

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UMA SERVOVÁLVULA DE BAIXO CUSTO PARA A APLICAÇÃO DE INSUMOS LÍQUIDOS

ANDRÉ L. JOHANN¹, EDISON RUSSO², NELSON L. CAPPELLI³, CLAUDIO K. UMEZU⁴

RESUMO: O presente trabalho teve o objetivo de desenvolver uma servoválvula de baixo custo, que respondesse a um sinal eletrônico de controle, para a aplicação de insumos líquidos a taxas variáveis. Depois de realizada pesquisa na literatura das opções de válvulas existentes para a dosagem de líquidos a baixas pressões, partiu-se para o desenvolvimento de uma válvula proporcional com acionamento mecânico por intermédio de um servomotor controlado eletronicamente. Uma vez desenvolvida a servoválvula, o sistema foi submetido a um conjunto de testes, realizados em bancada desenvolvida especificamente para esse fim, onde se procurou avaliar seu comportamento em termos de repetitividade, histerese e linearidade. Como resultados, obtiveram-se três curvas de vazão em função do percentual de abertura, descrevendo três incrementos de abertura e fechamento em duas pressões diferentes de trabalho. A servoválvula apresentou boa repetitividade, razoável histerese e curva tipicamente quadrática, bem como manteve a proposta de baixo custo. Esses resultados apresentaram-se bastante satisfatórios, uma vez que a não-linearidade e a histerese podem ser facilmente corrigidas por meio de *software*.

PALAVRAS-CHAVE: agricultura de precisão, taxa de aplicação, válvula proporcional.

DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A LOW COST SERVO-VALVE FOR LIQUID INPUTS APPLICATION

ABSTRACT: The present work aimed the development of a low cost servo-valve that answers to an electronic control signal, for variable rates liquid inputs application. A literature research to define which valve type should be used was made. A mechanically activated proportional valve with an electronically controlled servo-engine was designed and evaluated. Since developed the servo-valve, the system was submitted to a number of tests. The evaluation of its behavior was obtained in terms of repeatability, hysteresis and linearity. The test was accomplished in a bench, specially developed for this aim. As a result, were obtained three curves of opening percentage as function of flow rate, describing three opening and closing increments in two different work pressures. The servo-valve presented a good repeatability, reasonable hysteresis and a typically quadratic curve. This one maintained the low cost target. These results were very satisfied because the non-linearity and the hysteresis could be easily corrected by software.

KEYWORDS: precision agriculture, application rate, proportional valve.

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da agricultura moderna, a demanda por técnicas de manejo que possibilitam a aplicação de insumos a taxas variáveis tem aumentado significativamente. Conforme observado por UMEZU (2003), a reposição dos nutrientes e demais aplicações de insumos no solo representam uma das maiores parcelas do custo de produção, dentro da prática de agricultura convencional, e uma quantidade representativa dos insumos utilizados no meio agrícola apresenta-se

¹ Eng^o Agrícola, Mestrando em Engenharia Agrícola, Laboratório de Instrumentação e Controle - LIC/FEAGRI, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas - SP, Fone (0XX19) 3788.1052, andre.johann@ig.com.br

² Eng^o Eletricista, Mestrando em Engenharia Agrícola, LIC/FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP.

³ Eng^o Agrícola, Prof. Doutor, LIC/FEAGRI/UNICAMP, Campinas - SP.

⁴ Eng^o Eletricista, Prof. Adjunto Doutor, Universidade São Francisco - USF, Campinas - SP.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 31-8-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 30-3-2006

na forma líquida. FIXEN (1994) já comentava sobre o largo emprego de fertilizantes fluidos nos EUA e a demanda por sistemas de aplicação a taxas variáveis.

Diversas empresas fabricam dispositivos para a aplicação de insumos líquidos por meio de pulverização. Empresas como TeeJet, Jacto, Montana, K.O., AgChem, dentre outras, possuem linhas de produtos destinadas à pulverização desses insumos. Devido à característica da operação de pulverização, tais equipamentos operam a altas pressões e baixas vazões. Por outro lado, não se encontram equipamentos voltados especificamente para a aplicação de insumos líquidos a baixas pressões e em vazões mais elevadas, como é o caso dos fertilizantes e outros insumos líquidos depositados diretamente no solo.

