

---

# DESENVOLVIMENTO DE UM REGULADOR AUTOMÁTICO DE VAZÃO PARA CONDUTOS LIVRES<sup>1</sup>

Luis Gustavo Henriques do Amaral<sup>2</sup>, Márcio Mota Ramos<sup>3</sup>, Demetrius David da Silva<sup>4</sup>, Paulo Roberto Cecon<sup>5</sup>,  
Leticia Cibele da Silva Ramos Freitas<sup>6</sup>

## RESUMO

Nos locais onde a condução da água de irrigação é realizada utilizando-se condutos livres, as constantes oscilações no nível da água associadas à alta sensibilidade das estruturas de distribuição provocam grandes variações nas vazões fornecidas às áreas irrigadas. O objetivo desse trabalho foi desenvolver e calibrar um regulador de vazão capaz de minimizar o efeito das oscilações no nível da água em canais de irrigação. O regulador projetado contém oito orifícios perfurados na parede de um tubo deslizante que permitem o escoamento da água do canal para uma derivação. A carga hidráulica sobre os orifícios é ajustada pela ação de um flutuador que acompanha as oscilações no nível da água, minimizando as variações de vazão na derivação. O equipamento foi construído utilizando-se fibra de vidro como material básico e instalado na lateral de um canal experimental, em laboratório, onde foi submetido a um teste de funcionalidade e, posteriormente, calibrado. O regulador automático de vazão desenvolvido e construído atendeu aos propósitos para os quais foi concebido, constituindo-se num equipamento de baixo custo e de fácil operação, capaz de regular vazões entre 0,0033 e 0,0307 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** canais de irrigação, estruturas de controle, hidráulica de canais, orifícios.

## ABSTRACT

### DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC DISCHARGE REGULATOR FOR OPEN CHANNELS

In open channel irrigation systems, frequent fluctuations in water level together with high sensitivity of water delivery structures cause large variations in supplied discharge. The present study aimed to develop and calibrate a discharge regulator capable of minimizing the effect of such fluctuations. The regulator has eight rectangular orifices around the circumference of a sliding tube, which allows water flow from the main channel to the derivatives. The hydraulic head over them is adjusted by the action of a float that follows fluctuations in water level, thus minimizing the discharge variation. The equipment built from fiberglass was installed in an experimental concrete channel and submitted to functional evaluation and calibration. This automatic discharge regulator attended to the purpose for what it was conceived, providing an easy to operate low cost equipment, to supply discharges between 0.0033 and 0.0307 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

**Keywords:** irrigation channels, control structures, channel hydraulics, orifices.

---

#### Recebido para publicação em 16/01/2009. Aprovado em 29/05/2009

1 Extraído da tese de doutorado do primeiro autor. Projeto financiado pelo CNPq.

2 D.S., Prof. Adjunto, ICAD, UFBA, luisgha@ufba.br.

3 D.S., Prof. Titular, DEA, UFV, mmramos@ufv.br.

4 D.S., Prof. Associado, DEA, UFV, demetrius@funarbe.org.br.

5 D.S., Prof. Associado, DPI, cecon@dpi.ufv.br.

6 Acadêmica de Eng. Agrícola e Ambiental, DEA, UFV, leticiacibele@yahoo.com.br.

## INTRODUÇÃO

Responsável por cerca de 70% do consumo de água no mundo (FAO & IFAD, 2006) e 65% no Brasil (TUCCI et al., 2001), a irrigação é de suma importância para o suprimento da crescente demanda por alimentos que, de acordo com previsões da FAO (2008), deverá duplicar até o ano de 2050. Por outro lado, o desenvolvimento da agricultura irrigada depende do uso racional dos recursos hídricos, havendo necessidade de redução nas perdas que ocorrem desde a reservação até a aplicação da água nas áreas irrigadas.

Nos locais onde a condução da água de irrigação é realizada por meio de canais, as constantes oscilações no nível da água associadas à alta sensibilidade das estruturas de distribuição provocam grandes variações nas vazões fornecidas aos lotes irrigados (AMARAL et al., 2005; KUMAR et al., 2002). Em geral, as estruturas utilizadas nas tomadas de água são comportas verticais e vertedores retangulares que dependem de operação manual. Além de não compensarem as variações no nível da água nos canais, dificultando a distribuição da vazão ideal, as estruturas operadas manualmente não permitem uma estimativa confiável do volume de água fornecido aos lotes irrigados.

Apesar de existirem estruturas automáticas para controle da vazão derivada, como as desenvolvidas por Stringam e Pugh (2002) e Craig et al. (2006), a maioria delas necessita de energia externa para o seu funcionamento. Normalmente, essas estruturas são acionadas por sistemas fotovoltaicos isolados, cujo custo de implantação é elevado, atingindo, em média, 11,00 EUR por Watt (SHAYANI et al., 2006), o que pode aumentar consideravelmente o custo de instalação de tais estruturas. Uma opção mais viável economicamente é o emprego de estruturas automáticas acionadas pela energia hidráulica disponível nos canais. Além de facilitar o manejo da água nos canais, a utilização desse

tipo de equipamento nas tomadas de água dos perímetros irrigados pode favorecer a economia de água e, conseqüentemente, aumentar a eficiência de irrigação.

Considerando a escassez de recursos hídricos e as dificuldades enfrentadas no manejo da água em canais de condução, o objetivo desse trabalho foi desenvolver e calibrar um regulador automático de vazão para tomadas de água em condutos livres, capaz de minimizar o efeito das variações no nível da água a montante sobre a vazão escoada sem necessitar de fonte de energia externa.

## MATERIAL E MÉTODOS

A concepção do regulador foi baseada no princípio de funcionamento do *Autoregulator* (HERNANDEZ, 1969) e nas características construtivas do regulador automático de vazão apresentado por Amaral et al. (2005). No presente trabalho, foram propostas modificações no regulador automático de vazão com a finalidade de facilitar a sua fabricação em série, padronizando as dimensões e os materiais dos seus componentes e facilitando sua instalação e operação em canais com características dimensionais diversas. Além disso, visando à obtenção de um equipamento durável e de preço acessível, priorizou-se o emprego de materiais de baixo custo, com durabilidade e resistência satisfatórias.

O regulador automático de vazão foi projetado de forma a possibilitar o escoamento da água de um canal secundário ou terciário para uma derivação, através de orifícios retangulares perfurados na parede de um tubo de seção circular, conforme a Figura 1. Como a principal função do equipamento é a manutenção de uma vazão derivada aproximadamente constante, mesmo com variações expressivas no nível da água a montante, o regulador foi projetado com elementos que permitem o ajuste da carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios ( $h_c$ ), minimizando o efeito da variação no nível a montante sobre a vazão escoada.

