo em aplicações, encontraram variação negativa de 1,8% entre o volume aplicado e o pretendido, com o sistema em funcionamento, e variação positiva de 7,2% quando o controlador de fluxo estava desativado.

Smith (2001), ao estudar duas versões de sistemas controladores de fluxo para utilização em aeronaves agrícolas, uma com a correção da vazão diretamente através da válvula da barra de pulverização (Autocal I) e a outra 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), encontrou erros máximos entre 1,55% e 3,2% para o sistema Autocal I e variações de erros entre 0,64 a 1,60% para o sistema Autocal II. Verificou, ainda, que o tempo gasto pelos controladores para reduzir os erros a valores inferiores a 37% foram de menos de 0,5 s. Ainda segundo Smith (2001), diversos fatores afetam a acurácia da aplicação, incluindo a velocidade aerodinâmica, velocidade do solo, alinhamento de faixa, etc. Nas aeronaves que possuem sistemas de aplicação com bomba de acionamento eólico, mudanças na velocidade de vôo têm 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 à 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.

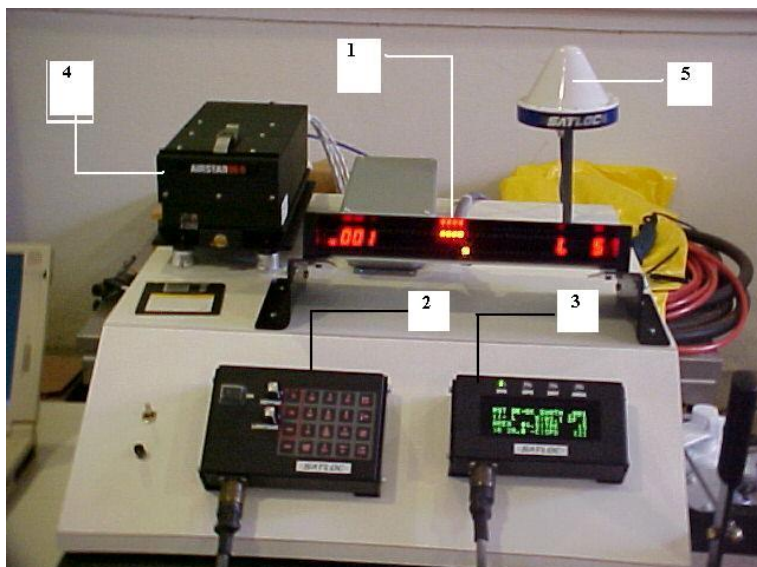
De acordo com Rider & Dickey (1982), nas instruções contidas no guia para aplicadores comerciais publicado nos Estados Unidos em 1975, os erros nas taxas de aplicações recomendadas deveriam estar dentro do intervalo de  $\pm 5\%$ . Estudando as taxas de aplicação em trabalhos de 152 operadores no Estado de Nebraska/EUA, Rider & Dickey (1982) verificaram que somente 4 operadores possuíam equipamentos que atendia as especificações requeridas, e que mais de 90% estavam com os equipamentos aplicando taxas acima das especificadas, com um o coeficiente de variação médio de uniformidade entre bicos de 21,9%. Observaram também que a maior fonte de erro foi devido à calibração (76,3% das situações).

O objetivo do presente trabalho foi estudar os tempos de resposta de um controlador de fluxo com DGPS para aplicações aéreas submetido à variação de velocidade de deslocamento em condições de simulação virtual de voo em laboratório.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios 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 Agrônomicas Campus Botucatu - UNESP, Fazenda Experimental Lageado, Botucatu/SP.

O trabalho baseou-se na avaliação de desempenho do sistema de controle e monitoramento de aplicação para aeronaves agrícolas Satloc modelo Airstar 99.5, equipado com DGPS e controlador de fluxo (Figura 1), cuja descrição das características técnicas encontra-se na Tabela 1.



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

**Tabela 1** - Características técnicas do sistema de controle e monitoramento de aplicação Satloc modelo Airstar 99.5 (Satloc, 1996).

