

ARTIGO TÉCNICO

DESEMPENHO DE UM REGULADOR AUTOMÁTICO DE VAZÃO PARA CANAIS DE IRRIGAÇÃO^{1,2}

LUÍS G. H. DO AMARAL³, MÁRCIO M. RAMOS⁴, DEMETRIUS D. DA SILVA⁵,
PAULO R. CECON⁶, LETÍCIA C. DA S. R. FREITAS⁷

RESUMO: As estruturas de controle comumente utilizadas nas tomadas de água dos canais de irrigação não permitem a distribuição da quantidade correta de água, favorecendo o desperdício e, conseqüentemente, reduzindo a eficiência no uso da água. O objetivo deste trabalho foi determinar o desempenho de um regulador automático de vazão no controle da vazão derivada. Para tanto, um exemplar do equipamento, construído em fibra de vidro, foi instalado na lateral de um canal de concreto do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG. O equipamento foi avaliado em toda a sua faixa de operação, sendo que, em cada regulagem prefixada, determinou-se a vazão derivada com o nível da água a montante variando de 0,30 a 0,45 m. A variação média na vazão do regulador, considerando toda a sua faixa de operação, foi de $\pm 2,3\%$ em relação às vazões médias fornecidas pelo equipamento em cada regulagem. A amplitude de variação na vazão fornecida foi pequena em relação aos equipamentos usualmente empregados no controle de vazão, em canais de irrigação, demonstrando que o regulador automático de vazão é um equipamento apropriado para a distribuição de água em redes de canais.

PALAVRAS-CHAVE: automação hidráulica, comportas hidráulicas, condutos livres.

PERFORMANCE OF AN AUTOMATIC DISCHARGE REGULATOR FOR IRRIGATION CHANNELS

ABSTRACT: The control structures commonly used in irrigation channels water intakes are inefficient in delivering the correct water volume to crops, collaborating to water waste and, hence, reducing the water use efficiency. The objective of this work was to determine the performance of an automatic discharge regulator in the control of the supplied discharge. The regulator was made of fiberglass and its evaluation was accomplished in a concrete channel belonging to the Hydraulic Laboratory of the Federal University of Viçosa, in Viçosa, state of Minas Gerais, Brazil. The evaluation was performed for all equipment discharge regulation options. In each regulation, the supplied discharge was determined for the upstream water level changing from 0.30 to 0.45 m. The regulator discharge mean variation, with regard to all regulation options, was of $\pm 2.3\%$ of the mean discharge supplied by the equipment in each regulation option. The discharge variation of the developed equipment was smaller than the discharge variation of the structures commonly used to control the discharge in channels, showing that the automatic flow regulator is a good alternative to regulate discharges in open channels.

KEYWORDS: hydraulic automation, water control gates, open channels.

¹ Extraído da tese de doutorado do primeiro autor.

² Projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

³ Eng^o Mecânico, Prof. Adjunto, Instituto de Ciências Ambientais e Desenvolvimento Sustentável, UFBA, Barreiras - BA, Fone: (0XX77) 3614.3500, luisgha@ufba.br.

⁴ Eng^o Agrônomo, Prof. Titular, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG.

⁵ Eng^o Agrônomo, Prof. Associado, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG.

⁶ Eng^o Agrônomo, Prof. Associado, Departamento de Informática, UFV, Viçosa - MG.

⁷ Acadêmica de Engenharia Agrícola e Ambiental, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa - MG, Bolsista do CNPq.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 23-9-2010

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 11-4-2010

INTRODUÇÃO

A irrigação tem grande importância no incremento da produção agrícola, sendo fundamental não só para garantir a provisão de alimentos, como também para suprir a crescente demanda por matérias-primas energéticas renováveis. Entretanto, a prática da agricultura irrigada exige a retirada de grandes volumes de água doce dos mananciais, o que compromete a disponibilidade de água para outras finalidades, sendo necessário o desenvolvimento de alternativas mais eficientes para a aplicação e o uso da água de irrigação (QUEIROZ et al., 2008). Estas alternativas são particularmente importantes nos locais onde a condução da água de irrigação é realizada em canais, onde geralmente as vazões escoadas são grandes e um manejo ineficiente pode acarretar perdas de água consideráveis (OOI & WEYER, 2008).

Uma das maiores dificuldades relacionadas à condução da água em canais consiste na distribuição da quantidade correta de água aos lotes irrigados. Em razão da multiplicidade de usuários que entram ou saem do sistema a cada instante e das conseqüentes variações no nível da água nos canais, as vazões derivadas alteram-se constantemente. Geralmente, as tomadas de água são dotadas de comportas de acionamento manual, o que torna a operação dos canais cara e trabalhosa. Ainda assim, as vazões distribuídas variam consideravelmente, em razão da alta sensibilidade das comportas às variações no nível da água a montante.

Para reduzir essa sensibilidade e facilitar o manejo da água, diversos pesquisadores e inventores vêm desenvolvendo e aprimorando sistemas automáticos para operação de redes de canais. Em redes automatizadas, normalmente são utilizados reguladores eletromecânicos cujas vazões fornecidas são ajustadas automaticamente em função dos sinais emitidos por sensores de nível de água (LITRICO et al., 2005b). Além de facilitar o manejo da água em redes de canais, o uso destes reguladores pode reduzir significativamente as perdas de água. MAREELS et al. (2005), utilizando reguladores transversais automáticos em substituição a comportas de acionamento manual, aumentaram a eficiência na distribuição de água em uma rede de canais na Austrália, de 70% para 90%.

Uma das desvantagens dos reguladores eletromecânicos é a necessidade de uma fonte de energia externa para o seu acionamento, o que pode influir consideravelmente nos custos de aquisição e manutenção. Uma alternativa interessante é o emprego de estruturas automáticas acionadas pela energia hidráulica disponível no canal, como as comportas hidromecânicas AMIL e AVIO (ALSTOM, 2005), utilizadas no controle de nível a jusante, ou as comportas basculantes automáticas, utilizadas no controle de nível a montante (BELAUD et al., 2008; LITRICO et al., 2005a), que operam, basicamente, pela ação de um flutuador e um contrapeso.

No Brasil, ANDRADE et al. (2007) desenvolveram e avaliaram três protótipos de reguladores automáticos de vazão para tomadas de água acionados por flutuadores. O protótipo mais promissor permitiu a manutenção de uma vazão média de $11,4 \text{ L s}^{-1}$, com variação média de $\pm 2,3\%$, para uma variação média no nível a montante de 0,2 m. A utilização desse tipo de equipamento nas tomadas de água dos perímetros irrigados brasileiros facilitaria o manejo da água nos canais, reduzindo o desperdício e, conseqüentemente, aumentando a eficiência de irrigação. Contudo, além da perda de carga relativamente alta (cerca de 0,6 m) proporcionada pelo protótipo desenvolvido por ANDRADE et al. (2007), o mesmo não permite a alteração da vazão em função da necessidade do usuário.

