

Projeto e Implantação de um Sistema de Controle para Geração Automática de Perfis de Vazão

Rodolfo S. Santana, Luís A. Aguirre

MACSIN - Depto. de Eng. Eletrônica - Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 - CEP 31270-901 Belo Horizonte, MG - aguirre@cpdee.ufmg.br

Carlos B. Martinez

Centro de Pesquisas Hidráulicas - CPH - Depto. de Hidráulica e Recursos Hídricos - UFMG
Av. Antônio Carlos, 6627 - CEP 31270-901 Belo Horizonte, MG - martinez@cce.ufmg.br

Recebido: 10/05/01 - revisão: 19/12/01 - aceito: 07/06/02

RESUMO

Este trabalho apresenta o resultado da implantação e comissionamento de um sistema de controle para geração automática de perfis de vazão, aplicáveis a laboratórios de hidráulica. O sistema foi concebido para operar em um circuito fechado de bombeamento de água. A implantação do sistema de controle baseou-se na instalação de medidores de pressão piezoresistivos, de medidores de nível e de um controlador do tipo PID acoplados a um microcomputador. Equipamentos mais onerosos, como por exemplo válvulas de controle, foram evitados ainda que tecnicamente seu uso fosse possível.

O sistema instalado é capaz de garantir um perfil de vazão, definido na forma de hidrógrafas, no circuito de alimentação da bancada de testes.

Conforme constatado pelos resultados, mostrados e discutidos, o sistema de controle projetado e instalado consegue reproduzir as hidrógrafas especificadas. As variações de pressão e vazão nos diagramas são inferiores a 4% para aplicações em que o tempo de duração das hidrógrafas se encontra entre 2520 e 5040 segundos. O desempenho do sistema é ainda melhor quando se amplia o tempo de aplicação do hidrograma.

Palavras-chave: controle; vazão; automático.

INTRODUÇÃO

O projeto de uma estrutura hidráulica apresenta características próprias, e na maioria das vezes, individualizada. Assim, quando do projeto e da otimização do mesmo, torna-se necessário o perfeito conhecimento do seu comportamento sob as mais diversas formas de operação. Cada projeto pré-supõe um conjunto específico de condições físicas às quais deve ser condicionado. A adoção de soluções simples ou medianamente estudadas pode conduzir a uma estrutura cujo comportamento não seja compatível com as perspectivas do projetista.

Neste contexto vê-se que o estudo dos fatores envolvidos em um projeto deste tipo são da maior importância. Assim, a utilização de modelos reduzidos para o estudo do comportamento de estruturas hidráulicas é extremamente necessária, pois, poderão ser estudadas as estruturas, sua forma, o dimensionamento dos diversos componentes do projeto e o seu comportamento dinâmico, entre outros. Um dimensionamento correto desses componentes pode ser alcançado, possibilitando um uso de coeficientes de segurança mais realista, além de possibilitar o estudo de situações até então não contempladas.

Como exemplo da necessidade de utilização destes modelos pode-se citar os dissipadores de energia compactos (Marques, 1995), os ressaltos hidráulicos (Lopardo,

1987; Lopardo et al., 1985) e as escadas de peixes (Clay, 1994). Devido às características dos escoamentos nestes dispositivos, considera-se que as pesquisas devam ser desenvolvidas através de trabalhos em laboratório, pois os fenômenos têm caracter bifásico e não linear. Os seus mecanismos são complexos e requerem um monitoramento para diferentes condições de contorno.

Os estudos em estruturas hidráulicas se baseiam na aquisição de dados de variação de pressão, nível e velocidade. O espaçamento das tomadas de pressão, os locais de coleta dos níveis e velocidades, a frequência de aquisição e o tamanho da amostra variam com o que se deseja analisar.

As características dinâmicas da operação do sistema podem ser obtidas a partir da simulação das condições dessa operação, de maneira a verificar o comportamento das estruturas, mapeando-se os parâmetros em estudo.

Alguns autores tais como Camargo (1997) e Santana (1998), apresentaram estudos onde se pode observar a pertinência deste tipo de controle em sistemas hidráulicos.

A implantação de um sistema de aquisição de dados de vazão, níveis, pressão e velocidade automáticos permite a formação de um banco de dados consistente, com uma elevada taxa de amostragem, possibilitando que se faça uma análise pontual ou cruzada do fenômeno em estudo.

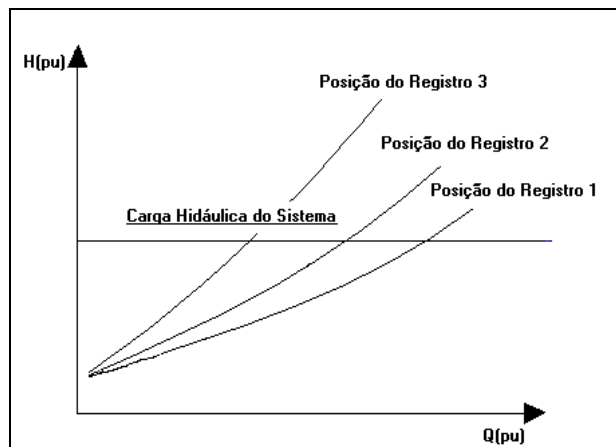


Figura 1. Esquema do sistema de modulação de vazão a partir da variação da perda de carga no circuito hidráulico.

OS LABORATÓRIOS DE HIDRÁULICA NO BRASIL E AS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE VAZÃO

O Brasil possui diversos laboratórios de hidráulica. Alguns se dedicam ao ensino e pesquisa acadêmicos, sendo equipados com bancadas de teste adaptadas à realidade do atendimento do ensino de graduação e ao de pós-graduação. Entretanto um pequeno número de laboratórios possuem como missão o apoio a pesquisas aplicadas.

