



XI-016 - CONTROLE SIMULTÂNEO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA E VÁLVULAS DE CONTROLE EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Saulo de Tarso Marques Bezerra⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestre em Engenharia Hidráulica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutor em Engenharia Mecânica (automação) pela UFPB. Atualmente é professor substituto do IFPB e pesquisador do LENHS UFPB.

Simplicio Arnaud da Silva

Engenheiro Eletricista pela UFPB. Doutor em Engenharia Mecânica (automação) pela UFPB. Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB.

Heber Pimentel Gomes

Engenheiro Civil e Mestre em Hidrologia pela UFPB. Doutor em Hidráulica pela Universidad Politécnica de Madrid. Professor do Departamento de Engenharia Civil da UFPB.

Wil Lavor Lucena Camboim

Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Mecânica pela UFPB. Atualmente é Doutorando da área de Dinâmica e Controle de Sistemas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB.

Magno José Gomes da Silva

Engenheiro Eletricista e Mestre em Engenharia Elétrica pela UFPB. Atualmente é Doutorando da área de Dinâmica e Controle de Sistemas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB e professor do IFAL.

Endereço⁽¹⁾: LENHS UFPB, Centro de Tecnologia, João Pessoa, PB, CEP: 58000-000, Telefone: (83) 3235-6206. E-mail: s.bezerra@yahoo.com.br.

RESUMO

Apresenta-se, neste trabalho, um sistema fuzzy, que foi desenvolvido no ambiente Labview™, para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água por meio do uso simultâneo de válvulas de controle e conversores de frequência acoplados a conjuntos motor-bomba, visando à economia de água e energia elétrica. O conversor de frequência mantém a altura manométrica do sistema de bombeamento em um valor ótimo (mínimo possível), enquanto as válvulas de controle têm a função de eliminar o excesso de pressão em diversos pontos do sistema. O sistema de controle é formado por dois controladores fuzzy acoplados. Os controladores atuam na determinação da velocidade de rotação do motor e no ângulo de abertura da válvula de controle. Foram realizados cinco experimentos diferentes, que comprovaram a eficiência do sistema de controle e a influência deste na redução do consumo de energia elétrica e água. O sistema é robusto e pode atuar com quaisquer valores de referência de pressão, não havendo limite para o número de pontos monitorados e controlados, podendo, inclusive, variar os valores de referência com o tempo. Pode-se concluir que o desempenho do sistema fuzzy se mostrou satisfatório, podendo ser implementado facilmente em outros sistemas de distribuição de água similares, a fim de proporcionar redução do consumo de água e energia elétrica, diminuição nos custos de manutenção e aumento do grau de confiabilidade dos procedimentos.

PALAVRAS-CHAVE: automação, sistema fuzzy, eficiência energética e hidráulica.

INTRODUÇÃO

As primeiras cidades foram fundadas há aproximadamente 3.500 anos antes de Cristo nos vales das bacias do Rio Nilo (Egito), dos Rios Tigre e Eufrates (Iraque) (GIDDENS, 1999 apud ESMPU, 2005). Os locais escolhidos para a moradia definitiva eram, em sua maioria, construídos às margens de rios ou grandes lagos, que, por sua vez, tornaram-se a fonte primária para as primeiras comunidades (FORMIGA, 2005).

Concomitantemente com o crescimento das primeiras cidades, ainda na Idade Antiga (4000 a.C. a 476 d.C.), surgiu a necessidade de se desenvolver técnicas para transportar água até os meios urbanos. Dentre as civilizações da época, pode-se destacar o Império Romano (31 a.C. a 476 d.C.1), que foi responsável pela construção de inúmeras redes de distribuição de água em cidades com centenas de milhares de habitantes.



No século XIX, com o surgimento do motor elétrico - que foi acoplado a diversos instrumentos da indústria, incluindo as bombas - a água começou a ser impulsionada, independente do fim da aplicação, por conjuntos motor-bomba.