A dosagem de insumos em solução ou suspensões, como é o caso dos fertilizantes líquidos, pode ser feita por meio de bombas ou válvulas dosadoras. Conforme observado em BOARETO et al. (1991), as bombas de pistões, de diafragma ou peristálticas possibilitam o controle do fluxo, controlando-se diretamente a rotação de seus eixos; no entanto, existem restrições quanto à durabilidade e custos. As bombas de diafragma e principalmente as peristálticas apresentam restrições quanto à vida útil dos elementos flexíveis que, com o tempo, alteram a vazão transportada por essas bombas, o que reduz a sua precisão em operações de dosagem. Outras bombas, como as de engrenagens, não chegaram a ser avaliadas para essas aplicações.

Outra opção para o controle do fluxo de insumos líquidos é o emprego de circuitos hidráulicos com válvulas dosadoras. MACYNTYRE (1997) define as válvulas destinadas a essa aplicação como sendo válvulas de regulagem. Nesse caso, a eficiência no controle do escoamento é obtida graças ao estrangulamento que aquelas provocam, enquadrando-se nessa classificação as válvulas de globo, de diafragma e de borboleta.

MACYNTYRE (1997) e THE BRITISH VALVE MANUFACTURERS' ASSOCIATION (1964) descrevem um modelo de válvula de globo denominado válvula de agulha (*niddle valve*). Trata-se de válvula de globo de sede simples, em que o obturador é guiado apenas na parte superior. O obturador apresenta forma afilada, razão pela qual recebeu a denominação de válvula de agulha, prestando-se esses modelos à regulagem fina do fluxo descarregado, trazendo como vantagem simplicidade mecânica e número reduzido de componentes.

Dessa forma, este trabalho teve o objetivo de conceber, projetar, construir e avaliar uma servoválvula de baixo custo, acionada eletronicamente, capaz de operar em sistemas de aplicação de insumos líquidos a taxas variáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Baseando-se nos trabalhos iniciais realizados por JOHANN & CAPPELLI (2003), projetou-se e construiu-se um primeiro protótipo da servoválvula, aproveitando-se a base de uma eletroválvula comercial, marca Asco, modelo 8262C090, confeccionada em latão, na qual foi adaptado um servomotor marca Futaba, modelo FP-5148, acionado por modulação por largura de pulso (PWM). Para tanto, foi necessário o desenvolvimento e a construção de um sistema mecânico de acoplamento da válvula ao servomotor.

Para a realização da avaliação da servoválvula, foi construída uma bancada similar à proposta por BOARETO et al. (1991). A bancada constitui-se de um reservatório de água alimentando uma bomba centrífuga, que proporciona pressão e vazão a uma linha hidráulica, na qual está ligada a servoválvula dosadora. O fluxo de água liberado por essa deixa o circuito depositando-se em um recipiente aberto de volume conhecido. A vazão excedente, não consumida pela mesma, retorna ao reservatório, passando antes por uma válvula de restrição que mantém constante a pressão a montante da linha, sendo o ajuste dessa válvula de restrição feito manualmente. Na Figura 1, apresenta-se o esquema da bancada experimental construída.

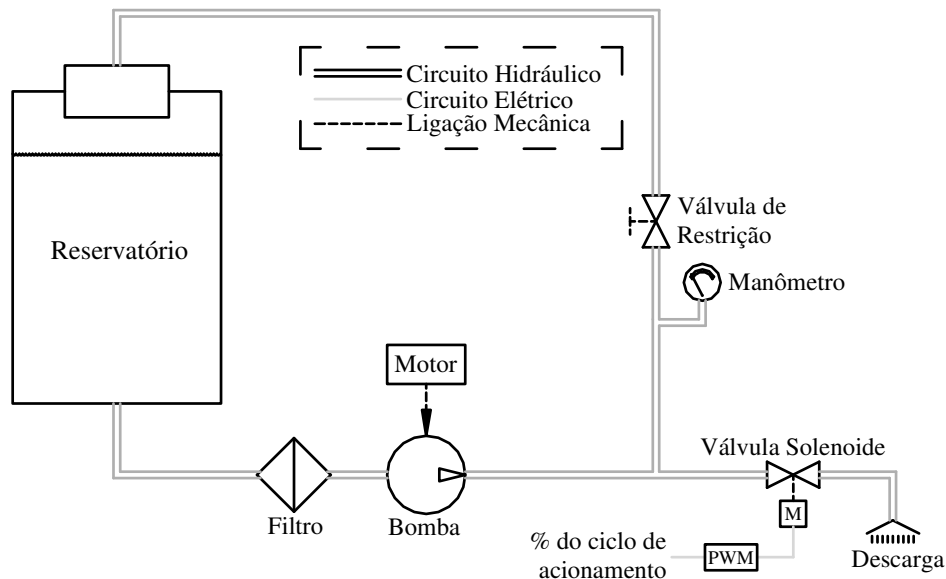


FIGURA 1. Esquema da bancada experimental.