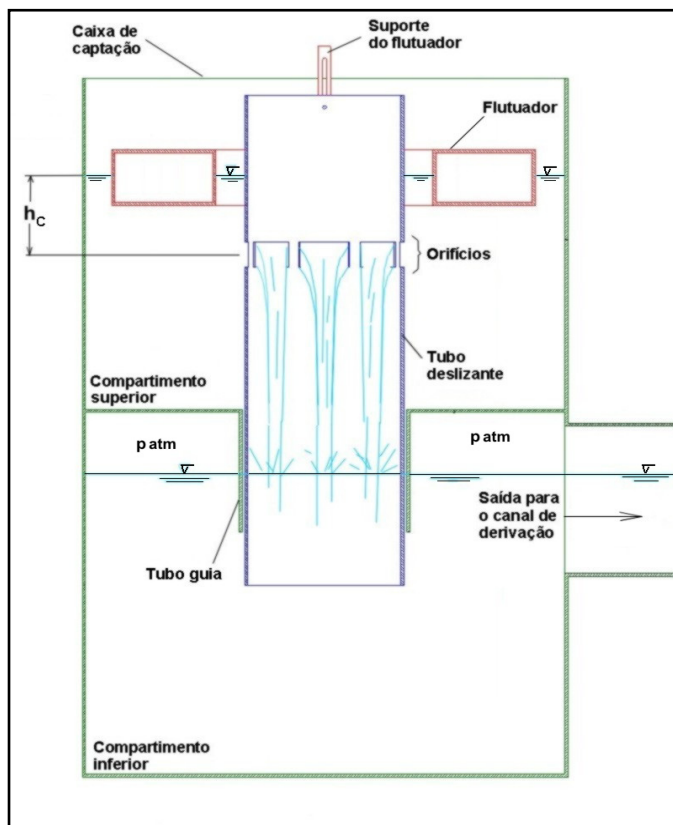


Figura 1. Croqui do regulador automático de vazão (vista em corte)

O equipamento projetado é composto de uma caixa de captação, um tubo deslizante, um tubo guia e um flutuador. A caixa de captação contém dois compartimentos: o superior, que recebe a água proveniente do canal secundário ou terciário, e o inferior, que recebe a água escoada pelos orifícios e a transmite ao canal de derivação. O tubo deslizante contém na sua parede os orifícios para escoamento da água, possuindo liberdade de movimento na direção vertical, uma vez que, entre a sua parede externa e a parede interna do tubo guia, há uma pequena folga que permite o seu deslizamento. O flutuador, que acompanha as variações no nível da água no compartimento superior da caixa de captação, está unido ao tubo deslizante, possibilitando o movimento deste último e, com isso, o ajuste da posição vertical dos orifícios em relação ao nível da água.

Também foi prevista a instalação, no compartimento superior da caixa de captação, de uma estrutura para dissipação de energia e direcionamento do escoamento, de forma a reduzir a turbulência no compartimento superior (Figura 2). Essa estrutura foi composta de tubos de PVC de 50 mm de diâmetro e espessura de parede de 1,6 mm, com 0,20 m de comprimento, posicionados em ângulo de 20° para evitar que os orifícios mais próximos da entrada da caixa de captação recebessem água com velocidade de aproximação elevada.

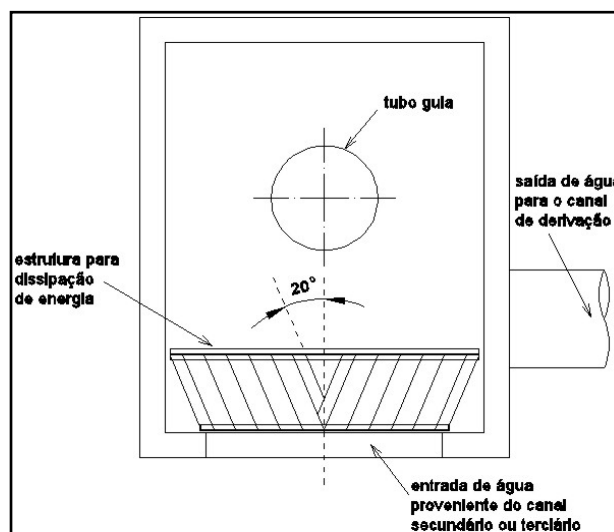


Figura 2. Croqui da caixa de captação (vista superior)

O equipamento foi projetado para operar em canais onde a variação na profundidade a montante da tomada de água atinge, no máximo, 0,15 m e a diferença de nível entre as superfícies da água nos canais de abastecimento e de derivação alcança, no mínimo, 0,50 m. A vazão máxima de projeto foi definida em  $0,030 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , prevendo-se a utilização do equipamento em tomadas que derivam água a lotes de pequeno e médio porte.

O flutuador foi projetado com suportes que permitem

seu deslocamento vertical em relação ao tubo deslizante, possibilitando a regulação de  $h_c$  e, conseqüentemente, o ajuste fino da vazão fornecida pelo regulador. As cargas hidráulicas mínima e máxima sobre os orifícios do tubo deslizante foram fixadas em 0,10 m e 0,20 m, respectivamente. Com o posicionamento adequado do flutuador, os orifícios podem operar sob qualquer carga entre a mínima e a máxima.

O tubo deslizante foi projetado com oito orifícios ao redor da sua circunferência, possibilitando manter a equidistância entre os jatos com dois, quatro ou oito orifícios em escoamento simultâneo. Para o máximo aproveitamento do tubo, optou-se por orifícios de forma retangular, que proporcionam área de escoamento maior do que aquela que seria obtida com orifícios circulares de mesma altura, considerando-se o mesmo espaçamento entre orifícios. As bordas dos orifícios foram confeccionadas sem bisel, ou seja, em ângulo reto, com faces verticais seguindo o prolongamento do raio do tubo.

Os orifícios foram dimensionados a partir da área total de escoamento ( $A$ ) necessária para suprir a vazão máxima de projeto, dada pela soma das áreas dos oito orifícios. A área de cada orifício ( $A_o$ ) foi calculada utilizando-se a Equação 1 (BOS, 1989):

$$Q_o = C_d A_o \sqrt{2gh_c} \quad (1)$$

em que

$Q_o$  = vazão do orifício ( $m^3 s^{-1}$ );

$C_d$  = coeficiente de descarga (adimensional);

$A_o$  = área do orifício ( $m^2$ );

$g$  = aceleração da gravidade ( $m s^{-2}$ ); e

$h_c$  = carga hidráulica sobre o centro de gravidade do orifício (m).

