



ISSN 1518-4277

Dezembro, 2005

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 44

Desenvolvimento e Avaliação de Dispositivos de Controle de Vazão Derivada em Canais de Irrigação

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade
Paulo Emílio Pereira de Albuquerque
Bruno Leite Teixeira Perroni
Tiago Alves da Silva
Flávio de Castro de Silva
Kazuyochi Ota Junior
Fernando Falco Pruski
Gabriel Roberto Oliveira

Sete Lagoas, MG
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Milho e Sorgo

Rod. MG 424 Km 45
Caixa Postal 151
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG
Fone: (31) 3779 1000
Fax: (31) 3779 1088
Home page: www.cnpms.embrapa.br
E-mail: sac@cnpms.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Antônio Carlos de Oliveira
Secretário-Executivo: Paulo César Magalhães
Membros: Camilo de Lélis Teixeira de Andrade, Cláudia Teixeira
Guimarães, Carlos Roberto Casela, José Carlos Cruz e Márcio
Antônio Rezende Monteiro

Supervisor editorial: Clenio Araujo
Revisor de texto: Dilermando Lúcio de Oliveira
Normalização bibliográfica: Maria Tereza Rocha Ferreira
Editoração eletrônica: Dilermando Lúcio de Oliveira

1ª edição

1ª impressão (2005): 200 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Andrade, Camilo de Lelis Teixeira de.

Desenvolvimento e avaliação de dispositivos de controle de vazão derivada em canais de irrigação / Camilo de Lelis Teixeira de Andrade...[et al.]. – Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005.

35 p. ; 21 cm. - (Documentos / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1518-4277 ; 44).

1. Irrigação. 2. Hidráulica. 3. Comporta I. Andrade, Camilo de Lelis Teixeira de. II. Série

CDD 631.7

© Embrapa 2005

Autores

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo. Caixa Postal 151. CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG. E-mail: camilo@cnpmis.embrapa.br

Paulo Emílio Pereira de Albuquerque

Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo

Bruno Leite Teixeira Perroni

Estudante de Engenharia Agrícola da UFLA

Tiago Alves da Silva

Estudante de Engenharia Agrícola da UFLA

Flávio de Castro de Silva

Estudante de Engenharia Agrícola da UFLA

Kazuyochi Ota Junior

Estudante de Engenharia Agrícola da UFLA

Fernando Falco Pruski

Professor da Universidade Federal de Viçosa

Gabriel Roberto Oliveira

Estudante, Téc. em Mec., Esc. Téc. Mun. Sete Lagoas

Sumário

Introdução	7
Material e Métodos	10
Calibrador do Sensor Eletrônico de Vazão	13
Avaliação do Hidrômetro com Turbina Tangencial	14
Aferição da Comporta Tipo Módulo de Máscara Modelo XX ₁	14
Desenvolvimento e Avaliação do Protótipo 1	15
Desenvolvimento e Avaliação do Protótipo 2	17
Desenvolvimento e Avaliação do Protótipo 3	18
Avaliação do Protótipo 3 no Projeto Gorutuba	20
Resultados e Discussão	21
Sensor Eletrônico de Vazão	21
Hidrômetro com Turbina Tangencial	23
Comporta Tipo Módulo de Máscara XX ₁	24
Protótipo 1	25
Protótipo 2	27
Protótipo 3	29
Desempenho do Protótipo 3 no Projeto Gorutuba	30
Conclusões	33
Referências Bibliográficas	34
Agradecimentos	35

Desenvolvimento e Avaliação de Dispositivos de Controle de Vazão Derivada em Canais de Irrigação

Camilo de Lelis Teixeira de Andrade

Paulo Emílio Pereira de Albuquerque

Bruno Leite Teixeira Perroni

Tiago Alves da Silva

Flávio de Castro de Silva

Kazuyochi Ota Junior

Fernando Falco Pruski

Gabriel Roberto Oliveira

Introdução

A distribuição de água do perímetro de irrigação do Gorutuba, situado em Nova Porteirinha, no Norte de Minas Gerais, é do tipo canais abertos elevados (acéquias). A derivação de água para os lotes é feita por gravidade, através de comportas metálicas do tipo módulos de máscara (Figura 1), que operam como orifícios retangulares. Variações de nível no canal, provocadas por alterações na demanda de água nos lotes ou por variações na liberação de água da barragem Bico da Pedra, afetam a vazão das comportas. No caso do módulo de máscara modelo XX₁, empregado no perímetro, a vazão derivada pode variar 10% acima ou abaixo da vazão nominal da comporta, em decorrência de uma oscilação de 11 cm no nível de água no canal (Equipamentos, 2004).



Figura 1. Comporta tipo módulo de máscara modelo XX₁ (à esquerda) e estrutura hidráulica tipo “bico de pato” (à direita), no projeto Gorutuba. Nova Porteirinha, MG.

A eficiência de distribuição de água pelo canal principal e secundários do perímetro é de cerca de 54,7% (Distrito, 2003), o que é muito baixo, considerando que a região é carente desse recurso e há sinais claros de conflitos pelo uso do mesmo. Além do mais, estima-se que cerca de 30% da água distribuída aos lotes não está sendo cobrada, por erros de medição da vazão derivada. É comum o represamento da água no canal a jusante da comporta, fazendo com que a mesma opere com o nível acima do recomendado e, assim, libere uma vazão acima da nominal. Em outras situações, especialmente onde foram removidas as estruturas hidráulicas chamadas de “bico de pato” (Figura 1), as comportas tipo módulo de máscara operam com o nível do canal abaixo do recomendado e, portanto, liberam uma vazão de água para o lote abaixo do que será cobrado. Verifica-se, portanto, a necessidade do desenvolvimento de um dispositivo que possibilite a derivação de água com vazão constante, independente do nível da água no canal ou que permita a medição, em um certo período de tempo, do volume de água derivado para os lotes. Um dispositivo melhorado para derivação de água dos canais de irrigação contribuiria também para o uso mais racional da água, num contexto de escassez desse recurso, que vem se agravando a cada ano na região.

Vários métodos foram desenvolvidos, na década de 1970, para derivação e medição de água em canais abertos empregados em projetos de irrigação. Schuster (1970) descreve vários deles, com detalhes práticos de aplicação. O mais comum é o do tipo orifício com carga constante, abordado em detalhes por Aisenbrey Jr. et al. (1978). Todos esses métodos, todavia, consideram que o nível de água no canal a montante da derivação não varia, permitindo que os orifícios operem com carga constante. Na prática, manter o nível de água constante nos canais é uma tarefa difícil, principalmente em sistemas de distribuição mais antigos, que utilizam canais com declividade elevada, como é o caso do sistema secundário do projeto Gorutuba.

Os manuais de hidráulica abordam com detalhes a teoria que descreve o fluxo de água em orifícios, bocais e tubos curtos, geralmente empregados nas derivações de água em canais (Azevedo Netto, 1973a; Daker, 1976; Flammer et al., 1986; Lencastre, 1972). A equação básica para estes dispositivos é (Azevedo Netto, 1973a):

$$Q = C_d A \sqrt{2 g H} \quad (1)$$

Em que:

Q = vazão, m³/s;

C_d = Coeficiente de descarga, adimensional;

A = Área da secção, m²;

g = Aceleração devido à gravidade, 9,81 m/s²;

H = Carga de água em relação ao centro do orifício, incluindo o componente de energia cinética ($V^2/2g$), m.

