Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Avaliação do desempenho e da durabilidade dos componentes
do sistema de pulverização Notliada**

Robson André Armino

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem**

Piracicaba

2007

Robson André Armino
Engenheiro Agrícola

**Avaliação do desempenho e da durabilidade dos componentes
do sistema de pulverização Notliada**

Orientador:
Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

**Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Agronomia. Área de concentração:
Irrigação e Drenagem**

Piracicaba
2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Armindo, Robson André

Avaliação do desempenho e da durabilidade dos componentes do sistema de pulverização Notliada / Robson André Armindo. - - Piracicaba, 2007.
69 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Pulverizadores – Desempenho – Durabilidade 2. Tecnologia agrícola I. Título

CDD 631.3

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

*Ao meu paizão, **João Armino Neto**, que sempre como um coeso pilar demonstrou equilíbrio, humildade, persistência e honestidade*

*A minha mãezinha, **Maria do Carmo Maculan**, pelo aconchego, amparo e carinho totalmente indispensáveis para um crescimento solidificado*

DEDICO

*Aos meus irmãos **Ronan Marcos Armino** e **Rose Marie Armino**, pela verdadeira irmandade, companherismo e incentivo diário,*

OFEREÇO

*Essa família proporcionou-me a principal oportunidade apenas pelo verdadeiro amor
Sem dúvida alguma foi, é e sempre será minha maior riqueza*

AGRADECIMENTOS

A essa Força maior e misteriosa que cada vez mais me leva a busca do entendimento.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), principalmente ao Departamento de Engenharia Rural pela oportunidade e ensinamentos doados durante a convivência, disciplinas e trabalhos realizados.

Aos “mestres” do ensino que convivi desde minha alfabetização até este momento.

Ao “mestre” e novo amigo Tarlei Arriel Botrel pela excelente orientação, amizade e ensinamentos que serão levados não só no meio profissional, mas sem dúvida alguma para o crescimento pessoal.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) que proporcionou a primeira oportunidade na iniciação científica.

Aos grandes amigos do programa de pós-graduação em Irrigação e Drenagem pelo enorme companheirismo e aprendizado.

A toda equipe de trabalho: Alessandro, Ceres, Maurice, Miguel, Priscila, Wanderlei e em especial ao Rogério, Tadeu e Tiago pelas amizades e contribuições fornecidas para realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP pelo conhecimento, apoio e atenção.

Aos amigos: Deive Oliveira, George Harisson, Joaquim Silva, Leonardo Moura, Marllon Chalfun, Patrícia Ferreira, Tatiane Freire e outros que me incentivaram no ingresso deste curso de mestrado.

Aos amigos da república: Carlos Werner, Davi Souza, Leônidas Melo e Patrick Schmidt pela excelente convivência, irmandade e solidariedade nos grandes momentos de dificuldade.

A toda minha família e em especial as minhas sobrinhas, Letícia e Isabelle, por me mostrarem a cada momento a continuação da vida.

Por fim, a todas as pessoas que ajudaram de alguma forma para conquista deste sonho. E, preferencialmente, aquelas que impuseram dúvidas e barreiras a minha capacidade proporcionando-me ainda mais motivação.

*“Mais do que ganhar sozinho é ajudar os outros a vencer,
mesmo que isso signifique diminuir os nossos passos...”*

*“Não sou santo, estou longe de ser santo e não procuro a santidade;
mas tudo isso não me impede a buscar a decência...”*
(Paulo Freire)

“É pena eu não ser burro, assim eu não sofria tanto...”
(Raul Seixas)

*“Necessidades fisiológicas, segurança, sociais, estatus, estima e auto realização são
indispensáveis para a felicidade de um ser humano”*
(Abraham Maslow)

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT.....	9
1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Pulverização Agrícola.....	13
2.2 Importância do tamanho das gotas	13
2.3 Volume de calda aplicado pelo pulverizador	15
2.4 Tempo de resposta	17
2.5 Aplicações em taxa variada em pivô central	17
2.6 Análise do erro aleatório e do erro sistemático	19
2.7 Uniformidade de emissão.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1 Localização e etapas do experimento	22
3.2 Avaliação do protótipo da barra de pulverização.....	22
3.3 Componentes do sistema hidráulico da barra de pulverização	22
3.3.1 Emissores.....	23
3.3.2 Dispositivos antidrenantes.....	24
3.3.3 Conectores.....	24
3.3.4 Barra de pulverização.....	25
3.3.5 Válvula solenóide.....	25
3.3.6 Regulador de pressão.....	26
3.3.7 Tubulações de alimentação.....	27
3.3.8 Conjunto moto-bomba.....	27
3.3.9 Reservatório.....	28
3.3.10 Registros e filtragem.....	29
3.3.11 Conjunto de fixação.....	29
3.4 Descrição geral do funcionamento do sistema hidráulico.....	30
3.5 Circuito eletro-eletrônico.....	30

3.6	Efeito intermitente do protótipo Noltiada.....	33
3.7	Metodologia de trabalho.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1	Determinação da curva vazão <i>versus</i> pressão.....	37
4.2	Comparação entre os valores de vazão estimados e observados com o tempo desligado constante.....	39
4.3	Comparação entre os valores de vazão estimados e observados com o tempo desligado variável.....	50
4.4	Durabilidade do dispositivo eletro-eletrônico.....	63
4.5	Utilização de tubulação PVC soldável.....	64
4.6	Durabilidade e estanqueidade da válvula solenóide.....	64
5	CONCLUSÕES.....	65
	REFERÊNCIAS.....	67

RESUMO

Avaliação do desempenho e da durabilidade dos componentes do sistema de pulverização Notliada

O presente trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho e a durabilidade do sistema de pulverização acoplado a pivô central, Notliada. Os testes foram realizados em um protótipo do sistema montando em uma área anexa ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural (LER) pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP. Os resultados obtidos mostraram que não houve alteração significativa da vazão dos quatro tipos de emissores testados em 505 horas intermitentes de avaliação. O circuito eletro-eletrônico, a válvula solenóide, a tubulação de material PVC soldável e os demais dispositivos da barra de pulverização operaram de maneira satisfatória no mesmo período de avaliação. As modelagens dos desvios relativos existentes entre as vazões estimadas e observadas em função da frequência de operação da válvula solenóide apresentaram excelentes índices de precisão e exatidão. Encontrou-se um tempo mínimo de 1s em que a válvula solenóide deve permanecer ligada para os emissores preto, vermelho e laranja. Para o emissor azul, esse tempo mínimo encontrado foi de 1,4s. A mesma válvula pode permanecer desligada durante qualquer tempo compreendido entre 3 e 9s para todos os emissores testados. Os emissores preto e laranja apresentaram excelentes índices de uniformidade estatística de aplicação para um tempo de ligamento da válvula solenóide maior que 0,7s. Os emissores vermelho e azul apresentaram excelentes índices de uniformidade estatística de aplicação para qualquer intervalo de tempo utilizado. Todos os emissores apresentaram excelentes índices de uniformidade estatística de aplicação para qualquer tempo de desligamento utilizado na válvula solenóide.

Palavras-chave: Pulverização; Válvula Solenóide; Notliada; Automação

ABSTRACT

Performance and durability assessment of the pulverization system components Notliada

The aim of this work was to evaluate the performance and durability of the pulverization system components Notliada. This work was carried out in the Hydraulic Laboratory/Rural Engineer Department - “Luiz de Queiroz” College of Agriculture (University of Sao Paulo). The results showed that it was not significant the changes in flow rate for four emitters used during 505 hours of evaluation. The electro-electronic circuit, solenoid valve, PVC plain pipe and other components worked satisfactorily at the same evaluation period. The proposed models showed excellent precision and accuracy indexes. It was found a minimum time of 1s for the solenoid valve to remain “on” for the black, orange and red emitters. For the blue emitter the time found was 1.4s. The solenoid valve can remain off during any time between 3 and 9 seconds. The black and orange emitters had unacceptable indexes of statistical application uniformity for the “on” time less than 0.7s. The red and blue emitters showed excellent statistical uniformity indexes of evaluation for any time interval used. All emitters had excellent statistical uniformity indexes for all “off” times used of the solenoid valve.

Key-words: Pulverization; Solenoid Valve; Notliada; Automation

1 INTRODUÇÃO

Durante a última década houve um aumento da preocupação com a degradação ambiental do planeta. A aplicação com baixa uniformidade de lâminas de água e fertilizantes reduz a eficiência do manejo na agricultura irrigada desprotegendo nossas fontes de água. Uma alternativa possível é a utilização de mecanismos de aplicação de taxa variada que auxiliarão no aumento da uniformidade de aplicação e na redução da aplicação super estimada de fertilizantes. Além disso, a aplicação eficiente de agro-químicos é uma alternativa que ajuda a manter um sistema de produção economicamente estável.

Atualmente, utilizam-se alguns sistemas para a pulverização no campo. Os pulverizadores costais, tratores, aviões, pivôs centrais e sistemas acoplados a pivôs centrais podem ser utilizados para a aplicação de herbicidas, fungicidas, inseticidas e fertilizantes. Entretanto, as viabilidades técnica e econômica para esses sistemas podem ser discutidas. Para se cultivar grandes áreas, requer-se na maioria das vezes, a utilização de defensivos agrícolas dentre outras tecnologias modernas. As aplicações de tais produtos são feitas mediante pulverizações ou via água de irrigação, técnica conhecida por quimigação.

Aplicações de produtos químicos com a utilização de pulverizadores costais, manuais, motorizados, além de outros de pequeno porte podem apresentar benefícios econômicos, uma vez que a aplicação de caldas de ultra baixo volume (UBV) é uma realidade. Entretanto, os mesmos se tornam tecnicamente inviáveis em grandes áreas sendo mais recomendados para a aplicação em pequenas áreas ou em áreas urbanas, fazendo-se o controle de insetos vetores de doenças. A impossibilidade desses sistemas leva à necessidade de utilização de alta tecnologia de aplicação utilizando-se tratores, aviões e/ou sistemas de irrigação (pivôs centrais).

O tráfego de tratores na área é dependente de limitações como: necessidade de boas condições meteorológicas, umidade do solo e cultura em baixo porte. A partir de certo crescimento vegetativo da cultura, torna-se impossível a entrada de máquinas na lavoura. O deslocamento do conjunto pulverizador pode provocar danos às plantas deixando assim de ser viável tecnicamente. A contaminação do operador é um outro fator preocupante nesse tipo de operação.

Aeronaves possuem alta eficiência de aplicação. Contudo, essa aplicação só é recomendada em valores ideais de umidade relativa, temperatura e velocidade do vento, além da

inexistência de neblina. Outros fatores seriam a impossibilidade de aplicação noturna, chuva, pista de aterrissagem, abastecimento, necessidade de mão-de-obra auxiliar, distância do traslado e a situação topográfica local além do custo elevado, comparado aos demais sistemas. A possibilidade de contaminação, tanto de auxiliares quanto do ambiente, também deve ser considerada.

Elevada lâmina de água e de produtos químicos é aplicada na quimigação pelo pivô central. Assim, apenas um pequeno gradiente ativo fica retido nas folhas da planta, o que reduz sensivelmente a eficiência, como exemplo em torno de 2% para o milho, desse sistema de aplicação. A razão das diferenças mostradas acima se reflete na variação das velocidades dos equipamentos de pulverização que podem chegar a 10 a 300 km h^{-1} , no caso de pulverizadores terrestres ou aéreos. Contudo para os pivôs centrais as velocidades podem variar de 0,12 a 0,34 km h^{-1} .

Para a realização da aplicação de produtos, sobre superfícies vegetais, por pivô central seria necessária a redução da lâmina de aplicação. Essa técnica pode ser realizada aumentando-se a velocidade de deslocamento do sistema de propulsão, mas essa alternativa envolve possíveis problemas de ordem mecânica e econômica. Uma outra forma seria diminuir a vazão dos emissores, o que é possível até um determinado limite não satisfatório. Porém essa última forma induziria a uma alteração da principal função do pivô central, que é a aplicação de água suficiente para atender a necessidade hídrica das plantas.