A determinação da vazão foi feita indiretamente por meio da medida do tempo necessário para o enchimento do recipiente de volume conhecido. Depois de realizada a medida, o líquido contido nesse recipiente foi bombeado retornando ao reservatório principal da bancada experimental. Para tornar as leituras mais precisas e facilitar os ensaios, a contagem do tempo foi automatizada, utilizando-se de sensores capacitivos para o disparo e parada de um cronômetro.

Para a avaliação do primeiro protótipo, aplicaram-se os níveis de abertura e fechamento por meio de um gerador de funções arbitrárias marca Agilent, modelo 33220A, gerando um sinal PWM aplicado ao servomotor. O período do sinal foi fixado em 17 ms, e o tempo ativo (*duty-cycle*) variava de zero a 2 ms, obtendo-se resposta linear de movimento angular de zero a 180 graus.

A avaliação constituiu-se do levantamento das curvas de vazão em função da abertura (FIGURA 3), em três repetições, nas operações de abertura e de fechamento, à pressão de 100 kPa. O líquido utilizado nesses experimentos foi água à temperatura ambiente.

A avaliação do primeiro protótipo mostrou haver inflexão na curva de abertura da servoválvula, identificada como sendo devido à folga nas roscas dos fusos. Para a correção dessa característica indesejável, construiu-se um segundo protótipo, inserindo-se uma mola para a eliminação do efeito dessa folga.

A avaliação do segundo protótipo foi realizada em dois grupos de ensaios. No primeiro, foi mantida a pressão nominal a montante da servoválvula em 100 kPa. No segundo, a pressão nominal foi mantida em 50 kPa. Com esse procedimento, foi possível avaliar a repetitividade, a histerese e a não-linearidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Protótipos da servoválvula

Para a montagem da servoválvula, incorporou-se sobre a base da eletroválvula um corpo usinado de aço-carbono que acomoda um fuso e a agulha, sendo essa última feita em aço inoxidável. A vedação entre a agulha e o corpo da válvula é feita por intermédio de um anel de elastômero (O'ring) e por um anel de aço inoxidável. Desse modo, apenas as partes da válvula que entram em contato com o fluido necessitam ser construídas com material que resista à abrasão e à corrosão.

Foi desenvolvido um primeiro protótipo que foi aprimorado por meio da inclusão de uma mola pressionando a rosca do fuso, obtendo-se um segundo protótipo. Na Figura 2, tem-se uma vista em explosão com a denominação dos componentes, bem como a vista em corte referente ao segundo protótipo, ou seja, a versão final da servoválvula.