O coeficiente de descarga C_d é de difícil derivação teórica, pois é afetado por vários parâmetros dependentes da forma de entrada e saída do orifício e da própria vazão de água. Para orifícios constituídos por tubos curtos (maiores que os bocais), o valor de C_d pode ser estimado através da relação comprimento/diâmetro (L/D). Para relações L/D entre 10 e 30, os

valores de C_d variam de 0,77 a 0,70 (Azevedo Netto, 1973a). Na prática, o valor de C_d deve ser determinado experimentalmente para um certo orifício e depois empregado para estimar a vazão com a equação 1.

Outras formas de medição de água, aplicáveis principalmente para tubulações, são descritas por Azevedo Netto (1973b) e Denículi (1993). Hidrômetros são largamente empregados em sistemas pressurizados de distribuição de água de cidades. Para sistemas de irrigação em que a água pode carrear detritos, os hidrômetros mais modernos utilizam turbina tangencial, nos quais esta fica localizada na borda da tubulação, deixando uma passagem maior para a água (Elster, 2004). Alguns desses medidores podem ser dotados de dispositivos eletrônicos que permitem a contagem de pulsos da turbina e, quando conectados a registradores eletrônicos, registram a vazão e/ou o volume com o tempo. Outros medidores já dispõem do mecanismo de contagem de pulsos embutido em seu sistema e basta serem conectados aos registradores eletrônicos para permitirem a monitoração da vazão (Nivetec, 2004a).

Considerando o exposto, propôs-se o presente trabalho, com o objetivo de desenvolver um dispositivo que permita derivar vazões constantes de água de um canal elevado, independente da variação no nível da água no canal, calibrar o dispositivo para diferentes vazões derivadas e comparar as medições com outros métodos de medição.

Material e Métodos

Uma parte do projeto foi desenvolvida na área experimental da Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, e outra parte em Nova Porteirinha, MG, onde fica localizado o distrito de irrigação Gorutuba. Em Sete Lagoas, foram construídos e testados, em situação controlada, os protótipos dos mecanismos de controle de derivação de água de canais. Em Nova Porteirinha, o protótipo mais promissor foi testado numa derivação existente no lote destinado às pesquisas da Embrapa Milho e Sorgo. Um

trabalho inicial foi realizado no Laboratório de Hidráulica de Universidade Federal de Viçosa, para calibração do sensor eletrônico de vazão (Figura 2). Em 2004, foi realizada uma visita ao projeto Gorutuba, para levantamento

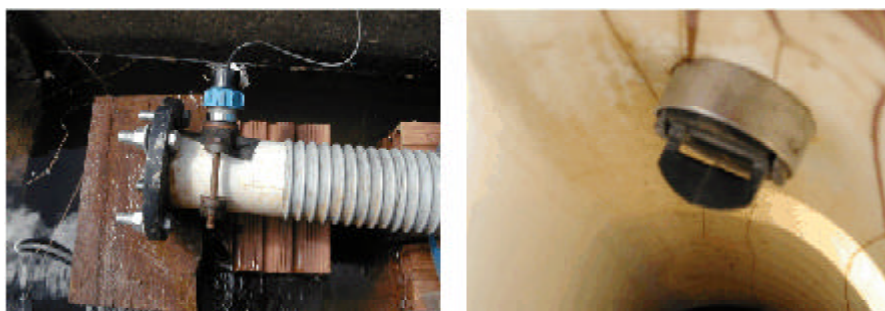


Figura 2. Sensor de vazão instalado no tubo (à esquerda) e vista da turbina tangencial na parte interna do tubo (à direita).

de dados aproximados de variação de nível da água no canal, desníveis existentes nas tomadas de água e dimensões gerais da estrutura hidráulica, para que o protótipo a ser desenvolvido pudesse ser posteriormente testado em campo.

Para propiciar a avaliação dos protótipos em uma condição controlada, foi construída, na Embrapa Milho e Sorgo, em Sete Lagoas, MG, uma estrutura de alvenaria que permite o controle de nível da água e, assim, simule as oscilações de um canal. A caixa de alvenaria foi dividida em dois compartimentos, sendo o compartimento 1 ligado a um açude e o compartimento 2 ligado ao primeiro por meio de um sifão invertido dotado de registro. No primeiro compartimento, o nível da água é controlado através da variação da altura da saída dos mangotes flexíveis. Variações do nível nesse reservatório simulam as oscilações de nível do canal. No compartimento 2, foram instalados orifícios constituídos de tubos de PVC de esgoto com diferentes diâmetros (Figura 3). Na concepção inicial do projeto, o nível no compartimento 1 seria forçado a variar para simular oscilações no nível do canal, enquanto procurava-se manter constante,

através de algum dispositivo hidráulico, o nível no compartimento 2, fazendo com que a vazão pelos orifícios de PVC fosse constante. No decorrer do projeto, percebeu-se que seria mais vantajoso atuar no registro do sifão para variar o nível no compartimento 2 e desenvolver um dispositivo controlador de nível portátil, fora desse compartimento, porém conectado ao mesmo através do tubo de PVC de 100 mm.



Figura 3. Estrutura de controle de nível de água para teste dos protótipos. Sete Lagoas, MG.

Devido às dificuldades e ao custo para o desenvolvimento dos protótipos em tamanho real, foram inicialmente desenvolvidos e testados dois protótipos em tamanho reduzido. Posteriormente, os dois mecanismos foram construídos e testados em escala normal. Um terceiro protótipo foi também desenvolvido em escala normal e testado posteriormente, o qual também será descrito adiante.

Todos os protótipos se basearam no princípio da torneira-bóia de caixa d'água, pelo qual se procura manter constante o nível de água. Três tipos de flutuadores foram construídos. Um, constituído de três segmentos de tubo de PVC de esgoto, dotados de tampões de chapa de PVC soldadas a quente, com diâmetro de 150 mm e comprimento de 600 mm. Um segundo foi construído com dois segmentos de tubo de PVC de esgoto de 200 mm de diâmetro por 300 mm de comprimento. Um flutuador alternativo foi preparado com o segmento inferior de uma bombona de plástico de 50 L (Figura 4). Nos Protótipos 1 e 2, foram empregados flutuadores de tubos de PVC. No Protótipo 3, foi utilizado o de segmento de bombona.



Figura 4. Flutuador construído de tubo de PVC de esgoto (à esquerda) e de segmento de bombona de 50 L (à direita).

Calibração do Sensor Eletrônico de Vazão

O sensor eletrônico de vazão, modelo + GF + SIGNET (Nivetec, 2004a), consiste em um mecanismo dotado de uma turbina tangencial (Figura 2) situada na extremidade de um pequeno segmento de tubo de aço, que pode ser inserido no conduto onde se deseja medir a vazão do líquido.