Recentemente, AMARAL & RIGHES (2005) apresentaram o protótipo de um regulador automático de vazão de baixo custo para canais de irrigação, capaz de minimizar o efeito das variações no nível da água a montante sobre a vazão escoada. O equipamento, acionado pela energia hidráulica disponível no próprio canal, foi aprimorado por AMARAL et al. (2009), que padronizaram suas dimensões e ampliaram a faixa de vazões atendidas, tornando-o apto a fornecer vazões entre $3,3$ e $30,7 \text{ L s}^{-1}$. No presente trabalho, objetivou-se determinar o desempenho do regulador automático de vazão aprimorado no controle da vazão fornecida frente a variações no nível da água a montante, abrangendo toda a sua faixa de operação.

MATERIAL E MÉTODOS

Características do regulador automático de vazão avaliado

O regulador automático de vazão utilizado no estudo foi desenvolvido com base no princípio de funcionamento do *Autoregulator* (HERNANDEZ, 1969), nas características construtivas do regulador automático de vazão apresentado por AMARAL & RIGHES (2005) e nos aprimoramentos realizados por AMARAL et al. (2009).

O equipamento avaliado, construído com fibra de vidro como material básico, é composto de um tubo deslizante (Figura 1) dotado de oito orifícios retangulares de 0,04 m de altura e 0,08 m de largura para escoamento da água. Com liberdade de movimento na direção vertical, esse tubo desliza dentro de um tubo-guia e está unido a um flutuador (Figura 2a) que possibilita o ajuste de sua posição vertical conforme o nível da água no canal principal.

O flutuador é dotado de quatro suportes de alumínio (Figura 2b), soldados em sua parede vertical interna, que permitem sua fixação ao tubo deslizante. O conjunto está posicionado dentro de uma caixa de captação (Figura 3) que possui dois compartimentos: o superior, onde o nível da água corresponde ao do canal principal, e o inferior, onde o nível da água corresponde ao do canal de derivação.

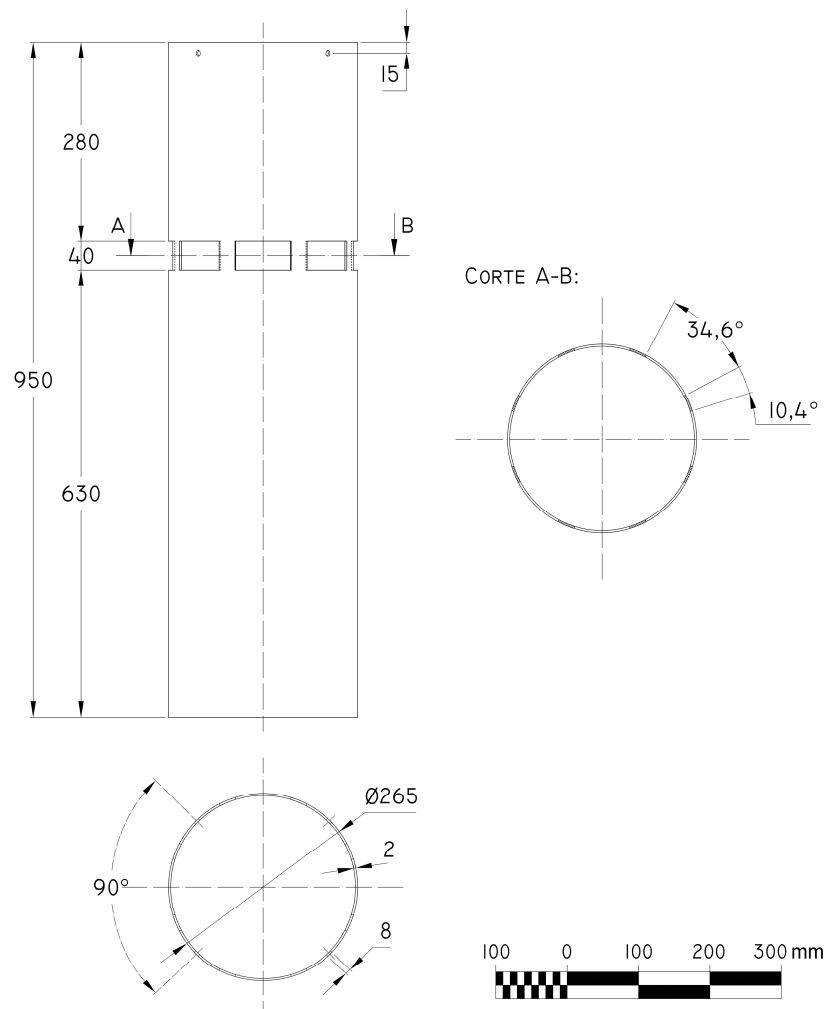


FIGURA 1. Tubo deslizante. **Sliding tube.**

No equipamento, o controle da vazão fornecida é realizado pela ação do flutuador, que acompanha as variações no nível da água a montante dos orifícios. Como o flutuador está unido ao tubo deslizante, este último movimenta-se verticalmente de acordo com o nível da água, fazendo

com que a carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios (h_C) e, conseqüentemente, a vazão fornecida (Q_{reg}) seja aproximadamente constante (Figura 4).