Para o cálculo de  $A_o$ , considerou-se que a vazão escoada em cada orifício seria igual a um oitavo da vazão máxima de projeto. Além disso, utilizou-se  $h_c = 0,20$  m e  $C_d = 0,61$ , arbitrado com base na recomendação de Andrade Netto et al. (1998). Nessas condições, obteve-se  $A_o = 0,0031$   $m^2$  e, conseqüentemente,  $A = 0,0248$   $m^2$ . Arbitrando-se que a largura do orifício ( $L$ ) seria igual ao dobro da altura ( $B$ ), obteve-se  $L = 0,08$  m (medida sobre a circunferência do tubo deslizante) e  $B = 0,04$  m. O valor das áreas foi então recalculado, obtendo-se  $A_o = 0,0032$   $m^2$  e  $A = 0,0256$   $m^2$ .

O diâmetro externo do tubo deslizante ( $d_{ext}$ ) foi calculado em função da circunferência necessária para conter os oito orifícios. Sem considerar o espaçamento entre orifícios, seria necessário um diâmetro de 0,204 m. Dessa forma, optou-se pela utilização de um tubo deslizante com  $d_{ext} = 0,250$  m (diâmetro comercial), possibilitando um espaçamento de aproximadamente 0,018 m entre orifícios.

Para ampliar a faixa de vazões fornecidas pelo equipamento, este foi projetado de forma que os orifícios pudessem ser obstruídos parcial ou totalmente e, assim, diferentes áreas de escoamento fossem utilizadas de acordo com a vazão necessária. Desse modo, três tipos de tampões foram projetados para obstruir os orifícios. Um deles foi projetado para permitir a utilização de 75% da área de escoamento do orifício (tampão tipo A); o segundo, a utilização de 50% da área (tipo B); e o terceiro, a obstrução total do orifício (tipo C). Diversas áreas de escoamento foram obtidas com a combinação dos diferentes tampões, de forma a possibilitar a utilização do regulador em uma ampla faixa de vazões.

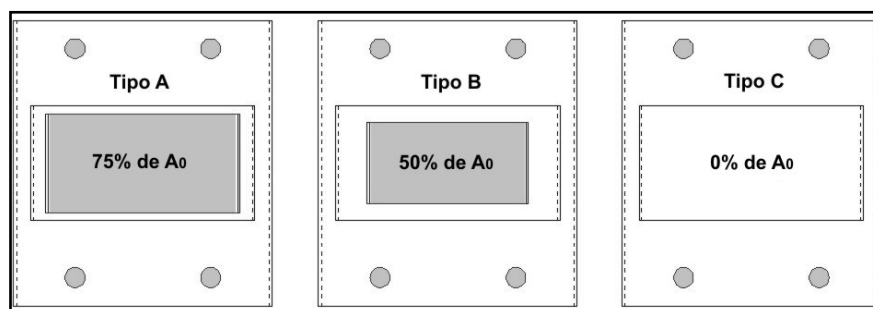


Figura 3. Tampões para obstrução parcial ou total dos orifícios.

No Quadro 1 estão apresentados os tipos de tampões a serem utilizados nos orifícios em cada uma das nove combinações previstas e, no Quadro 2, as áreas de escoamento e as vazões estimadas correspondentes a

cada combinação. Após a construção do regulador, as dimensões para o cálculo das áreas dos orifícios do tubo deslizante e dos tampões foram medidas com o auxílio de um paquímetro universal, com resolução de 0,05 mm.

**Quadro 1.** Tipo de tampão utilizado em cada orifício nas diferentes combinações previstas

Combinação	Número do orifício							
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	B*	C*	C	C	B	C	C	C
2	A*	C	C	C	A	C	C	C
3	T*	C	C	C	T	C	C	C
4	C	A	C	B	C	A	C	B
5	C	T	C	B	C	T	C	B
6	C	T	C	T	C	T	C	T
7	A	B	A	B	A	B	A	B
8	A	T	B	T	A	T	B	T
9	T	T	T	T	T	T	T	T

7

**Quadro 2.** Área total de escoamento e vazões mínima e máxima estimadas para as diferentes combinações previstas.

Combinação	Área total <sup>a</sup> - A (m <sup>2</sup> )	Vazão mínima <sup>b</sup> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Vazão máxima <sup>c</sup> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
1	0,0032	0,0027	0,0039
2	0,0048	0,0041	0,0058
3	0,0064	0,0055	0,0077
4	0,0080	0,0068	0,0097
5	0,0096	0,0082	0,0116
6	0,0128	0,0109	0,0155
7	0,0160	0,0137	0,0193
8	0,0208	0,0178	0,0251
9	0,0256	0,0219	0,0309

8

O dimensionamento do flutuador foi realizado pelo método das tentativas, procurando-se obter um flutuador com volume suficiente para produzir, quando totalmente submerso, empuxo igual ao dobro da soma do seu peso com o peso do tubo deslizante. As estimativas do peso do conjunto e do empuxo produzido pelo flutuador foram obtidas por simulação computacional com o programa de computador AutoCAD (AUTODESK, 2003).

O flutuador foi construído com parede de aproximadamente 3 mm, possuindo interior vazio. Optou-

se por seção transversal retangular, para que houvesse proporcionalidade entre a variação no nível da água e a variação no empuxo. Além disso, foi escolhida uma seção com a maior largura de base possível, de forma que pequena alteração no nível da água causasse variação relativamente grande no empuxo, tornando o equipamento mais sensível às alterações na profundidade da água a montante.

O tubo guia foi dimensionado de forma que o vazamento de água na folga entre este e o tubo deslizante

7 \* A - tampão do tipo A (75% da área de escoamento); B - tampão do tipo B (50% da área); C - tampão do tipo C (obstrução total); T - orifício totalmente aberto (100% da área).

8 <sup>a</sup> Soma das áreas dos orifícios totalmente abertos e/ou parcialmente abertos;

<sup>b</sup> Calculada utilizando-se a equação (1), com  $C_D = 0,61$  e  $h_C = 0,10$  m;

<sup>c</sup> Calculada utilizando-se a equação (1), com  $C_D = 0,61$  e  $h_C = 0,20$  m.

fosse o menor possível. Conforme Fox & McDonald (2001), o vazamento entre as paredes de dois tubos pode ser considerado como escoamento laminar completamente desenvolvido entre placas paralelas infinitas, desde que a folga seja suficientemente pequena e que  $Re \leq 1400$ . Nessas condições, tem-se que:

$$Q_F = \frac{\pi d_{ext} E_F^3 \gamma \Delta h}{12 \mu C_F} \quad (2)$$

em que

$Q_F$  = vazão na folga entre os tubos guia e deslizante ( $m^3 s^{-1}$ );

$d_{ext}$  = diâmetro externo do tubo deslizante (m);

$E_F$  = espessura da folga (m);

$\gamma$  = peso específico do fluido ( $N m^{-3}$ );

$\Delta h$  = diferença de carga entre a entrada e a saída da folga (m);

$\mu$  = viscosidade absoluta do fluido ( $N s m^{-2}$ ); e

$C_F$  = comprimento da folga (m).