Sistemas acoplados a pivôs centrais são constituídos, em maioria, de equipamentos independentes dos sistemas de distribuição de água dos pivôs centrais. Esses sistemas têm por objetivo, comparados aos pivôs centrais, atingir menores lâminas de aplicação e menores diâmetros de gotas, além de uma maior eficiência de aplicação. Como exemplo, pode-se citar o sistema intermitente de pulverização acoplado a pivô central Notliada. Segundo Vilela (2002), através da utilização do Notliada, pode-se efetuar a quimigação com uma calda de aplicação de 286,7L ha^{-1} , com um diâmetro médio volumétrico (DMV) de 126,30 μm e com uma satisfatória uniformidade de aplicação classificada de acordo com Cupery (1987).

Ainda segundo Vilela (2002), testes com o Notliada apresentaram valores de calda estimados maiores que valores de caldas observados. De acordo com o autor essas variações podem ser explicadas, possivelmente, por diversas causas tais como tempo de resposta hidráulico diferenciado em cada pulso, erro metodológico de coleta e amostragem, possíveis evaporações decorridas após a exposição dos coletores à pulverização, dentre outras.

Em resumo, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho e a durabilidade do sistema Notliada dentre os seguintes aspectos: o erro existente entre as vazões estimada e observada para diferentes frequências de operação; a durabilidade e o desempenho do conjunto eletro-eletrônico projetado, a durabilidade e a estanqueidade da válvula solenóide e a durabilidade do conjunto conector, válvula anti-gotas e emissor, ambos sob regime intermitente de operação de 505 horas além da durabilidade do sistema efetuando-se a construção da barra de pulverização com material PVC de instalação predial soldável.

2 REVISAO DE LITERATURA

2.1 Pulverização Agrícola

Segundo Andreason (1983) apud Baio (2001) o objetivo principal da pulverização de defensivos agrícolas é aplicar a dosagem correta do defensivo no alvo desejado.

Salyani e Serdynski (1993) comentam que os erros existentes na calibração em uma pulverização podem se originar do uso de bicos impróprios, defeituosos ou desgastados; da velocidade de deslocamento utilizada ou até mesmo na determinação das vazões. Esses erros podem levar a caldas mais concentradas que consequentemente serão mais prejudiciais ao meio ambiente além de serem mais caras.

Segundo Ozkan (1999) é importante se preocupar com os efeitos dos defensivos agrícolas que são grandemente influenciados pelos métodos de aplicação, pela época de aplicação, pelas recomendações da operação e pela exatidão do equipamento utilizado, o que justifica a introdução de alta tecnologia em aplicação de defensivos.

2.2 Importância do tamanho das gotas

Cambridge Animal and Public Health Limited (1987), El Awady (1978) e Patel (1981) apud Costa (2002) relatam que diversos autores concordam que para se obter sucesso na técnica de pulverização é necessário produzir gotas de tamanho adequado e colocá-las numa área alvo durante o período de maior atividade do inseto que se deseja controlar.

De acordo com Balastreire (1987) o controle da calda utilizada e a seleção da máquina ideal para processo de pulverização devem ser baseados na classificação do tamanho de gotas. O tamanho ideal da gota gerada pela pulverização é dado por diversas classificações que se baseiam no diâmetro médio volumétrico (DMV) da gota.

Seguindo-se a recomendação da Asae (1996) essa classificação é dada de acordo com a tabela (1) apresentada a seguir.

Tabela 1 – Classificação do tamanho de gotas de pulverização

Faixa de DMV (μm)	101 a 400	401 a 1200	> 1200
Classificação	Fina	Média	Grossa

Fonte: Asae (1996).

Entretanto Matthews (1992) aborda uma classificação mais detalhada apresentada na tabela (2).

Tabela 2 – Classes de pulverização em função do tamanho das gotas

Classes	DMV (μm)
Aerossol Fino	< 25
Aerossol Grosso	25 – 50
Pulverização Muito Fina (neblina)	51 a 100
Pulverização Fina	101 a 300
Pulverização Média	201 a 300
Pulverização Grossa	> 300

Fonte: Matthews (1992).

A densidade de gotas no alvo a ser pulverizado é um importante índice que auxilia uma aplicação de agro-químicos ser eficiente. Na tabela (3) são apresentados valores ideais de tamanho e densidade de gotas para produtos de aplicação de pré ou pós-emergência.

Tabela 3. Densidade de gotas no alvo

Tratamento	Natureza	Número de gotas (cm^2)	Tamanho da gota (μm)
Pré-emergência	-	20-30	> 300
Pós-emergência	Sistêmico	20-30	200-300
	Contato	30-50	150-300

Fonte: Embrapa Uva e Vinho

2.3 Volume de calda aplicado pelo pulverizador

Para uma mesma concentração química, o aumento do custo de aplicação de produtos via água é diretamente proporcional à quantidade de calda utilizada. No Brasil, o tipo de classificação de defensivos é classificado segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1991) e utiliza como critério o volume de água aplicado pelo pulverizador, como pode ser visto na tabela (4) a seguir.

Tabela 4 - Classificação do tipo de aplicação de acordo com o volume de aplicação (L ha⁻¹)

Sigla	Denominação	Aplicação Terrestre (L ha ⁻¹)	
		Culturas de porte baixo (anuais)	Culturas de porte baixo (árvores e arbustos)
AV	Alto Volume	> 600	> 1000
MV	Médio Volume	200 a 400	500 a 1000
BV	Baixo Volume	50 a 200	200 a 500
MBV	Médio Baixo Volume	5 a 50	50 a 200
UBV	Ultra Baixo Volume	<5	<50

Fonte: ABNT (1991)

De maneira geral, os melhores resultados na aplicação de defensivos têm sido observados com as caldas especificadas na tabela (5). Com a utilização de caldas próximas a 300L/ha, o que corresponde a uma lâmina de 0,03mm, seria perfeitamente possível atender tanto à aplicação de herbicidas, quanto de inseticidas e fungicidas (VILELA, 2002).

Tabela 5. Caldas indicadas para a aplicação de alguns tipos de defensivos.

Tipo de defensivo	Calda (L/ha)
Herbicidas	200 a 400
Inseticidas	100 a 300
Fungicidas	300 a 500

Fonte: Máquinas Agrícolas Jacto S/A (s.d.)

A aplicação de qualquer produto químico via água de irrigação é denominada de quimigação. Dowler et al. (1989) apud Alves (2000) comentam que produtos como herbicidas, fungicidas, nematicidas, reguladores de crescimento e agentes de controle biológico podem ser aplicados fazendo-se o uso da quimigação.

Vieira (1994) e Vilela (2002) citam que as principais vantagens da quimigação são: controlar melhor a aplicação de nutrientes para as plantas ao longo do ciclo de cultivo reduzindo a possibilidade de lixiviação; permitir a aplicação dos produtos químicos necessários, em tempo oportuno independentemente da cobertura do solo e do estágio de desenvolvimento da cultura; diversificar o uso do sistema de irrigação; reduzir a necessidade de compra e manutenção de equipamentos utilizados na aplicação convencional; incorporar e ativar o produto químico a uma profundidade determinada; reduzir a compactação do solo e dos danos mecânicos à cultura; incorporar e ativar o produto químico a uma profundidade determinada; reduzir a deriva além de reduzir os custos de aplicação.

Alves (2000) determinou a lâmina de água e as quantidades de nitrogênio e potássio retidas na folhagem da cultura do milho. Nesse trabalho, ajustaram-se modelos durante três fases fenológicas (4, 8 e 12 folhas). O método de irrigação utilizado nesse experimento foi o de aspersão utilizando-se pivô central. A interceptação média de água nas folhas de milho, para a fase 4, foi de aproximadamente 1,87%. As quantidades médias de fertilizantes interceptadas pelo dossel da cultura de milho, na época da primeira semeadura, foram de 1,56% (N) e 1,95% (K_2O), e na época da segunda semeadura de 14,3% (N) e 12,3% (K_2O). Na época da terceira semeadura as quantidades médias de fertilizantes interceptados pelo dossel da cultura foram de 19,0% (N) e 19,4% (K_2O). Para o estágio de 8 folhas os valores de lâmina interceptada foram de 6,56 e 5,57% em alturas de coleta de 0 e 0,25m respectivamente. Para o estágio de 12 folhas os valores médios de lâmina interceptada foram de 7,21; 6,21 e 3,61% para as alturas de coleta de 0; 0,50 e 1,40m respectivamente. Esses resultados ajudam a solidificar a necessidade de se ter um equipamento específico para a quimigação com objetivo foliar e não apenas a aplicação por pivô central.

2.4 Tempo de resposta

Baio (2001) cita que um dos mais importantes fatores que definem a eficiência de um equipamento para a aplicação localizada de defensivos, em realizar a pulverização da dosagem correta sobre o local desejado, é seu tempo resposta.

De acordo com Antuniassi et al. (1997) apud Baio (2001) o tempo resposta pode ser definido como a troca da razão de aplicação e sua efetiva mudança nos bicos. Esse período de tempo pode variar em função do ponto de injeção de defensivos no sistema, do volume de aplicação, da densidade do defensivo, do comprimento e do diâmetro das tubulações do pulverizador e da configuração do sistema.

Qiu et al. (1998) apresentaram que para um sistema de injeção direta de defensivos o tempo resposta avaliado variou entre 15,9 e 52,6s, dependendo da configuração do sistema e do diâmetro das tubulações.

O tempo de resposta do sistema de injeção direta de defensivos Raven SC-700 foi determinado utilizando um sistema de laser (SUDDUTH et al., 1995). Com auxílio desse sistema foi possível determinar o instante de tempo em que a concentração da calda se tornou constante. O tempo resposta desse trabalho variou de 14 a 21 s, dependendo da configuração utilizada do sistema.

2.5 Aplicações em taxa variada em pivô central

Fraisse, Heermann e Duke (1995) exploraram a irrigação por pulsos como uma técnica de aplicação variada de água e produtos químicos em um sistema de irrigação tipo pivô linear. Utilizaram-se válvulas solenóides a uma pressão de operação de 35KPa e uma sub-rotina para simular a aplicação variada de lâmina em condições de pulso. Nesse sistema essa forma de aplicação não resultou em uma diminuição significativa da uniformidade de aplicação, uma vez que se utilizaram pulsos longos, mantendo-se em torno de 90%.

King e Kincaid (2004) desenvolveram um aspersor, para pivô central e/ou sistema linear, que aplicava água com taxa variada. Atingiu-se essa aplicação variada movimentando-se um pino concêntrico dentro do orifício do aspersor, fornecendo-se um tempo médio de abertura que implicava em uma taxa de aplicação de 36% a 100% da taxa de aplicação de um aspersor

convencional. Entretanto, observou-se que o raio de aplicação desse aspersor reduziu em torno de 15% em relação a condições normais de operação. Observou-se também que a partir da vazão de 28 L min^{-1} a vazão teórica se diferiu significativamente da vazão medida.

King et al. (2005) testaram em campo 32 protótipos de aspersores de aplicação variada em três vãos de um pivô linear. Desenvolveu-se um algoritmo que efetuou o controle da rede, permitindo-se o controle em grupos de seis ou sete aspersores ao longo da lateral do pivô. Monitorou-se a uniformidade de aplicação que excedeu o valor de 90%. Resultados indicaram que a redução da uniformidade de aplicação de água teve efeito mínimo, utilizando-se 4% de nitrogênio na aplicação.