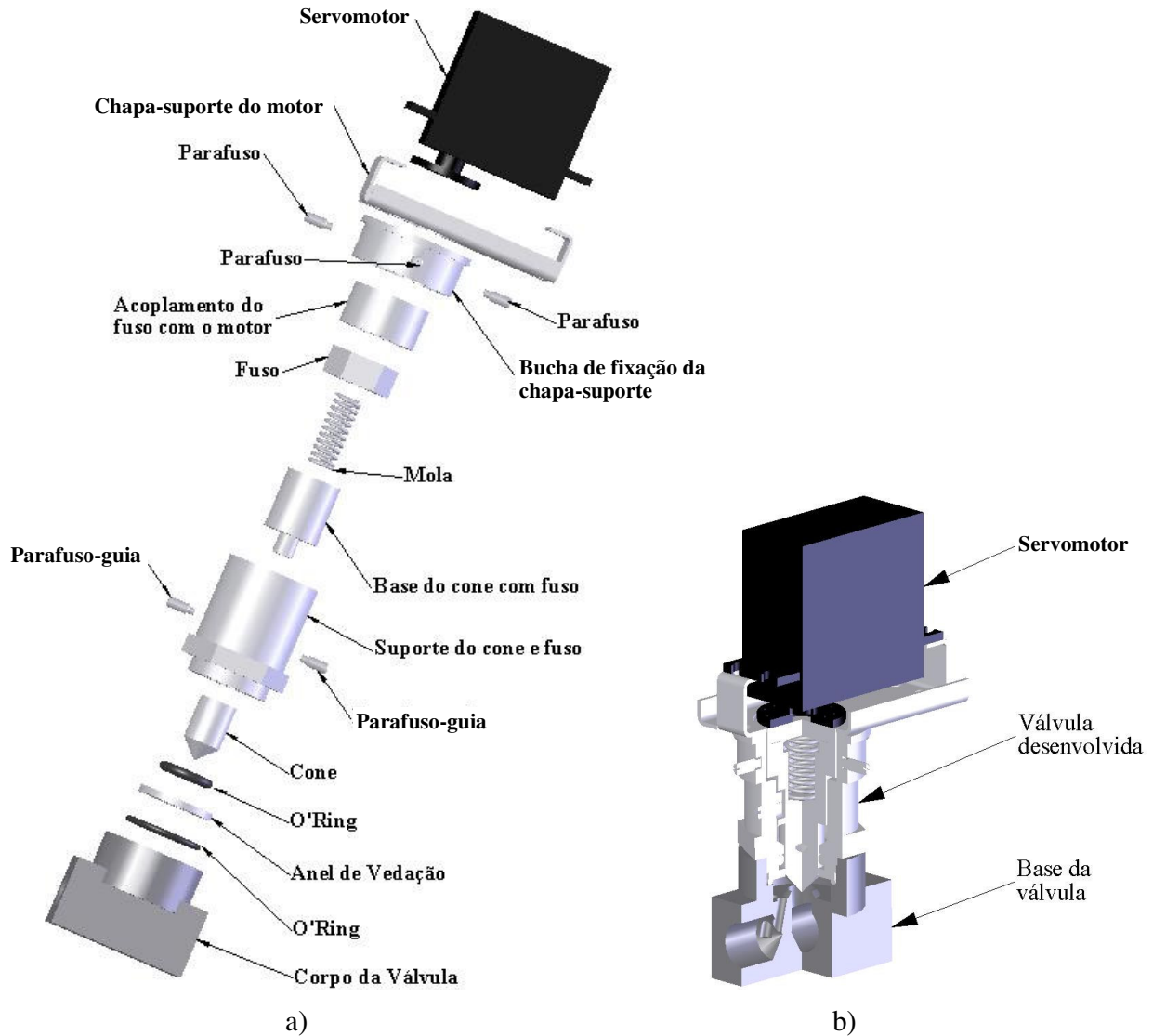


FIGURA 2. Versão final da servoválvula desenvolvida. a) Vista em explosão. b) Vista em corte.

O controle da vazão é feito por meio do deslocamento axial da agulha, denominada de cone, proporcionado pelo fuso quando submetido ao movimento giratório do servomotor. A lubrificação das roscas do fuso foi feita por meio de graxa de petróleo.

Para reduzir os problemas de entupimento, tanto o orifício no corpo da válvula quanto a extremidade da agulha apresentam formato cônico, o que forma apenas uma linha de contato entre os dois componentes quando a servoválvula está completamente fechada. No entanto, essa alternativa apresentou problemas no fechamento total da mesma, a qual ainda apresenta pequeno fluxo remanescente.

Avaliação do primeiro protótipo

Nos ensaios com o primeiro protótipo, obtiveram-se as curvas descritas na Figura 3.