Apesar de muitos desses laboratórios estarem equipados com uma ampla gama de equipamentos, poucos possuem um controle de velocidade/vazão no circuito de bombeamento. Quando existe, este controle é usualmente obtido através de acoplamento hidrocínético. Os demais laboratórios possuem circuitos para ensaios de grandes estruturas hidráulicas e, via de regra, se utilizam de um reservatório elevado situado entre o circuito de bombeamento/alimentação dos modelos. Este fato impõe uma característica de controle de vazão nos circuitos de alimentação baseada na variação da perda de carga do sistema hidráulico através de válvulas reguladoras. A Figura 1 apresenta a estratégia de operação deste tipo de controle, onde se pode observar que a modulação de vazão é feita a partir da dissipação de energia no registro de controle. Este fato se constitui em um ponto de consumo de energia no laboratório.

É importante citar que estes laboratórios podem ter um controle de vazão a partir da variação do nível d'água no reservatório superior. Esta estratégia de controle atua diretamente sobre a carga hidráulica e permite a modulação indireta da vazão. A grande vantagem desta estratégia é que, devido à sua simplicidade, necessita-se apenas da instalação de medidores de nível, de vazão e de um controlador de velocidade no circuito de bombeamento do laboratório. Assim, esta se torna interessante para a modernização de laboratórios mais antigos. A Figura 2 apresenta o esquema de modulação através do controle de nível do reservatório superior.

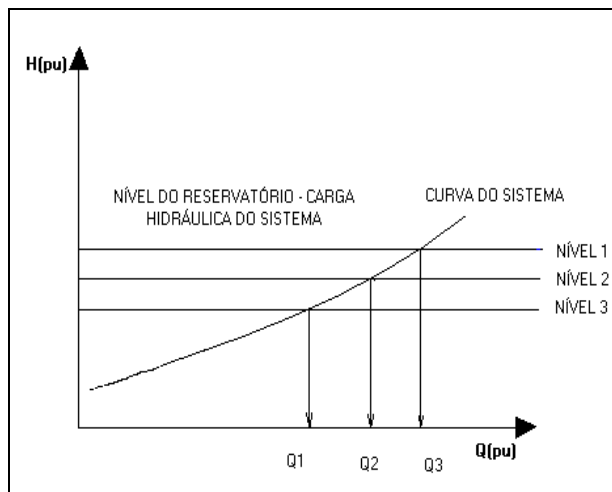


Figura 2. Esquema do sistema de modulação de vazão a partir da variação do nível do reservatório elevado.

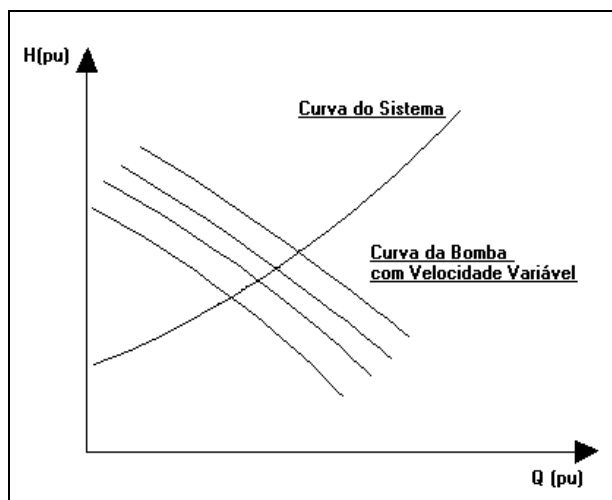


Figura 3. Esquema do sistema de modulação de vazão a partir da variação da rotação das bombas hidráulicas.

Em alguns laboratórios o controle de vazão pode ser feito a partir do controle de velocidade da bomba. Desta forma ao invés de atuarmos na curva do sistema (variando a perda de carga do mesmo), atua-se na curva da bomba, regulado-se a vazão em função da característica da bomba. A Figura 3 apresenta o esquema das curvas do sistema e da bomba mediante esta estratégia de regulação de vazão.

Pode-se visualizar a utilização desta estratégia a partir da entrada ou retirada de bombas em um arranjo onde a modulação da vazão será obtida de acordo com a configuração da associação. Entretanto a modulação conseguida é grosseira e não pode prescindir do uso de válvulas reguladoras, que invariavelmente dissipam grandes quantidades de energia. Da mesma forma, os acoplamentos hidrocínéticos também dissipam grandes quantidades de energia e têm um ajuste fino difícil de ser controlado automaticamente.

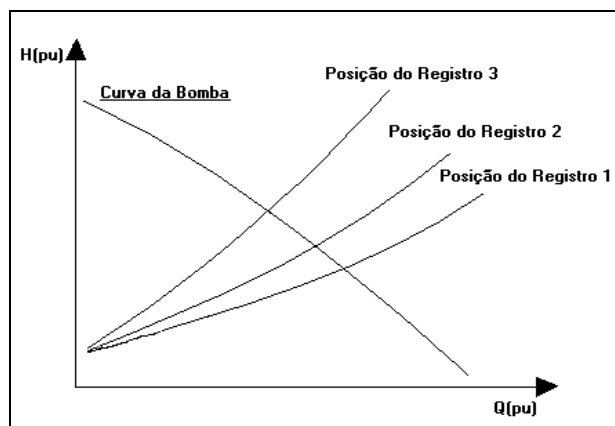


Figura 4. Esquema do sistema de modulação de vazão a partir da variação da perda de carga no circuito hidráulico.