Farahani et al. (2006) reavaliaram a performance do sistema de pulverização Accu-Pulse que aplicava médio volume (224 L ha^{-1}) com intervalo entre pulsos de 6 s mas com elevados diâmetros médios volumétricos. Utilizaram-se, no protótipo criado para simulação, aspersores que permitiam ajustar o volume de aplicação de 8 a 31 mL por pulso. Conseguiu-se ativar aplicações de baixas taxas semelhantes a aplicadores terrestres, ou seja, bem menores que quimições realizadas com pivôs centrais e lineares. Essas baixas taxas foram atingidas com pulsos periódicos de soluções químicas através de aplicações em base “*span by span*”. Correntes de ar foram responsáveis por causar uma maior variação das descargas em algumas aplicações isoladas. Em condições normais, o coeficiente de variação (CV) foi menor que 15% para descargas compreendidas entre 19 até 31 mL por pulso, variando de 13 até 34% para aplicações menores que 19 mL por pulso. Testes realizados mostraram que a uniformidade de aplicação da descarga não é sinônimo da uniformidade de aplicação. Esses foram realizados com papéis sensíveis para determinação do diâmetro médio volumétrico das gotas chegando-se a valores bem menores. Essa nova versão do Accu-Pulse atingiu de 50 a 75% a mais de cobertura do produto sobre a folha.

De acordo com Vilela (2002) o sistema Notliada é capaz de aplicar médio volume entrando na faixa de alguns aplicadores terrestres. O diâmetro médio volumétrico é aceitável produzindo um ótimo percentual de cobertura foliar. Entretanto, o mesmo autor ressalta a importância de se avaliar o desempenho e a durabilidade do sistema.

2.6 Análise do erro aleatório e erro sistemático

Lima e Abreu (2001) reportam que em todo dado existe um erro, por maior que tenha sido o cuidado ao tomá-lo. Dois tipos de erro existentes em experimentos são os erros aleatório e sistemático.

O erro aleatório visa avaliar o efeito das fontes de variabilidade que afetam os resultados do experimento e que não deveriam existir. Assim, a precisão das estimativas dos efeitos dos tratamentos é influenciada pelo número de repetições. Em princípio, quanto maior o número de repetições, maior a precisão. A avaliação do erro aleatório é feita de forma indireta avaliando-se o grau de precisão do experimento. O índice de correlação de Pearson é um bom indicador de precisão, uma vez que em sua expressão estão relacionados os dados estimados e observados. Esse índice pode ser calculado de acordo com a equação *i*.

$$r = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N E_i O_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right) \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)}{\sqrt{\left[\left(N \sum_{i=1}^N (E_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N E_i \right)^2 \right] \left[\left(N \sum_{i=1}^N (O_i)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N O_i \right)^2 \right]}} \quad (i)$$

Em que:

r: coeficiente de correlação de Pearson;

N: número de repetições;

E_i: i-ésima variável estimada;

O_i: i-ésima variável observada;

O erro sistemático caracteriza o quanto o dado estimado está distante do dado observado. Esse tipo de erro pode ser observado com a determinação da exatidão do sistema. Quanto maior é a proximidade do valor estimado ao valor observado maior é a exatidão e menor é o erro sistemático existente. Para determinar a exatidão utilizar-se-á o coeficiente de correlação de Willmott (1981) que está descrito na equação (ii).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N \left(|E_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}| \right)^2} \quad (ii)$$

Em que:

d: Índice de concordância de Willmott;

Com a utilização do índice de confiança ou desempenho de Camargo pode-se indicar como se comportou a precisão e a exatidão, ou seja, o erro aleatório e sistemático dos dados estimados. O índice de Camargo constitui-se do produto entre o índice de Pearson (r) e o índice de Willmott (d).

2.7 Uniformidade de emissão

O conceito de uniformidade de emissão foi originalmente apresentado por Keller e Karmeli em 1974, sendo a sua definição baseada na razão entre as vazões mínima e média dos emissores.

A partir desse período surgiram-se diversas formas de se calcular a uniformidade de emissão. Favetta (1993) avaliou os métodos de determinação da Uniformidade de Emissão (UE), Uniformidade de Emissão Absoluta (UEa) e Uniformidade Estatística (Us) obtendo-se melhores resultados para irrigação localizada com o último método apresentado.

A Uniformidade Estatística (Us) foi primeiramente apresentada por Wilcox e Swailes (1947) na avaliação de equipamentos de irrigação por aspersão, sendo baseada no coeficiente de variação (CV) da lâmina aplicada. O coeficiente de variação pode ser calculado de acordo com a função abaixo:

$$CVq = \frac{S}{q_m} \quad (1)$$

Em que:

CVq: coeficiente de variação das vazões observadas, adimensional.

S: desvio padrão das vazões observadas, L h⁻¹.

q_m: vazão média observada, L h⁻¹.

De acordo com Bralts et al (1987), uma abordagem estatística idêntica pode ser feita para os sistemas de irrigação localizada, bastando fazer a substituição das lâminas, na conceituação original, pela vazão dos emissores. Assim, a Uniformidade Estatística pode ser calculada de acordo com a função (2).

$$U_s = 100(1 - CV_q) \quad (2)$$

Em que:

U_s : Uniformidade estatística, %.

CV_q : Coeficiente de variação das vazões observadas, adimensional.

Bralts et al (1981) recomendam o uso de U_s na avaliação das linhas laterais de um sistema de irrigação localizada. A justificativa reside em que, nessa abordagem estatística, todos os fatores que influenciam a uniformidade podem ser incluídos na estimativa final da uniformidade. Esses fatores são: a perda de carga, o desnível topográfico, a variação na fabricação dos emissores e o entupimento. Dessa forma, como critério para interpretação de U_s tem-se que:

90% ou mais	excelente
80 a 90%.....	muito bom
70 a 80%	regular
60 a 70 %	ruim
Menos de 60%	inaceitável

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e Etapas do Experimento

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado no Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP), no município de Piracicaba – SP. O protótipo do sistema foi instalado em uma área anexa ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural, no campus dessa Universidade, onde se realizaram as devidas análises. Os equipamentos individuais que integraram o protótipo foram testados previamente no laboratório.

O equipamento de pulverização utilizado neste trabalho foi concebido com base no sistema Notliada, apresentado por Vilela (2002). Por se tratar de um protótipo e também por razões econômicas, instalou-se o mesmo sobre suportes fixos onde permaneceu estático, já que para o objetivo desse trabalho o sistema não necessitou ser dinâmico. Todas as avaliações foram feitas com água pura como sugerido para ensaios de pulverização.

3.2 Avaliação do protótipo da barra de pulverização

No projeto da barra de pulverização, observaram-se todos os detalhes e metodologias descritas por Vilela (2002). Dessa forma, o protótipo do sistema Notliada foi produzido em semelhança com o sistema montado anteriormente sobre o pivô central.

O fluxo de entrada da barra foi controlado e a pressão nesse ponto foi mantida em 245 kPa. Esclarece-se que esse valor coincide com a pressão de saída do regulador de pressão empregado no sistema.

3.3 Componentes do sistema hidráulico da barra de pulverização

O sistema hidráulico foi composto das seguintes partes: emissores, dispositivos antidrenantes, conectores, barra de pulverização, válvula solenóide, regulador de pressão, tubulações de alimentação, conjunto moto-bomba, reservatório, registros e filtragem, conjunto de

fixação, dentre outros. Algumas dessas partes foram formadas pela associação de outros elementos, cujos detalhes serão apresentados na sequência.

3.3.1 Emissores

A concepção deste projeto foi montar um sistema de pulverização com intermitência acionada por alguns instantes de acordo com rotinas pré-estabelecidas. Utilizaram-se os emissores tipo Fogger 7800, fabricado pela empresa israelense Dan Sprinklers, que foram utilizados na montagem do Notliada em 2002.

Submeteram-se os conjuntos de emissão a um processo de limpeza e desentupimento antes de serem instalados na barra de pulverização. Primeiramente, desmontaram-se os emissores, conectores e válvulas anti-gotas colocando-se os mesmos em contato com água a uma concentração de 10 ppm de cloro (Cl) por um tempo de 48 horas. Após esse período, utilizou-se um compressor de ar para efetuar a limpeza dos mesmos.

Logo após a limpeza, encaminharam-se os bicos ao laboratório para a determinação dos diâmetros dos respectivos bocais. Devido os diâmetros dos bocais serem muito pequenos utilizou-se, para essa medição, o projetor de perfil modelo HB 400, apresentado na Figura (1), fabricado pela empresa Starret. A pressão de serviço foi de 245 kPa para os quatro tipos de emissores utilizados: preto, vermelho, laranja e azul.

Figura 1 – Partes do projetor de perfil e o “software” utilizado para determinação dos diâmetros dos bocais

3.3.2 Dispositivos antidrenantes

Seguindo-se o procedimento de montagem do protótipo, instalaram-se em todos os conjuntos de emissão válvulas antidrenantes, também conhecidas por válvulas anti-gotas.

Tais dispositivos foram incorporados ao conjunto com o intuito de atender a dois objetivos distintos: o primeiro deles foi evitar a formação de gotas nas extremidades externas dos bocais nos momentos em que a pulverização não estivesse ocorrendo; o segundo objetivo foi manter a barra de pulverização totalmente preenchida com líquido nos momentos em que a mesma não estivesse em operação.

As válvulas anti-gotas utilizadas neste trabalho, como exemplos dos emissores, foram as mesmas utilizadas na montagem do Notliada em 2002 e também passaram pelo mesmo processo de limpeza.

Empregaram-se válvulas anti-gotas denominadas L.P.D. (*Leakage Prevention Device*), modelo “baixa pressão”, codificadas pela cor preta, produzidas pelo mesmo fabricante dos emissores. De acordo com as informações disponibilizadas pela empresa, as pressões de fechamento e abertura desses modelos de válvulas são de 70 e 200kPa (0,7 e 20bar), respectivamente.

Essas válvulas possuem extremidades lisas, com encaixes do tipo ponta e bolsa, os quais possibilitam seu acoplamento aos emissores e aos conectores.

3.3.3 Conectores

A ligação do conjunto formado pelos emissores e válvulas anti-gotas à barra de pulverização foi efetuada por meio de conectores específicos para essa finalidade, denominados “butterfly treaded 3/8”, também produzidos pelos mesmos fabricantes dos emissores e válvulas anti-gotas.

Após serem desmontados do Notliada, os conectores passaram pelo mesmo processo de limpeza dos emissores e das válvulas anti-gotas. Esses conectores possuem uma das extremidades lisa, que é acoplada a válvula anti-gota. A extremidade oposta, própria para a fixação em tubulações, é dotada de rosca cônica com diâmetro de 9mm (3/8”).

Fixaram-se os conectores à barra de pulverização no laboratório de hidráulica seguindo-se as recomendações do fabricante.

3.3.4 Barra de Pulverização

O conjunto de emissão foi preparado e instalado em uma tubulação de PVC rígido, roscável, de cor marrom e com diâmetro de 0,025m (3/4"). A barra de pulverização foi montada a uma altura de 50 cm do solo. Adaptou-se uma tomada de pressão no início da tubulação e outra no final da mesma a fim de se determinar a perda de pressão entre o início e o final da barra durante o funcionamento do sistema. Na Figura (2) é apresentada a imagem do protótipo montado para avaliação.

Figura 2 – Barra de pulverização construída para as avaliações

3.3.5 Válvula solenóide

Na entrada da barra de pulverização, instalou-se uma válvula solenóide, objetivando controlar o fluxo hidráulico proveniente da tubulação de alimentação para a barra, de maneira a produzir um efeito de intermitência do sistema de pulverização. Na Figura (3) são apresentadas duas vistas da válvula solenóide utilizada.