Com base na Equação 2, procurou-se reduzir ao máximo o diâmetro interno do tubo guia ( $D_{int}$ ), para que o valor de  $E_F$  fosse pequeno, e aumentar ao máximo o comprimento desse tubo, para que  $C_F$  fosse grande, reduzindo o valor da vazão na folga. Dessa forma, definiu-se  $E_F = 0,3$  mm, valor mínimo necessário para o deslizamento apropriado do tubo deslizante, conforme avaliações práticas preliminares, obtendo-se  $D_{int} = 0,2506$  m. O valor de  $C_F$  e, conseqüentemente, do comprimento do tubo guia, foi fixado em 0,25 m, valor suficiente para assegurar o alinhamento vertical do tubo deslizante. Valores maiores proporcionariam a redução do contato linear entre os dois tubos em algumas posições assumidas pelo tubo deslizante, acarretando redução de  $C_F$  e, conseqüentemente, maior variação

na vazão da folga.

A largura e o comprimento da caixa de captação foram definidos em função do diâmetro do flutuador e do espaço necessário para instalação da estrutura de dissipação de energia. Por outro lado, evitou-se que o espaço requerido para a instalação da caixa de captação fosse demasiadamente grande, o que limitaria sua aplicabilidade em condições de campo. A altura do compartimento superior foi fixada em 0,50 m, valor da diferença mínima entre as superfícies da água nos canais de abastecimento e de derivação fixada no projeto. A altura do compartimento inferior foi definida a partir do comprimento do tubo deslizante, prevendo-se um espaço mínimo de 0,35 m entre a borda inferior do tubo deslizante e o fundo do compartimento inferior.

Todos os componentes do regulador foram construídos em fibra de vidro, a partir de modelos em escala real que permitiram a obtenção dos moldes das peças. Optou-se pela fibra de vidro em função do custo baixo em relação a outros materiais, da alta inércia química e da resistência a intempéries desse material, o que o torna aplicável em ambientes agressivos a materiais convencionais como aço e madeira. Além disso, a fibra permite a moldagem de peças complexas e possui grande resistência à tração, ao impacto e à flexão (MATHEUS, 2002).

Após a sua construção, o equipamento foi instalado na lateral de um canal de concreto com seção retangular de 0,50 m de altura e 0,70 m de largura, pertencente ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, conforme esquema apresentado na Figura 4. Inicialmente, foram realizados testes de caráter qualitativo para avaliar a sua funcionalidade e, posteriormente, o regulador foi calibrado em toda a sua faixa de operação.

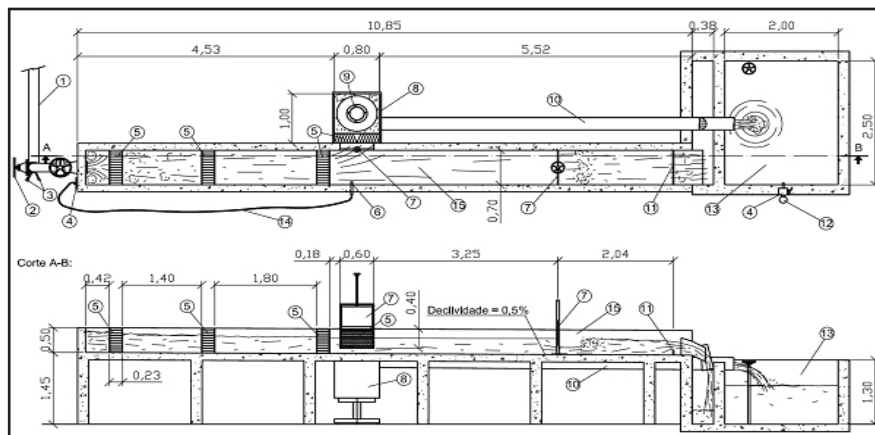


Figura 4. Esquema de instalação do regulador automático de vazão em laboratório (dimensões em metros)

Legenda:

1 – tubulação de alimentação

2 – válvula de gaveta para ajuste grosseiro da vazão

3 – válvula de gaveta para ajuste fino da vazão

4 – régua linimétrica

5 – estruturas para dissipação de energia

6 – tomada de nível

7 – comporta vertical

8 – caixa de captação

9 – tubo deslizante e flutuador

10 – derivação

11 – vertedor retangular

12 – poço tranquilizador

13 – reservatório de coleta do volume escoado

14 – mangueira

15 – canal de concreto

Durante o teste de funcionalidade, o equipamento foi submetido a diversas condições de operação, tanto em termos de regulagem quanto em termos de profundidade da água no canal principal, de forma a verificar se o seu funcionamento era adequado e satisfazia as exigências do projeto.

Verificou-se, inicialmente, se a resposta do equipamento às oscilações do nível da água a montante da caixa de captação era satisfatória e se a lubrificação das paredes dos tubos guia e deslizante alterava essa resposta. Observou-se, também, o comportamento do equipamento quando o nível da água a montante da caixa de captação assumia valores extremos, bem como o grau de dificuldade durante a regulagem da vazão fornecida.

Posteriormente, o equipamento foi colocado em operação utilizando-se cada uma das nove combinações de tampões previstas no Quadro 1 e, para cada combinação, a carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios foi regulada em 0,100, 0,125, 0,150, 0,175 e 0,200 m. Estes valores foram considerados cargas hidráulicas nominais ( $h_{NOM}$ ), pois correspondem a valores previamente regulados, enquanto a carga hidráulica real sobre o centro de gravidade dos orifícios ( $h_c$ ) poderia sofrer variações durante o funcionamento do equipamento.

Em cada regulagem, o equipamento foi mantido em operação enquanto o nível da água no canal era alterado aleatoriamente dentro da faixa de operação de 0,15 m prevista no projeto, ou seja, com a profundidade da água a montante da caixa de captação variando desde 0,30 até 0,45 m. Observou-se o comportamento do equipamento frente às variações de nível, verificando-se se valor de  $h_c$  mantinha-se próximo ao valor de  $h_{NOM}$ .