Atualmente, são raros os sistemas de distribuição de água que operam exclusivamente por gravidade. Estes são compostos geralmente por redes de distribuição de água, reservatórios e conjuntos motor-bomba. Assim sendo, a energia elétrica tornou-se essencial para tornar a água potável e movê-la através dos sistemas; cada litro de água que se move representa um determinado consumo de energia. Segundo TSUTIYA (2008) é necessário cerca de 0,6 kWh para produzir um metro cúbico de água potável.

As empresas de saneamento consomem de 2 a 10% do total da eletricidade utilizada em um país (PELLI e HITZ, 2000 apud RODRIGUES, 2007). Os países latino-americanos gastam de 1 a 1,5 bilhões de dólares por ano apenas para bombear água (JAMES et al., 2002). No Brasil, o setor de saneamento básico consome cerca de 2,5% do consumo total de energia elétrica, o equivalente a aproximadamente 10 bilhões de kWh/ano (ELETROBRÁS, 2008), sendo que 90% dessa energia é consumida por conjuntos motor-bomba TSUTIYA (2008). Os custos com energia elétrica em sistemas de bombeamento, na grande maioria das vezes, ultrapassam, ao longo da vida útil dos projetos, os custos de investimento das instalações (GOMES, 2005).

A otimização das operações de bombeamento pode gerar economias significativas, as quais, no caso de grandes sistemas, atingem milhões de reais por ano. Segundo JAMES et al. (2002), o consumo de energia, na maioria dos sistemas de distribuição de água em todo o mundo, poderia ser reduzido em pelo menos 25% com a implementação de ações de eficiência energética e hidráulica, o que equivale a toda energia utilizada na Tailândia. Vários estudos na Europa e nos Estados Unidos da América indicam que o setor industrial tem um potencial de redução de 30 a 50% do consumo em sistemas de bombeamento (HOVSTADIUS, 2007).

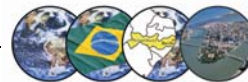
A alternativa mais eficiente para reduzir o consumo de energia elétrica das companhias é através da diminuição das vazões e pressões dos sistemas. Para amortizar o volume de água fornecido, sem que haja racionamento e/ou “racionalização forçada”, a forma mais impactante é a minimização das perdas reais de água. Entre as ações voltadas para a minimização destas perdas e do consumo de água, a comunidade científica (GERMANOPOULOS e JOWITT, 1989; SAVIC e WATERS, 1995; VITKOVSK'Y et al., 2000; THORNTON, 2002; ARAUJO et al., 2006; GARZÓN CONTRERAS e THORNTON, 2006; PILCHER et al., 2007) e os técnicos das empresas destacam o controle da pressão. Destarte, observa-se que o controle piezométrico nas redes hidráulicas apresenta-se como uma ação diretamente impactante no consumo de energia elétrica e água.

Os atuais sistemas de automação, mais especificamente os sistemas tipo SCADA, possibilitam o controle de pressão em pontos do sistema. Porém, as decisões são vinculadas à experiência dos operadores, já que os sistemas SCADA, via de regra, propiciam apenas a operação assistida. É possível monitorar, controlar e interferir nas diversas unidades do sistema em tempo real, mas não o controle automático dos processos. Nos casos em que há controle automático, este fica a cargo de CLP que operam de forma independente, local e em aplicações de processos simples, por exemplo, o liga/desliga de bombas com base no nível de um reservatório e o controle de pressão no barrilete através do acoplamento de um conversor de frequência ao conjunto motor-bomba.

Quanto mais extenso for o sistema de distribuição de água, obviamente, mais complexas serão as decisões. O grande número de elementos passíveis de terem seus estados alterados torna complexa a tarefa dos operadores definirem, num determinado instante, qual a melhor combinação do estado operacional das bombas e grau de abertura das válvulas (PEDROSA FILHO, 2006). Devido a esta elevada complexidade, a busca da decisão mais adequada em termos de política operacional deve ser feita com o auxílio de ferramentas computacionais apropriadas. Sem um planejamento otimizado, os sistemas de produção de água para abastecimento continuam desperdiçando [...] energia elétrica.