Figura 3 –Válvula solenóide utilizada na entrada da barra de pulverização

A válvula utilizada foi do modelo AA144A-1, fabricada pela Spray Systems Co., e usualmente empregadas em pulverizadores agrícolas. São do tipo “normalmente fechada”, e quando submetidas a uma diferença de potencial elétrico de 12V, em regime de corrente contínua, abrem-se quase que instantaneamente, permitindo a passagem do líquido por sua câmara interna. De acordo com o fabricante, essa válvula demanda uma corrente elétrica de 2,5A para ser acionada. O sinal elétrico para sua operação provém do circuito eletro-eletrônico descrito a por Vilela (2001).

3.3.6 Regulador de pressão

Por causa das possíveis variações de pressão que podem ocorrer no circuito hidráulico, em decorrência das alterações de vazões provenientes da intermitência do sistema de pulverização e do tipo de bomba a ser utilizada, empregou-se um regulador de pressão após a válvula solenóide. O regulador de pressão utilizado pode ser visto abaixo na Figura (4).

Figura 4 – Regulador de pressão utilizado no experimento

Utilizou-se o regulador de pressão da empresa Fabrimar. De acordo com o fabricante, a pressão de entrada pode variar entre 211 e 844kPa (30 a 120 psi). A pressão regulada na saída é de 211kPa, quando se opera sob vazões de 0,4 a 4,5m³/h. Entretanto, por se tratar de um regulador que estava operando em campo, optou-se por calibrar o mesmo em laboratório determinando-se a pressão de saída de aproximadamente 245 kPa.

3.3.7 Tubulações de alimentação

As tubulações de alimentação da barra de pulverização dividiram-se em tubulação de sucção e tubulação de recalque. Utilizou-se uma tubulação de sucção de PVC branco com um diâmetro 0,0127m (1/2”) teve por finalidade conduzir a água do reservatório até o conjunto moto-bomba. Uma válvula de pé com crivo, uma curva de 90° e uma redução estavam presentes nessa tubulação de sucção.

A tubulação de recalque utilizada compunha-se também de material PVC marron com um diâmetro de 0,01905m (3/4”). Essa teve por objetivo conduzir a água da saída do conjunto moto-bomba até a barra de pulverização. Um registro de gaveta, cinco curvas de 90°, duas tomadas de pressão, um regulador de pressão e uma válvula solenóide foram utilizados na montagem dessa tubulação de recalque.

3.3.8 Conjunto moto-bomba

O conjunto moto-bomba tem a função de fornecer pressão e vazão suficientes para o sistema de pulverização. Dessa forma, empregou-se uma bomba da empresa KSB do modelo Hydrobloc C 500, que possui dados de vazão de 0,6 a 4,8 m³ h⁻¹, de pressão de 340 a 220 KPa e rotação nominal de 3450 rpm. O conjunto moto-bomba utilizado no trabalho é apresentado na Figura (5).

Figura 5 – Conjunto moto-bomba utilizado para alimentação da barra

Para a realização deste trabalho, necessitou-se de determinar a curva vazão x pressão para os quatros tipos de bicos: preto, vermelho, laranja e azul. Para tal determinação foi necessário variar a pressão do sistema de 205 a 435 KPa. Entretanto a bomba citada acima não foi capaz de fornecer pressão suficiente para a faixa necessária. Assim, utilizou-se uma associação de bombas em série para atingir a pressão recomendada. A bomba escolhida para essa associação também foi da empresa KSB modelo Hydrobloc C 1000 com dados de vazão de 10 a 90 L h⁻¹, de pressão de 340 a 220 KPa e de rotação nominal de 3450 rpm.

3.3.9 Reservatório

Por não se dispor de uma fonte natural de água, valeu-se de um reservatório artificial. Assim como o conjunto moto-bomba e o sistema de acionamento o reservatório foi implantado na parte interna do laboratório para que o mesmo tivesse uma maior proteção durante o experimento. Utilizou-se o reservatório, apresentado na Figura (6), da empresa Japi modelo Caixa Flex com capacidade de 500 L.

Figura 6 – Reservatório responsável pelo abastecimento da barra de pulverização

3.3.10 Registros e filtragem

Utilizou-se um filtro de tela de 120mesh para efetuar a filtragem da água que foi conduzida a barra de pulverização. Para controlar a vazão, colocou-se um registro de gaveta na saída da bomba e outro na extremidade final da tubulação objetivando: a eliminação do risco de possíveis entupimentos, a realização da escorva da tubulação e o controle da pressão atual na barra. O filtro utilizado no sistema pode ser visto na Figura (7).

Figura 7 – Filtro de tela utilizado no experimento

3.3.11 Conjunto de fixação

O conjunto de fixação montado foi dividido nas seguintes partes: mourões e conjunto tensionador. Os mourões serviram de sustentação para a barra de pulverização e ao mesmo tempo de suporte para que a mesma fosse devidamente instalada em nível.

O conjunto tensionador foi constituído de catracas que forneceram uma tensão de tração a um cabo de aço que se fixou a barra com o auxílio de abraçadeiras. O objetivo desse reforço foi de prover esses corpos de uma maior resistência à flambagem quando sujeitados aos esforços perpendiculares à sua maior dimensão. Na Figura (8) pode-se observar todos os componentes do conjunto de fixação utilizado.

Figura 8 – Componentes utilizados para a fixação da barra de pulverização

3.4 Descrição geral do funcionamento do sistema hidráulico

A água utilizada nos testes foi pressurizada pelo conjunto moto-bomba e conduzida, por meio das tubulações de alimentação, até a entrada do regulador de pressão. Desse ponto em diante, o fluido passou a ser transportado por uma tubulação flexível até a válvula solenóide. Posicionou-se a válvula solenóide no início da barra de pulverização com o objetivo de permitir ou bloquear o fluxo de água propiciando a intermitência do sistema.

A barra de pulverização esteve totalmente preenchida, devido à ação estanque das válvulas anti-gotas, possibilitando a operação dos emissores quase instantaneamente à abertura da válvula solenóide.

3.5 Circuito eletro-eletrônico

O efeito de intermitência do Notliada dependeu da ação do circuito eletro-eletrônico e da válvula solenóide. Esse circuito foi comandado por um algoritmo inserido em um microcontrolador do tipo Basic Step fabricado pela empresa Tato Equipamentos Eletrônicos Ltda. Na Figura (9) é apresentada uma imagem do microcontrolador utilizado.

Figura 9 – Microcontrolador do tipo Basic Step

O Basic Step possui 8 pinos configuráveis como saídas ou entradas de sinais digitais que podem ser programados para executar o algoritmo necessário. Dessa forma, utilizou-se o compilador do Basic Step para inserir na memória do mesmo o programa responsável pelas marchas de acionamento da válvula solenóide. Utilizaram-se 4 pinos para conectar ao referencial terra (negativo) a fim de neutralizar a aleatoriedade da escolha das marchas. Assim, restaram outros 4 pinos que possibilitam a variação de intermitência no sistema. O esquema do circuito eletro-eletrônico microcontrolado utilizado neste trabalho está apresentado abaixo na Figura (10).

Vista Lateral 1

Vista Lateral 2

b

D1 e D2: Diodos 007 e LED

0 a 7: Pinos do Basic Step

K1: relê A1RC2 12Vcc

Q1: Transistor BC 548B

H, I, J e L: Posições

VS: Válvula Solenóide

R1 a R6: Resistores

Figura 10 – Imagem e esquema do circuito eletro-eletrônico microcontrolado

O programa para acionamento da válvula solenóide foi realizado em linguagem denominada “*tbasic*”. Realizou-se essa programação em um “software” emulador, disponibilizado gratuitamente pelo fabricante. Após sua conclusão, o programa foi enviado para o microcontrolador através da porta serial do computador.

Quando o pino da marcha escolhida era acionado, excitava-se a base do transistor que automaticamente acionava um relê. Esse dispositivo eletro-mecânico exercia um regime de trabalho semelhante a uma chave, que permitia ou não o fluxo de energia elétrica responsável pela alimentação da válvula solenóide.

Como a válvula solenóide utilizada neste trabalho é do tipo “normalmente fechada”, no momento em que a mesma recebia energia elétrica para se abrir era acionado imediatamente um diodo emissor de luz (LED). Assim, a luz vermelha indicava que havia fluxo de água na barra de pulverização.

Alimentou-se o circuito eletro-eletrônico com uma tensão de 12Vcc fornecida por uma fonte projetada exclusivamente para esse fim. Para válvula solenóide, por necessitar de um maior valor de corrente elétrica para ser alimentada, utilizou-se uma bateria de 12Vcc capaz de fornecer a carga demandada por essa válvula. Ao mesmo tempo, essa bateria foi alimentada por uma outra fonte como é apresentado na Figura (12) a seguir.

cab: Chave de acionamento da bomba tab: Timer para acionamento da bomba

Figura 12 - Itens para o acionamento da válvula solenóide e do conjunto moto-bomba

3.6 Efeito intermitente do protótipo Noltiada

A realização da pulverização de forma variada no sistema Notliada foi obtida mediante a intermitência da válvula solenóide na entrada da barra de pulverização. Dessa forma, o sistema foi programado para funcionar alternando tempos ligados e desligados, realizando-se assim a aplicação variada. De acordo com a Figura (13), nota-se que o acionamento da válvula solenóide segue um comportamento de uma função degrau de Oliver Heaviside (1893).

t_l : tempo ligada t_d : tempo desligada T : período t_0 : instante de tempo 0

t_1 : desligamento da VS t_2 : ligamento da VS P_s : pressão de saída VS: Válvula solenóide

Figura 13 – Representação do funcionamento da válvula solenóide no tempo

Observando-se o gráfico pode-se parametrizar a função que descreve a pressão atuante no sistema Notliada em função do tempo. Assim, a função que descreve essa trajetória pode ser escrita por:

$$P(t) = P_s - P_s \times u(t - t_1) + P_s \times u(t - t_2) + \dots \quad (3)$$

Em que: $t_l = t_1 - t_0$ $t_d = t_2 - t_1$

Dessa maneira, o sistema foi pressurizado no intervalo “ t_l ” aplicando-se a calda programada. O intervalo de tempo desligado (t_d) apresenta a importância de ser responsável pelo efeito de redução da calda. A vazão aplicada por um emissor no sistema Notliada em condições normais pode-se ser estimada de acordo com a seguinte função.

$$q = kH^x \quad (4)$$

Em que:

q - vazão de um emissor, $m^3 s^{-1}$.

k - constante, $m^{5/2} s^{-1}$.

H - pressão atuante no emissor, kPa.

x - parâmetro de ajuste da função.

Já em condições de aplicação em forma variada utiliza-se a equação (iii).

$$q_{est} = kH^x \left(\frac{t_l}{t_l + t_d} \right) \quad (iii)$$

Em que:

q_{est}- vazão estimada de um emissor com taxa variada, $m^3 s^{-1}$.

t_l - tempo em que a válvula solenóide permanece ligada, s.

t_d - tempo em que a válvula solenóide permanece desligada, s.

Entretanto, observa-se no gráfico da Figura (13) que o período de pulverização (T) pode ser determinado pela equação (iv).

$$T = t_l + t_d \quad (iv)$$

Substituindo-se a equação (iv) na equação (iii) obtém-se

$$q_{est} = kH^x \left(\frac{t_l}{T} \right) \quad (v)$$

O período de um ciclo da válvula solenóide corresponde ao intervalo de tempo suficiente para a mesma realizar dois pulsos. No início do ciclo a válvula recebe o primeiro pulso sendo pressurizada e logo após recebe o segundo sendo desenergizada. O tempo ligado (t_l) corresponde ao intervalo em que a válvula inicia o primeiro pulso até o início do segundo. Sabendo-se que o

período (T) é o inverso da frequência (ω), deduz-se a equação (vi) para estimar a vazão aplicada por um único emissor no protótipo projetado.

$$q_{est} = kH^x t l \omega \quad (vi)$$

Em que:

ω - frequência de operação da válvula, ciclo s^{-1} .