Características	Descrição
Fabricante	Satloc
Canais e sinal de recepção de satélite	12 .Omnistar
Velocidade de atualização	Dez vezes por segundo
Precisão de georreferência 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	Software Mapstar for Windows V 1.6.2.1 (Satloc) e controlador de vazão com fluxômetro

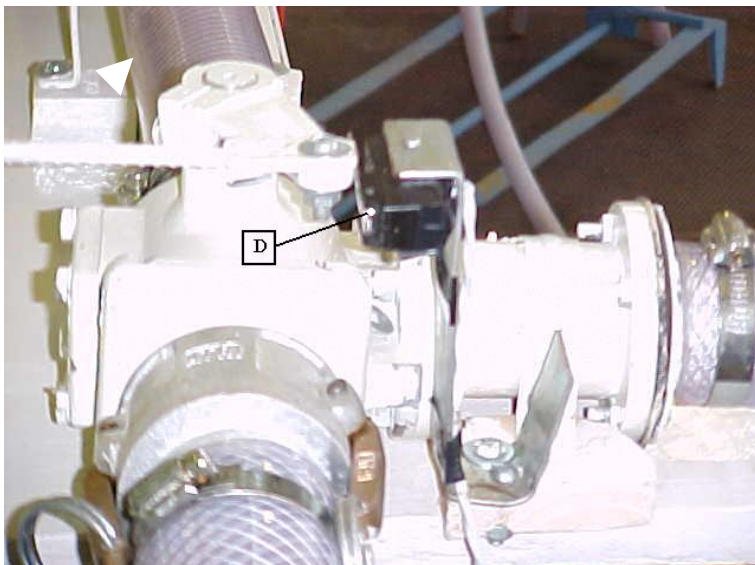
O sistema foi instalado numa bancada de ensaios em laboratório (Figura 2) construída com o intuito de simular as condições de uso em voo. A bancada foi dimensionada para proporcionar estabilidade física às tubulações de entrada e saída junto ao controlador de fluxo, atendendo os pré-requisitos previstos no seu manual de instalação, além de proporcionar confiabilidade na execução dos comandos de acionamento da válvula que comanda a abertura e o fechamento da pulverização (válvula “by pass”).



**Figura 2** - Vista geral da bancada de ensaios e equipamentos

Na parte superior desta bancada foram afixados o controlador de fluxo, o fluxômetro, a válvula de controle “by pass” e sua haste de comando, a antena receptora do sinal DGPS, a barra de luzes, o 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 foram afixados de forma a manter uma tubulação estável e em linha reta, de acordo com as instruções de instalação do sistema.

Solidário à alavanca de aplicação “by pass” foi afixado o sensor de abertura e fechamento dos pontos de aplicação (Figura 3). 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 as situações (no laboratório ou nas próprias aeronaves), a existência deste tipo de sensor é necessária para que haja o georreferenciamento das posições de abertura e fechamento da pulverização.



**Figura 3** - Detalhes da fixação sensor de georreferenciamento de abertura da válvula “by pass”, indicado pela letra (D).

Na parte inferior da bancada foram afixadas a CPU do sistema Airstar 99.5, a bateria para sua energização, os cabeamentos e o sistema de bombeamento para acionamento da pulverização, constituído de uma bomba centrífuga modelo ME 2250V, de 5 CV, com 2 estágios, dimensionada para vazões de até 19,6 m<sup>3</sup>/h. Como reservatório de água foi utilizado um tanque de pulverizador terrestre da marca Montana, com capacidade de 600 litros (Figura 4).

Para atender diferentes níveis de vazões e pressões de trabalho, necessários às simulações previstas nos ensaios, a barra de aplicação da aeronave e suas respectivas pontas de pulverização foram substituídas por pontas de jato plano Teejet OC 40 e OC 80 (Figura 5), as quais foram utilizadas como orifícios de tamanho conhecido. Estas pontas foram afixadas na tubulação de saída da pulverização, após o controlador de fluxo (local onde seriam afixadas as barras de aplicação em uma aeronave), presas através de suportes junto ao tanque do pulverizador. A tubulação contendo as pontas OC 80 ou OC 40 foi redirecionada par dentro do reservatório, tornando o sistema um circuito fechado, com reaproveitamento de 100% da água utilizada (Figura 4).