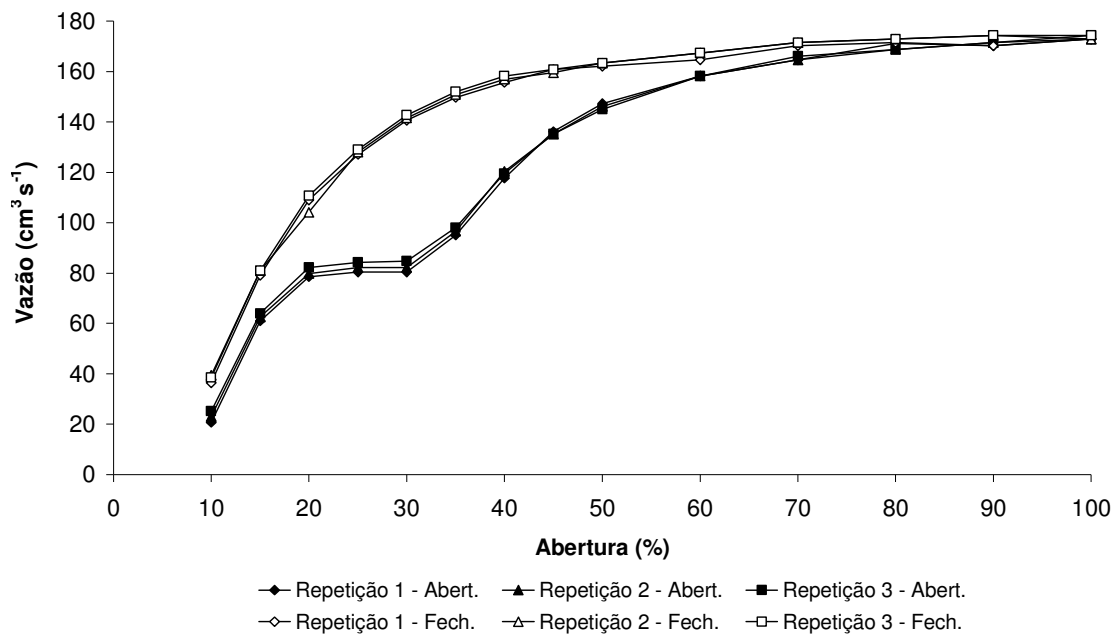


FIGURA 3. Resultados dos ensaios com o primeiro protótipo da servoválvula, na pressão de 100 kPa, em operação de abertura e fechamento.

Esse protótipo apresentou problemas de elevada não-linearidade nas operações de abertura, bem como inflexão na curva, o que inviabilizaria o seu emprego nesse tipo de operação. Além disso, puderam-se observar problemas de baixa repetitividade, o que também comprometia a sua precisão.

Avaliação do segundo protótipo

No primeiro grupo de ensaios com o segundo protótipo, obtiveram-se as curvas descritas na Figura 4, para as operações de abertura e fechamento da servoválvula, à pressão de 100 kPa.

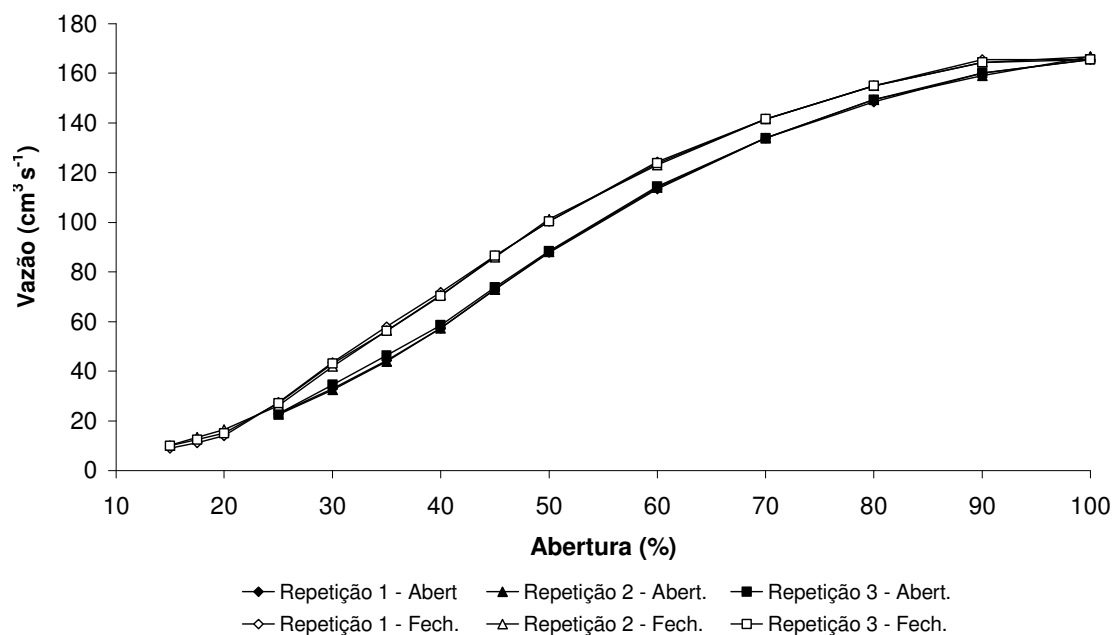


FIGURA 4. Resultados do primeiro grupo de ensaios do segundo protótipo de servoválvula, à pressão de 100 kPa, em operação de abertura e fechamento.