3.7 Metodologia de Trabalho

A avaliação da durabilidade e do desempenho do sistema Notliada foi realizada avaliando-se alguns itens como: a estanqueidade e durabilidade da válvula solenóide; o desvio existente entre a vazão observada e a vazão estimada do sistema; a durabilidade do conector, emissor, dispositivo anti-gotas e do circuito eletro-eletrônico e o comportamento da tubulação de PVC marron da linha predial soldável.

Realizou-se após a montagem do sistema, a determinação da curva pressão *versus* vazão dos quatro conjuntos de emissão (conector, dispositivo anti-gotas e emissor). O ensaio para a determinação das curvas foi baseado na norma ISO9260:1991(E) (International Standart Organization, 1991). As pressões utilizadas na determinação foram de 205, 255, 275, 295, 315, 335, 355, 375, 395, 415 e 435 kPa. As vazões foram determinadas pelo método gravimétrico utilizando-se garrafas “pet’s” para a coleta do volume. Logo após os recipientes foram levados a uma balança para a determinação do peso da água coletada. Dividiu-se esse valor pelo tempo de coleta realizado, uma vez que se considerou a densidade da água unitária. Para cada ponto de pressão foram realizadas três coletas por conjunto de emissão, determinando-se a vazão média de cada conjunto. De posse dos valores médios de vazão calculados e dos pontos de pressões utilizados, realizaram-se quatro regressões para determinação das funções pressão-vazão que seguiram o ajuste apresentado pela função (4).

Após esses procedimentos, realizaram-se dois experimentos para a determinação do desvio existente entre as vazões observadas e estimadas. No primeiro experimento manteve-se o tempo de desligamento da válvula solenóide constante e no segundo variou-se o mesmo. Os dois experimentos foram realizados a pressão de 245 kPa, pressão de saída do regulador utilizado. Após a realização dos dois experimentos, colocou-se o sistema em funcionamento sob um período

de tempo de 505 horas. Nesse intervalo, o sistema trabalhou de forma intermitente acompanhando a frequência de operação da válvula solenóide. Após as 505 horas realizaram-se análises de durabilidade e desempenho do sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da curva vazão *versus* pressão

Os valores médios de vazões para os diferentes tipos de bicos e valores de pressão são apresentados na tabela (6). De posse desses dados, realizaram-se análises de regressão para determinar os parâmetros de ajuste das funções vazão *versus* pressão para os quatro modelos de bicos utilizados.

Tabela 6 – Vazões médias coletadas nos diferentes emissores e em diferentes valores de pressão

Pressão (kPa)	Vazão média dos emissores (L h ⁻¹)			
	Preto	Laranja	Azul	Vermelho
205	16.39	8.84	4.34	12.87
255	18.28	9.64	4.79	13.90
275	19.00	10.19	5.15	14.73
295	19.61	10.64	5.31	15.13
315	20.53	11.00	5.44	15.92
335	21.13	11.43	5.69	16.53
355	21.89	11.81	5.96	17.04
375	22.65	12.14	6.11	17.53
395	23.86	12.67	6.32	17.88
415	24.38	12.89	6.54	18.61
435	24.69	13.06	6.59	18.98

De acordo com as funções (1) e (2) efetuou-se o cálculo do coeficiente de variação (CVq) e da uniformidade estatística (Us) nos ensaios de determinação das curvas pressão *versus* vazão. Esses coeficientes podem ser observados na tabela (7).

Tabela 7 – Coeficiente de variação e uniformidade estatística das vazões dos emissores utilizados

Pressão kPa	CVq (%)				Us (%)			
	preto	laranja	azul	vermelho	preto	laranja	Azul	Vermelho
205	4.56	1.41	4.60	4.78	95.44	98.59	95.40	95.22
245	6.58	2.81	2.61	4.81	93.42	97.19	97.39	95.19
255	6.31	1.64	3.27	4.27	93.69	98.36	96.73	95.73
275	4.20	2.19	3.83	4.77	95.80	97.81	96.17	95.23
295	3.89	3.98	2.65	4.12	96.11	96.02	97.35	95.88
315	4.38	3.96	4.73	3.95	95.62	96.04	95.27	96.05
335	4.23	4.46	3.99	3.88	95.77	95.54	96.01	96.12
355	3.77	4.68	5.06	4.81	96.23	95.32	94.94	95.19
375	3.96	5.04	6.61	4.14	96.04	94.96	93.39	95.86
395	3.25	4.91	7.88	3.85	96.75	95.09	92.12	96.15
415	2.97	5.86	6.35	4.97	97.03	94.14	93.65	95.03
435	2.94	4.95	6.59	4.93	97.06	95.05	93.41	95.07

Conforme visto na tabela acima, nota-se que as uniformidades estatísticas calculadas apresentaram valores excelentes de acordo com Bralts et al. (1981), o que garante uma boa confiabilidade nas funções geradas nesse ensaio. Na Figura (14) são apresentadas as curvas vazão *versus* pressão para os emissores preto, laranja, azul e vermelho.

Figura 14 - Curvas vazão *versus* pressão para os bicos utilizados nas avaliações

Os parâmetros de ajuste “k” e “x” das quatro funções são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de ajuste das funções pressão *versus* vazão para os quatros tipos de emissores

Bicos	Parâmetros		
	k	x	R ²
Preto	10,6608	0,5741	0,9938
Vermelho	8,3943	0,5510	0,9921
Laranja	5,8463	0,5534	0,9943
Azul	2,8221	0,5837	0,9942

4.2 Comparação entre os valores de vazão estimados e observados com o tempo desligado constante

Após as curvas de pressão *versus* vazão, determinaram-se os desvios existentes (Δ) entre as vazões estimadas pela equação (vi) e as vazões observadas na barra de acordo com a função (5). Os dados foram colhidos para uma pressão de serviço de 2,45 kgf cm⁻². Os valores de “ Δ ” para os diferentes emissores e diferentes frequências de operação da válvula solenóide são apresentados nas tabelas (9), (10), (11) e (12).

$$\Delta = |q_{\text{est}} - q_{\text{obs}}| \quad (5)$$

Em que:

q_{est}: Vazão estimada pela função 4, L h⁻¹;

q_{obs}: Vazão observada na barra de pulverização, L h⁻¹;

Tabela 9 – Valores de “ Δ ” para o emissor preto em diferentes frequências de operação da válvula solenóide

Tempos			Emissor Preto					
			Vazão (L h ⁻¹)			w (ciclo/min)	Desvio (mL/ciclo)	Dr (%)
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Observado	Estimado	Δ			
0.1	2.5	0.04	0.13	0.69	0.56	23.1	0.40	80.96
0.3	2.5	0.11	1.34	1.91	0.57	21.4	0.44	29.87
0.5	2.5	0.17	2.41	2.97	0.56	20.0	0.47	18.99
0.7	2.5	0.22	3.49	3.90	0.41	18.8	0.37	10.62
0.9	2.5	0.26	4.35	4.72	0.37	17.6	0.35	7.88
1.1	2.5	0.31	5.00	5.45	0.45	16.7	0.45	8.24
1.3	2.5	0.34	5.68	6.10	0.42	15.8	0.44	6.89
1.5	2.5	0.38	6.37	6.69	0.32	15.0	0.36	4.81
1.7	2.5	0.40	6.86	7.22	0.36	14.3	0.42	4.99
1.9	2.5	0.43	7.28	7.70	0.42	13.6	0.51	5.46
2.1	2.5	0.46	7.71	8.14	0.43	13.0	0.54	5.24
2.3	2.5	0.48	8.21	8.54	0.34	12.5	0.45	3.93
2.5	2.5	0.50	8.55	8.92	0.37	12.0	0.51	4.11

Tabela 10 - Valores de “ Δ ” para o emissor vermelho em diferentes frequências de operação da válvula solenóide

Tempos			Emissor Vermelho					
			Vazão (L h ⁻¹)			w (ciclo/min)	Desvio (mL/ciclo)	Dr (%)
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Observado	Estimado	Δ			
0.1	2.5	0.04	0.43	0.53	0.10	23.1	0.07	19.28
0.3	2.5	0.11	1.35	1.47	0.12	21.4	0.09	8.18
0.5	2.5	0.17	2.19	2.29	0.11	20.0	0.09	4.61
0.7	2.5	0.22	2.92	3.01	0.09	18.8	0.08	3.11
0.9	2.5	0.26	3.52	3.64	0.12	17.6	0.11	3.19
1.1	2.5	0.31	4.09	4.20	0.11	16.7	0.11	2.68
1.3	2.5	0.34	4.59	4.71	0.12	15.8	0.12	2.49
1.5	2.5	0.38	5.03	5.16	0.13	15.0	0.14	2.49
1.7	2.5	0.40	5.44	5.57	0.13	14.3	0.15	2.31
1.9	2.5	0.43	5.81	5.94	0.13	13.6	0.15	2.12
2.1	2.5	0.46	6.15	6.28	0.13	13.0	0.17	2.13
2.3	2.5	0.48	6.40	6.59	0.19	12.5	0.26	2.92
2.5	2.5	0.50	6.77	6.88	0.11	12.0	0.15	1.59

Tabela 11 - Valores de “ Δ ” para o emissor laranja em diferentes frequências de operação da válvula solenóide

Tempos			Emissor Laranja					
			Vazão (L h ⁻¹)		Δ	w (ciclo/min)	Desvio (mL/ciclo)	Dr (%)
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Observado	Estimado				
0.1	2.5	0.04	0.11	0.37	0.25	23.1	0.18	68.91
0.3	2.5	0.11	0.74	1.03	0.29	21.4	0.23	28.21
0.5	2.5	0.17	1.34	1.60	0.26	20.0	0.21	16.10
0.7	2.5	0.22	1.89	2.10	0.21	18.8	0.19	9.94
0.9	2.5	0.26	2.36	2.54	0.18	17.6	0.17	7.06
1.1	2.5	0.31	2.69	2.93	0.24	16.7	0.24	8.15
1.3	2.5	0.34	3.05	3.28	0.23	15.8	0.24	7.07
1.5	2.5	0.38	3.40	3.60	0.20	15.0	0.22	5.57
1.7	2.5	0.40	3.67	3.89	0.22	14.3	0.25	5.58
1.9	2.5	0.43	3.95	4.15	0.19	13.6	0.24	4.66
2.1	2.5	0.46	4.17	4.38	0.21	13.0	0.27	4.80
2.3	2.5	0.48	4.43	4.60	0.17	12.5	0.23	3.70
2.5	2.5	0.50	4.62	4.80	0.18	12.0	0.25	3.80

Tabela 12 - Valores de “ Δ ” para o emissor azul em diferentes frequências de operação da válvula solenóide

Tempos			Emissor Azul					
			Vazão ($L h^{-1}$)			w (ciclo/min)	Desvio	
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Observado	Estimado	Δ		(mL/ciclo)	Dr (%)
0.1	2.5	0.04	0.16	0.18	0.03	23.1	0.02	14.05
0.3	2.5	0.11	0.47	0.51	0.04	21.4	0.03	7.79
0.5	2.5	0.17	0.76	0.79	0.04	20.0	0.03	4.68
0.7	2.5	0.22	1.01	1.04	0.03	18.8	0.03	3.14
0.9	2.5	0.26	1.25	1.26	0.01	17.6	0.01	0.57
1.1	2.5	0.31	1.44	1.45	0.01	16.7	0.04	1.00
1.3	2.5	0.34	1.63	1.63	0.00	15.8	0.00	0.16
1.5	2.5	0.38	1.80	1.79	0.01	15.0	0.01	0.62
1.7	2.5	0.40	1.92	1.93	0.01	14.3	0.01	0.55
1.9	2.5	0.43	2.06	2.06	0.01	13.6	0.01	0.30
2.1	2.5	0.46	2.20	2.17	0.02	13.0	0.03	1.08
2.3	2.5	0.48	2.31	2.28	0.03	12.5	0.04	1.45
2.5	2.5	0.50	2.42	2.38	0.04	12.0	0.05	1.58

Observando-se a Figura (15) e a tabela (13) notou-se que as curvas mostradas na figura abaixo apresentaram no mínimo uma diferença significativa entre os valores estimados e observados confrontando-se os tempos em que válvula solenóide permanecia ligada (t_{ℓ}) e os quatro tipos de emissores (cor). Entretanto, torna-se difícil chegar a alguma conclusão com tais curvas.