**Figura 4** - Reservatório de produto utilizado durante os ensaios.



**Figura 5** - Pontas OC 80 (a) e OC 40 (b).

O transdutor de pressão foi fixado próximo ao bico de pulverização usado para simular o conjunto de bicos de uma barra de uma aeronave agrícola. Este transdutor foi utilizado para monitorar a pressão através de um coletor de dados Campbell modelo CR10X, o qual foi programado para uma frequência de aquisição de dados de 8 Hz.

Para a simulação do voo em condições de laboratório os sinais reais de DGPS do sistema Airstar 99.5 foram substituídos por sinais simulados a partir do software Simfly 4.4 (Figura 6), também fornecido pela Satloc. O software foi acionado a partir de um computador acoplado à CPU do sistema Airstar 99.5



através de uma interface serial RS232 desenvolvida especificamente para este trabalho pela própria Satloc. Uma das características do Simfly 4.4 é o de criar uma situação virtual de recepção de satélites, e esses sinais possibilitam a simulação de voos de aplicação. Para tanto, a antena do DGPS do Airstar 99.5 foi desativada, e o cabeamento de ligação do receptor DGPS à CPU foi direcionado para a conexão com o Simfly 4.4 através da interface RS 232.

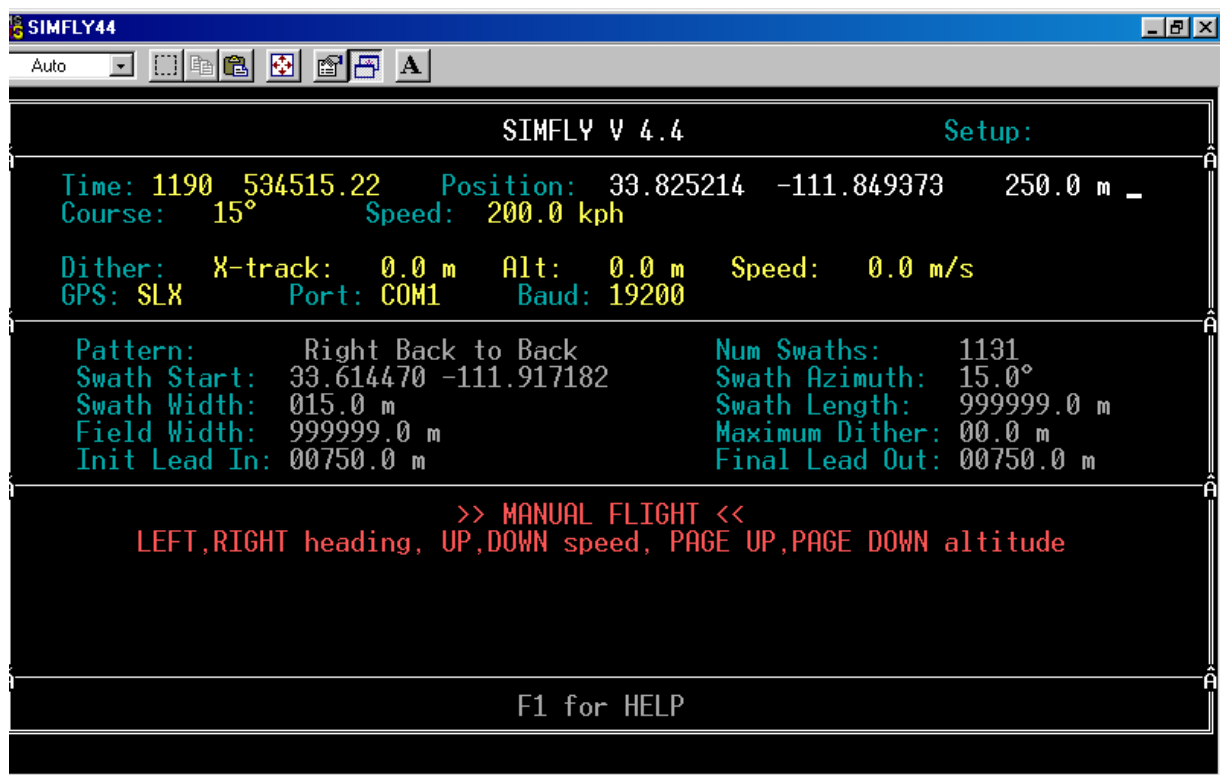
Durante os ensaios o sistema Satloc 99.5 foi programado para operar com faixa de deposição de 15 m e volume de calda de 4,0 ou 8,0 L/ha, enquanto o Simfly 4.4 foi programado para simular voos com velocidade inicial constante. Adotou-se no software de simulação de voo um comprimento de talhão de 99.9 km (máximo permitido). Este procedimento visou fornecer um longo tempo de voo simulado em linha reta, oferecendo condições de realização dos ensaios de simulação da velocidade. Os diferentes níveis de vazão total do equipamento, correspondentes aos volumes de calda ajustados de 4,0 e 8,0 L/ha, foram assim definidos visando proporcionar duas condições de operação da válvula de controle (alta e baixa vazão). Em situação de baixa vazão a válvula de controle se posiciona mais próxima do fechamento total, enquanto na situação de maior vazão ocorre o contrário, com a válvula se posicionando próxima a posição de máxima abertura. Desta maneira, torna-se possível avaliar também possíveis interações entre o tempo de resposta e a posição efetiva da válvula durante o trabalho (mais aberta ou mais fechada).