A curva de abertura só descreve valores de abertura a partir de 25% do ciclo de trabalho, valor pelo qual se passou a observar fluxo efetivo.

No segundo grupo de ensaios, obtiveram-se as curvas descritas na Figura 5, para as operações de abertura e fechamento, à pressão de 50 kPa.

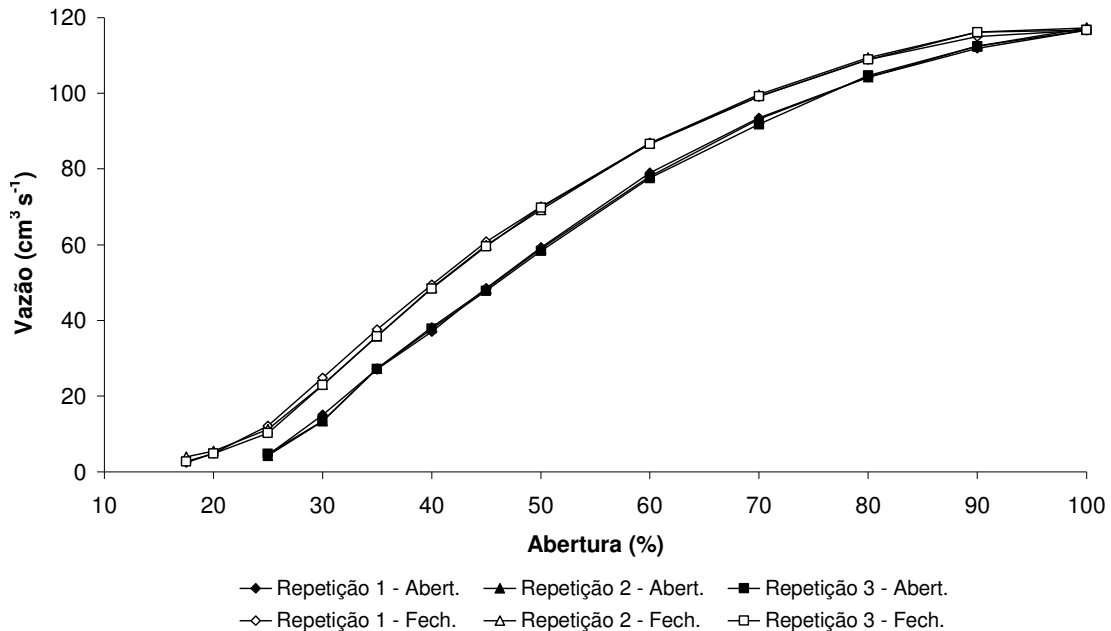


FIGURA 5. Resultados do segundo grupo de ensaios do segundo protótipo de servoválvula, à pressão de 50 kPa, em operação de abertura e fechamento.

Conforme pode ser observado, há a presença de inflexão na curva para valores abaixo de 25% do ciclo de trabalho, nas operações de fechamento, o que faz com que esses não sejam bem descritos por meio de função polinomial quadrática. Além disso, observa-se perda de repetitividade nesse intervalo, o que pode ser um problema, visto que esse erro representa razoável percentual da vazão liberada pela servoválvula a essa abertura. Por esse motivo, optou-se por descartar a sua utilização em aberturas inferiores a 25% de ciclo de trabalho.

No primeiro grupo de ensaios, a pior situação quanto à repetitividade ocorreu aos 40% do ciclo de trabalho das operações de fechamento, sendo de $2,7 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ a maior diferença de vazões entre um ensaio e outro, o que representa 1,6% da vazão máxima. Entre 50% e 60% do ciclo de trabalho, a servoválvula apresentou diferença de vazões médias de $11,0 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ entre as operações de abertura e fechamento, o que representa 6,4% da sua vazão máxima. Nas operações de abertura, entre 35% e 45% do ciclo de trabalho, nota-se variação na tendência da curva, apresentando pequena inflexão. Nas demais faixas, tanto na abertura quanto no fechamento, notou-se comportamento típico de uma função polinomial do segundo grau, apresentando $R^2 = 0,9997$, na operação abertura, e $R^2 = 0,9998$, na operação de fechamento.