Figura 15 - Desvios dos volumes de aplicação para diversas frequências de operação da válvula solenóide para os quatro tipos de bicos utilizados

Tabela 13 – Teste F dos desvios existentes de vazão nos diferentes tipos de emissores

	GL	SQ	QM	Valor de F	Pr (>F)
TL	1	0.3557	0.3557	5.7930	0.0166*
Cor	3	8.4488	2.8163	45.8626	< 2e-16 ***
TL x Cor	3	0.4893	0.1631	2.6562	0.04850*
Resíduo	317	19.4659	0.0614		

*** Significativo a 0,1% de probabilidade; ** Significativo a 1% de probabilidade;

* Significativo a 5% de probabilidade.

Na tabela (14) são apresentados os valores de coeficiente de variação (CV) e uniformidade estatística (Us) para as vazões observadas referentes a todos os tempos de acionamento da válvula solenóide.

Tabela 14 – Coeficientes de variação e uniformidade estatística da vazão dos emissores em todos os tempos de acionamento da válvula solenóide

Tempo (s)		CVq (%)				Us (%)			
Ligada	Desligada	preto	laranja	azul	vermelho	preto	laranja	azul	Vermelho
0.1	2.5	129.67	95.34	11.71	7.55	-29.67	4.66	88.29	92.45
0.3	2.5	26.46	22.01	1.39	6.80	73.54	77.99	98.61	93.20
0.5	2.5	15.51	15.10	2.59	5.80	84.49	84.90	97.41	94.20
0.7	2.5	9.79	9.02	3.07	6.14	90.21	90.98	96.93	93.86
0.9	2.5	7.52	5.74	1.04	6.37	92.48	94.26	98.96	93.63
1.1	2.5	5.92	4.88	2.44	6.31	94.08	95.12	97.56	93.69
1.3	2.5	6.05	5.30	3.82	6.30	93.95	94.70	96.18	93.70
1.5	2.5	6.37	3.40	1.80	5.03	93.63	96.60	98.20	94.97
1.7	2.5	6.86	3.67	1.92	5.44	93.14	96.33	98.08	94.56
1.9	2.5	4.03	3.34	3.48	5.83	95.97	96.66	96.52	94.17
2.1	2.5	3.98	4.04	3.10	5.56	96.02	95.96	96.90	94.44
2.3	2.5	4.66	3.60	2.48	6.58	95.34	96.40	97.52	93.42
2.5	2.5	4.29	3.28	2.32	5.82	95.71	96.72	97.68	94.18

Na Figura (16) são apresentadas as tendências da uniformidade estatística das vazões observadas para os diversos tempos em que a válvula solenóide permaneceu ligada e para os quatro tipos de emissores utilizados.

Figura 16 – Uniformidade estatística das vazões observadas para os diversos tempos em que a válvula solenóide permaneceu ligada

Com base nos resultados mostrados acima, observou-se que cada bico apresentou diferentes respostas aos intervalos de acionamento da válvula solenóide. Em busca de uma análise que se aplicasse em todos os bicos, estimou-se um desvio relativo (Dr) entre os dados das vazões estimadas e as vazões coletadas. Os desvios relativos estão apresentados nas tabelas 8, 9, 10 e 11 e foram calculados de acordo com a função (6) apresentada abaixo.

$$Dr = \frac{|q_{est} - q_{obs}|}{q_{est}} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

Dr: Desvio relativo, %;

De posse dos dados obtidos na função 6 plotaram-se quatro curvas que representam os desvios relativos (Dr) existentes em função de cada valor de frequência (w) de operação da válvula solenóide para os quatro tipos de bicos utilizados. As respectivas curvas são apresentadas na Figura (16).

Figura 16 - Desvios Relativos das vazões de aplicação para diversas frequências de operação da válvula solenóide para os quatro tipos de bicos utilizados.

Verifica-se na Tabela (15) que os desvios relativos apresentaram diferença significativa entre as vazões observadas e estimadas em função do tempo ligado, do tipo de emissor (cor) e da interação entre esses dois fatores.

Tabela 15 – Teste F dos desvios relativos de vazão nos diferentes tipos de emissores

	GL	SQ	QM	Valor de F	Pr (>F)
TL	1	551.87	551.87	78.1600	< 2.2e-16 ***
Cor	3	1745.44	581.81	82.4004	< 2.2e-16 ***
TL x Cor	3	210.82	70.27	9.9526	2.535e-06 ***
Resíduo	367	2591.31	7.06		

*** Significativo a 0,1% de probabilidade

Pode-se verificar conforme a Figura (16) que o melhor ajuste encontrado em todos os emissores se deu com uma função polinomial do 3º grau. A forma dessa função é apresentada a seguir.

$$Dr = aw^3 + bw^2 + cw + d \quad (7)$$

Na tabela (16) são apresentados alguns indicadores de desempenho estatístico: a) precisão – coeficiente de correlação de Pearson (r); b) exatidão – índice de concordância de Willmott (d) e c) índice de confiança ou desempenho de Camargo (c).

Tabela 16 – Indicadores de desempenho estatístico para testar a precisão e exatidão dos modelos propostos

Emissor	r	d	c
Preto	0.9898	0.9948	0.9847
Vermelho	0.9641	0.9849	0.9495
Laranja	0.9935	0.9967	0.9902
Azul	0.9693	0.9405	0.9116

De acordo com os valores apresentados na tabela acima, as modelagens dos desvios relativos em função das frequências de operação da válvula solenóide apresentaram ótimos índices de precisão e exatidão, já que o índice de concordância apresentou valor maior que 0,85.

Com o intuito de minimizar o desvio relativo das taxas de aplicação, tomou-se a primeira derivada da função (7) obtendo-se a seguinte função.

$$\frac{dDr}{dw} = 3aw^2 + 2bw + c \quad (8)$$

Fazendo-se $k = 3a$, $y = 2b$, $z = c$ e substituindo-se esses parâmetros na função (8) chegou-se a expressão final que representa a primeira derivada da função (7). Essa, auxiliou na

obtenção dos percentuais dos desvios ocasionados a cada tipo de bico utilizado em cada frequência de operação da válvula solenóide.

$$\frac{dDr}{dw} = kw^2 + yw + z \quad (9)$$

Igualando-se a função (9) ao valor zero e desenvolvendo-a obtiveram-se as funções (10) e (11) que indicam o valor ideal de frequência (w) que minimiza o efeito dos desvios relativos.

$$w' = \frac{-y + \sqrt{y^2 - 4kz}}{2k} \quad (10)$$

$$w'' = \frac{-y - \sqrt{y^2 - 4kz}}{2k} \quad (11)$$

Na tabela (17) são apresentados os valores dos parâmetros mostrados à cima para cada tipo de emissor utilizado.

Tabela 17 - Parâmetros calculados para a obtenção da frequência ideal da válvula solenóide

Parâmetros	Emissor			
	Preto	Vermelho	Laranja	Azul
a	0.1898	0.0455	0.1621	0.0099
b	-8.8833	-2.1371	-7.6058	-0.3059
c	137.4700	33.1520	118.1600	2.4130
d	-696.96	-167.22	-601.23	-0.38
k	0.5694	0.1365	0.4863	0.0297
y	-17.7666	-4.2742	-15.2116	-0.6118
z	137.4700	33.1520	118.1600	2.4130
w' (ciclo min ⁻¹)	17.00	17.16	16.92	15.28
w''(ciclo min ⁻¹)	14.20	14.16	14.36	5.32

Analisando-se a Figura (16) e as frequências w' e w'' adotou-se como limite de frequência de operação da válvula solenóide o valor de w' . Esses valores estão contidos em domínios que apresentam pequena variação. Dessa maneira, substituindo-se a frequência calculada nas funções geradas para cada tipo de bico, calcularam-se os valores de tempo aceitáveis em que a válvula solenóide permaneceu ligada e seus respectivos desvios relativos. Esses dados estão apresentados na tabela (18).

Tabela 18 – Tempos limite de ligamento da válvula solenóide e seus respectivos desvios relativos (Dr) aceitáveis para os diferentes tipos de emissores

	Emissores			
	Preto	Vermelho	Laranja	Azul
Tempo mínimo de Ligamento (s)	1,03	1,00	1,05	1,43
Desvios Relativos aceitáveis (%)	5,2437	2,2787	5,8070	0,3852

Os desvios relativos entre as vazões estimadas e observadas ocorrem devido a diversos fatores como: o tempo de resposta do acionamento da válvula solenóide para marchas que implicam pequenos tempos de acionamento; o aumento de pressão ocorrido na barra de pulverização devido ao golpe de aríete da válvula solenóide; a celeridade descrita no percurso da água dentro da barra em altas frequências de operação da válvula solenóide, entre outros.

4.3 Comparação entre os valores de vazão estimados e observados com o tempo desligado variável

Com o intuito de avaliar se o tempo em que a válvula solenóide permanece desligada (t_d) leva a desvios significativos de vazões realizou-se um segundo ensaio como pode ser observado nas tabelas (19), (20), (21) e (22).

Tabela 19 - Valores de desvios relativos para o emissor preto variando-se o tempo em que a válvula solenóide permanece desligada

Tempos			Emissor Preto			
			Vazão (L h ⁻¹)			w
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Observada	Estimada	Dr (%)	(ciclo/min)
0.9	3	0.23	3.79	4.13	8.21	15.38
0.9	4.5	0.17	2.72	2.98	8.71	11.11
0.9	6	0.13	2.12	2.33	9.18	8.70
1.3	3	0.30	5.05	5.40	6.58	13.95
1.3	4.5	0.22	3.74	4.01	6.64	10.34
1.3	6	0.18	2.96	3.18	6.87	8.22
1.7	3	0.36	6.12	6.47	5.42	12.77
1.7	4.5	0.27	4.64	4.90	5.39	9.68
1.7	6	0.22	3.74	3.95	5.18	7.79
2.1	3	0.41	7.03	7.36	4.44	11.76
2.1	4.5	0.32	5.44	5.69	4.33	9.09
2.1	6	0.26	4.43	4.63	4.40	7.41
2.5	3	0.45	7.82	8.13	3.79	10.91
2.5	4.5	0.36	6.07	6.38	4.85	8.57
2.5	6	0.29	5.00	5.26	4.95	7.06

Tabela 20 - Valores de desvios relativos para o emissor laranja variando-se o tempo em que a válvula solenóide permanece desligada

Tempos			Emissor Laranja			
			Vazão (L h ⁻¹)			w
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Observada	Estimada	Dr (%)	(ciclo/min)
0.9	3	0.23	2.00	2.22	9.81	15.38
0.9	4.5	0.17	1.44	1.60	9.80	11.11
0.9	6	0.13	1.13	1.25	10.14	8.70
1.3	3	0.30	2.70	2.91	7.08	13.95
1.3	4.5	0.22	2.00	2.15	7.16	10.34
1.3	6	0.18	1.58	1.71	7.40	8.22
1.7	3	0.36	3.27	3.48	5.82	12.77
1.7	4.5	0.27	2.50	2.63	5.16	9.68
1.7	6	0.22	2.00	2.12	5.81	7.79
2.1	3	0.41	3.77	3.96	4.72	11.76
2.1	4.5	0.32	2.92	3.06	4.42	9.09
2.1	6	0.26	2.38	2.49	4.62	7.41
2.5	3	0.45	4.19	4.37	4.09	10.91
2.5	4.5	0.36	3.28	3.43	4.56	8.57
2.5	6	0.29	2.69	2.83	4.91	7.06