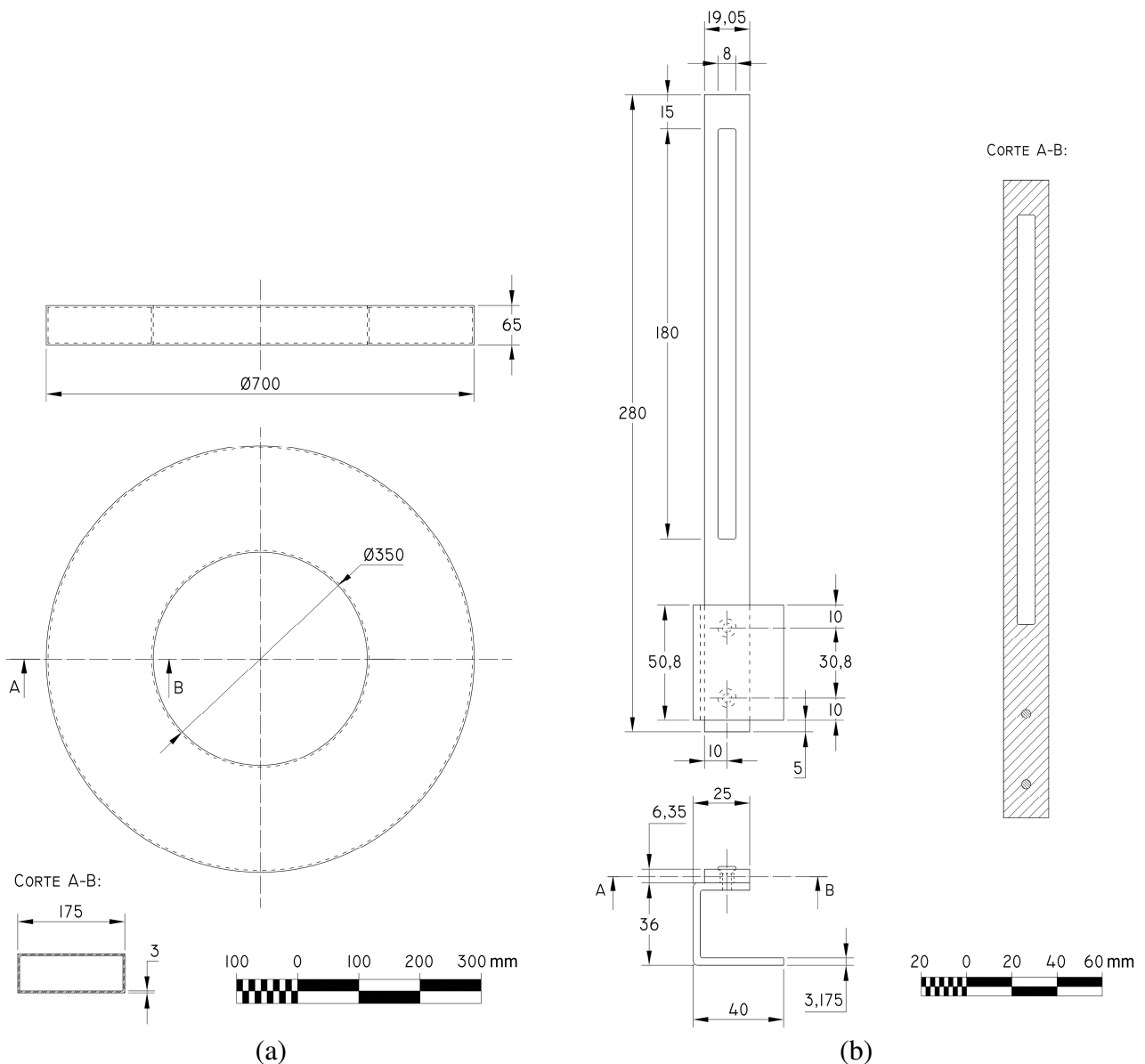


FIGURA 2. Flutuador (a) e suporte do flutuador (b). **Float (a) and float support (b).**

A regulação da vazão fornecida pelo equipamento pode ser realizada tanto pela modificação da área total de escoamento (A) quanto pela alteração de h_C . A modificação de A é realizada com a colocação de tampões (Figura 5) sobre os orifícios, os quais permitem a obstrução parcial ou total dos mesmos e, com isso, a obtenção de valores de A variando de $0,0032 \text{ m}^2$ a $0,0254 \text{ m}^2$. A alteração de h_C possibilita o ajuste fino da vazão em cada combinação de tampões, e é realizada pela alteração da posição vertical do flutuador em relação ao tubo deslizante.

Na Tabela 1, são apresentadas as faixas de vazões abrangidas pelo equipamento em cada combinação entre tampões. As curvas de calibração do equipamento para as diferentes combinações de tampões, contendo a vazão escoada em função de h_C , são apresentadas por AMARAL et al. (2009).

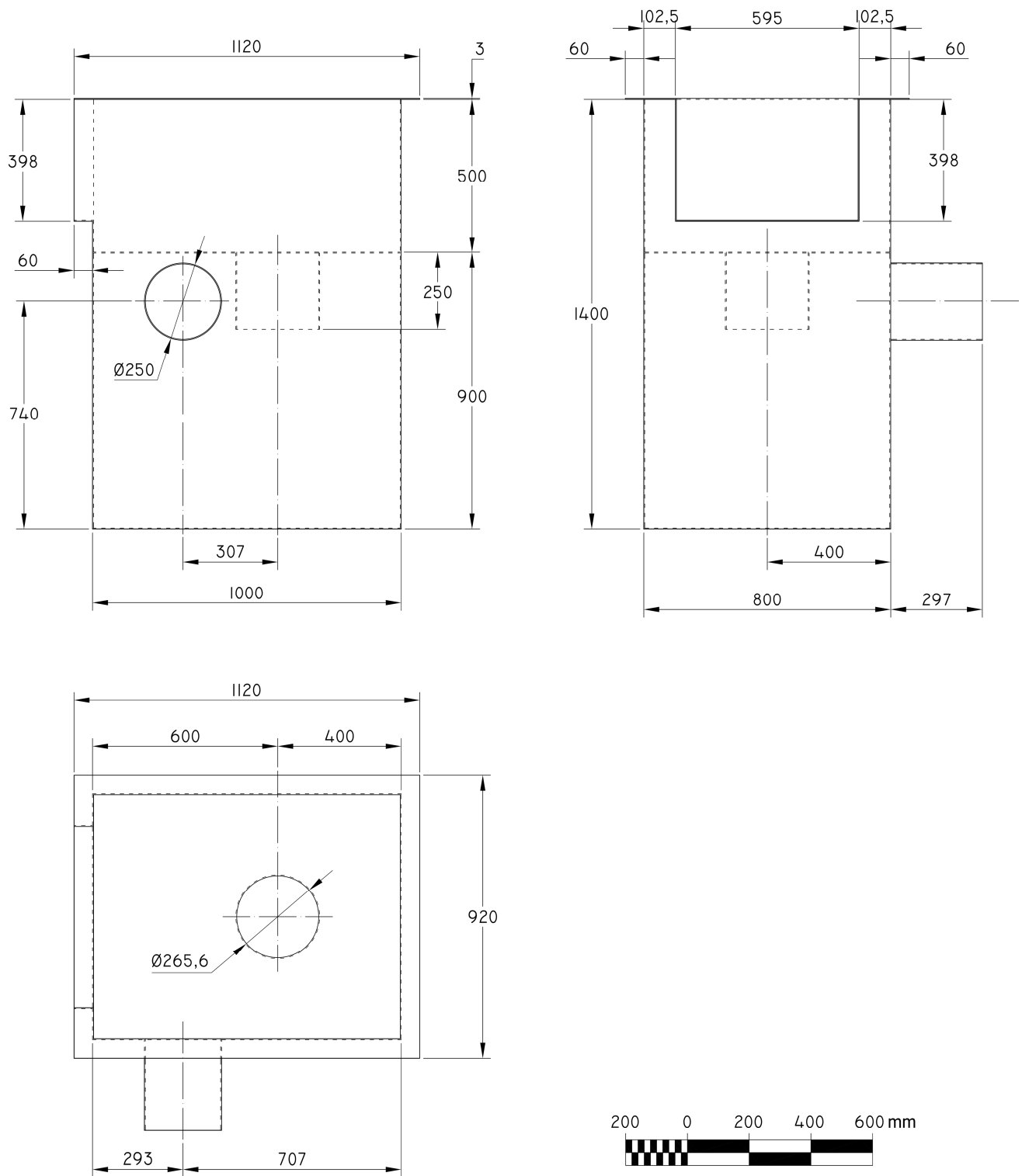


FIGURA 3. Caixa de captação. Collect box.