Pode-se ter também circuitos de ensaio constituídos de estações elevatórias, tubulações de alimentação e circuitos de teste (sem a existência de caixas d'água intermediárias). Nestes, a modulação de vazão é feita normalmente através de válvulas reguladoras (válvulas gaveta, entre outras). Este tipo de regulação se baseia na modificação da curva do sistema hidráulico, com variação da perda de carga e conseqüente mudança no ponto de equilíbrio da vazão a ser disponibilizada para os ensaios em modelo. Apesar deste sistema ser aparentemente mais simples, a regulação de vazão é um problema pois, fazer o acoplamento da curva do sistema com a curva da bomba mediante atuação direta sobre válvulas não é uma tarefa trivial, principalmente se levarmos em consideração as dimensões dos equipamentos. A Figura 4 apresenta a estratégia de modulação utilizada neste tipo de laboratório de hidráulica.

As estratégias de controle apresentadas, permitem a regulação das vazões nos circuitos hidráulicos dos laboratórios. Entretanto, apesar de todas as estratégias permitirem uma razoável modulação de vazão, apenas com um controle efetivo sobre a bomba (controlando a potência da mesma) é que se consegue reduzir o consumo de energia, otimizando a instalação como um todo e reduzindo o seu custo operacional.

O SISTEMA

O trabalho aqui apresentado foi direcionado à adequação do circuito hidráulico de bombeamento existente no antigo Laboratório de Hidráulica da UFMG. A evolução deste sistema permitirá abastecer os modelos reduzidos a serem estudados no Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos Hídricos (CPH) (Camargo, 1997; Santana, 1998). Para a implantação do sistema piloto de controle, tornou-se necessário o acréscimo de alguns itens à mesma, uma vez que o sistema inicialmente funcionava com circuito aberto (onde a saída do processo não tem nenhum efeito sobre a entrada). Isto se deve ao fato de não existir nenhum tipo de realimentação não possibilitando meios para eliminar possíveis erros na saída da mesma (variável de

Tabela 1. Nível do reservatório para se manter a vazão desejada.

Vazão (l/s)	Altura da carga necessária (m)	Nível do reservatório (m)
18,00	2,372	0,200
18,25	2,439	0,267
18,50	2,506	0,334
18,75	2,574	0,402
19,00	2,643	0,471
19,25	2,713	0,541
19,50	2,784	0,612
19,75	2,856	0,684
20,00	2,929	0,757
20,25	3,003	0,831
20,50	3,077	0,905
20,75	3,153	0,981
21,00	3,229	1,057
21,25	3,306	1,134
21,50	3,385	1,213
21,75	3,464	1,292
22,00	3,544	1,372

Obs.: o valor da rugosidade do tubo se deve ao seu estado de conservação.

processo) em relação ao valor desejado (valor de referência). O resultado obtido foi um sistema com baixo custo de implantação e com uma resposta compatível com as necessidades dos estudos em laboratório.

A planta de bombeamento de água utilizada é apresentada no diagrama da Figura 5. É composta por: um reservatório de 2,5 m³ (2 500 l) - TQ_01; um poço de sucção de 12,3 m³ (12 300 l) - TQ_02; tubulação; uma bomba centrífuga com capacidade de 25×10⁻³ m³/s (25 l/s); um motor de indução trifásico de 5 cv; um conversor de frequência de 6,1 kVA; um sistema de proteção e comando elétrico; dois elementos primários de medição, uma placa de orifício (FE_01) e um tubo Venturi (FE_02); e três tomadas de pressão (PI_01, PI_02 e PI_03).

A planta de bombeamento de água está submetida às seguintes condições de serviço: pressão atmosférica: 10.300 kgf/m²; água sujeita a eventuais impurezas; vazão máxima: 25×10⁻³ m³/s (25 l/s); altura manométrica de sucção máxima: 3,45 m; altura manométrica de sucção mínima: 0,80 m; altura manométrica de recalque máxima: 3,60 m; e altura manométrica de recalque mínima: 2,70 m.

Devido à característica do sistema, a estratégia de controle adotada é a apresentada na Figura 2, onde o controle se dá mediante à variação do nível do reservatório. Desta forma para se obter a modulação esperada, equaciona-se o circuito hidráulico de alimentação do modelo. A partir desta, procede-se ao mapeamento do nível do reservatório que permite manter as vazões desejadas no sistema. Entretanto, devido à possibilidade de modificações eventuais no circuito de alimentação (obstruções, aumento gradativo de rugosidade, etc.) optou-se por um controle