Para a calibração do sensor, este foi inserido, com um ângulo de 45° em relação ao plano vertical, em um segmento de tubo de PVC de irrigação de 100 mm. Este tubo foi conectado a uma fonte de água cuja vazão pôde variar de 2,7 L/s a 22,7 L/s. A descarga do segmento de tubo foi feita em

um reservatório graduado, permitindo a medição direta da vazão média. O sensor eletrônico foi conectado a um registrador de dados LogBox (Nivetec, 2004b) programado para tomar leituras a cada três segundos e proceder ao cálculo da média. Foram realizadas seis repetições para cada valor nominal de vazão estável deixada passar pelo tubo onde estava inserido o sensor. A média das leituras do sensor eletrônico foi comparada, por regressão linear, com os valores da medição direta da vazão, para gerar um coeficiente de conversão (K) de leitura em vazão, em litros por segundo. O valor de K, coeficiente angular na equação de regressão da reta ajustada, foi introduzido na memória do sensor eletrônico, para possibilitar a leitura direta da vazão.

Avaliação do Hidrômetro com Turbina Tangencial

Um hidrômetro, com turbina tangencial e diâmetro nominal de 80 mm (Elster, 2004) foi adquirido após o início do projeto, acreditando-se que o mesmo pudesse ser mais preciso que o sensor eletrônico de vazão. Embora o mesmo tenha sido adquirido com o mecanismo para registro automático dos pulsos em um registrador eletrônico, isto não foi possível devido a problemas de comunicação entre o registrador e o computador, necessário para programar o mesmo. Uma avaliação foi realizada, comparando-se as leituras manuais do hidrômetro com as leituras médias registradas no sensor eletrônico, ambos instalados na saída de um dos protótipos de controle de nível. Coeficientes de vazão, Cd, foram determinados empregando-se a equação 1 (Azevedo Netto, 1973a).

Aferição da Comporta Tipo Módulo de Máscara Modelo XX₁

Antes da avaliação do Protótipo 3, no projeto Gorutuba, a vazão derivada pelo módulo de 10 L/s da comporta tipo módulo de máscara, modelo XX₁ (Figura 1), foi aferida para diversos níveis de água no canal. A variação de nível no canal foi gerada obstruindo-se, com uma tábua, a passagem de

água a jusante da tomada d'água. O nível da água no canal foi monitorado com o sensor ultrassônico (Nivetec, 2004c), procedendo-se a leituras médias a cada minuto. Um segmento de tubo de PVC de esgoto de 100 mm, contendo o sensor eletrônico de vazão, foi instalado no orifício da parede construída a jusante da comporta (Figura 5). As leituras médias de vazão foram também registradas a cada minuto. Os dados de vazão registrados foram comparados com o valor nominal da comporta e com os desvios esperados em decorrência da flutuação no nível da água.



Figura 5. Sensor de nível (à esquerda) e o mesmo sensor instalado em um poço tranquilizador em um canal do projeto Gorutuba (à direita). Nova Porteirinha, 2005.

Desenvolvimento e Avaliação do Protótipo 1

No Protótipo 1, quando a água atinge um determinado nível, o flutuador (bóia) atua no sentido de fechar uma portinhola sobre a saída de um tubo, estando, portanto, sujeito a grandes esforços e turbulências (Figura 6). O nível da água é definido em função do comprimento da corrente que prende o flutuador e é limitado, também, pela altura do tambor. Esse dispositivo foi construído com conexões de ferro galvanizado com diâmetro nominal de duas polegadas e montado em um tambor metálico de 200 litros. A entrada e saída de água do tambor foram construídas com segmentos de tubos de ferro galvanizado de duas polegadas. O flutuador empregado nesse caso foi o de dois tubos de PVC de 200 mm.



Figura 6. Protótipo 1, indicando a portinhola (à esquerda) e flutuador em operação (à direita)

No tubo de saída, foi instalado o sensor eletrônico de vazão (Nivetec, 2004a), que, por sua vez, foi conectado ao registrador eletrônico de dados de dois canais LogBox (Nivetec, 2004b). O registrador foi programado para tomar seis leituras a cada 30 segundos e determinar a média, que era, então, armazenada.

Os valores de nível da água no compartimento 2 (que simulou o nível da água no canal) foi monitorado empregando-se uma mangueira transparente do tipo “nível de pedreiro”, colada em uma régua de madeira, tendo como escala uma trena metálica de dois metros, graduada em milímetros. O nível da água dentro do tambor foi monitorado com o sensor eletrônico ultrassônico (Nivetec, 2004c), montado em um poço tranquilizador construído com um tubo de PVC tipo esgoto de 75 mm e acoplado ao tambor através de uma flange de caixa d'água. A amostragem e o registro do nível seguiram o mesmo critério da monitoração da vazão, exceto para o nível do compartimento 2, que foi lido a cada minuto. O mesmo registrador eletrônico de dois canais foi empregado para armazenar os dados de ambos os sensores. Todas as medidas de nível foram tomadas em relação ao fundo do tambor e, posteriormente, convertidas para altura de água em relação ao centro do orifício de saída.

Fez-se variar nível da água a montante do Protótipo 1 abrindo ou fechando o registro do sifão que interliga os compartimentos 1 e 2, simulando, dessa forma, as oscilações de um canal de irrigação. Isto permitiu que a habilidade do Protótipo 1 em manter o nível de água constante sobre o orifício de saída e, conseqüentemente, a vazão de saída constante, fosse avaliada para diferentes condições de operação do canal.

Desenvolvimento e Avaliação Protótipo 2

No Protótipo 2, o fluxo de água se dá na direção do fechamento da válvula, que é mantida aberta através de um contrapeso (Figura 7). Esse aparato foi também construído com conexões de ferro galvanizado de 2,5 polegadas e montado, para fins de teste, na parede que divide os dois compartimentos da caixa de alvenaria. O flutuador empregado foi o de três tubos de PVC de 150 mm.



Figura 7. Protótipo 2 mostrando a válvula de controle de fluxo, iniciando a operação e indicando o nível constante da água sobre o orifício

Os procedimentos para avaliação do Protótipo 2 foram semelhantes aos empregados para testar o Protótipo 1. As flutuações no nível da água no compartimento 1 (que, nesse caso, simulava o canal) foram proporcionadas pela variação da altura dos mangotes conectados ao mesmo (Figura 3). Os valores da altura de água foram monitorados utilizando-se os mesmos instrumentos e os mesmos tempos de amostragem do Protótipo 1.

A vazão de saída do orifício foi medida com o sensor eletrônico (Figura 2) instalado no segmento de tubo de PVC de 50 mm chumbado na parede do

compartimento 2. Como esse protótipo causou grande perda de carga devido às passagens estreitas para a água, o diâmetro do orifício de saída teve que ser reduzido para 37 mm. Utilizou-se, para isso, um “cap” de PVC, com anel de borracha, com um furo no centro. Os procedimentos de leitura e registro dos dados foram idênticos aos empregados no teste do Protótipo 1.

Desenvolvimento e Avaliação do Protótipo 3

O Protótipo 3 foi construído em tamanho normal, empregando uma bombona de plástico azul, com capacidade para 200 litros. A entrada de água foi feita com um tubo de PVC tipo esgoto, de 100 mm, conectado a um segmento de tubo de ferro soldado a uma flange de chapa com junta de borracha plana. A saída de água também foi construída empregando flange de chapa, conectada a um tubo de PVC tipo esgoto de 100 mm, no qual foram instalados o sensor eletrônico de vazão (Nivetec, 2004a) e o hidrômetro de turbina tangencial (Elster, 2004) (Figura 8).