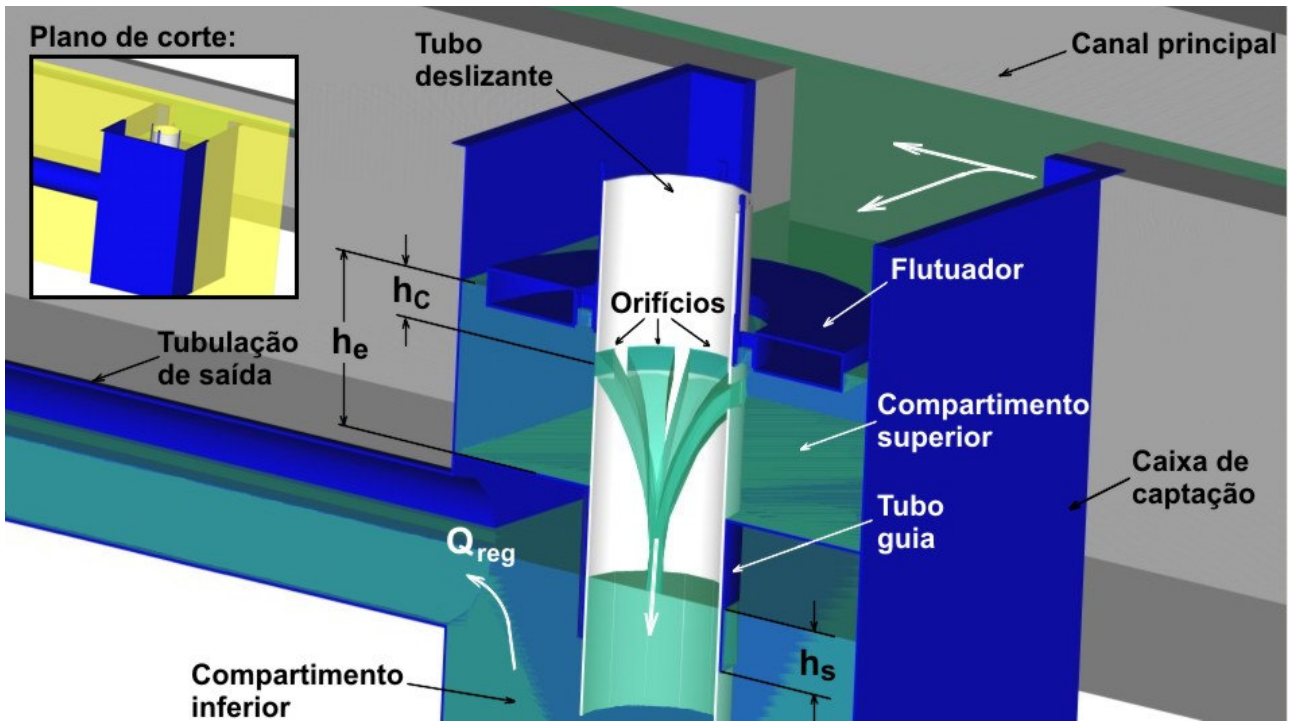


FIGURA 4. Vista em corte do regulador automático de vazão. **Sectional view of the automatic discharge regulator.**

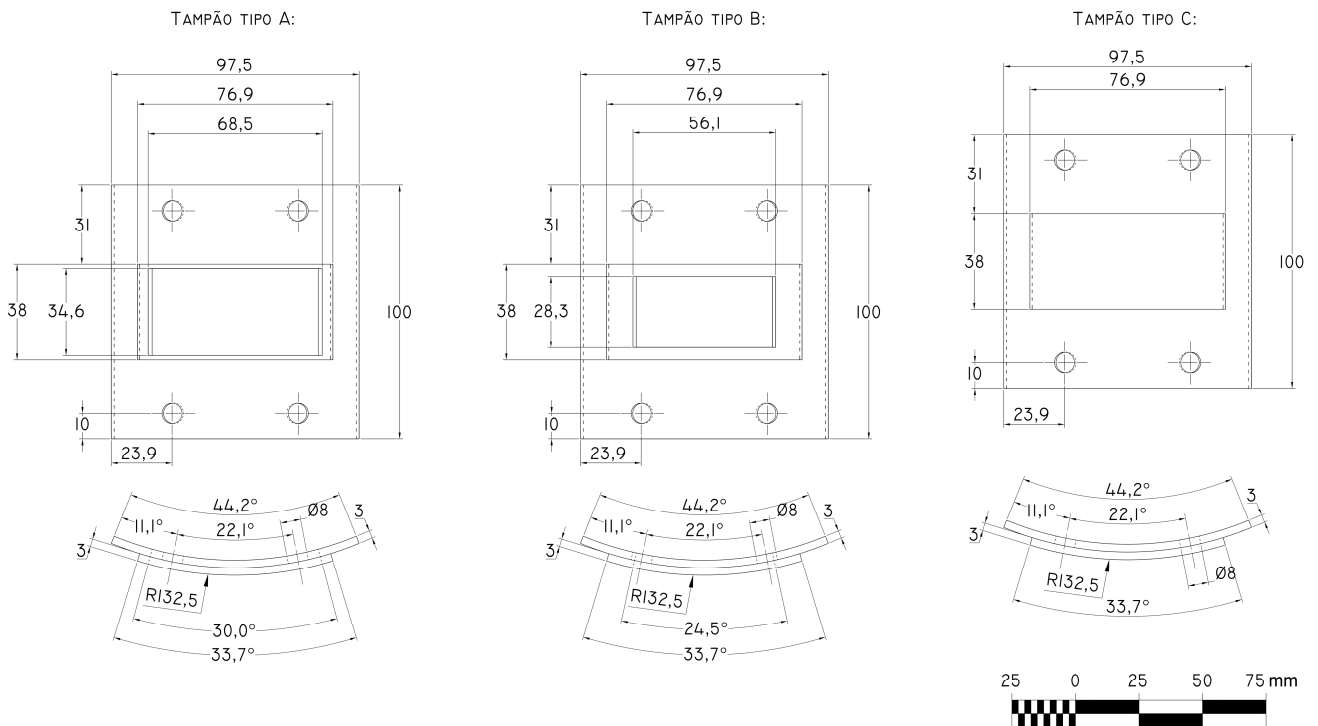


FIGURA 5. Tampões tipo A, B e C. **Type A, B and C plugs.**

TABELA 1. Área total de escoamento e vazões mínima e máxima fornecidas pelo regulador automático de vazão nas diferentes combinações entre tampões. **Total discharge area and minimal and maximum discharge supplied by the automatic discharge regulator for the different plug combinations.**