Tabela 21 - Valores de desvios relativos para o emissor azul variando-se o tempo em que a válvula solenóide permanece desligada

Tempos			Emissor Azul			
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Vazão (L h ⁻¹)			w (ciclo/min)
			Observada	Estimada	Dr (%)	
0.9	3	0.23	1.10	1.10	0.24	15.38
0.9	4.5	0.17	0.77	0.79	2.51	11.11
0.9	6	0.13	0.61	0.62	1.17	8.70
1.3	3	0.30	1.42	1.44	1.19	13.95
1.3	4.5	0.22	1.05	1.07	1.29	10.34
1.3	6	0.18	0.83	0.85	1.82	8.22
1.7	3	0.36	1.72	1.72	0.37	12.77
1.7	4.5	0.27	1.29	1.31	1.47	9.68
1.7	6	0.22	1.03	1.05	2.23	7.79
2.1	3	0.41	1.96	1.96	0.28	11.76
2.1	4.5	0.32	1.52	1.52	0.06	9.09
2.1	6	0.26	1.22	1.24	1.11	7.41
2.5	3	0.45	2.16	2.17	0.20	10.91
2.5	4.5	0.36	1.70	1.70	0.03	8.57
2.5	6	0.29	1.39	1.40	0.80	7.06

Tabela 22 - Valores de desvios relativos para o emissor vermelho variando-se o tempo em que a válvula solenóide permanece desligada

Tempos			Emissor Vermelho			
			Vazão (L h ⁻¹)			w
TL(s)	TD(s)	TL/(TL+TD)	Observada	Estimada	Dr (%)	(ciclo/min)
0.9	3	0.23	3.16	3.20	1.25	15.38
0.9	4.5	0.17	2.26	2.31	2.22	11.11
0.9	6	0.13	1.77	1.81	2.51	8.70
1.3	3	0.30	4.14	4.20	1.36	13.95
1.3	4.5	0.22	3.07	3.11	1.47	10.34
1.3	6	0.18	2.44	2.47	1.18	8.22
1.7	3	0.36	4.98	5.02	0.87	12.77
1.7	4.5	0.27	3.77	3.81	1.11	9.68
1.7	6	0.22	3.02	3.07	1.42	7.79
2.1	3	0.41	5.67	5.72	0.83	11.76
2.1	4.5	0.32	4.40	4.42	0.47	9.09
2.1	6	0.26	3.54	3.60	1.78	7.41
2.5	3	0.45	6.27	6.31	0.62	10.91
2.5	4.5	0.36	4.91	4.96	1.05	8.57
2.5	6	0.29	4.04	4.08	0.97	7.06

Na tabela (23), encontram-se os valores de uniformidade estatística que se apresentam com excelentes índices de acordo com a classificação proposta por Bralts et al. (1981). Na mesma tabela, apresentam-se também os valores dos coeficientes de variação.

Tabela 23 - Coeficientes de variação e uniformidade estatística para o ensaio com variação do tempo em que a válvula solenóide permanece desligada

Tempo (s)		CVq (%)				Us (%)			
Ligada	Desligada	Preto	Laranja	Azul	Vermelho	Preto	Laranja	Azul	Vermelho
0.9	3	6.34	3.21	3.84	1.52	93.66	96.79	96.16	98.48
0.9	4.5	5.80	2.22	2.17	1.64	94.20	97.78	97.83	98.36
0.9	6	6.80	2.11	4.84	1.68	93.20	97.89	95.16	98.32
1.3	3	4.33	2.03	1.61	1.70	95.67	97.97	98.39	98.30
1.3	4.5	4.18	2.17	1.67	1.45	95.82	97.83	98.33	98.55
1.3	6	3.21	2.12	1.89	1.42	96.79	97.88	98.11	98.58
1.7	3	3.50	1.87	1.84	1.54	96.50	98.13	98.16	98.46
1.7	4.5	4.56	1.31	1.68	2.63	95.44	98.69	98.32	97.37
1.7	6	3.72	1.99	1.81	1.72	96.28	98.01	98.19	98.28
2.1	3	3.57	2.59	1.89	1.39	96.43	97.41	98.11	98.61
2.1	4.5	2.70	2.22	1.71	1.35	97.30	97.78	98.29	98.65
2.1	6	3.72	1.94	2.10	1.56	96.28	98.06	97.90	98.44
2.5	3	3.17	2.65	1.66	1.26	96.83	97.35	98.34	98.74
2.5	4.5	2.68	2.54	2.23	1.32	97.32	97.46	97.77	98.68
2.5	6	2.87	2.62	1.80	1.49	97.13	97.38	98.20	98.51

Observa-se na Figura (17) que os desvios relativos permaneceram constantes para os três intervalos de tempo de desligamento da válvula solenóide independente do tipo de emissor. Assim, pressupõe-se que o sistema de pulverização Notliada pode ser projetado para trabalhar em quaisquer intervalos de acionamento da válvula solenóide com tempo de desligamento superior a 3s que o desvio relativo sempre será esperado em uma faixa conhecida.

Figura 17 – Desvios relativos para os quatro emissores variando-se o tempo em que a válvula solenóide permanece desligada

Observa-se na tabela (24) que não ocorreu nenhuma diferença significativa entre os desvios relativos existentes variando-se o tempo de desligamento da válvula solenóide. Assim, existe a possibilidade de se utilizar qualquer tempo de desligamento para a válvula solenóide acima de 3s.

Tabela 24 – Teste F dos desvios relativos de vazão nos diferentes tipos de emissores variando-se o tempo de desligamento

	GL	SQ	QM	Valor de F	Pr (>F)
TL	1	551.87	551.87	77.4718	< 2.2e-16 ***
Cor	3	1745.44	581.81	81.6749	< 2.2e-16 ***
TD	1	19.21	19.21	2.6967	0.1014
TL x Cor	3	210.82	70.27	9.8649	2.884e-06 ***
TL x TD	1	1.63	1.63	0.2288	0.6327
Cor x TD	3	12.27	4.09	0.5743	0.6322
TL x TD x Cor	3	0.86	0.29	0.0401	0.9893
Resíduo	359	2557.34	7.12		

*** Significativo a 0,1% de probabilidade

Para confirmar se realmente os intervalos propostos de “td” afetaram com significância os desvios relativos (Dr) compararam-se as vazões observadas com as vazões estimadas pela equação (vi) nos novos intervalos propostos. Para tal comparação utilizou-se novamente o índice de confiança de Camargo. Na Tabela (25) são apresentados os índices obtidos na análise onde se constatou que todos os intervalos testados apresentaram pequenos erros aleatórios e erros sistemáticos, já que o valor de c é maior que 0,85 para todos os intervalos.

Tabela 25 – Índices de Pearson, Willmott e Camargo para a comparação entre as vazões estimadas e observadas para os intervalos de tempo testados

Tempo (s)		Índices		
Ligada	Desligada	r	d	c
0.9	3	0.9157	0.9515	0.8714
0.9	4.5	0.9180	0.9518	0.8737
0.9	6	0.9146	0.9490	0.8680
1.3	3	0.9249	0.9582	0.8863
1.3	4.5	0.9261	0.9587	0.8879
1.3	6	0.9263	0.9586	0.8880
1.7	3	0.9278	0.9607	0.8914
1.7	4.5	0.9266	0.9600	0.8896
1.7	6	0.9293	0.9618	0.8939
2.1	3	0.9302	0.9625	0.8954
2.1	4.5	0.9312	0.9630	0.8967
2.1	6	0.9320	0.9635	0.8979
2.5	3	0.9321	0.9638	0.8983
2.5	4.5	0.9316	0.9628	0.8969
2.5	6	0.9296	0.9619	0.8942

Dessa maneira, comprova-se a utilização de qualquer tempo de desligamento para a válvula solenóide maior que 3s. Entretanto deve-se escolher um tempo que garanta um molhamento uniforme da estrutura foliar da cultura. Atualmente, existem pivôs centrais que podem atingir uma velocidade de deslocamento de 344 m h^{-1} utilizando-se pneus de $12.4 \times 38 \text{ cm}$. De acordo com Vilela (2002) os bocais pretos e azuis apresentam alcances superiores a 50cm enquanto os alcances dos demais modelos encontram-se compreendidos entre 40 e 50cm. Considerando-se que na extremidade do último vão do pivô central utilizar-se-ão emissores de cor preta e admitindo-se uma sobreposição de 15 cm no sentido de caminhamento do pivô central recomenda-se a utilização da válvula solenóide com tempo de desligamento menor que 9 s.

4.4 Durabilidade dos emissores

Na tabela (26) são apresentados os valores de vazão observados num instante inicial (t_0) e após 505 horas de funcionamento. O tempo de 505 horas de funcionamento se deu no período de 7 a 24 de novembro de 2006 operando 24 horas por dia. Nesse intervalo não houve interrupção do funcionamento do sistema. Os testes foram realizados com uma marcha referente a um tempo ligado (t_l) de 0,9s e tempo desligado (t_d) de 2,5s.

Tabela 26 – Valores médios de vazão observada antes e após 505 horas ininterruptas de funcionamento

(continua)

Número	Cor	q (L h ⁻¹)	
		0 horas	após 505 horas
1	Preto	2.10	2.13
5	Preto	2.17	2.02
9	Preto	2.17	2.12
13	Preto	2.25	2.28
17	Preto	2.11	2.22
21	Preto	2.06	2.25
25	Preto	2.41	2.45
29	Preto	1.93	2.12
33	Preto	1.97	2.02
37	Preto	2.00	2.08
45	Laranja	1.09	1.02
51	Laranja	1.11	1.16
57	Laranja	1.13	1.22
63	Laranja	1.15	1.15
69	Laranja	1.15	1.17
74	Azul	0.59	0.61
77	Azul	0.60	0.61
78	vermelho	1.78	1.78

Tabela 26 – Valores médios de vazão observada antes e após 505 horas ininterruptas de funcionamento

(conclusão)

Número	Cor	q (L h ⁻¹)	
		0 horas	após 505 horas
80	Azul	0.62	0.87
83	Azul	0.60	0.59
86	Azul	0.66	0.58
87	Vermelho	1.78	1.79
88	Vermelho	1.80	1.80
89	Vermelho	1.75	1.75
90	Vermelho	1.73	1.76

A partir dos dados apresentados, confrontaram-se os mesmos determinando-se uma função linear como se pode observar na Figura (18).

Figura 18 – Relação das vazões observadas num instante inicial versus vazões observadas após 505 horas de funcionamento ininterruptos da barra de pulverização

Realizou-se o teste “t” com um nível significativo de 5% e 24 graus de liberdade. Dessa forma o valor do parâmetro “a” pôde ser descartado, já que $t_c < 2,064$ e manteve-se o parâmetro “b” uma vez que $t_c > 2,064$ para um valor de F igual a 1167. Diante desses dados, não houve diferença significativa entre os valores de vazões observados antes e após 505 horas de funcionamento o que mostra que nenhum dos quatro tipos de emissores utilizados no processo

sofreu alteração em seus diâmetros. Na tabela (27) são apresentados os valores do teste “t” realizado.

Tabela 27 – Teste “t” para avaliação da vazão dos emissores após 505 horas de funcionamento

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	Valor de tc	Intervalo de confiança a 95%	
a	0.0283	0.0488	0.5795	-0.0726	0.1292
b	1.0035	0.0294	34.1693	0.9428	1.0643

Os valores dos diâmetros dos emissores preto, laranja, azul e vermelho antes e após 505 horas de funcionamento são apresentados na tabela (28). Esses valores foram determinados no projetor de perfil e confrontados para a determinação de uma função linear apresentada na Figura (19).