Figura 8. Protótipo 3 indicando a flange para conexão da entrada e saída de água e haste de acoplamento do flutuador.

O mecanismo de controle de nível consistiu de um flutuador construído com o segmento inferior de uma bombona de 50 L, preso, através de uma haste rígida, a uma barra que estrangula a extremidade de um mangote flexível de baixa pressão conectado à entrada de água (Figura 9). Desta forma, procurou-se manter o nível de água constante dentro da bombona e, assim, manter constante a vazão pelo tubo de saída.



Figura 9. Protótipo 3 indicando o mecanismo de estrangulamento do mangote (à esquerda) e o flutuador (à direita).

Os procedimentos de monitoração de nível e de vazão empregados para avaliar esse protótipo foram similares aos utilizados nos Protótipos 1 e 2. O tempo de amostragem dos sensores de vazão e de nível passou de 30 segundos para um minuto, sempre armazenando a média de leituras, que, nesse caso, foram 12. Da mesma forma, o nível de água no compartimento 2 da caixa de alvenaria, que simulou o canal, foi registrado, manualmente, a cada minuto. Neste ensaio, já havia sido adquirido o hidrômetro de turbina tangencial que também foi lido, manualmente, a cada minuto, uma vez que o registrador de dados do mesmo apresentou defeito de fabricação.

Fez-se variar o nível de água no compartimento 2 (canal) para cima e para baixo, numa faixa de 30 a 40 cm, utilizando-se, para tal, o registro do sifão invertido, que liga os dois compartimentos da caixa de alvenaria.

Vários ensaios foram realizados com este protótipo, para que se pudesse avaliar a repetibilidade do mecanismo de controle de nível em diferentes condições de operação do canal, bem como o desempenho dos sensores de nível e de vazão.

Avaliação do Protótipo 3 no Projeto Gorutuba

O dispositivo que apresentou melhor desempenho e praticidade, no caso o Protótipo 3, foi testado em uma tomada de água de um canal secundário do projeto Gorutuba. Nesse ponto do canal, havia uma comporta do tipo módulo de máscara, modelo XX₁ (Equipamentos, 2004), comumente utilizada no perímetro (Figura 1).

O Protótipo 3 foi acoplado ao tubo de PVC de 100 mm, previamente chumbado em uma parede construída a jusante da saída da comporta. Dessa forma, evitou-se danificar o canal de irrigação elevado (acéquia) do projeto.

Para a avaliação do Protótipo 3, foram utilizados o sensor ultrassônico de nível, instalado em um poço tranquilizador conectado na lateral da bombona, o sensor eletrônico de vazão, conectado na tubulação de PVC de 100 mm da saída e o hidrômetro de turbina tangencial de 80 mm, acoplado a jusante do sensor eletrônico de vazão. O nível de água no canal foi registrado manualmente, lendo-se a régua do nível de borracha tipo pedreiro.

Durante o teste do Protótipo 3, todos os módulos da comporta XX₁ foram abertos, permitindo a passagem total de água pelos orifícios retangulares. Fez-se variar o nível de água no canal obstruindo-se a passagem da água imediatamente a jusante da tomada de água, empregando-se, para tal, uma tábua (Figura 10). Esse procedimento permitiu fazer o nível variar para cima, até próximo do transbordamento do canal, e para baixo, até deixar a comporta XX₁ operar com uma carga hidráulica inferior ao recomendado. Vale lembrar que a estrutura de controle de nível tipo “bico de pato” (Figura

1) originariamente existente no canal havia sido removida já há algum tempo pelo pessoal da operação e manutenção do projeto. Os testes foram realizados por várias horas e com repetições em dias diferentes. Todos os dados de nível foram convertidos para altura de água em relação ao centro do orifício de saída.



Figura 10. Represamento do canal (à esquerda) junto a tomada de água onde o Protótipo 3 foi testado em um canal do projeto Gorutuba. Nova Porteirinha, MG, 2005.

Resultados e Discussão

Sensor Eletrônico de Vazão

Os dados de calibração do transmissor de vazão são apresentados na Tabela 1. Durante o ensaio, a vazão variou de 2,9 a 22,7 L/s, englobando a faixa de valores na qual o instrumento seria empregado posteriormente. Embora os erros padrão das leituras do transmissor de vazão sejam relativamente baixos, os valores do fator K variaram significativamente, de 4,4080 a 4,9552, com uma média de 4,6226. Esses valores estão acima de 4,301, recomendado pelo fabricante para tubos de diâmetro nominal de 100 mm (Nivetec, 2004a). Tais desvios podem ser devido às diferenças no diâmetro interno dos tubos nacionais e à forma de inserção do instrumento no tubo. O valor do fator K utilizado nas medições posteriores foi considerado o coeficiente angular da equação de regressão entre os valores de vazão, determinados pelo método direto, e as leituras do sensor

eletrônico (Figura 11). Esse valor, de 4,9668, é mais consistente para toda a faixa de vazão para qual o sensor foi calibrado e, por isso, foi adotado.

Nota-se que, à medida que diminui a vazão, menor é o erro nas leituras do sensor eletrônico.

Tabela 1. Leituras médias do transmissor de vazão + GF + SIGNET, com os respectivos erros padrão, valores medidos de vazão e fator K de conversão de leitura em vazão, em L/s.

Descrição	Pontos de Medição de Vazão					
Leitura do +GF+ SIGNET	112,5	90,9	54,9	41,8	23,3	12,8
Erro padrão da leitura	1,3	1,4	1,5	-*	0,5	0,2
Vazão pelo método direto (L/s)	22,7	19,2	12,3	8,9	5,2	2,9
Fator K	4,9552	4,7318	4,4661	4,6966	4,4776	4,4080

* Dados das repetições foram perdidos, embora a média tenha sido retida.

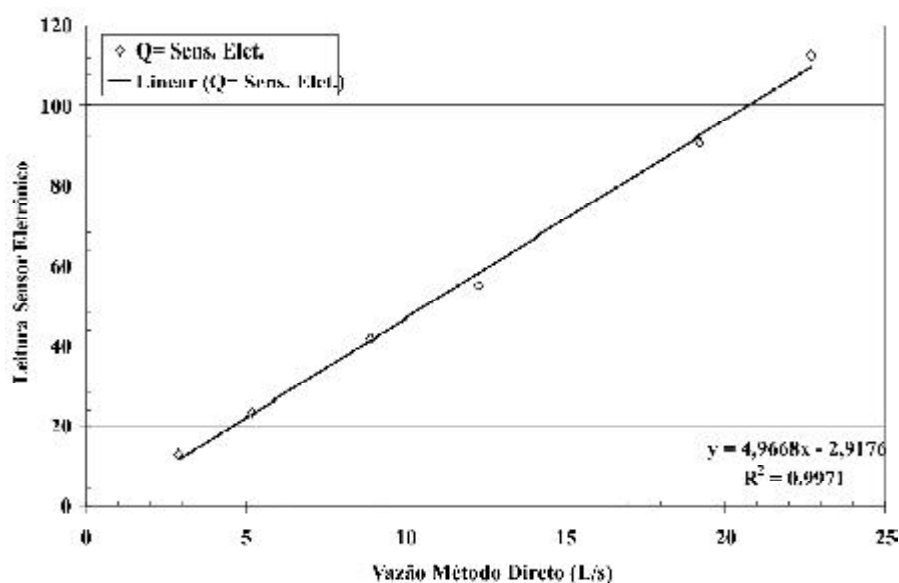


Figura 11. Regressão entre a vazão obtida pelo método direto e as leituras do transmissor de vazão + GF + SIGNET, indicando a equação ajustada.