Combinação	Área total* - A (m ²)	Vazão mínima (m ³ s ⁻¹)	Vazão máxima (m ³ s ⁻¹)
1	0,0032	0,003271	0,004439
2	0,0047	0,004859	0,006602
3	0,0064	0,005875	0,008020
4	0,0079	0,007634	0,010409
5	0,0096	0,008796	0,011916
6	0,0127	0,011388	0,015403
7	0,0159	0,014851	0,020192
8	0,0206	0,018386	0,025208
9	0,0254	0,021622	0,030693

* Soma das áreas dos orifícios totalmente abertos e/ou parcialmente abertos. Fonte: AMARAL et al. (2009).

Determinação da variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão

O regulador automático de vazão foi instalado na lateral de um canal de concreto do Laboratório de Hidráulica da Universidade Federal de Viçosa, conforme o esquema da Figura 6.

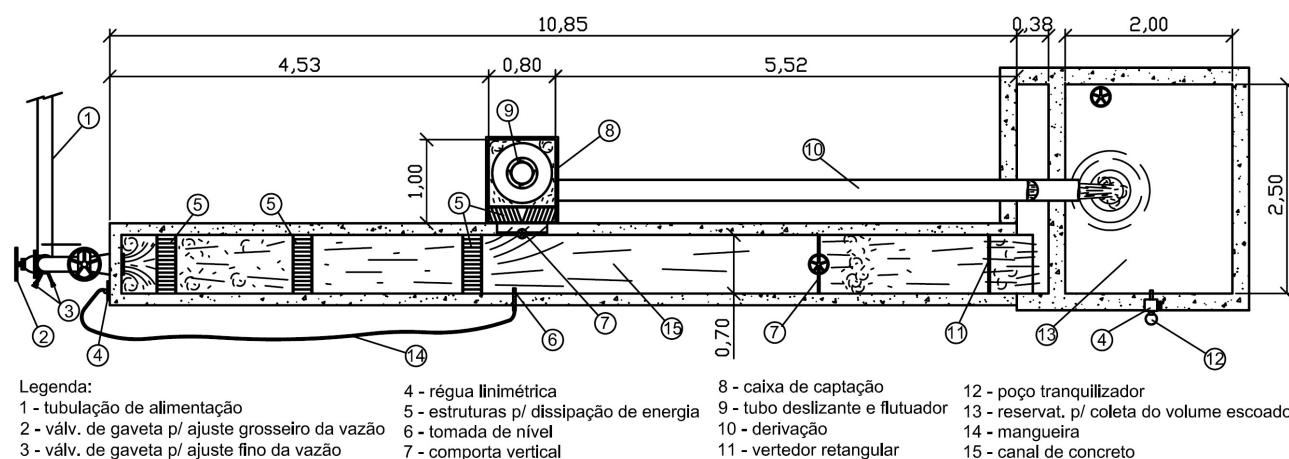


FIGURA 6. Esquema de instalação do regulador automático de vazão em laboratório (vista de topo). **Installation layout of the automatic discharge regulator (top view).**

A variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão foi determinada para as nove combinações entre tampões apresentadas na Tabela 1. Em cada combinação, foi determinada a variação na vazão para as cargas hidráulicas de 0,100; 0,125; 0,150; 0,175 e 0,200 m sobre o centro de gravidade dos orifícios, em três repetições. Estas cargas hidráulicas foram denominadas de cargas hidráulicas nominais (h_{NOM}) por serem os valores iniciais de h_C , uma vez que h_C é um valor instantâneo que pode sofrer variações durante o funcionamento do equipamento.

Cada repetição consistiu em oito determinações de Q_{reg} , sendo quatro com o nível da água no canal principal em ascensão e quatro com o nível em descensão. Q_{reg} foi determinada nas profundidades de 0,30; 0,35; 0,40 e 0,45 m, tanto na ascensão quanto na descensão, utilizando-se do método direto. O volume escoado pelo equipamento foi determinado em um reservatório de 5 m² de área superficial, dotado de uma régua linimétrica com resolução de 0,1 mm, cada vez que o nível da água atingia as profundidades preestabelecidas.

Para alterar o nível da água no canal principal, a vazão em sua entrada foi regulada com três válvulas de gaveta de diâmetros diferentes, uma para ajuste grosseiro e duas para ajuste fino da

vazão. Quando o nível atingia o valor preestabelecido, a abertura das válvulas era ajustada de forma a mantê-lo constante até o final da coleta. O monitoramento do nível da água no canal principal foi realizado com uma régua linimétrica com resolução de 1 mm. Uma comporta vertical situada a jusante do regulador permitia a manutenção de escoamento subcrítico no trecho de canal onde o equipamento foi instalado.

A variação relativa na vazão fornecida pelo regulador (ΔQ_{reg}), em cada repetição, foi calculada pela seguinte equação:

$$\Delta Q_{reg} = 100 \frac{(Q_{max} - Q_{min})}{Q_{med}} \quad (1)$$

em que,

ΔQ_{reg} - variação relativa na vazão fornecida pelo regulador em uma dada repetição, %;

Q_{max} - vazão máxima observada na repetição, $m^3 s^{-1}$;

Q_{min} - vazão mínima observada na repetição, $m^3 s^{-1}$, e

Q_{med} - vazão média fornecida pelo regulador na repetição, $m^3 s^{-1}$.

As paredes dos tubos guia e deslizante foram lubrificadas com graxa líquida de alta resistência à água, com o intuito de reduzir o atrito entre os tubos guia e deslizante e, conseqüentemente, de facilitar o deslizamento deste último.