Tabela 28 – Valores dos diâmetros dos quatro emissores antes e após 505h de funcionamento

(continua)

N	Cor	D₀(mm)	D₅₀₅(mm)	N	Cor	D₀(mm)	D₅₀₅(mm)
1	Preto	1.215	1.199	46	Laranja	0.990	1.022
2	Preto	1.165	1.187	47	Laranja	0.991	1.021
3	Preto	1.167	1.212	48	Laranja	1.005	1.024
4	Preto	1.178	1.193	49	Laranja	1.006	1.017
5	Preto	1.181	1.184	50	Laranja	1.008	1.006
6	Preto	1.181	1.144	51	Laranja	1.012	0.984
7	Preto	1.184	1.216	52	Laranja	1.013	0.984
8	Preto	1.186	1.176	53	Laranja	1.014	1.035
9	Preto	1.194	1.211	54	Laranja	1.016	1.028
10	Preto	1.194	1.153	55	Laranja	1.017	1.000
11	Preto	1.195	1.173	56	Laranja	1.019	1.004
12	Preto	1.195	1.155	57	Laranja	1.020	1.012
13	Preto	1.197	1.303	58	Laranja	1.020	1.030
14	Preto	1.200	1.212	59	Laranja	1.021	1.016
15	Preto	1.202	1.199	60	Laranja	1.023	1.031

Tabela 28 – Valores dos diâmetros dos quatro emissores antes e após 505h de funcionamento

(continuação)

N	Cor	D ₀ (mm)	D ₅₀₅ (mm)	N	Cor	D ₀ (mm)	D ₅₀₅ (mm)
16	Preto	1.202	1.203	61	Laranja	1.025	0.991
17	Preto	1.202	1.206	62	Laranja	1.022	1.004
18	Preto	1.203	1.217	63	Laranja	1.030	1.014
19	Preto	1.205	1.216	64	Laranja	1.031	1.003
20	Preto	1.205	1.212	65	Laranja	1.033	1.026
21	Preto	1.206	1.218	66	Laranja	1.033	1.005
22	Preto	1.207	1.184	67	Laranja	1.035	1.000
23	Preto	1.207	1.175	68	Laranja	1.037	1.015
24	Preto	1.207	1.195	69	Laranja	1.037	0.983
25	Preto	1.208	1.199	70	Laranja	1.037	1.018
26	Preto	1.236	1.225	71	Laranja	1.037	1.030
27	Preto	1.211	1.195	72	Laranja	1.038	0.994
28	Preto	1.211	1.199	73	Azul	0.593	0.611
29	Preto	1.226	1.220	74	Azul	0.611	0.622
30	Preto	1.212	1.203	75	Azul	0.614	0.608
31	Preto	1.228	1.231	76	Azul	0.614	0.579
32	Preto	1.228	1.197	77	Azul	0.618	0.623
33	Preto	1.213	1.212	78	Vermelho	1.028	1.014
34	Preto	1.213	1.207	79	Azul	0.619	0.610
35	Preto	1.214	1.193	80	Azul	0.619	0.594
36	Preto	1.232	1.227	81	Azul	0.622	0.624
37	Preto	1.215	1.221	82	Azul	0.626	0.630
38	Preto	1.232	1.213	83	Azul	0.629	0.621
39	Preto	1.216	1.230	84	Azul	0.633	0.621
40	Preto	1.217	1.202	85	Azul	0.635	0.611
41	Preto	1.218	1.228	86	Azul	0.636	0.635
42	Preto	1.192	1.167	87	Vermelho	0.990	1.021
43	Preto	1.230	1.219	88	Vermelho	1.012	0.997

Tabela 28 – Valores dos diâmetros dos quatro emissores antes e após 505h de funcionamento
(conclusão)

N	Cor	D ₀ (mm)	D ₅₀₅ (mm)	N	Cor	D ₀ (mm)	D ₅₀₅ (mm)
44	Preto	1.234	1.217	89	Vermelho	1.016	1.025
45	Laranja	0.975	1.044	90	Vermelho	1.024	1.015

Os diâmetros medidos dos emissores após 505 horas de funcionamento (D₅₀₅) que apresentaram menores valores que os diâmetros medidos antes do funcionamento (D₀) servem como indicadores de desgaste resultando em aumento de vazão. Entretanto, os diâmetros de D₅₀₅ que apresentaram maiores valores que D₀ acusam uma redução desse diâmetro devido a entupimentos ocasionando em redução da vazão.

Figura 19 - Relação dos diâmetros medidos antes e após 505 horas de funcionamento

Os diâmetros também foram analisados em teste “t” de acordo com a Tabela (29). Para um valor de “t” tabelado de 1,999 correspondente a 5% de significância e 89 graus de liberdade determinou-se que não existe diferença significativa entre os valores dos diâmetros antes e após 505 horas de funcionamento, uma vez que o parâmetro “a” pode ser descartado, aceitando-se apenas o parâmetro “b” que representa o coeficiente angular da reta. O valor de F encontrado nessa análise foi de 6124.

Tabela 29 – Teste “t” para avaliação dos diâmetros dos emissores após 505 horas de funcionamento

Parâmetro	Valor	Erro Padrão	Valor de tc	Intervalo de Confiança 95%	
a	-0.0065	0.0137	-0.4741	-0.0338	0.0208
b	1.0020	0.0128	78.2594	0.9765	1.0274

4.4 Durabilidade do dispositivo eletro-eletrônico

O microcontrolador Basic Step, o relê, o transistor e demais componentes eletrônicos utilizados no circuito apresentaram bom funcionamento durante todos os ensaios de vazão realizados e todo o tempo de 505 horas de funcionamento.

4.5 Utilização de tubulação PVC soldável

A tubulação de material PVC soldável de diâmetro de 0,01905m (3/4”) não apresentou vazamentos nas junções entre os conectores e a barra. Com o auxílio de cabos de aço para sua fixação e sustentação, a barra de pulverização não apresentou catenárias que alterassem sua estrutura mantendo-se em nível durante toda a experimentação.

4.6 Durabilidade e estanqueidade da válvula solenóide

A válvula solenóide manteve-se estanque mesmo após o período em que a mesma foi utilizada apresentando uma boa confiabilidade em seu uso.

5 CONCLUSÕES

Após as análises realizadas utilizando-se um protótipo do sistema Notliada concluiu-se que:

Os modelos propostos para a determinação de desvios relativos em função da frequência de operação da válvula solenóide, para os diferentes tipos de emissores, apresentaram excelentes índices de precisão e exatidão.

Os emissores preto, vermelho e laranja apresentaram desvios relativos, entre a vazão observada e a vazão estimada, inaceitáveis para um tempo de ligamento da válvula solenóide menor que 1s. O emissor azul apresentou desvio relativo inaceitável para um tempo menor que 1,4 s. Os emissores preto e laranja não apresentaram excelentes índices de uniformidade estatística de aplicação para um tempo de ligamento da válvula solenóide menor que 0,7s. Os emissores azul e vermelho apresentaram bons índices de uniformidade estatística em todos os tempos de ligamento.

Os desvios relativos dos emissores para um tempo de desligamento da válvula solenóide maior que 3s são perfeitamente aceitáveis necessitando-se de atenção para a escolha de um tempo que permita um molhamento uniforme da estrutura foliar de acordo com a velocidade de deslocamento do pivô central. Todos os emissores apresentaram excelentes índices de uniformidade estatística para um tempo de desligamento da válvula solenóide maior que 3s.

O conjunto eletro-eletrônico não apresentou nenhuma falha proporcionando bom funcionamento em todo período de acionamento da válvula solenóide.

A válvula solenóide permaneceu estanque após o período de intermitência em que foi submetida. Além das 505 horas interrompidas de atuação, a mesma foi acionada durante todos os ensaios realizados para a determinação de vazão nas frequências de operação propostas neste trabalho.

Não houve alteração significativa da vazão e dos diâmetros de todos os emissores utilizados sob o regime intermitente de 505 horas. Todos conectores e válvulas anti-gotas apresentaram um bom funcionamento durante esse período.

Utilizando-se a tubulação de PVC soldável não ocorreu identificação de nenhuma alteração do sistema Notliada.

REFERENCIAS

ALVES, D.R.B. **Distribuição de nitrogênio e potássio na cultura de milho aplicados via pivô central**. 2000. 99 p. Tese (Doutor em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Terminology and definitions for agricultural chemical applications. **ASAE standards 1996**. St Joseph, 1996. p.159-161.

ANDRADE JUNIOR, S.A. de. **Viabilidade da irrigação, sob risco climático e econômico, nas microrregiões de teresina e litoral piauiense**. 2000. 566p. Tese (Doutor em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

AZEVEDO NETO, J.M.; FERNANDES, M.F.; ARAUJO, R. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1998. 669 p.

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

BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 307 p.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: UFV, 1975 164 p.

BRALTS, V.F.; WU, I.P; GITLIN, H.M. Emitter plugging and drip irrigation lateral line hydraulics. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, p. 1274-1281, May 1982.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Campinas, v. 5, p. 89-97, 1997.

COSTA, M.A.F. de. **Avaliação de desempenho operacional de um pulverizador pneumático costal motorizado utilizado no controle de mosquitos vetores de doenças**. 2002. 99 p. Dissertação (Mestre em Máquinas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

Del PINO, M.IA.I.T. **Sistema computacional de auxílio ao desenho, simulação e desenvolvimento de projetos de irrigação localizada**. 2005. 142 p. Tese (Doutor em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

DENÍCULI, W. **Medidores de vazão tipo orifício**. Viçosa: UFV, 1990. 43 p.

FARAHANI, H.J., SHANER, D.L., BUCHLEITER, G.W., BARTLETT, G.A. Evaluation of a low volume agro-chemical application system for center pivot irrigation. **Transactions of the ASABE**, St Joseph, v. 22, p. 517-528, Mar. 2006.

FAVETTA, G.M. **Avaliação da uniformidade de emissão e da uniformidade estatística em irrigação localizada**. 1993. 52 p. Dissertação (Mestre em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1993.

IBARS, R.A.F. **Desenvolvimento e avaliação de tubos venturi para a medição de vazão**. 2004. 61 p. Dissertação (Mestre em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 17, p. 678-684, Apr. 1974.

KING, B.A.; KINCAID D.C. A variable flow rate sprinkler for site-specific irrigation management. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 20, p. 765-770, Apr. 2005.

KING, B.A.; WALL R.W.; KINCAID D.C.; WESTERMANN D.T. Field testing of a variable rate sprinkler and control system for site-specific water and nutrient application. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 21, p. 847-853, Apr. 2005.

MATTHEWS, G.A. **Pesticide application methods**. 2nd ed. New York: Longman, 1992. 405 p.

OZKAN, E.H. Recommendations for pesticide applicator training in USA based on licensing and training procedures in Western Europe. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.15, n.1, p. 25-30, 1999.

QIU, W.; WATKINS, G.A.; SOBOLIK, C.J.; SHEARER, S.A. A feasibility study of a direct injection for variable rate herbicide application. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.41, n.2, p.283-292, Aug. 1996.

QUEIROZ, T.M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 141 p. Tese (Doutor em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SALYANI, M.; SERDYNISKI, J.W. A device and method for spray calibration. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 9, n. 1, p. 29-32, Jan. 1993.

SUDDUTH, K.A.; BORGELT, S.C.; HOU, J.X. Performance of a chemical injection sprayer system. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v. 11, n. 3, p. 343-348, May 1995.

VIEIRA, R.F. Introdução a quimigação. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIANA, P.A. **Quimigação: aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. cap. 1, p. 13-40.

VILELA, L.A. **Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplado a pivô central**. 2002. 128 p. Tese (Doutor em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Transactions of the ASAE**, Ottawa, v. 27, p. 565-583, Nov. 1947.

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Estatistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Resarch**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.