Para alterar o nível da água no canal, a vazão na sua entrada era regulada com três válvulas de gaveta de diâmetros diferentes, uma para ajuste grosseiro e duas para ajuste fino da vazão. O monitoramento do nível da água foi realizado com uma régua linimétrica com graduação de 1 mm. Uma comporta vertical situada a jusante do regulador permitiu a manutenção de escoamento subcrítico no trecho de canal onde o equipamento foi instalado.

A calibração do equipamento consistiu na determinação das curvas características relacionando a vazão fornecida ( $Q_{reg}$ ) com a carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios ( $h_c$ ). As curvas características foram obtidas para todas as combinações de tampões previstas no

Quadro 1. Em cada uma das nove combinações,  $Q_{reg}$  foi determinada com  $h_{NOM} = 0,100, 0,125, 0,150, 0,175$  e  $0,200$  m, utilizando-se o método direto. Foram realizadas três repetições, sendo que cada repetição consistiu em oito determinações de  $Q_{reg}$ , quatro com o nível da água a montante da entrada da caixa de captação em ascensão antes de se estabilizar e quatro com o nível em descensão antes de se estabilizar. Tanto na ascensão quanto na descensão,  $Q_{reg}$  foi determinada nos níveis de 0,30, 0,35, 0,40 e 0,45 m.

O volume escoado pelo equipamento foi determinado em um reservatório de 5 m<sup>2</sup> 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. O valor de  $h_c$  foi monitorado com uma régua com graduação de 1 mm colocada na parede do tubo deslizante. A superfície interna do tubo guia e a superfície externa do tubo deslizante permaneceram lubrificadas com graxa líquida de alta resistência à água durante todos os ensaios de calibração.

As equações das curvas características foram obtidas por análise de regressão com o programa de computador SAS (SAS, 1999). O modelo matemático foi escolhido com base no processo físico envolvido. Assim, considerando-se que a vazão em orifícios é regida pela Equação 1, o modelo escolhido foi o seguinte:

$$Q_{reg} = \beta_0 h_c^{\beta_1} \quad (3)$$

em que

$Q_{reg}$  = vazão fornecida pelo regulador automático de vazão (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) e

$\beta_0$  e  $\beta_1$  = coeficientes de regressão (adimensionais).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em função de algumas limitações que ocorreram durante a fabricação dos modelos e dos moldes das peças, algumas dimensões previstas durante o projeto do equipamento foram modificadas:  $d_{ext}$  passou de 0,250 m para 0,265 m e, com isso,  $D_{int}$  passou de 0,2506 para 0,2656 m. Além disso, não foi possível manter constante o valor da espessura da parede dos tubos guia e deslizante (em média, a espessura

das paredes dos tubos foi de aproximadamente 2 mm), devido à dificuldade em promover acabamento nas duas faces de cada peça, o que constitui uma limitação inerente à fabricação de peças em fibra de vidro.

O tubo deslizante (Figura 5), com massa de 2,3 kg, foi construído com oito orifícios laterais que poderiam estar totalmente abertos, parcial ou totalmente obstruídos, conforme as combinações previstas no Quadro 1. Os orifícios foram numerados para facilitar a colocação dos tampões, ainda que os três tipos de tampão fossem intercambiáveis, podendo ser fixados em qualquer orifício. Para satisfazer todas as combinações previstas no Quadro 1, foram necessários quatro tampões do tipo A, quatro do tipo B e seis do tipo C. Havia também uma escala no tubo para facilitar a regulação e o monitoramento de  $h_c$ .

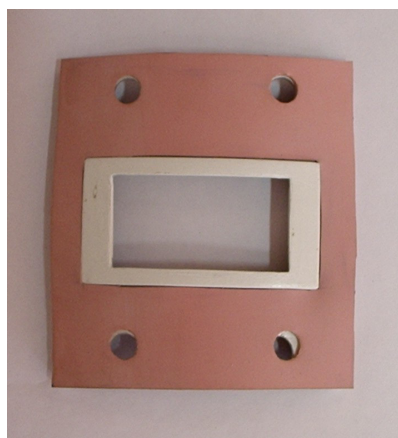


**Figura 5.** Tubo deslizante: (a) vista geral e (b) escala, orifícios e tampões.



(a)

A fixação de cada tampão foi realizada com quatro parafusos tipo francês, de bitola 6,35 mm x 38,1 mm ( $1/4'' \times 1\frac{1}{2}''$ ), associados a uma arruela de borracha, uma arruela de metal e uma porca tipo borboleta. Somente as cabeças dos parafusos ficaram do lado externo da parede do tubo deslizante, reduzindo possíveis interferências no escoamento. Para uma vedação eficiente, uma junta de borracha foi colocada entre o tampão e a parede do tubo deslizante (Figura 6). O lixamento da superfície interna do tubo deslizante, na região onde os tampões são assentados, tornou a superfície mais lisa e uniforme, favorecendo a vedação.



(a)



(b)

**Figura 6.** Fixação de um tampão do tipo B: (a) junta de borracha para vedação e (b) posicionamento no interior do tubo deslizante



No Quadro 3 estão apresentadas as áreas médias dos orifícios do regulador. Os desvios padrão obtidos foram pequenos, evidenciando boa uniformidade de fabricação. Por outro lado, houve diferença entre as áreas médias e as

áreas previstas, o que se deve às dificuldades encontradas na confecção de modelos totalmente fiéis ao projeto. O tampão do tipo A permitiu a utilização de 73,8% da área total de escoamento e o do tipo B, 50,8%.

**Quadro 3.** Área média de escoamento, desvio padrão e percentagem da área do orifício totalmente aberto dos orifícios do regulador automático de vazão

Tipo de orifício (tamanho da amostra)	Área média (mm <sup>2</sup> )	Desvio padrão (mm <sup>2</sup> )	Percentagem da área do orifício totalmente aberto (%)	Área prevista no projeto (mm <sup>2</sup> )
Orifício livre (8)	3.179	9,18	100,00	3.200
Tampão tipo A (4)	2.347	5,50	73,83	2.400
Tampão tipo B (4)	1.616	5,74	50,83	1.600

A área média de escoamento dos orifícios livres foi 0,66% menor do que a prevista no projeto e a dos tampões do tipo A foi 2,21% menor, enquanto a área média dos tampões do tipo B foi 1% maior do que a prevista no projeto. Como, conforme apresentado na Equação 1, a vazão no orifício é diretamente proporcional à área de escoamento, a alteração nos valores das áreas previstas no projeto contribuiu para que as vazões reais obtidas pelo equipamento fossem diferentes das vazões calculadas. Contudo, as

diferenças entre as áreas médias e as áreas previstas no projeto foram pequenas, não sendo suficientes para causar alterações expressivas na faixa de vazões abrangida pelo regulador.