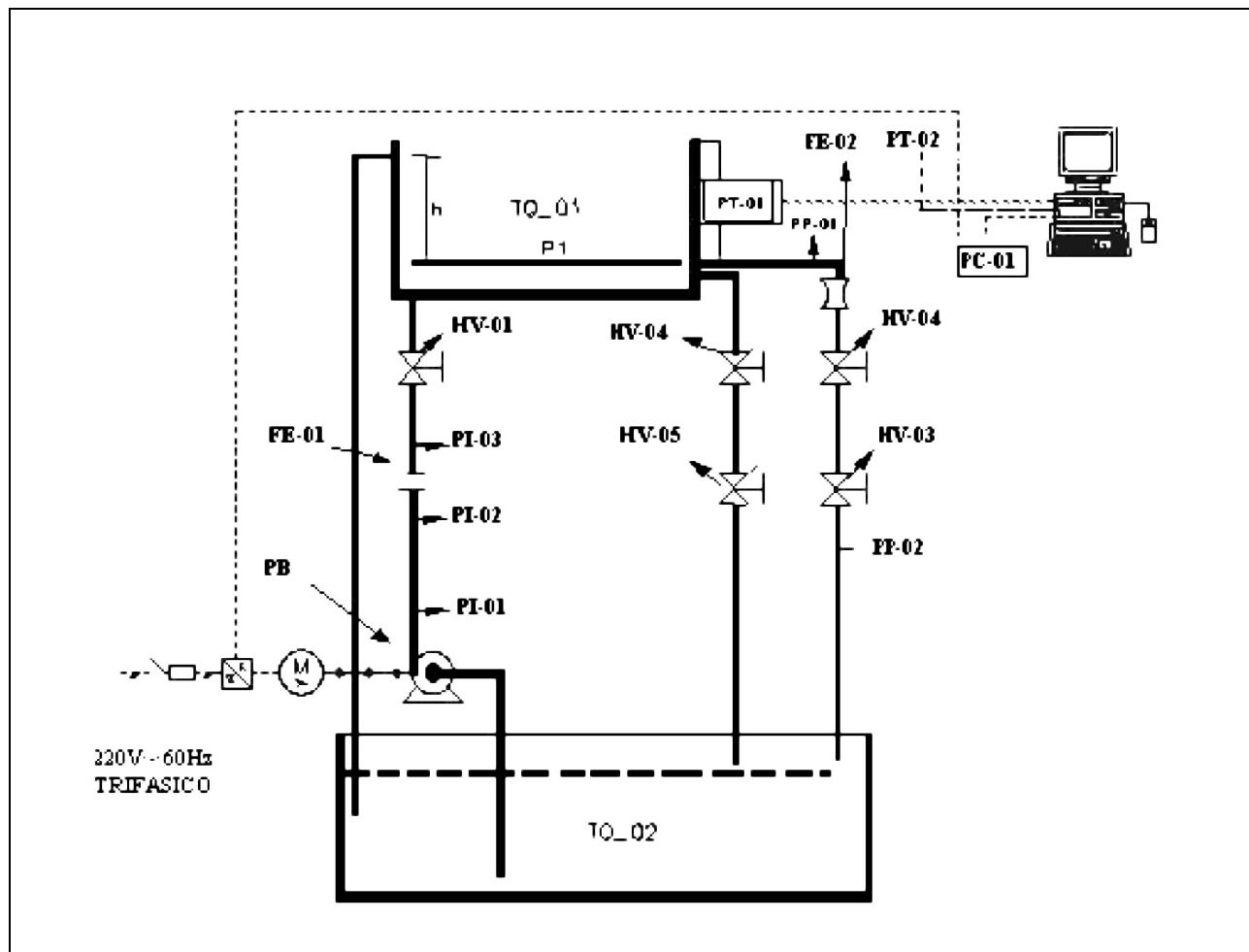


Figura 5. Diagrama de instrumentação da planta de bombeamento de água utilizada após a implantação do sistema de controle.

baseado na medição direta da vazão, através de um tubo de Venturi (FE02). Assim, o equacionamento do circuito hidráulico foi utilizado somente no início do procedimento para a calibragem do sistema. O circuito de alimentação é formado pela tubulação de saída, pelo Venturi (FE02), pelos registros HV04, HV03 e por PP02 (tomada de pressão).

Os cálculos do sistema hidráulico têm a finalidade de contabilizar as perdas de carga na tubulação. As perdas de carga ocorrem nos tubos retos, nas curvas e registros e no Venturi. Assim optou-se por utilizar as Equações (1) e (2) a seguir:

$$\Delta h_{f_{circ}} = \frac{8.f.Q^2}{\pi^2.g} * \left[\frac{1}{D_{circ}^5} * (L_{eq}) \right] \quad (1)$$

$$L_{eq} = L_{eq,FE02} + L_{eq,HV03} + L_{eq,HV04} + L_{eq,PP02} + L_{tub,circ} \quad (2)$$

sendo $\Delta h_{f_{circ}}$ a perda de carga total no circuito de alimentação do modelo (m); f o coeficiente de perda de carga da fórmula universal, que depende de Re e e/D ; Re o número

de Reynolds; e/D a aspereza relativa; D_{circ} o valor do diâmetro da tubulação de alimentação do modelo (m); Q a vazão de bombeamento (m^3/s); $L_{eq,FE02}$ o comprimento equivalente do Venturi em (m); $L_{eq,HV03}$ o comprimento equivalente do registro em (m); $L_{eq,HV04}$ o comprimento equivalente do registro em (m); $L_{eq,PP02}$ o comprimento equivalente da tomada de pressão em (m); e $L_{tub,circ}$ o comprimento do tubo de alimentação em (m).

A partir de um levantamento da instalação existente determinou-se que o desnível entre o centro da tubulação de alimentação em estudo e o nível inferior da caixa d'água é de 2,17 m. As demais características são:

- $e = 0,5 \text{ mm}$;
- $\varnothing_{tubo} = 100 \text{ mm}$;
- $L_{eq,FE02} = 0,90 \text{ m}$;
- $L_{eq,HV03} = 0,50 \text{ m}$;
- $L_{eq,HV04} = 0,50 \text{ m}$;
- $L_{eq,PP02} = 0,15 \text{ m}$;
- $L_{tub,circ} = 55 \text{ m}$.

Tabela 2. Desempenho do sistema.

Tempo de aplicação da hidrógrafa (s)	Grandezas analisadas	Amplitude (%)	Erros
			Fases - alinhamento dos picos máximos (s)
5040	pressão	+1	0
	vazão	~0	0
2520	pressão	-1	~50
	vazão	<1	~50
1400	pressão	-10	100
	vazão	5	100