No segundo grupo de ensaios, a pior situação quanto à repetitividade ocorreu aos 25% do ciclo de trabalho das operações de fechamento, sendo de $1,9 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ a maior diferença de vazões entre um ensaio e outro, o que representa 1,6% da vazão máxima. Entre 40% e 50% do ciclo de trabalho, a servoválvula apresentou diferença de vazões médias de $11,9 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ entre as operações de abertura e fechamento, o que representa 10,1% da sua vazão máxima. Nas operações de abertura, entre 35% e 45% do ciclo de trabalho, nota-se variação muito pequena na tendência da curva, resultando em leve inflexão. Em todo o intervalo de trabalho, a servoválvula mostrou comportamento típico de uma

função polinomial do segundo grau, apresentando $R^2 = 0,9991$, na operação abertura, e $R^2 = 0,9998$, na operação de fechamento.

Utilizando-se dos valores médios das curvas correspondentes às três repetições, dentro de cada ensaio, conforme metodologia proposta por NETO et al. (2002), obtiveram-se as funções polinomiais com os seus respectivos coeficientes de ajuste R^2 . Na Figura 6, apresentam-se as curvas dos valores médios dos ensaios com as suas respectivas funções polinomiais.

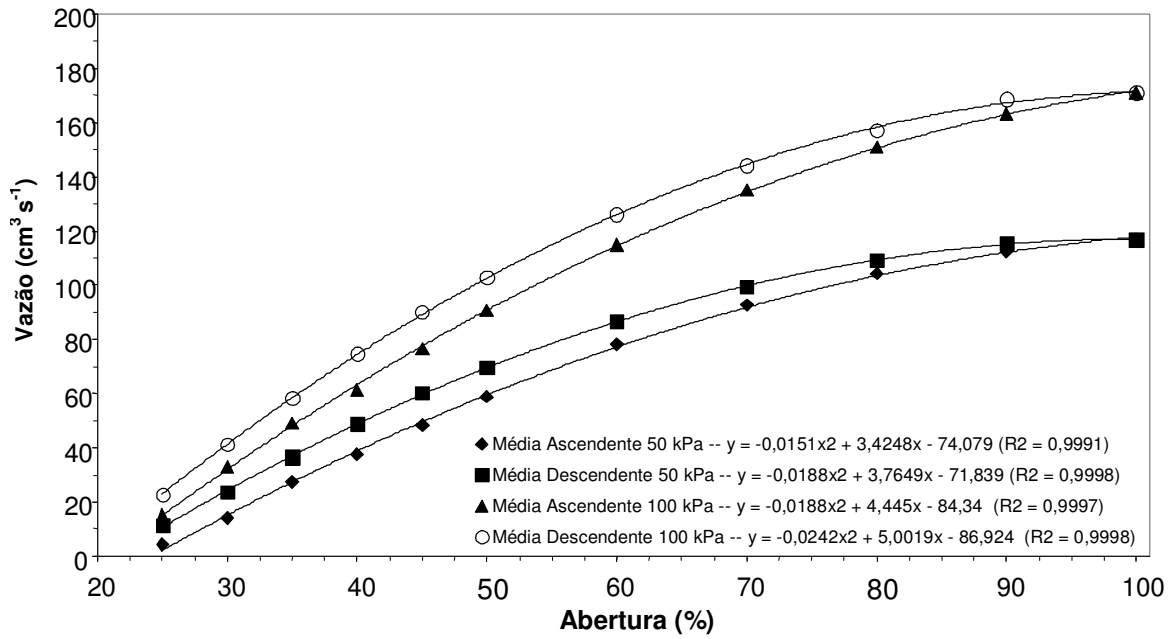


FIGURA 6. Dados médios com as respectivas funções polinomiais e curvas de ajuste quadráticas.

A servoválvula desenvolvida apresentou comportamento satisfatório nos incrementos de abertura e fechamento, com boa repetitividade, comportamento quadrático e a presença de histerese.

O comportamento quadrático não representa problemas para a sua utilização, visto que tal comportamento pode ser compensado por *software*.

O problema da histerese pode ser resolvido efetuando-se o ajuste da vazão apenas na abertura ou apenas no fechamento. Tal operação pode ser facilmente implementada por *software*, ou mesmo por microcontrolador incorporado ao circuito de acionamento da servoválvula.