Determinação da variação na carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios

Apesar de o equipamento ser regulado para operar com valores de h_{NOM} previamente definidos, h_C foi determinada durante cada coleta de vazão, com o intuito de verificar a capacidade de ajuste do equipamento frente às variações no nível da água a montante. Assim, para cada valor de Q_{reg} obtido durante o experimento, determinou-se o valor de h_C correspondente, utilizando-se de uma régua com resolução de 1 mm na parede do tubo deslizante. A variação de h_C em cada repetição foi obtida aplicando-se a seguinte equação:

$$\Delta h_C = h_{C_{max}} - h_{C_{min}} \quad (2)$$

em que,

Δh_C - variação na carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios do regulador em uma dada repetição, m;

$h_{C_{max}}$ - carga hidráulica máxima observada na repetição, m, e

$h_{C_{min}}$ - carga hidráulica mínima observada na repetição, m.

Quantificação do vazamento de água na folga entre os tubos guia e deslizante

Como uma parcela da vazão fornecida pelo regulador é oriunda do vazamento de água na folga entre os tubos guia e deslizante, realizou-se um experimento à parte para quantificar esse vazamento. Neste experimento, todos os orifícios do regulador foram vedados para que a vazão fornecida fosse unicamente aquela oriunda da folga entre os tubos. A vazão na folga entre os tubos (Q_F) foi determinada para diferentes valores de diferença de carga entre a entrada e a saída da folga (Δh) que, por sua vez, foram obtidos pela regulagem das profundidades da água no canal principal e no compartimento inferior da caixa de captação. O valor de Δh foi calculado por:

$$\Delta h = h_e - h_s \quad (3)$$

em que,

Δh - diferença de carga entre a entrada e a saída da folga, m;

h_e - carga hidráulica na entrada da folga, m, e

h_s - carga hidráulica na saída da folga, m.

A determinação de Q_F foi realizada para h_e , variando de 0,30 m a 0,45 m, e h_s variando de 0 a 0,25 m, ambos com intervalos de 0,05 m, abrangendo toda a faixa de valores possíveis de serem obtidos para as condições em que o regulador foi projetado. Q_F foi determinada para todas as combinações entre h_e e h_s , em três repetições, utilizando-se do método das pesagens. O volume escoado foi coletado e transferido para uma balança com resolução de 0,1 g, e a conversão da massa em volume foi realizada considerando-se a massa específica da água $\rho = 998 \text{ kg m}^{-3}$, uma vez que a temperatura da água durante os ensaios variou entre 20 °C e 21 °C.

Após a coleta dos dados, procedeu-se à análise de regressão de Q_F em função de Δh . O modelo foi escolhido com base no coeficiente de determinação ajustado aos graus de liberdade e na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se do teste “t”, a 1% de probabilidade de erro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias de ΔQ_{reg} e de Δh_C obtidas no experimento são apresentadas na Figura 7. A maior variação na vazão foi de 8,51% ($\pm 4,25\%$), obtida na Combinação 9, com $h_{NOM} = 0,20$ m, enquanto a menor variação, de 1,96% ($\pm 0,98\%$), foi obtida na Combinação 1, com $h_{NOM} = 0,175$ m. A variação na carga hidráulica foi, em média, de 11,4 mm, atingindo 19,6 mm para a Combinação 9, com $h_{NOM} = 0,20$ m.

Pela Figura 7, percebe-se a tendência de aumento em ΔQ_{reg} com o aumento em Δh_C , evidenciando que a variação na vazão fornecida pelo equipamento deveu-se, em grande parte, à variação na carga hidráulica sobre os orifícios do regulador, apesar de este ter sido projetado para compensar as variações no nível da água a montante.

Em geral, Δh_C foi maior para as cargas nominais de 0,10 m e 0,20 m, assumindo valores menores nas vazões intermediárias. Os valores de ΔQ_{reg} acompanharam essa mesma tendência; entretanto, houve aumento mais acentuado de ΔQ_{reg} para as menores cargas nominais. Como, de acordo com a equação para o cálculo da vazão em orifícios (NETTO et al., 1998), a vazão é função da carga hidráulica elevada à potência 0,5, a mesma variação na carga provoca maior variação de vazão quando os valores da carga são menores.

A variação na carga hidráulica sobre os orifícios do regulador automático de vazão deveu-se ao atrito estático entre as paredes dos tubos guia e deslizante, que não era vencido quando a variação no empuxo sobre o flutuador era pequena.

As dificuldades encontradas na fabricação do modelo e do molde dos tubos não permitiram que sua seção transversal fosse perfeitamente circular, assumindo uma forma levemente elipsoide. Esse efeito foi mais acentuado nas duas extremidades do tubo deslizante, mas também ocorreu, em menor grau, no tubo-guia. Apesar de ter sido pequena, essa distorção influenciou no deslizamento entre os tubos, ocasionando uma leve pressão de um tubo sobre a parede do outro, aumentando o atrito entre as superfícies. Na prática, isso fez com que h_C fosse maior do que h_{NOM} quando o nível da água estava em ascensão, e menor do que h_{NOM} quando o nível da água estava em descensão.

A histerese causada pelo atraso na resposta do regulador automático de vazão ocorreu em todas as combinações avaliadas. Para uma dada profundidade, a vazão era maior se o nível da água estivesse em ascensão antes de se estabilizar, pois h_C atingia valores superiores ao nominal. Se o nível estivesse em descensão antes de se estabilizar, h_C assumia valores inferiores ao nominal e, conseqüentemente, a vazão diminuía.