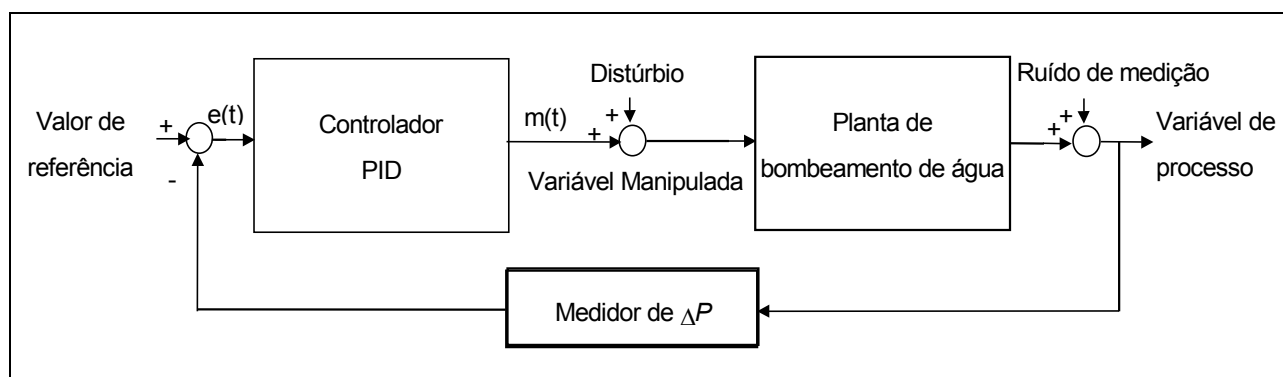


Figura 6. Diagrama em blocos do sistema em malha fechada da planta de bombeamento de água estudada; o bloco planta de bombeamento de água representa a planta existente.

Este equacionamento fornece o nível do reservatório necessário para manter a vazão desejada. O resultado está apresentado na Tabela 1.

Estes resultados foram utilizados para o início do processo de calibragem do sistema. Vencida a etapa de calibragem, o sistema prescindirá deste levantamento, ficando o banco de dados disponível para uma avaliação da modificação das características do circuito hidráulico, tais como entupimentos ou aumento significativo da rugosidade da tubulação, entre outros.

Neste trabalho, devido ao fato do controle ser efetuado apenas via variação de velocidade do conjunto moto bomba, as válvulas HV_04 e HV_05 foram mantidas totalmente fechadas enquanto as demais foram mantidas totalmente abertas.

O sistema de controle implantado se baseou em uma série de sistemas previamente existentes. Assim, procurou-se trabalhar sobre os elementos primários de medição existentes. A precisão obtida com placa de orifício no laboratório é de 1,5%. Optou-se por adotar a medição com a placa de orifício pois, a precisão foi considerada suficiente para permitir um bom resultado de vazão. Outras alternativas de medição de vazão como medidores magnéticos foram desconsideradas, pois os custos destes equipamentos são elevados (considerou-se que os ganhos em termos de precisão seriam muito pequenos). Neste trabalho utilizamos também um tubo de Venturi que está instalado na tubulação de esvaziamento principal. Assim, a implantação

do sistema de controle consistiu na adição à planta existente dos seguintes itens: um medidor/transmissor de diferença de pressão (PT_02); um medidor/transmissor de nível (PT_01); um controlador do tipo PID (PC_01); uma placa de aquisição de dados PCL 711; um microcomputador PC 486 DX2 66; um console de operação; duas tomadas de pressão; calibração e ajustes; interligação dos novos componentes do sistema entre si e à planta existente; e *software* para a placa de aquisição de dados.

Com a instalação e interligação destes novos itens obteve-se um sistema em malha fechada, conforme visto na Figura 6, e um novo procedimento de operação.

A fim de promover uma melhor visão da planta de bombeamento de água, após a implementação do sistema de controle, uma vista da mesma é apresentada nas Figuras 7 e 8. Os novos itens integrantes do sistema serão descritos com mais detalhes a seguir.

O medidor de diferença de pressão e o de nível utilizados nesta aplicação possuem o mesmo princípio de funcionamento. A escala do sensor utilizado no medidor de diferença de pressão é de 0 a 15 PSI e o do utilizado no medidor de nível é de 0 a 30 PSI; a precisão é de 0,76% FS, linearidade de 0,85% FS, sensibilidade de 1,981 mV/Cm e ebias de 1,289 V. Um sensor piezo-resistivo com duas tomadas de pressão gera um sinal elétrico de tensão que é proporcional ao ΔP entre as tomadas. Então, o sinal elétrico é amplificado e condicionado de forma a fornecer entre 1 e 6 volts.

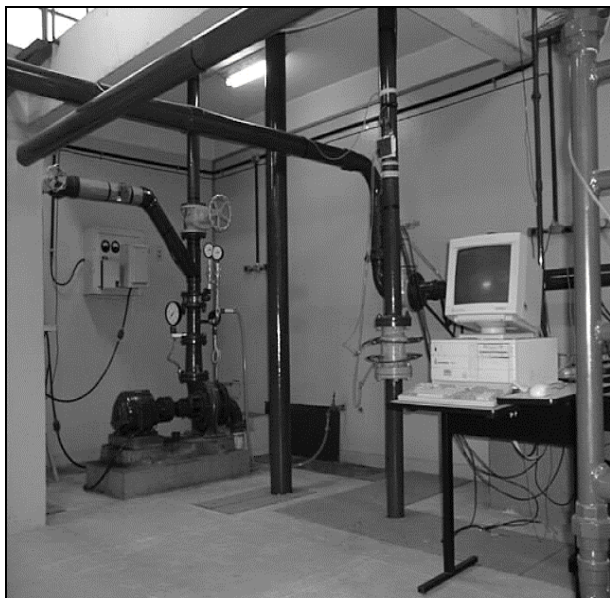


Figura 7. Fotografia frontal das instalações do Laboratório de Hidráulica após a implantação do sistema de controle.

Desta forma, as tomadas de pressão do sensor piezo-resistivo podem ser conectadas às extremidades de um tubo Venturi ou em pontos distintos de um reservatório, por exemplo, fornecendo a vazão e o nível que são inferidos através da diferença de pressão no Venturi e no reservatório, respectivamente.

Nesta aplicação, a partir da diferença de pressão obtida nas extremidades do tubo Venturi e da relação entre a vazão e a diferença de pressão (ΔP) foi inferida a vazão.