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. 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 Mapstar (programa de gerenciamento de dados de aplicação da Satloc). Os arquivos gerados tanto no Mapstar como no CR10X (coletados através do transdutor de pressão) foram convertidos em arquivo texto para leitura em planilha MS Excel, visando à execução dos cálculos dos tempos de resposta através da tabulação dos dados e análise gráfica dos mesmos.

Considerando-se a proporcionalidade entre pressão e fluxo, e adotando-se como aceitáveis desvios de até 5% da vazão desejada, calculou-se o tempo de resposta de acordo com o procedimento descrito na Tabela 2. Em cada gráfico de variação de pressão de acordo com as condições de ensaio (Figura 7), 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.

Nos ensaios para determinação do tempo de resposta frente a mudanças de velocidade, 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 pres-

são 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 tempos de reação e ação.



**Figura 6** - Tela do software simulador de voo Simfly 4.4.

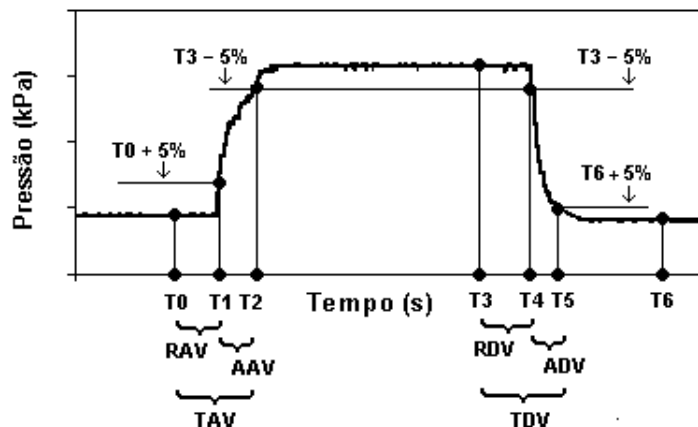
Durante os ensaios realizados em laboratório, os instantes onde ocorriam mudanças de velocidade de voo (através dos comandos aplicados no Simfly 4.4) foram definidos como T0, T3 e T6. Para estas condições T0 representa o momento onde a velocidade iniciada como padrão em 164 km/h passa para 200 km/h; 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.

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 no transdutor e vazão para cada um dos bicos (OC 40 e OC 80) utilizados na simulação da barra de aplicação. Para a ponta OC 80 foram realizadas amostragens de vazão no

intervalo de pressão de trabalho entre 93,09 a 555,31 kPa, enquanto que para a ponta OC 40 o intervalo de pressão de trabalho foi entre 41,36 a 626,06 kPa. Neste procedimento os volumes de calda coletados em baldes plásticos foram aferidos com o uso da balança de precisão, sendo os valores convertidos em volume de líquido. 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 de planilha Excel, gerando-se as equações de vazão para as pontas OC 40 e OC 80.

**Tabela 2** - Procedimentos para o cálculo do tempo de resposta do controlador de fluxo nos 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)



**Figura 7** - Exemplo dos critérios adotados para o cálculo do tempo de resposta do sistema controlador de fluxo a mudanças de velocidade de voo, de acordo com os parâmetros definidos na Tabela 2.