Um grande campo de pesquisa se abre na busca do desenvolvimento de sistemas de controle voltados para a melhoria da eficiência energética e hidráulica dos sistemas de distribuição de água que resultem em confiabilidade operacional, redução dos custos e garantia da continuidade do abastecimento com qualidade.

Atualmente, os equipamentos utilizados para o controle de pressão nas redes hidráulicas são os conversores de frequência e as válvulas de controle. O controle de velocidade de rotação, realizado pelo conversor de



freqüência acoplado ao motor, propicia apenas o controle de pressão em um ponto do sistema, o que faz com que os níveis piezométricos do sistema de distribuição diminuam ou aumentem de forma proporcional, fazendo com que a determinação da rotação fique vinculada a um determinado ponto. As válvulas de controle utilizadas para reduzir a pressão são chamadas de válvulas redutoras de pressão e geralmente são localizadas nas entradas dos setores das redes hidráulicas. Conquanto acrescentem perda de carga ao sistema, aquelas propiciam uma redução do volume de água fornecida (diminuição do consumo mais perdas de água) ao setor de jusante, reduzindo indiretamente o consumo de energia. Por outro lado, com o crescimento dos sistemas de distribuição de água, surgiram situações onde há uma variação significativa da pressão ao longo da rede hidráulica; nestes casos, para garantir o controle piezométrico (vários pontos) é necessária a aplicação simultânea de válvulas de controle e conversores de freqüência.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema fuzzy, no ambiente Labview™, para o acionamento automático e simultâneo de válvulas de controle e de um conversor de freqüência, a fim de controlar a pressão em um sistema de distribuição de água. Para tanto, desenvolveu-se uma ferramenta computacional - sistema de controle - que trata a velocidade de rotação dos conjuntos motor-bomba e o grau de abertura das válvulas como variáveis de controle.

Diante do exposto acima, a principal contribuição deste trabalho está em desenvolver um sistema fuzzy para o controle piezométrico de redes de distribuição de água, em tempo real, minimizando o consumo de energia elétrica e o volume de água fornecido ao sistema. O conversor de freqüência atua mantendo a altura manométrica do sistema de bombeamento em um valor ótimo (mínimo possível), enquanto as válvulas de controle têm a função de eliminar o excesso de pressão em diversos pontos do sistema; obviamente a diminuição da velocidade de rotação prevalece sobre o acréscimo da perda de carga através das válvulas.

SISTEMAS DE CONTROLE

A indústria da água no Brasil vem tentando acompanhar o desenvolvimento tecnológico dos demais setores industriais, onde a presença da automação é uma realidade. A automação pode ser definida como qualquer aplicação de técnica computadorizada ou mecânica para diminuir ou suprimir a interferência humana em qualquer processo. Mecanismos automáticos podem ser adotados tanto no auxílio de controle de processos simples como no controle automático de grandes sistemas.

Existem duas maneiras de controlar um determinado processo industrial, através de CLP ou SoftPLC. O Controlador Lógico Programável, comumente chamado de CLP é um tipo de computador especializado, baseado num microprocessador que desempenha funções de controle de diversos tipos e níveis de complexidade. Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), é um equipamento eletrônico digital com *hardware* e *software* compatíveis com aplicações industriais. Segundo a NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), é um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, seqüenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos.

O SoftPLC é um programa computacional que emula a CPU de um CLP, apresentando linguagem de programação semelhante a este. Funcionam em um computador *desktop* (de uso geral, “doméstico”, não-industrial), cujas entradas das variáveis de controle e saídas dos comandos elétricos dão-se através de um módulo de aquisição de dados conectado a uma determinada porta do computador (COM, LPT, USB, etc).