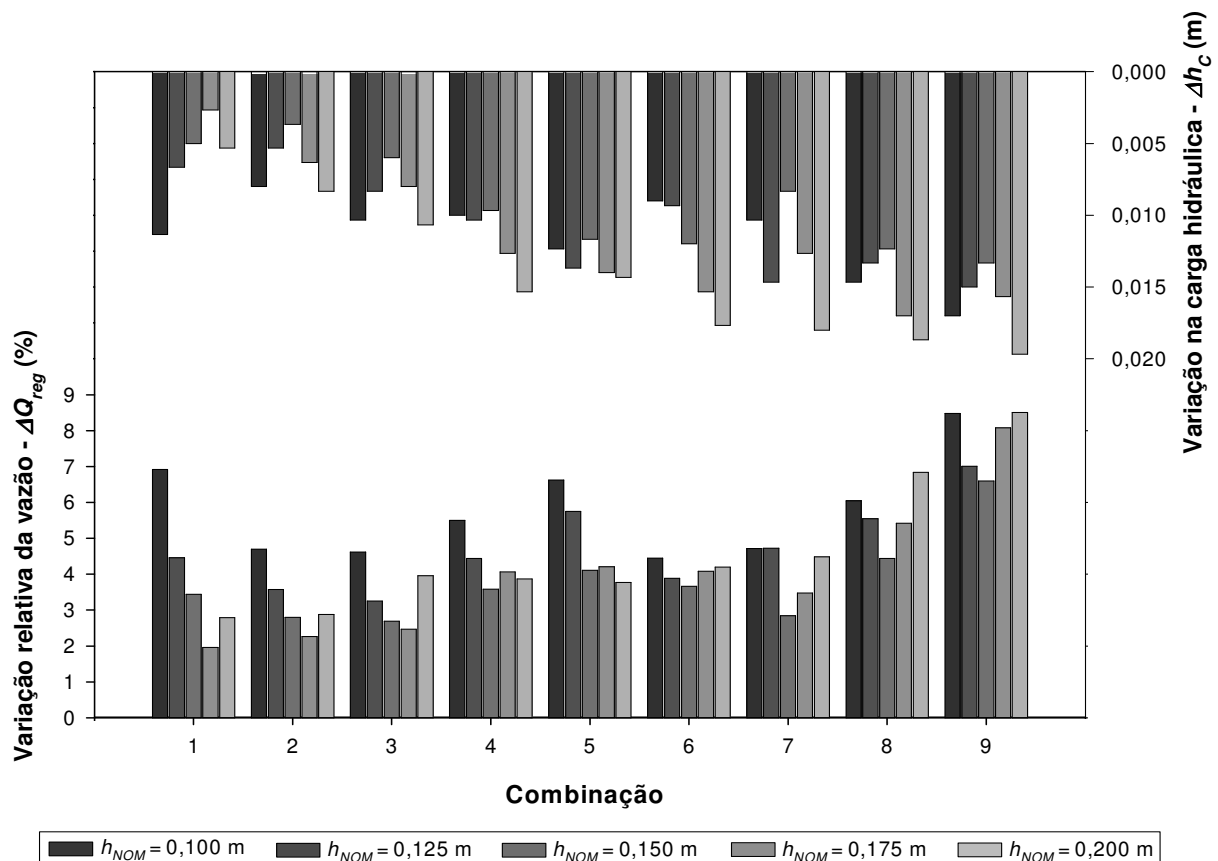


FIGURA 7. Variação relativa na vazão e variação na carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios para as diferentes cargas nominais e combinações de tampões utilizadas no experimento. **Relative discharge variation and hydraulic head variation over the center of gravity of the orifices for the different standard heads and cap combinations applied in the experiment.**

Comparando-se, na Figura 7, as nove combinações de tampões, percebe-se que as maiores variações na vazão ocorreram para as maiores áreas de escoamento. Provavelmente, essa variação está relacionada com o tempo de uso do equipamento, já que os ensaios foram realizados partindo-se das maiores para as menores áreas de escoamento, ou seja, da Combinação 9 para a Combinação 1. Suspeita-se que tenha havido um desgaste maior nas paredes dos tubos guia e deslizante durante as primeiras horas de utilização, já que os ensaios foram realizados com um equipamento novo, logo após a sua instalação no laboratório. O desempenho do equipamento melhorou gradativamente com o tempo de uso, mas após certo período de funcionamento, a perda da graxa lubrificante ocasionou piora em seu desempenho. A primeira lubrificação foi realizada antes do início dos ensaios, e o equipamento operou aproximadamente 133 horas (compreendendo os ensaios com as combinações 9; 8; 7; 6 e 5) até que a segunda lubrificação fosse necessária. Da Combinação 4 até a Combinação 1, foram mais 107 horas de funcionamento, sem necessidade de nova lubrificação. Apesar da boa resposta do equipamento à lubrificação com a graxa líquida, recomenda-se a utilização de graxa lubrificante atóxica, largamente empregada na indústria alimentícia, para evitar a contaminação da água escoada.

Além da variação na carga hidráulica, outro fator que influenciou a variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão foi o vazamento de água na folga entre os tubos guia e deslizante. Como pode ser visto na Figura 8, esse vazamento aumentou com o incremento de Δh . Quando o regulador automático de vazão está em funcionamento, a variação em Δh se deve,

basicamente, à alteração no nível da água no canal principal, que ocasiona um grande aumento em h_e , enquanto h_s permanece aproximadamente constante.

Pela equação empírica obtida para o vazamento na folga entre os tubos (Figura 8), o incremento de uma unidade em Δh causa um aumento de 0,0004335 unidades em Q_F . Isso significa que um incremento de 0,15 m em Δh (equivalente à variação máxima da profundidade do canal principal para a qual o regulador foi projetado) ocasiona aumento de 0,065 L s⁻¹ em Q_F . Apesar de pequeno, esse valor representa cerca de 2% da menor vazão fornecida pelo equipamento, de 3,3 L s⁻¹ para a Combinação 1, com $h_{NOM} = 0,10$ m. Nessas condições, a variação na vazão do regulador foi de 6,92%, evidenciando que uma parcela razoável desta variação pode ser atribuída à vazão da folga. Por outro lado, quando se compara a variação na vazão na folga com a vazão máxima fornecida, de 31,0 L s⁻¹ para a Combinação 9, com $h_{NOM} = 0,20$ m, aquela representa apenas 0,21% desta. Ou seja, à medida que a vazão fornecida aumenta, a influência da variação na vazão na folga entre os tubos guia e deslizante sobre a variação na vazão do regulador torna-se desprezível.