Na operacionalização dos ensaios os dados utilizados na comparação dos valores de vazão entre os dados gerados no Airstar 99.5 e o valor real de vazão foram obtidos do mesmo conjunto de valores utilizados 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 mesmos instantes. 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 real de vazão obtido a partir dos dados coletados com o sensor de pressão.

A análise do desempenho do controlador de vazão em função da variação dos valores da constante do algoritmo interno de controle foi operacionalizada nos vários ensaios realizados. Esta constante corresponde a dado de entrada do algoritmo com 4 dígitos, cujos valores são selecionáveis via software no painel do controlador de fluxo. A função de cada número é apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3** - Função e faixa de variação dos valores ajustáveis do algoritmo de controle do controlador de fluxo, visualizado no menu "Valve Cal". O valor básico desta constante, sugerido pelo fabricante, é 0213.

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. Valor "1" indica um pulso curto; "0" indica sem pulso. Obs.: é recomendado o valor "0" para este controlador de baixa vazão.	0 ou 1
2º	Valve speed digit	Controla o tempo de resposta da válvula de controle. Valor "9" indica reação lenta; valor "0" indica resposta 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 "bre-car" para evitar sobre dosagem ou subdosagem, após uma mudança. Este dígito representa a porcentagem de desvio da vazão desejada. exemplo: "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. O valor varia de 1 a 9%. Exemplo: "1" = 1%; "9" = 9%.	1 a 9

**Fonte:** manual Satloc, 1996.

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 (bre-car a 5%);

0293: valor básico alterando-se o terceiro dígito para o máximo (bre-car 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 resultou em condições operacionais viáveis (algumas delas inibiam a ação de controle do equi-

pamento). Assim, optou-se por utilizar apenas quatro ajustes, para os quais o controlador apresentou atividade normal de controle. Os ajustes selecionados foram:

0213: valor básico sugerido pelo fabricante;

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

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

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

A partir destas definições os ensaios foram então realizados adotando-se um delineamento experimental com parcelas subdivididas no esquema 2 x 4, com 5 repetições, sendo 2 parcelas (volumes de cada de 4,0 e 8,0 L/ha) e 4 sub-parcelas, correspondentes aos ajustes da constante do controlador: 0213, 0013, 0203 e 0211.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 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.

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 (Tabela 5) houve interação entre os fatores.

**Tabela 4** - 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	
Vazão		7,05	0,0290	4,58	0,0647
Ajuste		9,11	0,0003	10,03	0,0002
Vazão x Ajuste		0,53	0,6686	0,17	0,9177
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.

**Tabela 5** - 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.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados das análises das interações entre a vazão de calda e ajuste do controlador de fluxo para o tempo de resposta a mudanças 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 exceção do ajuste 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.



**Tabela 6** - 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
<hr/>					
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
<hr/>					
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, destacam-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 tempos 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 breçar (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 (2<sup>o</sup> dígito), observou-se que a redução deste limite de desvio melhorou o tempo de resposta do equipamento para as mudanças instantâneas de velocidade.

Os resultados de acurácia nos ensaios de variação da velocidade (Tabela 7) 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%.

**Tabela 7** - 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	
Vazão		2,32	0,1663	82,14	0,0001
Ajuste		2,88	0,0567	1,82	0,1702
Vazão x Ajuste		6,39	0,0024	2,38	0,0951
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 do controlador e vazão (Tabela 8) 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.

**Tabela 8** - 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.

#### 4 CONCLUSÕES

Para as condições de realização deste trabalho são possíveis as seguintes conclusões. 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 ocorreram interações entre os fatores avaliados; houve

tendência de melhores resultados no tempo de resposta utilizando-se o ajuste 0203 para a constante do controlador; 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.

## 5 REFERÊNCIAS

**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.

**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.**

**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.*

**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 Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

**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.

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

**SATLOC. Advantage of having Automatic Flow Control:** Disponível em :  
<[http://www.satloc.com/site\\_Products4\\_FlowControl.htm](http://www.satloc.com/site_Products4_FlowControl.htm) > Acesso em 26 dez.2002.

SATLOC. Precision GPS application. SFC/M. **Satloc flow control and monitor option kit-Technical manual**. 1996.

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