Os sistemas de controle baseados em PC (SoftPLC) ainda não são muito difundidos e normalmente os usuários não utilizam somente esta tecnologia para controle de plantas (TSUTIYA, 2004). Há as soluções híbridas, chamadas de Sistemas Mistos, que utilizam o conceito SoftPLC em CLP industriais. Estes sistemas suportam as condições críticas - poluição eletromagnética, sujeira, umidade, temperatura, vibrações, choques físicos, atmosferas agressivas, tempos de resposta, etc - e tem custos e qualidades intermediárias entre o SoftPLC e o CLP.

Um sistema de controle é uma disposição de componentes físicos, conectados ou relacionados de tal maneira a comandar, dirigir ou regular a si mesmo ou a outros sistemas. Um componente ou processo a ser controlado pode ser representado como um diagrama de blocos. A excitação aplicada a um sistema é conhecida como



entrada - $U(s)$, enquanto a resposta obtida é chamada de saída - $C(s)$. Os sistemas de controle podem ser de “malha aberta” e “malha fechada”. O sistema de controle em malha aberta utiliza um atuador para controlar o processo sem a utilização de realimentação (*feedback*). Um sistema com várias bombas em paralelo, onde se determina com base no horário e na experiência dos técnicos quantas bombas devem ser ligadas, sem nenhuma variável sendo medida, é um exemplo de controle em malha aberta tipo liga/desliga (*on/off*).

Os sistemas em malha fechada, conhecidos também como sistemas retroalimentados, determinam a ação corretiva mais apropriada com base em variáveis medidas. Para tanto, são utilizados controladores que, por meio da execução algorítmica de um programa ou circuito eletrônico, comparam o valor atual com o *valor de referência*, efetuando o cálculo para ajuste e correção. O *valor de referência* também é conhecido como *valor desejado* e *set-point* (em inglês). Nos sistemas de malha fechada, a ação de controle depende, de alguma maneira, da variável controlada. Como exemplo, pode-se citar o controle da pressão através da variação da velocidade de rotação do conjunto motor-bomba; o sistema de controle do conversor de frequência verifica o valor da pressão e decide se aumenta ou diminui a frequência de acionamento do motor.

No sistema de malha fechada, a ação de controle depende, de alguma maneira, da saída. A diferença entre o *valor de referência* e o sinal da malha de realimentação é chamada de *erro* - $E(s)$. A saída do sistema de controle, geralmente, é definida como *variável de controle* - $U(s)$. De maneira geral, no controle clássico, a relação “entrada-saída” representa a relação “causa-efeito” do processo e pode ser descrita matematicamente através de equações diferenciais, equações de diferença, funções de transferência. Logo, para compreender e controlar sistemas deve-se determinar *modelos matemáticos* destes sistemas. Torna-se necessário, por conseguinte, analisar as relações entre as variáveis do sistema e obter um modelo matemático. Geralmente, os sistemas são dinâmicos e as equações que os descrevem são *equações diferenciais*. Além disso, se estas equações podem ser linearizadas, pode-se usar a *Transformada de Laplace*.

Dentre os diversos tipos de controladores, os mais utilizados são o *Proporcional Integral Derivativo* (PID), *Regulador Linear Quadrático* (LQR), *Regulador Linear Gaussiano* (LQG), *Controle H Infinito* (H^∞), Fuzzy. A literatura apresenta diversas técnicas para projeto e desenvolvimento de controladores PID. CUBILLOS (2008) apresenta um resumo sobre a teoria dos métodos de controle LQR, LQG e H^∞ .

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, pode-se perceber que os sistemas de controle de processo estão mais confiáveis. Controladores mais modernos e eficientes estão sendo projetados para sistemas onde o controle do processo é complexo. Os sistemas fuzzy surgiram fortemente como alternativa para o controle automático de sistemas não-lineares e com várias entradas e saída. Em 1974, o professor *E. H. Mamdani* aplicou pela primeira vez um controlador fuzzy no controle de uma máquina a vapor, segundo REYERO e NICOLÁS (1995), após inúmeras tentativas frustradas com diversos tipos de controladores.