Hidrômetro com Turbina Tangencial

Os dados de vazão do hidrômetro e do sensor eletrônico (transmissor de vazão), com os respectivos coeficientes de vazão, C_d da equação 1 e o nível de água sobre o orifício de saída são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Vazão do hidrômetro e do sensor eletrônico de vazão, coeficientes de vazão da equação 1 e nível da água sobre o orifício de saída.

Repetição	Vazão Hidrômetro (L/s)	C_d Hidrômetro	Vazão Sensor Eletrônico L/s	C_d	
				Sensor Eletrônico	Nível de Água Sobre Orifício (cm)
1	15,42	0,83	13,70	0,74	69,2
2	13,92	0,75	13,97	0,75	69,1
3	15,17	0,82	14,03	0,76	69,3
4	14,42	0,78	13,90	0,75	69,2
5	14,58	0,79	14,07	0,76	69,4
Média	14,70	0,79	13,93	0,75	69,2
Erro padrão	0,268	0,014	0,065	0,003	0,043

Observa-se que o hidrômetro, tido inicialmente como uma melhor opção para medição das vazões dos protótipos, apresentou uma variação maior nos valores de vazão, indicadas pelo maior erro padrão de média. As leituras foram realizadas manualmente num intervalo de tempo muito curto (a cada três minutos), o que pode introduzir erros no processo. O sensor eletrônico, programado para tomar 36 leituras em três minutos e calcular a média, mostrou-se mais consistente, com menores erros. Observa-se, pela Figura 12, que o hidrômetro tendeu a superestimar a vazão que deveria ser mantida constante, já que a carga de água sobre o orifício do aparato, onde se procedeu às medições, permaneceu praticamente constante ao longo do teste (Tabela 2).

Os valores dos coeficientes de vazão, C_d , variaram de 0,74 a 0,83, sendo mais consistentes, todavia, para o sensor eletrônico. Entretanto, um valor médio geral de 0,77 foi adotado como coeficiente de vazão para estimativa

da vazão empregando-se a equação 1, por ser mais representativo de um número maior de observações.

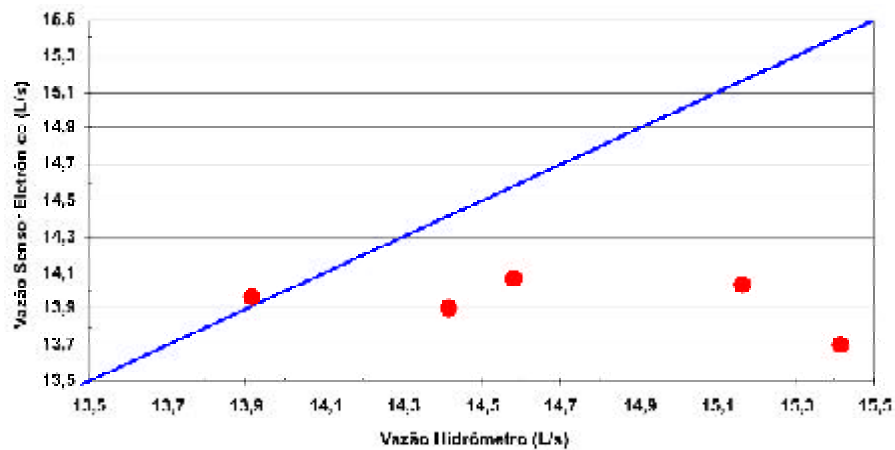


Figura 12. Comparação entre a vazão do hidrômetro de turbina tangencial e do sensor eletrônico + GF + SIGNET

Comporta Tipo Módulo de Máscara Modelo XX₁

Durante o teste do módulo de 10 L/s da comporta existente (Figura 1), fez-se variar artificialmente o nível da água acima da soleira r de 17,3 a 36 cm (Figura 13), o que permitiu aferir o mesmo em condições extremas de operação, uma vez que o nível nominal é de 27 cm. Valores de nível maiores que o limite máximo e menores que o mínimo foram observados durante o ensaio.

A vazão medida com o sensor eletrônico variou de 7,4 a 12,9 L/s (Figura 14), em decorrência de uma oscilação de 18,7 cm no nível do canal (Figura 13). Esses dados são muito diferentes dos valores nominais de 10 L/s para vazão e de 27 cm para nível de água no canal. Todavia, eles estão compatíveis com os relatados pelo fabricante da comporta (Equipamentos, 2004), que admite erros de 20% acima e 20% abaixo da vazão nominal, para variações de nível de 7 cm abaixo e de 4 cm acima do nível nominal

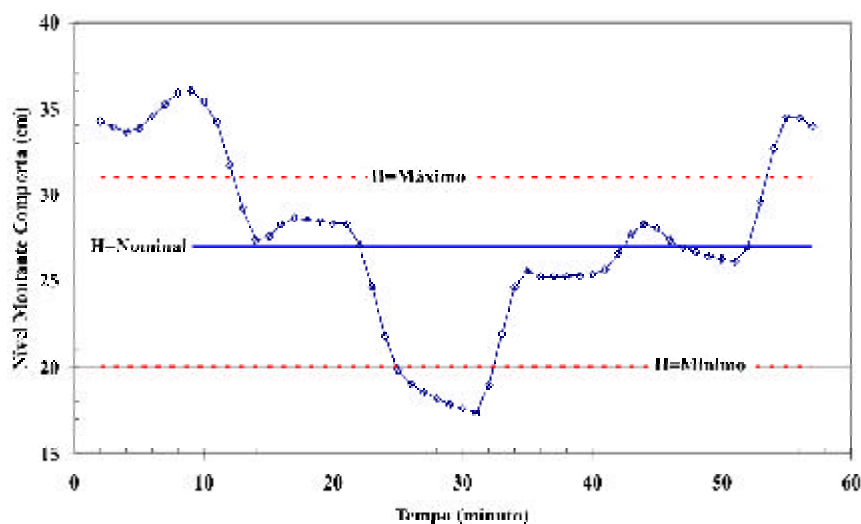


Figura 13. Variação do nível de água no canal secundário do projeto Gortuba a montante da derivação pela comporta tipo módulo de máscara, modelo XX₁. Nova Porteirinha, MG, 2004.

de operação da mesma, respectivamente. Erros da ordem de 5% acima e abaixo da vazão nominal são admitidos pelo fabricante quando o nível da água no canal oscila entre 21,5 e 29,5 cm (Equipamentos, 2004).

Os dados demonstram que as informações fornecidas pelo fabricante estão corretas. Entretanto, a magnitude dos erros é muito grande, considerando que os dados são empregados para cobrar pela água derivada para os lotes dos usuários.