O controlador utilizado é de uso industrial e é o elemento do sistema responsável por efetuar a comparação entre o valor de referência (SP) e a variável de processo (PV) e, em função desta comparação e do seu algoritmo de controle, o mesmo irá atuar no processo, através de sua saída (m), a fim de tornar o valor de PV coincidente ao valor de referência (SP).

OPERAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Com a implantação do sistema de controle a operação do circuito de bombeamento foi alterada drasticamente. A maneira de se atuar na planta a fim de obter as vazões desejadas, passa a ser através do conjunto controlador-microcomputador-software e não mais via comando manual.

Com a inclusão de equipamentos de controle e conseqüente alteração no processo de bombeamento, os inconvenientes encontrados na variação de vazão e do controle de níveis, tais como: mapeamento prévio em frequência dos valores de vazão desejados; resposta lenta do sistema, e grande susceptibilidade a distúrbios, foram totalmente ou praticamente eliminados. Assim, a alteração do valor de referência, provoca uma alteração na frequência do sistema de bombeamento alterando a vazão.

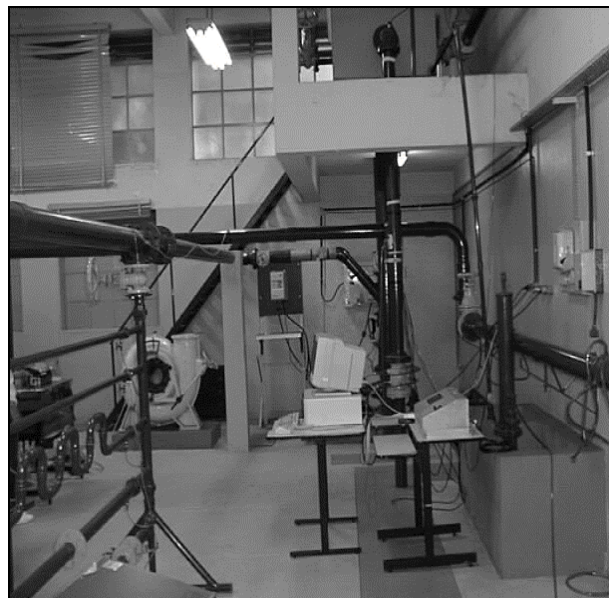


Figura 8. Fotografia lateral das instalações do Laboratório de Hidráulica após a implantação do sistema de controle.

Quando ocorrem variações, distúrbios, o controlador atua de imediato eliminando os efeitos dos mesmos. Além disso a resposta do sistema se torna mais rápida, permitindo um gradiente de vazão maior do que sem o sistema de controle.

Os seguintes controles se tornaram possíveis:

- controle da vazão na tubulação de esvaziamento principal;
- controle da vazão de recalque e;
- controle de nível.

O controle de nível se faz através do medidor de nível (PT_01) ou através da vazão da tubulação de esvaziamento com a utilização do medidor de vazão na tubulação de esvaziamento principal (PT_02).

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

O hidrograma de vazões pode ser obtido a partir da atuação no conversor de frequência em função de um valor de referência (sinal elétrico que representa o perfil de vazão desejado) e da medição efetuada, produzindo uma curva de vazão de saída com um perfil próximo ao perfil de vazão desejado.

Após a definição de qual o perfil de vazão a ser gerado, deve-se transformá-lo em um perfil de diferença de pressão. Assim, de posse do hidrograma de vazão é necessário transformar os valores em ΔP (que é a nossa variável de processo) e depois aplicar ao sistema como sinal de referência. Da mesma forma, de posse da variável de processo é necessário inferir o valor de vazão utilizando-se a equação do tubo Venturi, que relaciona as duas grandezas (Delmée, 1983).

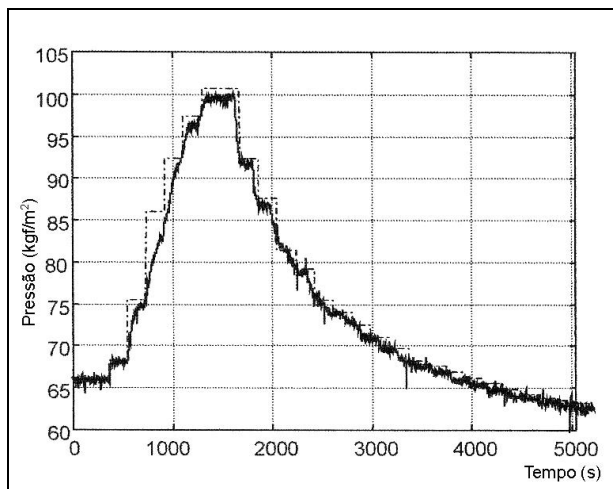


Figura 9. Perfil de diferença de pressão gerado no circuito de bombeamento (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).

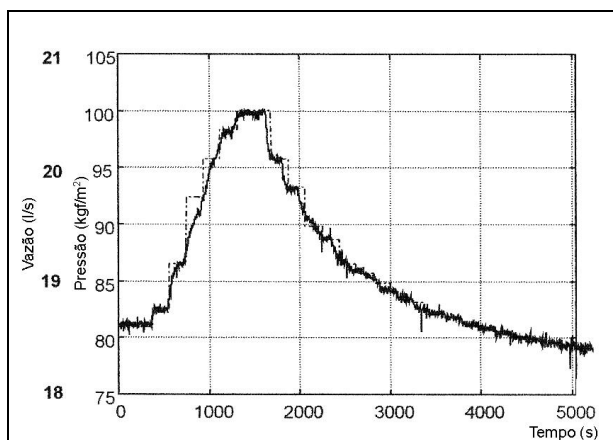


Figura 10. Hidrograma de vazão gerado no circuito de bombeamento (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).