SISTEMAS FUZZY

A Lógica Fuzzy é baseada na teoria dos conjuntos fuzzy e difere da teoria clássica do filósofo grego *Aristóteles*. A BRAGA *et al.* (1995 *apud* SILVA, 2005) definiu a Lógica Fuzzy como uma tentativa de se aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real, nascida no desejo profundo de se conhecer melhor os processos mentais do raciocínio.

Informações vagas, incertas, qualitativas, comunicações verbais, capacidade de aprendizado e de formulação de estratégias de tomadas de decisão são características humanas. Portanto, a teoria fuzzy é freqüentemente referida como “inteligente”, devido ao fato de emular a inteligência humana. Os sistemas fuzzy são importantes componentes da área de inteligência computacional. Estes sistemas são paradigmas computacionais de processamento de informação que procuram executar tarefas que exijam alguma forma de inteligência similar à exibida por determinados sistemas humanos.

A *Teoria de Conjuntos Fuzzy* (ZADEH, 1965) e os *Conceitos de Lógica Fuzzy* (ZADEH, 1973) são uma alternativa para a solução de problemas de controle envolvendo não linearidades nas dinâmicas inerentes aos sistemas; possui uma alta habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Seu comportamento é representado de maneira simples, levando à construção de sistemas acessíveis e de fácil conservação.



O conceito básico dos conjuntos fuzzy é relativamente fácil de ser assimilado, já que, no mundo real, as pessoas interpretam e utilizam instruções vagas e dados imprecisos todos os dias. A lógica tradicional, booleana (*crisp*), apresenta apenas valores “0” ou “1”, não há “meio termo”, a teoria fuzzy apresenta uma proposta do uso de funções que operem dentro de um intervalo de números reais [0,1]. A lógica trata com conceitos inexatos, sendo uma técnica de caracterização de classes que não define limites rígidos entre elas. A sua utilização é indicada sempre que se lida com ambigüidade, abstração e ambivalência em modelos matemáticos ou conceituais de fenômenos empíricos. Dadas suas características intrínsecas, a Lógica Fuzzy é capaz de incorporar tanto o conhecimento objetivo (de dados numéricos) quanto o conhecimento subjetivo (de informações lingüísticas).

Para explicar o conceito de conjunto fuzzy e a abordagem booleana, tem-se o exemplo clássico da idade de uma pessoa. Observa-se, na abordagem booleana, que as transições entre os conjuntos “*jovem*” e “*adulto*”, e entre os conjuntos “*adulto*” e “*idoso*”, são bruscas. Por exemplo, uma pessoa que passar dos 24 anos e 11 meses para os 25 anos e um dia, sai de uma categoria de “*jovem*” diretamente para “*adulto*”; essa abordagem é incompatível com a lógica de pensamento humano. Já na abordagem fuzzy, por exemplo, pode ser considerado um indivíduo a partir dos 18 anos deixa de ser 100% “*jovem*” e começa a pertencer parcialmente aos conjuntos “*jovem*” e “*adulto*”. É importante observar o conceito de grau de pertinência, este define o “quanto” uma variável pertence a um determinado conjunto, variando geralmente no intervalo [0, 1].

A Lógica Fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em uma forma compreensível pelos computadores. Assim, a tecnologia possibilitada pelo “enfoque fuzzy” tem um imenso valor prático, na qual se torna possível a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos (SHAW e SIMÕES, 1999). O conceito de *fuzziness* é introduzido generalizando-se a função característica de modo que ela possa assumir um número infinito de valores diferentes no intervalo [0,1]. O universo de discurso (U) de uma variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que esta pode assumir.