Protótipo 1

Os resultados da avaliação do Protótipo 1 são apresentados na Figura 15. Nota-se que, mesmo com o nível de água no canal variando de 111 a 157 cm, o nível da água sobre o orifício aumentou de 54,5 para 57,1 cm apenas, fazendo com que a vazão de saída no orifício acrescesse de 5,6 para 5,9 L/s, o que representou 5,3% de aumento. Todavia, após a

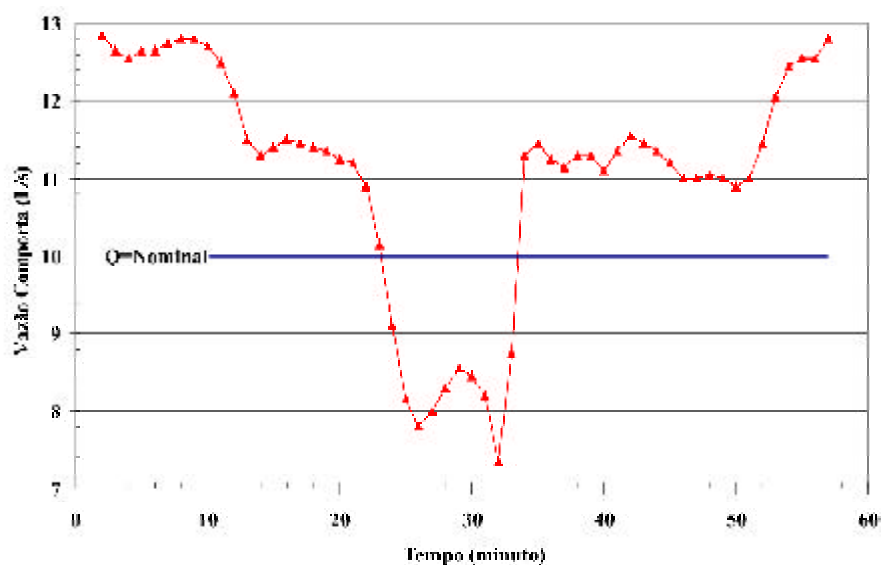


Figura 14. Variação da vazão de água derivada pelo módulo de 10 L/s da comporta tipo módulo de máscara modelo XX₁, instalada no canal secundário do projeto Gorutuba. Nova Porteirinha, MG, 2004.

estabilização do nível no canal em torno de 157 cm, ocorrida por volta dos 35-40 minutos de teste, a vazão derivada variou apenas de 5,61 a 5,68 L/s, ou seja, 1,2%. O Protótipo 1 opera tentando manter o nível sobre o orifício através do fechamento da válvula contra o fluxo de água. Para fechar a válvula, o flutuador tem que exercer uma força equivalente ao peso da coluna d'água que tenta abrir a válvula. Isso dificulta a sua capacidade de manter o nível de água constante sobre o orifício. Embora em tamanho reduzido, a capacidade de regulação desse protótipo é melhor que da comporta existente tipo módulo de máscara, visto que, para uma oscilação de 46 cm no nível de água no canal, a vazão variou pouco mais de 5%.

Uma versão do Protótipo 1, com diâmetro de 100 mm, foi construída e testada, não apresentando, todavia, resultados satisfatórios. Os esforços

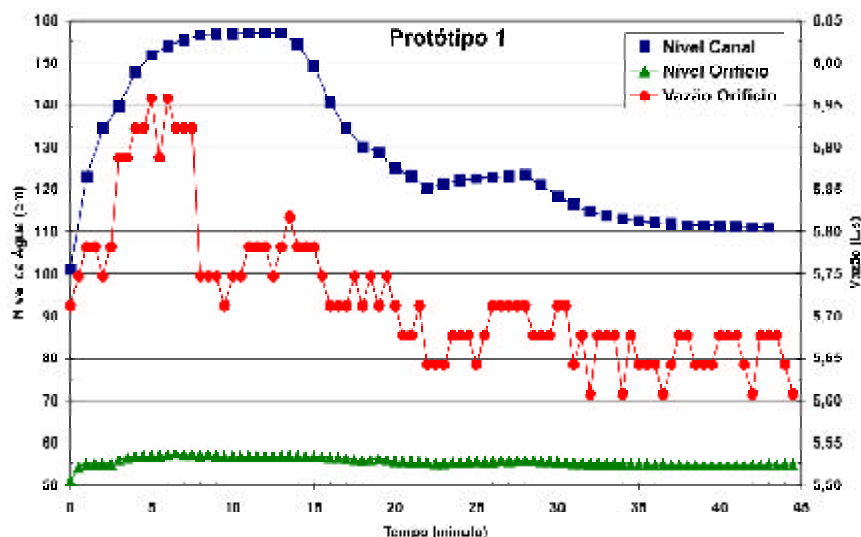


Figura 15. Variação do nível de água à montante do dispositivo de controle e sobre o orifício de saída do Protótipo 1 e variação da vazão derivada. Sete Lagoas, MG, 2004.

exercidos pela água tentando abrir a portinhola eram muito grandes, exigindo um flutuador com área muito grande e estruturas metálicas muito reforçadas, que eram incompatíveis com a concepção do projeto de produzir um aparato simples que pudesse, posteriormente, ser testado em campo. Além do mais, o grau de regulação do mecanismo de controle de nível não foi adequado, devido, principalmente, à turbulência da água dentro do tambor.

Protótipo 2

No caso do Protótipo 2 (Figura 16), nota-se que o grau de regulação da vazão pelo mecanismo é muito melhor. Enquanto o nível do canal variou de 162 cm a 122 cm, o nível sobre o orifício ficou praticamente constante, em 50 cm. A vazão oscilou entre 2,56 e 2,59 L/s, o que representa um desvio de apenas 1,2%. Vale lembrar que, possivelmente, o sensor de

vazão apresenta um erro inerente maior que 1,2%, o que indica que o Protótipo 2 regula com excelente precisão a vazão derivada do canal. A desvantagem desse dispositivo é que ele é mais complexo para ser construído e causa uma perda de carga maior. Enquanto o Protótipo 1 permitiu a derivação de uma vazão em torno de 5,6 L/s, com o nível da água sobre o orifício de cerca de 55 cm, o Protótipo 2, com o nível em 50 cm, só derivou menos da metade da vazão. Para conseguir operar corretamente, mantendo um nível constante de água sobre o orifício, o diâmetro do tubo de saída de água do Protótipo 2 foi reduzido de 50 para 37 mm.

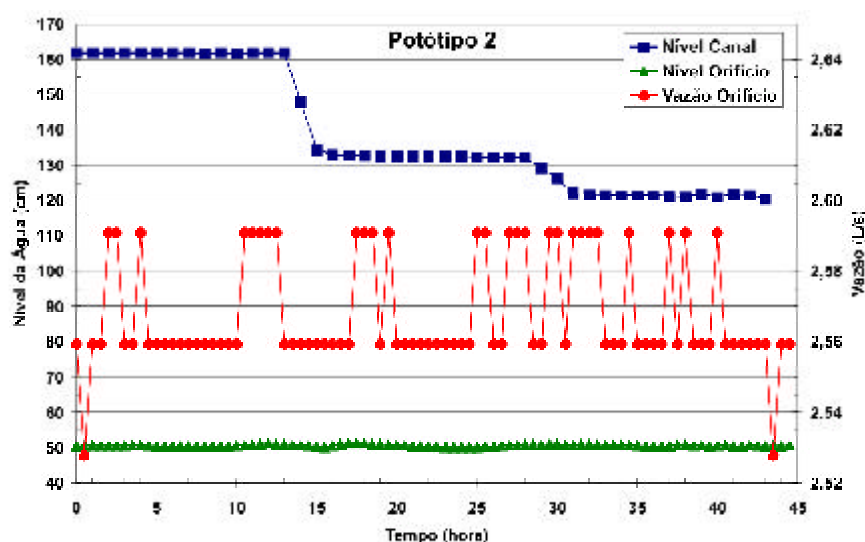


Figura 16. Variação do nível de água à montante do dispositivo de controle e sobre o orifício de saída do Protótipo 2 e variação da vazão derivada. Sete Lagoas, MG, 2004.