As Figuras 9 a 14 apresentam os perfis de diferença de pressão e os hidrogramas de vazão gerados. O valor de referência para os perfis de diferença de pressão e para os perfis de vazão, também é apresentado nas figuras. Os perfis de vazão aqui apresentados reproduzem um dos hidrogramas referenciados em Linsley & Franzini (1978).

Pode ser observado nas figuras apresentadas que a dinâmica do processo para tempos de aplicação de 5040 e 2520 segundos permitiu a geração de perfis de vazão com uma boa resposta geral, com erros médios abaixo de 4% com relação ao sinal de referência (hidrógrafa). Entretanto, quando o tempo de aplicação da hidrógrafa se reduziu para 1400 s a resposta do sistema apresentou desempenho significativamente pior, indicando a saturação do atuador. Desta forma, caso se deseje gerar perfis de vazão com períodos de tempo mais curtos nesta planta, seria necessário aumentar o diâmetro da tubulação de alimentação da bancada de testes.

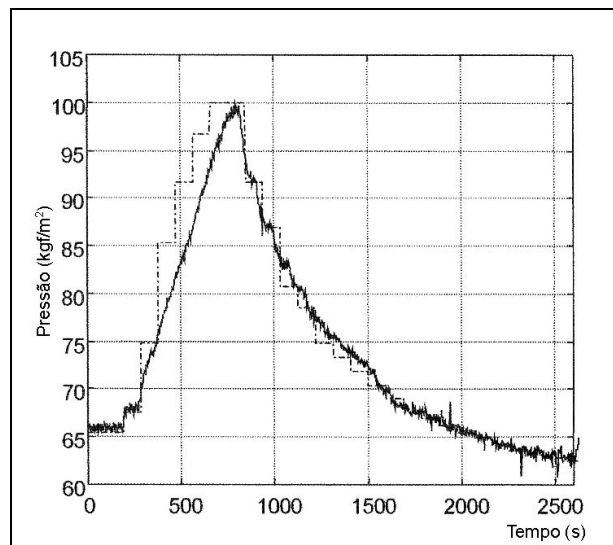


Figura 11. Perfil de diferença de pressão gerado no circuito de bombeamento (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).

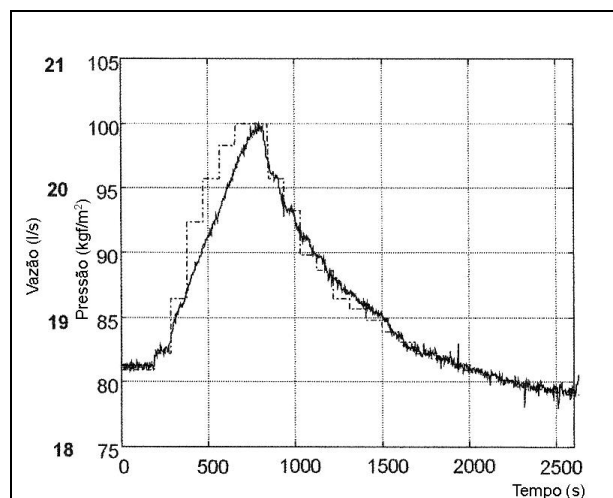


Figura 12. Hidrograma de vazão gerado no circuito de bombeamento (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).

Parece útil analisar o desempenho do sistema observando os erros de amplitude e de ocorrência no tempo nos pontos de máximo das hidrógrafas. Essa análise está resumida na Tabela 2. Pode-se verificar que a utilização deste sistema deve respeitar um limite de aplicação da hidrógrafa objetivando-se a redução dos erros em amplitude e fase. No caso apresentado, o tempo de aplicação não deve ser inferior a 2520 segundos. Para tempos de aplicação de 1400 segundos os erros de amplitude são de 10% e de tempo de aplicação, de 100 (s), considerados elevados. Entretanto, este tempo é uma característica do circuito hidráulico e deve ser identificado para cada instalação fornecendo uma solução específica para cada caso.

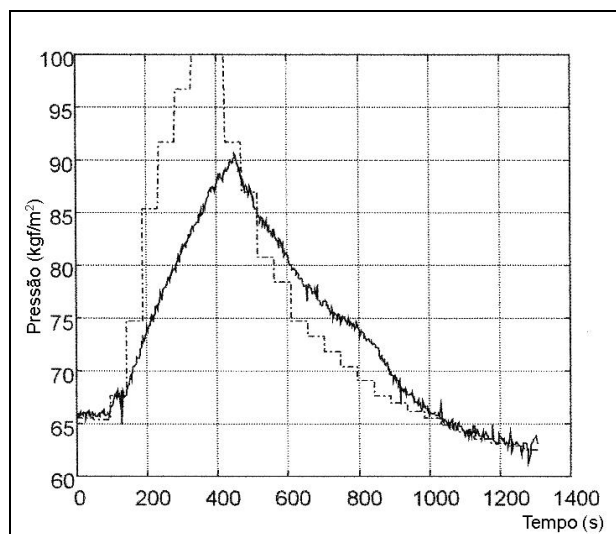


Figura 13. Perfil de diferença de pressão gerado no circuito de bombeamento (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).

CONCLUSÕES

Este trabalho discutiu o projeto e implantação de um sistema de controle de vazão em um circuito piloto de bombeamento. Por se tratar de um sistema realimentado, o presente projeto é robusto a variações nos parâmetros hidráulicos do processo. Esta característica permite que o mesmo seja utilizado em circuitos hidráulicos já existentes e que têm o seu equacionamento teórico dificultado devido a problemas de envelhecimento (incrustações, etc.). Para isto foi necessário se adotar instrumentação que permitisse modular a vazão no duto de saída de forma automática. Optou-se por uma linha de pesquisa na qual adota-se o mínimo de instrumentação possível de forma a reduzir custos. Assim sendo, equipamentos mais onerosos, como por exemplo válvulas de controle, foram evitados ainda que tecnicamente seu uso fosse possível. Acredita-se que, seguindo-se as linhas que nortearam o presente trabalho, circuitos hidráulicos encontrados em outros laboratórios podem ser automatizados a um custo relativamente baixo.