O flutuador (Figura 7), com corpo construído em fibra de vidro e suportes em alumínio, apresentou massa total de 4,3 kg. A fixação do flutuador ao tubo deslizante foi realizada com parafusos de aço galvanizado tipo francês, de bitola 6,35 mm x 38,1 mm (1/4" x 1 1/2") associados a porcas do tipo borboleta.



**Figura 7.** Flutuador: (a) vista geral e (b) fixado ao tubo deslizante.

A caixa de captação foi construída com 1,4 m de altura, 0,8 m de largura e 1,0 m de comprimento (Figura 8a), e foi reforçada internamente com barras de aço, para evitar que a pressão sobre as suas paredes causasse deformações. O tubo guia foi construído de forma conjugada com o fundo horizontal que separa o compartimento superior do inferior da caixa de captação (Figura 8b).

A maior dificuldade encontrada durante o

desenvolvimento do equipamento foi a fabricação dos tubos guia e deslizante nos diâmetros adequados, já que a folga entre ambos é bastante pequena (0,3 mm). Contudo, o regulador automático de vazão construído atendeu às especificações de projeto, além de apresentar custo de fabricação relativamente baixo.

O custo de fabricação de um exemplar do equipamento, incluídos os custos de material e mão-de-obra referentes

aos componentes fabricados, sem contemplar o custo dos moldes e modelos utilizados, foi de 440,00 EUR (em 30/03/2007). Este valor corresponde ao custo de implantação de um sistema fotovoltaico isolado com potência de apenas 40 W, considerando-se um custo médio de 11,00 EUR por Watt (SHAYANI et al., 2006). Mesmo que esta potência fosse suficiente para

o acionamento de uma comporta eletromecânica de pequeno porte, somente o seu sistema de acionamento (painel fotovoltaico, bateria e motor) custaria mais do que o valor total do regulador construído. Além disso, é provável que o custo do regulador automático de vazão apresente queda considerável caso o equipamento seja fabricado em larga escala.



(a)



(b)

**Figura 8.** Caixa de captação: (a) vista externa e (b) vista do interior do compartimento superior.

A carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios ( $h_c$ ) não permaneceu constante frente às oscilações no nível da água a montante da caixa de captação. Isso ocorreu porque o atrito estático entre as paredes dos tubos guia e deslizante 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 forma levemente elipsoidal. Apesar de ter sido pequena, essa distorção influenciou o deslizamento entre os tubos, ocasionando 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 o valor previamente regulado ( $h_{NOM}$ ), quando o nível da água a montante estava em ascensão, e menor do que  $h_{NOM}$  quando o nível estava em descensão. Entretanto, a lubrificação da parede externa do tubo deslizante e da parede interna do tubo guia melhorou a resposta do equipamento às oscilações do nível da água. Nessas condições, apesar de não permanecer constante, o valor de  $h_c$  manteve-se próximo ao de  $h_{NOM}$ . Em média, a variação em  $h_c$  foi de apenas  $\pm 5,7$  mm em relação ao

valor de  $h_{NOM}$  ( $\pm 2,85\%$  para  $h_{NOM} = 0,200$  m,  $\pm 3,80\%$  para  $h_{NOM} = 0,150$  m e  $\pm 5,70\%$  para  $h_{NOM} = 0,100$  m), para variação de 0,150 m no nível da água a montante da caixa de captação. Considerando-se que esse desempenho é suficiente para reduzir expressivamente a variação de vazão causada pelas alterações na profundidade da água a montante de uma tomada de água, pode-se inferir que a resposta do equipamento foi satisfatória. Com base nas observações realizadas, recomenda-se a lubrificação das paredes dos tubos a cada 120 horas de operação, aplicando-se uma camada fina de graxa líquida lubrificante de alta resistência à água com auxílio de um pincel.

Durante o teste de funcionalidade, o equipamento foi capaz de operar em qualquer profundidade da água no canal principal (de 0 a 0,50 m) e não necessitou de intervenção para iniciar o funcionamento quando o nível partia de zero. Entretanto, ocorreram alterações expressivas em  $h_c$  quando nível da água no compartimento superior da caixa de captação era inferior a 0,30 m e superior a 0,45 m. Isso já era esperado, uma vez que o equipamento foi projetado para operar com o nível da água no compartimento superior entre 0,30 e 0,45 m de profundidade.

A regulagem da área total de escoamento constituiu-se em tarefa fácil, porém demorada, uma vez que foi necessário interromper o funcionamento do regulador e retirar o tubo deslizante a cada troca de tampões. Contudo, como a alteração na combinação de tampões permite o ajuste grosseiro da vazão, esse procedimento só deve ser realizado quando a alteração de vazão for expressiva. Para o ajuste fino da vazão, a regulagem da carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios é suficiente. Esse procedimento, por sua vez, constituiu-se em tarefa simples e rápida, podendo ser realizado com o equipamento em funcionamento. Para tanto, reduz-se o aperto dos parafusos de fixação dos suportes do flutuador (Figura 9) e altera-se a posição vertical do tubo deslizante. Com auxílio da régua (graduada a cada 1 mm) presente nesse tubo, regula-se a carga hidráulica no valor desejado.

O teste de funcionalidade do regulador automático de

vazão demonstrou que, do ponto de vista qualitativo, o equipamento apresentou desempenho adequado aos propósitos para os quais foi projetado. Torna-se importante ressaltar que os ensaios foram realizados em laboratório, utilizando-se água limpa. Em locais onde a água apresenta grande quantidade de partículas em suspensão, o desempenho do regulador pode ser prejudicado, uma vez que essas partículas podem penetrar na folga entre os tubos guia e deslizante e aumentar o atrito necessário para o movimento relativo entre eles. Dessa forma, sugere-se a utilização de estruturas para filtração da água antes da sua entrada na caixa de captação, caso a quantidade de partículas em suspensão seja elevada. Apesar de contribuir para o aumento do custo final do produto, o emprego de estruturas de filtração deve ser considerado sempre que as partículas em suspensão prejudicarem o movimento do tubo deslizante.



Figura 9. Regulador automático de vazão em funcionamento<sup>9</sup>.

As equações de regressão relacionando a vazão fornecida pelo regulador automático de vazão com a carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios, bem como as faixas de vazões abrangidas em cada combinação de tampões estão apresentadas no Quadro 4. Na Figura 10, são apresentadas as curvas características correspondentes.