O fluxo remanescente observado, quando a servoválvula se encontra completamente fechada não constitui, necessariamente, um problema, visto que, durante a operação, ela atende à função de dosar insumos líquidos. No caso da necessidade de uma interrupção total do fluxo, pode-se adicionar uma válvula do tipo aberta/fechada instalada a montante da servoválvula.

A servoválvula apresenta limitação no seu uso em aberturas abaixo de 25% do ciclo de trabalho, o que restringe a sua vazão mínima. No entanto, o seu emprego ainda é viável se adotada em dosagem de componentes com menor concentração.

É possível melhorar a resposta em pequenas vazões, por meio do uso de agulha com cone de perfil parabólico ou outro polinômio de ordem superior, porém essa solução certamente dificultará a sua fabricação, conseqüentemente, elevando o seu custo.

Custo de fabricação

O custo de fabricação do protótipo foi levantado na região de Ribeirão Preto - SP, no mês de maio de 2004. Os dados relativos a esse levantamento estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Levantamento de custo de construção da servoválvula proposta.

Descrição	Mão-de-obra	Matéria-Prima	Material	Produto
				Manufaturado
Custo (R\$)				
Servomotor	-	-	-	56,00
Chapa de suporte do motor	5,00	0,46	Inox	
Bucha de fixação da chapa-suporte	3,00	0,10	aço 1045	
Acoplamento do fuso com o motor	2,00	0,08	aço 1045	
Fuso	3,00	0,04	aço 1045	
Base do cone com o fuso	5,00	0,04	aço 1045	
Mola	-	-	Aço mola	0,10
Cone	2,00	0,19	Inox	
Suporte do cone e fuso	3,00	0,31	aço 1045	
Anel de vedação	-	-	Inox	0,10
Corpo da válvula	6,00	3,00	Inox	
Parafusos	-	-	Aço oxidado	0,20
O' rings	-	-	Elastômero	1,00
Montagem	5,00	-	-	-
Custos Parciais (R\$)	34,00	4,22		57,40
Custo Total (R\$)				95,62

O custo de fabricação do protótipo foi de aproximadamente R\$ 96,00 (US\$ 40,00 convertidos ao câmbio de R\$ 2,40 por dólar americano) por unidade, sendo esse valor passível de redução em produção em larga escala.

Conforme relatado na introdução deste trabalho, não foram encontrados equipamentos voltados especificamente para a aplicação de insumos líquidos a baixas pressões e em vazões elevadas. A válvula comercial que mais se assemelhou à desenvolvida foi a *DirectoValve*, modelo 344BR-23-01C, fabricada pela TeeJet. Trata-se de uma válvula destinada ao controle da pressão em sistemas de pulverização, utilizando uma esfera de polipropileno acionada por motor elétrico de 12 Vdc, com conexões de 19,05 mm de diâmetro, apresentando vazão máxima de $2.016 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ à pressão nominal de 2.068 kPa. No entanto, dadas as suas características, não se adapta ao sistema de aplicação de fertilizantes líquidos proposto. Essa válvula comercial apresenta preço de tabela aproximado de US\$ 271,00.

Todos os componentes empregados na fabricação do protótipo são de baixo custo e seu processo de fabricação é relativamente simples, preservando, assim, a proposta inicial deste trabalho.

CONCLUSÕES

A configuração da servoválvula desenvolvida apresentou-se adequada quanto ao comportamento de vazão na faixa proposta e quanto ao baixo custo de fabricação.

REFERÊNCIAS

BOARETO, A.E.; CRUZ, A.P.; LUZ, P.H.C. *Adubo líquido: produção e uso no Brasil*. São Paulo: Fundação Cargill, 1991. 100 p.

FIXEN, P.E. Fluid fertilizers in an evolving agriculture. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES FLUÍDOS, 1993, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: Potafos, 1994. p.1-30.

JOHANN, A.L.; CAPPELLI, N.L. Seleção e modelagem matemática de uma válvula dosadora a ser empregada na aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis. In: WOKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO: O WORKSHOP DAS ÁREAS DE CONCENTRAÇÃO, 4., 2003, Campinas. *Anais...* Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, 2003. 1 CD-ROM.

MACINTYRE, A.J. *Bombas e instalações de bombeamento*. 2.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1997. 635 p.

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria*. 2.ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 250 p.

THE BRITISH VALVE MANUFACTURERS' ASSOCIATION. *Valves for the control of fluids*. Manchester: C. Nicholls & Company, 1964. 344 p.

UMEZU, C.K. *Sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis*. 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.