Tal como no Protótipo 1, uma versão do Protótipo 2 com diâmetro maior foi construída utilizando conexões de PVC reforçadas com fibra de vidro. Igualmente, essa versão não apresentou resultados adequados. Houve uma grande dificuldade de se definir, na prática, o tamanho do contrapeso para operar com diferentes níveis de água no canal. Uma elevação do nível da

água no canal acima do nível máximo definido para o contra-peso causava o fechamento da válvula, que deixava de operar. A turbulência excessiva da água, causada pelas passagens estreitas, também dificultava a regulação do nível dentro da bombona na qual o dispositivo foi montado. Dessa forma, esse protótipo também foi abandonado.

Protótipo 3

O Protótipo 3 (Figuras 8 e 9), cujo mecanismo de regulação do nível de água sobre o orifício é obtido pela estrangulação de um segmento de mangote flexível, apresentou resultados promissores. Os dados apresentados na Figura 17 são resultantes da média de cinco repetições. Observa-se que os valores de vazão obtidos com o sensor eletrônico (Nivetec, 2004a) são muito consistentes, embora ligeiramente superiores aos obtidos com a equação 1, empregando-se um coeficiente de vazão de 0,77, obtido previamente para o mesmo aparato. Por outro lado, os dados obtidos com o hidrômetro tangencial (Elster, 2004) apresentaram uma variabilidade muito grande, devido à turbulência da água e, possivelmente, devido a erros decorrentes da leitura manual do mesmo em curtos intervalos de tempo.

Para uma variação do nível da água no canal de cerca de 30 cm, o nível sobre o orifício oscilou cerca de 3 cm (Figura 17), ou seja, para um aumento de mais de 25% no nível no canal, o nível sobre o orifício aumentou menos de 7%. Esse mecanismo de controle proporcionou vazões pelo orifício muito estáveis, que variaram de 11,6 a 12,0 L/s, uma oscilação de cerca de 3,4% ao longo do período de teste. Esse aparato apresenta, portanto, vantagens em relação à comporta tipo módulo de máscara empregada no projeto Gorutuba.

Uma desvantagem desse dispositivo para controle de vazão é a perda de carga relativamente elevada causada durante o processo de controle de nível. Observa-se que, durante os testes (Figura 17), a diferença de nível da

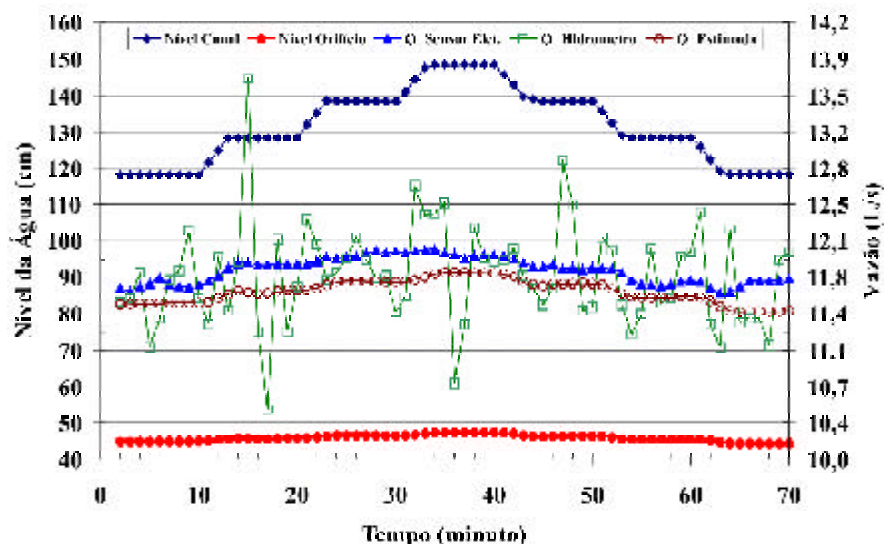


Figura 17. Variação do nível de água à montante do dispositivo de controle e sobre o orifício de saída do Protótipo 3 e variação da vazão derivada obtida por diferentes métodos. Sete Lagoas, MG, 2005.

água entre o canal e o tambor foi de pelo menos 74 cm, o que é elevado, considerando os desníveis existentes nos canais do projeto Gorutuba. É possível, todavia, aprimorar o desenho do aparato para que o mesmo opere com perdas de carga menores. Além do mais, nos ensaios realizados em Sete Lagoas, MG, não se determinou o valor mínimo de desnível para que o aparato funcionasse corretamente.

Desempenho do Protótipo 3 no Projeto Gorutuba

Os resultados dos ensaios realizados com o Protótipo 3 em um canal secundário do Projeto Gorutuba são apresentados na Figura 18. Nota-se que o nível de água no canal variou drasticamente, quando comparado com o que se observa na operação normal do projeto. Isso permitiu que o Protótipo 3 pudesse ser testado em condições extremas de operação.

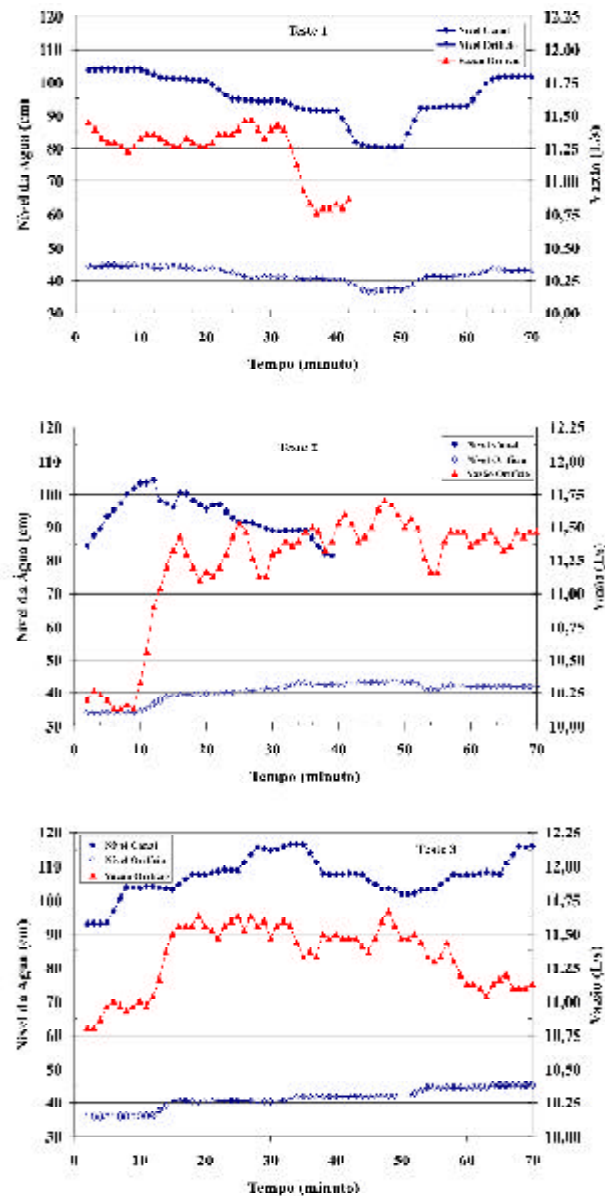


Figura 18. Variação do nível da água no canal do Projeto Gorutuba e sobre o orifício de saída do Protótipo 3 e variação da vazão derivada. Nova Porteirinha, MG, 2005.