Conforme constatado pelos resultados mostrados e discutidos, o sistema de controle consegue reproduzir os hidrogramas especificados com até 4% de erro médio em relação à referência, para tempos de aplicação acima de 2520 segundos. Podemos considerar também que, abaixo deste valor o desempenho do sistema de controle deteriora-se para variações de vazão correspondentes a valores superiores a pressões de 85 kgf/m² ou 19 l/s. É importante dizer que as limitações apresentadas se devem mais à dinâmica do próprio circuito piloto do que ao sistema de controle em si.

O banco de dados obtido a partir da simulação do circuito de alimentação pode ser utilizado para um acompanhamento do comportamento da evolução do circuito hidráulico. Assim o aumento da rugosidade, possíveis entu-

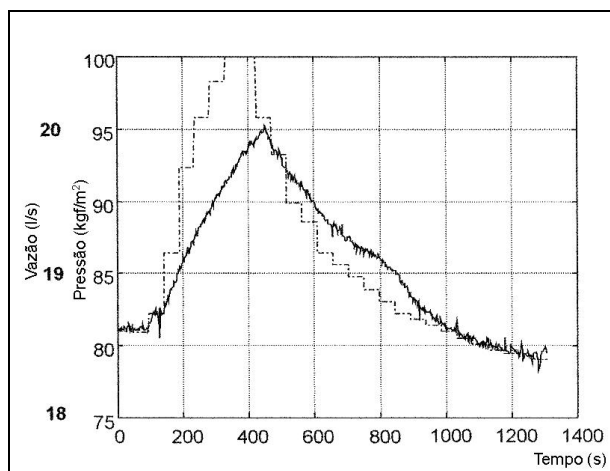


Figura 14. Hidrograma de vazão gerado no circuito de bombeamento (linha contínua) e valor de referência (linha pontilhada).

pimentos da tubulação, entre outros, podem ser detectados a partir de uma comparação entre a variação do nível inicialmente necessário para se manter uma determinada vazão e o nível efetivo em cada instante. Esta possibilidade deve ser explorada em trabalhos futuros. Devido ao arranjo da planta piloto ser semelhante ao da maior parte dos laboratórios de hidráulica, considera-se que a estratégia de controle adotada possa ser aplicável na modernização desses.

A geração de um hidrograma permite que sejam ensaiados modelos hidráulicos em laboratório sob as mais diversas condições de vazão. Este fato possibilita a cobertura de uma ampla faixa de operação da estrutura. O sistema em questão, associado a instrumentos de aquisição de dados de pressão, de nível e de velocidade, permite a automação do ensaio, criando um amplo banco de dados que facilitará a análise do comportamento do modelo. Além disso, a operação sob condições de regime não permanente pode ser estudada, e assim o conhecimento do funcionamento da estrutura ou do fenômeno em estudo pode ser ampliado. A implantação e teste de um sistema de controle de vazão permite um intercâmbio interdisciplinar que propicia a modernização dos laboratórios de hidráulica a partir de um esforço acadêmico comum, com um ganho significativo em termos de precisão, ampliação da capacidade de trabalho e de treinamento de pessoal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPEMIG e CNPq.

REFERÊNCIAS

- CAMARGO, H. A. (1997). *Deteção e isolamento de falhas utilizando estimação de parâmetros de modelos contínuos e limites de confiança adaptativos - aplicação a uma planta piloto*. Dissertação de Mes-

- trado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.
- CLAY, C. H. (1994). *Design of fishways and other fish facilities*. (2 nd ed). Boca Raton, Lewis, 248p.
- DELMEE, G. J. (1983). *Manual de medição de vazão*. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2ª edição.
- LINSLEY, R. K. & FRANZINI, J. B. (1978). *Engenharia de recursos hídricos*. McGraw-Hill do Brasil Ltda.
- LOPARDO, R. A. (1987). Notas sobre fluctuaciones macro-turbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico. *Revista Latino Americana de Hidráulica*. Setembro, p.109-154.
- LOPARDO, R. A., VERNET, G. F. & CHICIDINI, M. F. (1985). Modelling the behaviour of high head hydraulic jump energy dissipators under flood conditions, *Proc. 2nd International Conference on the Hydraulic of Floods & Flood Control*, Cambridge, England, BHRA, The Fluid Engineering Center. Paper G1. p.313-323.
- MARQUES, M. G. (1995). *Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge*. These de doctorat apresentada a Faculté de 'tudes supérieures da Université Laval, 328p.
- SANTANA, R. S. (1998). *Implementação de uma malha de controle para o sistema de bombeamento – um estudo de caso para a modulação de vazão em uma planta piloto*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

Design and Implementation of a Control System for the Automatic Generation of Flow Profiles

ABSTRACT

This study describes the connection between the instrumentation and control of a pilot plant located in the Hydraulics Laboratory at UFMG. These pilot plants consist basically of a water tank receiving water from a pump driven by an induction motor connected to a frequency converter. Originally, the pilot plant operated in an open-loop and, consequently, it was not possible to generate prespecified water flow profiles required to test reduced scale models of hydraulics structures. The purpose of this study was to implement a closed-loop control system in order to enable the pilot plant to produce the aforementioned water flow profiles.

The closed-loop implemented consists basically of a differential pressure sensor and transmitter, a PID controller connected to the frequency converter and a PC. These devices were connected to the pilot plant and tuned in order to achieve water flow control. Some PID tuning methods were implemented in order to tune the controller. After this was done, it was possible to successfully produce standard water flow profiles using the pilot plant. Some results are presented and discussed in the study.

Key Words: control; flow; automatic.