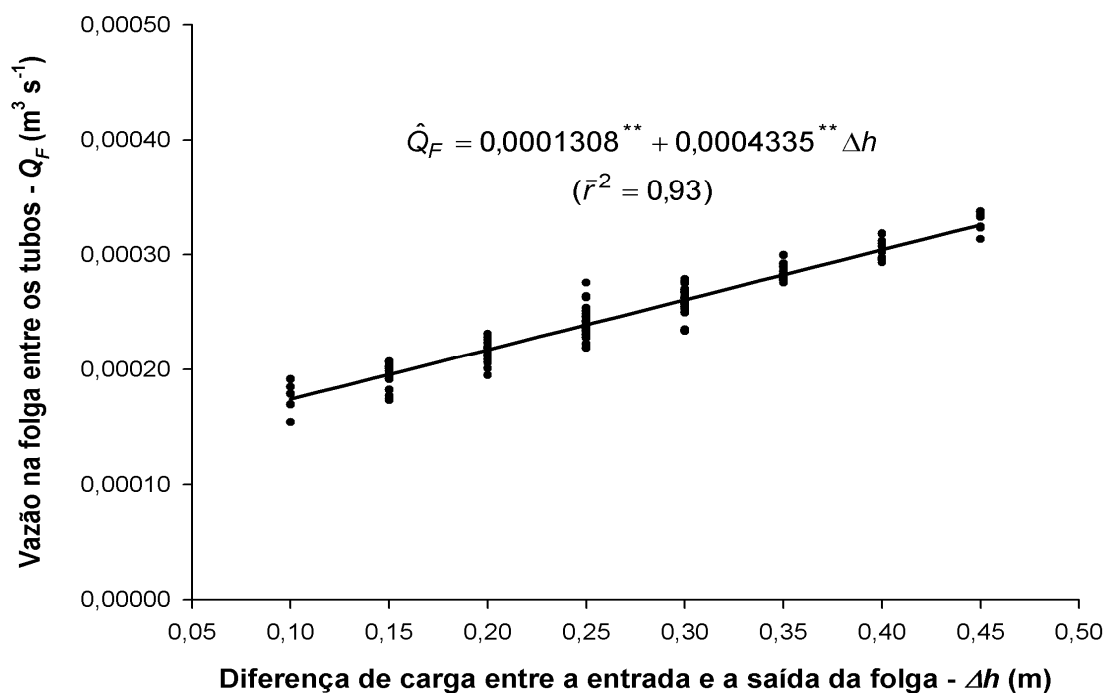


FIGURA 8. Vazão na folga entre os tubos guia e deslizante em função da diferença de carga entre a entrada e a saída da folga (**: significativo ao nível de 1% de probabilidade de erro, pelo teste “t”. **Discharge between the leading and sliding tubes in function of the head difference between the leak inlet and outlet (**: significant at the 1% level of confidence, based on Student’s “t” test).**

Em comparação com as comportas verticais usualmente utilizadas em tomadas de água, nas quais a variação na vazão fornecida pode ser superior a $\pm 10\%$ da vazão média para uma alteração de 0,20 m no nível da água a montante (AMARAL & RIGHES, 2005), a variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão é pequena.

Mesmo quando comparado ao módulo de máscaras, estrutura de controle amplamente utilizada em canais de irrigação, percebe-se que a variação na vazão fornecida pelo regulador automático de vazão desenvolvido é menor. O módulo de uma máscara modelo X₁, que opera na mesma faixa de vazões que o regulador, apresenta variação de aproximadamente $\pm 10\%$ com a alteração de 0,07 m na profundidade a montante (ALSTOM, 2005). A variação máxima na vazão fornecida pelo regulador, para 0,15 m de variação na profundidade a montante, foi de $\pm 4,25\%$, e a variação média foi de $\pm 2,3\%$. Para os mesmos 0,15 m de variação a montante, o módulo de duas

máscaras modelo X_2 apresenta variação de $\pm 5\%$ na vazão fornecida (ALSTOM, 2005), o que demonstra que o regulador automático de vazão é mais preciso. Além disso, os módulos de máscaras citados só permitem a regulação gradual da vazão, em intervalos de $0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto o regulador automático de vazão possibilita a regulação contínua da vazão fornecida. Maiores detalhes relacionados à regulação da vazão e à operação do regulador automático de vazão são abordados em AMARAL et al. (2009).

Embora o regulador automático de vazão tenha apresentado desempenho adequado para a operação de redes de canais, a variação na vazão do equipamento pode ser ainda menor se a seção transversal dos tubos guia e deslizante for perfeitamente circular. Isso reduziria o atrito entre as superfícies dos tubos, minimizando a histerese apresentada pelo equipamento.

CONCLUSÕES

O regulador automático de vazão avaliado é um equipamento apropriado para a operação de redes de canais, apresentando uma amplitude de variação na vazão fornecida inferior aos equipamentos usualmente empregados no controle de vazão em canais de irrigação. Com o desempenho apresentado, o equipamento pode ser recomendado, inclusive, como medidor de vazão em locais onde há cobrança pelo uso da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, pelo financiamento do projeto e pela concessão de bolsa de estudos ao primeiro e ao quinto autores.

REFERÊNCIAS

- ALSTOM. *Equipamentos para irrigação e saneamento*. Taubaté: Alstom Brasil, 2005. 1 CD-ROM.
- AMARAL, L.G.H. do; RAMOS, M.M.; SILVA, D.D. da; CECON, P.R.; FREITAS, L.C. da S.R. Desenvolvimento de um regulador automático de vazão para condutos livres. *Engenharia na Agricultura*, Viçosa-MG, v.17, n.4, p.303-316, 2009.
- AMARAL, L.G.H. do; RIGHES, A.A. Estruturas automáticas para controle de água nos canais em lavoura de arroz irrigado. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.25, n.1, p.272-281, 2005.
- ANDRADE, C. de L. T. de; PERRONI, B.L.T.; ALBUQUERQUE, P.E.P. de; OLIVEIRA, G.R.; PRUSKI, F.F.; GONÇALVES, F.A. Desenvolvimento e avaliação de dispositivos de controle de vazão derivada em canais de irrigação. *Irriga*, Botucatu, v.12, n.4, p.439-455, 2007.
- BELAUD, G.; LITRICO, X.; DE GRAAFF, B.; BAUME, J.P. Hydraulic modeling of an automatic upstream water level control gate for submerged flow conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v.134, n.3, p.315-326, 2008.
- HERNANDEZ, N.M. Irrigation structures. In: DAVIS, C.V.; SORENSEN, K.E. *Handbook of applied hydraulics*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1969. p.34.1-34.53.
- LITRICO, X.; BELAUD, G.; BAUME, J.P.; RIBOT-BRUNO, J. Hydraulic modeling of an automatic upstream water-level control gate. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v.131, n.2, p.176-189, 2005a.
- LITRICO, X.; FROMION, V.; BAUME, J.P.; ARRANJA, C.; RIJO, M. Experimental validation of a methodology to control irrigation canals based on Saint-Venant equations. *Control Engineering Practice*, Barrington, v.13, n.11, p.1.425-1.437, 2005b.
- MAREELS, I.; WEYER, E.; OOI, S.K.; CANTONI, M.; LI, Y.; NAIR, G. Systems engineering for irrigation systems: successes and challenges. *Annual Reviews in Control*, Oxford, v.29, n.2, p.191-204, 2005.

NETTO, J.M.A.; FERNANDEZ, M.F.; ARAUJO, R.; ITO, A.E. *Manual de hidráulica*. 8.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

OOI, S.K.; WEYER, E. Control design for an irrigation channel from physical data. *Control Engineering Practice*, Barrington, v.16, n.9, p.1.132-1.150, 2008.

QUEIROZ, T.M. de; BOTREL, T.A.; FRIZZONE, J.A. Desenvolvimento de software e hardware para irrigação de precisão usando pivô central. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.28, n.1, p.44-54, 2008.