No teste 1, o sensor de vazão parou de funcionar após os 42 minutos do início do teste. A vazão derivada oscilou entre 11,25 e 11,50 L/s, quando caiu drasticamente, em decorrência da queda no nível de água no canal a valores muito baixos, fazendo com que o mecanismo que regula o nível sobre o orifício parasse de funcionar. No teste 2, o mecanismo de controle só iniciou o funcionamento após os primeiros 15 minutos de teste, a partir do qual a vazão oscilou entre 11,13 e 11,70 L/s. Da mesma forma, no teste 3, a regulação da vazão só iniciou após 15 minutos de teste, sendo que esta permaneceu entre 11,33 e 11,70 L/s até os 52 minutos, após o qual decresceu sem uma razão óbvia.

Os resultados dos três testes indicam que o aparato inicia o processo de regulação quando o nível da água dentro da bombona é de pelo menos 40 cm. Isto só ocorre quando o nível no canal está acima de 100 cm, o que demonstra que uma perda de carga de 60 cm ocorre nesse mecanismo de controle de vazão.

Uma análise dos três testes permite deduzir que o Protótipo 3 deriva uma vazão média de 11,37 L/s, com uma oscilação máxima de aproximadamente 0,25 L/s para cima e para baixo, independente das flutuações de nível da água no canal ocorridas acima do nível de 100 cm. Isso representa um erro de apenas 2,2% da vazão nominal do aparato. O Protótipo 3 possibilita, portanto, uma acurácia muito maior no controle da vazão derivada do que o que se observou com a comporta tipo módulo de máscara, utilizada no projeto (Figura 14). Vale lembrar que a comporta existente só opera com erros menores de 5% quando o nível de água no canal é mantido em torno de 27 cm, medido em relação à soleira da comporta, o que corresponde a um nível médio de 105,5 cm, medido em relação ao centro do orifício do Protótipo 3. Além do mais, o Protótipo 3 foi submetido a uma oscilação de nível de água no canal extrema, quase nunca observada no cotidiano do projeto.

Conclusões

- O transmissor de vazão, que permite o registro dos dados, se mostrou consistente e com boa acurácia para medir vazões entre 3 e 22 L/s, quando programado para tomar pelo menos dez leituras e calcular a média aritmética;
- O hidrômetro com turbina tangencial, quando lido manualmente em curtos intervalos de tempo, não apresentou boa consistência nas leituras;
- Os valores do coeficiente de vazão, C_d , da equação de orifício variaram de 0,74 a 0,83, com um valor médio de 0,77;
- Valores de vazão entre 7,4 e 12,9 L/s foram medidos durante o teste do módulo de 10 L/s da comporta tipo XX_1 , confirmando as informações do fabricante quanto aos erros de medição da mesma de até 20% acima ou abaixo da vazão nominal, em decorrência de oscilações no nível do canal;
- O Protótipo 1, de duas polegadas, operou razoavelmente bem, com variações na vazão da ordem de 5% para flutuações do canal de 46 cm, embora o mesmo protótipo construído com conexões de 100 mm não tenha apresentado desempenho satisfatório;
- O Protótipo 2, de 2,5 polegadas, apresentou um funcionamento excelente, com variações na vazão de apenas 1,2% para oscilações no nível do canal de 40 cm; o mesmo modelo, construído com conexões de 100 mm, não operou de forma adequada;
- O Protótipo 3 apresentou um desempenho superior ao da comporta XX_1 , com variações na vazão derivada de apenas 3,4% para oscilações no nível do canal de 30 cm;
- O Protótipo 3, testado em um canal do projeto Gorutuba, apresentou excelente desempenho, com variações na vazão de apenas 2,2%, para uma vazão nominal de 11,37 L/s e oscilações de mais de 30 cm no nível do canal;

- A desvantagem do Protótipo 3 é a perda de carga de 60 cm que o mesmo causa para que o nível de água sobre o orifício seja mantido constante;

Referências Bibliográficas

- AISENBREY JR., A. J.; HAYES, R. B.; WARREN, H. J.; WINSETT, D. L.; OUNG, R. B. **Design of small canal structures**. Denver: USBR, 1978. 435 p.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1973a. v. 1, 333 p.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; ALVAREZ, G. A. **Manual de hidráulica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1973b. v. 2, 668 p.
- DAKER, A. **Hidráulica aplicada à agricultura**. 5. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1976. v. 1, 302 p.
- DENÍCULI, W. **Medidores de vazão do tipo orifício**. Viçosa: UFV, 1993. 43p.
- DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DO PERÍMETRO GORUTUBA. **Plano de operação e manutenção do DIG para o ano de 2004**. Nova Porteirinha, 2003. Não paginado.
- ELSTER METERING LIMITED. **The kent range of metering products** – Pulse units for retro-fitting to H4000, S3000, C4000 and C4200 meters. Bedfordshire, 2004. 9 p.
- EQUIPAMENTOS para irrigação e saneamento. Taubaté: ALSTOM, 2004. Paginação irregular.
- FLAMMER, G. H.; JEPPSON, R. W.; KEEDY, H. F. **Fundamentals principles and applications of fluid mechanics**. Logan: Utah State University. 1986. 376 p.
- LENCASTRE, A. **Manual de hidráulica geral**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972. 411 p.

NIVETEC INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE LTDA. **+ GF + SIGNET 2536/3-8512-xx sensor para baixas vazões**. São Paulo, 2004a. Não paginado.

NIVETEC INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE LTDA. **Manual de instalação e programação** – registrador de dados eletrônico série 585. São Paulo, 2004b. 6 p.

NIVETEC INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE LTDA. **Manual de instalação e programação** – transmissor de nível ultra-sônico compacto a 2 fios ECHOTREK – SE/SG-300. São Paulo, 2004c. 35 p.

SCHUSTER, J. C. **Water measurement procedures** – irrigation operator´s workshop. Denver: Engineering Research Center: Bureau of Reclamation, 1970.

Agradecimentos

Ao Banco do Nordeste do Brasil o apoio financeiro que propiciou a execução do trabalho.

Aos colegas Barão, Clebinho, Levi e Marcinho, da Gestão de Campos Experimentais da Embrapa Milho, Beló e Leo, da Gestão de Logística e Serviços, o apoio na construção e teste dos protótipos.

Ao sr. Rodrigo Gott, torneiro mecânico autônomo, e ao sr. Emerson, da Serralheria Larena, a paciência e as sugestões durante a construção dos protótipos.

Ao colega Carlos Eduardo Prado Leite, do Campo Experimental de Nova Porteirinha, as sugestões e o apoio durante os testes no projeto Gorutuba.