As estimativas dos coeficientes de regressão ( $\hat{\beta}_1$ ) das curvas características obtidas assumiram valores próximos ao valor teórico que, de acordo com o teorema de Torricelli, é de 0,5. A diferença entre os valores das estimativas de

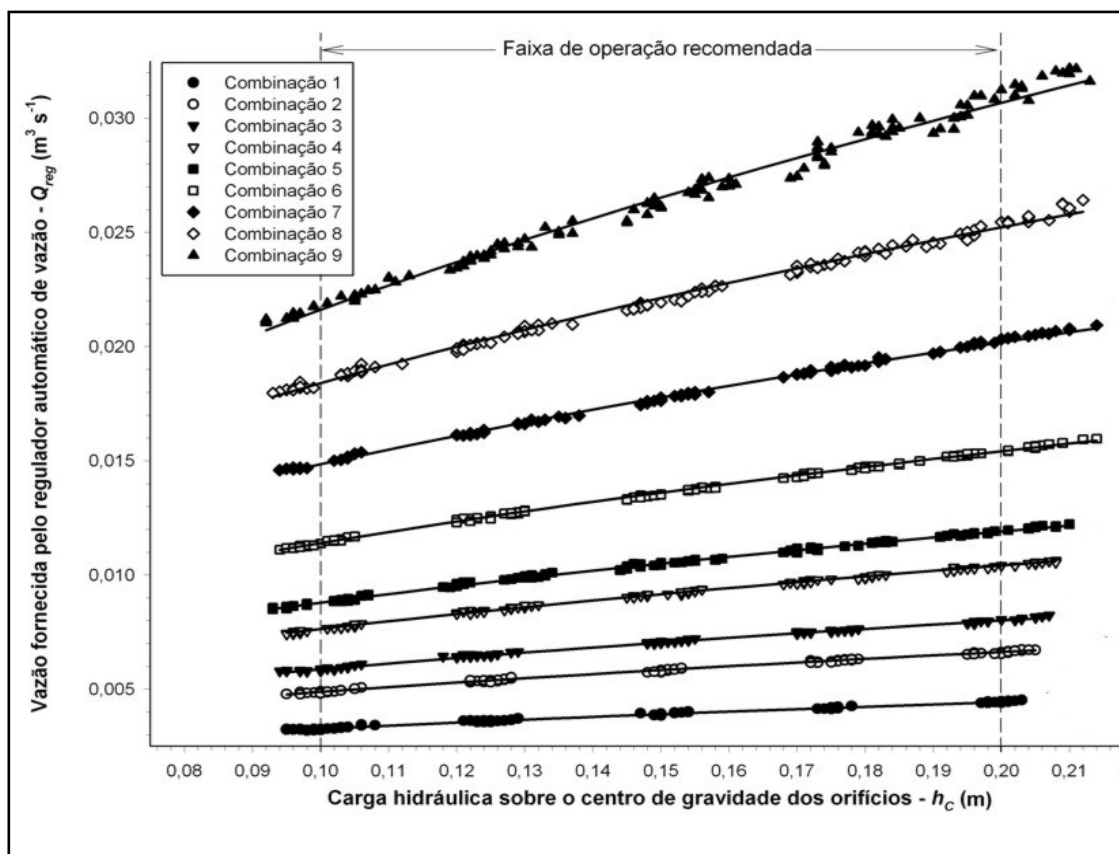
$\beta_1$  e o valor teórico pode ser explicada pelo fato de que, nas curvas características obtidas, a variação de  $C_D$  em função de  $h_c$  não é considerada isoladamente. De acordo com as curvas teóricas apresentadas por Rouse (1951) e Ávila (1974), o valor de  $C_D$  diminui com o aumento da carga hidráulica na faixa de números de Reynolds em que o equipamento foi calibrado. Como o valor de  $C_D$  está incluído nos coeficientes  $\beta_0$ , que são constantes, a redução de  $C_D$  com o aumento da carga reflete-se nas estimativas de  $\beta_1$ , fazendo com que seus valores sejam, de um modo geral, menores que o valor teórico.

<sup>9</sup> (a) escoamento no compartimento superior da caixa de captação e (b) suportes do flutuador e escala para regulagem da carga hidráulica sobre os orifícios

**Quadro 4.** Equações de regressão e coeficientes de determinação das curvas características, área total de escoamento e vazões mínima e máxima obtidas para as diferentes combinações de tampões.

Combinação	Equação de regressão	Coefficiente de determinação - $\bar{R}^2$	Área total <sup>a</sup> - $A$ (m <sup>2</sup> )	Vazão mínima <sup>b</sup> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Vazão máxima <sup>c</sup> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
1	$\hat{Q}_{reg} = 0,0090^{**} h_C^{0,4405^{**}}$	0,9936	0,003232	0,003271	0,004439
2	$\hat{Q}_{reg} = 0,0135^{**} h_C^{0,4421^{**}}$	0,9960	0,004694	0,004859	0,006602
3	$\hat{Q}_{reg} = 0,0165^{**} h_C^{0,4491^{**}}$	0,9973	0,006359	0,005875	0,008020
4	$\hat{Q}_{reg} = 0,0214^{**} h_C^{0,4473^{**}}$	0,9979	0,007926	0,007634	0,010409
5	$\hat{Q}_{reg} = 0,0241^{**} h_C^{0,4380^{**}}$	0,9980	0,009590	0,008796	0,011916
6	$\hat{Q}_{reg} = 0,0311^{**} h_C^{0,4358^{**}}$	0,9989	0,012717	0,011388	0,015403
7	$\hat{Q}_{reg} = 0,0412^{**} h_C^{0,4432^{**}}$	0,9981	0,015852	0,014851	0,020192
8	$\hat{Q}_{reg} = 0,0525^{**} h_C^{0,4553^{**}}$	0,9958	0,020644	0,018386	0,025208
9	$\hat{Q}_{reg} = 0,0692^{**} h_C^{0,5054^{**}}$	0,9900	0,025435	0,021622	0,030693

10

**Figura 10.** Curvas características do regulador automático de vazão.10 <sup>a</sup> Soma das áreas dos orifícios totalmente abertos e/ou parcialmente abertos;<sup>b</sup> Calculada utilizando-se a curva característica da combinação correspondente, com  $h_C = 0,10$  m;<sup>c</sup> Calculada utilizando-se a curva característica da combinação correspondente, com  $h_C = 0,20$  m;

\*\* Significativo em nível de 1% de probabilidade de erro, pelo teste “t”.

O regulador pode fornecer qualquer vazão entre 0,0033 e 0,0307 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, com exceção do intervalo entre 0,0044 e 0,0049 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Para suprir as vazões abrangidas nesse intervalo, poderia ser incluída uma nova combinação de tampões com área intermediária entre as áreas das combinações 1 e 2. Entretanto, isso implicaria no dimensionamento de um novo tipo de tampão, influenciando negativamente na praticidade de fabricação, ou na utilização de dois tampões com áreas diferentes, acarretando assimetria entre os jatos oriundos dos orifícios e uma provável inclinação do tubo deslizante em relação ao eixo vertical.

As diferenças entre os valores reais das áreas totais de escoamento, apresentados no Quadro 4, e os valores arbitrados no projeto, apresentados no Quadro 2, são bastante pequenos. Com exceção da Combinação 2, onde a diferença entre o valor real e o de projeto foi de 2,3%, a diferença entre os valores reais e os de projeto foram menores do que 1% da área real.

Por outro lado, os valores das vazões mínima e máxima, obtidos a partir das curvas características, apresentados no Quadro 3, e aqueles calculados durante o projeto com a Equação 1, apresentados no Quadro 2, são bastante diferentes. Em geral, as vazões obtidas a partir das curvas características foram maiores do que as calculadas pela Equação 1. Provavelmente, isso ocorreu porque nos cálculos efetuados com a Equação 1 utilizou-se  $C_d = 0,61$ . Na prática, o valor de  $C_d$  pode ter sido superior a 0,61, fazendo com que as vazões fornecidas pelo regulador fossem maiores do que as previstas no projeto. Outro fator que pode ter contribuído para essa diferença é o vazamento de água que ocorre na folga entre os tubos guia e deslizante.

Por outro lado, para a Combinação 9 as vazões mínima e máxima obtidas com as curvas características foram menores do que as de projeto. Nessa combinação, a vazão é alta, ocasionando grande turbulência no interior do tubo deslizante, o que pode ter contribuído para a redução do  $C_d$  a valores menores do que 0,61.

A regulagem da vazão fornecida pelo regulador deve ser realizada a partir do Quadro 4, determinando-se a combinação de tampões cuja faixa de vazões abrange a vazão desejada. Definida a combinação a ser utilizada, deve-se determinar a carga hidráulica correspondente

a essa vazão utilizando-se a curva característica da combinação escolhida (Figura 10). Para tanto, traça-se uma reta horizontal que intercepte o eixo das ordenadas no ponto correspondente à vazão desejada. Posteriormente, traça-se uma reta vertical que passe pela intersecção entre a curva da combinação escolhida e a reta horizontal previamente traçada. Finalmente, determina-se o ponto de intersecção entre a reta vertical e o eixo das abscissas, que fornecerá o valor da carga hidráulica correspondente à vazão desejada.

Após a definição da combinação e da carga hidráulica a serem utilizadas, bem como da fixação dos tampões de acordo com a disposição apresentada no Quadro 1, coloca-se o regulador em funcionamento e posiciona-se o flutuador de forma que o nível da água na graduação da régua do tubo deslizante corresponda à carga hidráulica obtida.

Apesar de o vazamento de água na folga entre os tubos guia e deslizante não ter sido quantificado de forma isolada, os valores das vazões fornecidas pelo equipamento já incluem este vazamento. Recomenda-se a realização de testes complementares para determinação da vazão na folga entre os tubos, bem como da precisão do equipamento no controle de vazão em toda a sua faixa de operação.

## CONCLUSÕES

- O regulador automático de vazão desenvolvido atende aos propósitos para os quais foi projetado, constituindo-se num equipamento de baixo custo de fabricação e operação, capaz de ajustar a carga hidráulica sobre o centro de gravidade dos orifícios através dos quais ocorre o escoamento e, dessa forma, minimizar o efeito das oscilações no nível da água a montante sobre a vazão derivada;
- A vazão fornecida pelo equipamento pode ser regulada tanto pela alteração da área de escoamento quanto pelo ajuste da carga hidráulica sobre os orifícios. Com as duas opções de regulagem, é possível obter qualquer vazão de 0,0033 a 0,0307 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, com exceção do intervalo entre 0,0044 e 0,0049 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, possibilitando a utilização do equipamento em tomadas de água para lotes irrigados de pequeno e médio porte.

**AGRADECIMENTOS**

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

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AMARAL, L.G.H.; RIGHES, A.A.; SOUZA FILHO, P.S.; DALLA COSTA, R. Automatic regulator for channel flow control on flooded rice. **Agricultural Water Management**, v.75, n.3, p.184-193, 2005.

AUTODESK AutoCAD 2004. Version 2004.0.0. Autodesk, 2003. 1 CD-ROM.

ÁVILA, G.S. **Hidraulica General**: fundamentos. v. 1. México: Editorial Limusa S. A., 1974. 551 p.

BOS, M.G. (Ed.). **Discharge measurement structures**. 3. ed. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1989. 401 p.

CRAIG, K.R.; ELSER, P.G.; ALLEN, L.; LANGEMAN, P. **Irrigation gate system**. Int. Cl. E02B 7/40. U.S. n. 7.114.878 B2, 19 Nov. 2004, 3 Out. 2006.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The state of food insecurity in the World 2008**: high food prices and food security, threats and opportunities. Roma: FAO, 2008. 56 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION; INTERNATIONAL FUND FOR AGRICULTURAL DEVELOPMENT. Water for Food, Agriculture and Rural Livelihoods. In: UNESCO. **Water, a shared responsibility**: the United Nations world water development report 2. New York: Berghahn Books, 2006. p.243-273.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T. **Introdução à**

**mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2001. 504 p.

HERNANDEZ, N.M. Irrigation Structures. In: DAVIS, C.V.; SORENSEN, K.E. (Eds.) **Handbook of Applied Hydraulics**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1969. p.34.1-34.53.

KUMAR, P.; MISHRA, A.; RAGHUWANSHI, N.S.; SINGH, R.J. Application of unsteady flow hydraulic model to a large and complex irrigation system. **Agricultural Water Management**, v.54, n.1, p.49-66, 2002.

MATHEUS, M. A. **Aprenda fiberglass**: fibra de vidro. Ribeirão Preto, 2002. 132 p.

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

ROUSE, H. **Hidraulica**: mecanica elemental de fluidos. Buenos Aires: Dossat, 1951. 337 p.

SAS System for Windows. Version 8.0. SAS Institute Inc., 1999. 2 CD-ROM.

SHAYANI, R.A.; OLIVEIRA, M.A.G.; CAMARGO, I.M.T. Comparação do custo entre energia solar fotovoltaica e fontes convencionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 5, 2006, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Planejamento Energético, 2006. p. 469-484.

STRINGAM, B.L.; PUGH, C.A. **Automated farm turnout**. Int. Cl<sup>7</sup>. F16K 21/18. U.S. n. 2002/0066484 A1, 06 Dez. 2000, 06 Jun. 2002.

TUCCI, C.E.M.; HESPANHOL, I.; NETTO. O. M. **Gestão da água no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2001. 156 p. o autor deve preencher