A principal função das variáveis lingüísticas é fornecer uma maneira sistemática para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. Os valores assumidos pela variável lingüística são representados por conjuntos fuzzy definidos por funções de pertinência. A função de pertinência indica o quanto um elemento pertence a um dado conjunto. O conjunto fuzzy A é o conjunto de elementos no universo X para os quais $\mu_A(x) > 0$. Assim, um conjunto fuzzy também pode ser visto como o mapeamento do conjunto suporte no intervalo [0,1], o que implica em expressar o conjunto fuzzy por sua função de pertinência.

Nas teorias de controle clássica e moderna, o primeiro passo para implementar um controlador é a determinação do modelo matemático que descreve o processo. Este procedimento requer que se conheça detalhadamente o processo a ser controlado, o que nem sempre é factível em processos complexos (ZADEH, 1973). Ao contrário dos controladores convencionais, os SF não requerem a definição da função de transferência do sistema. Os controladores fuzzy são robustos, versáteis e de grande adaptabilidade. Se um operador humano for capaz de articular sua estratégia de ação através de um conjunto de regras da forma SE ENTÃO, então é possível a implementação de um algoritmo computacional fuzzy.

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de controle automático foi desenvolvido para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água. A fim de testar o sistema de controle proposto, foi projetada e implantada uma bancada experimental de distribuição de água (**Figura 1**) no Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba - LENHS UFPB. O processo computacional automatizará as ações referentes à velocidade de rotação (frequência do motor) do conjunto motor-bomba e de válvulas de controle.

A bancada experimental é constituída de um reservatório circular de 7,64 m³, um CMB monobloco de 3 cv, um conversor de frequência, duas válvulas de controle (CVc e CVs), dois transdutores de pressão (PT1 e PT2), dois medidores de vazão (FT1 e FT2), duas fontes de alimentação, dois manômetros tipo *bourdon*, além das conexões e tubos de PVC (DN 50) da rede. Também foram utilizados nos experimentos: dois analisadores de energia, para medição e análise das grandezas elétricas envolvidas no processo; um computador portátil e um módulo de aquisição de dados (DAQ) da *National Instruments*. A **Figura 1** descreve, por meio de um

diagrama esquemático (diagrama de blocos), a configuração da bancada experimental.

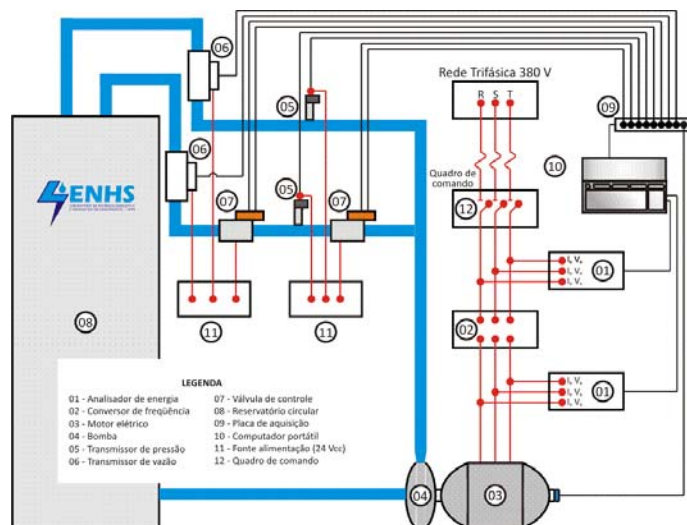


Figura 1 - Diagrama de blocos da bancada de teste

O conjunto motor-bomba é responsável pelo fornecimento de energia ao sistema de bombeamento de água na forma de vazão e pressão. A rede hidráulica contém dois ramais que simulam a alimentação de dois setores em SDA reais. A CVs, a jusante do PT1, tem a função de alterar as condições de operação do sistema, proporcionando a variação da vazão demandada. À medida que a CVs fecha, a vazão diminui e, conseqüentemente, a pressão a montante aumenta. Os PT1 e PT2 são responsáveis pelas medições das pressões. O conversor de frequência será responsável por manter a pressão no ponto mais desfavorável igual à pressão desejada (pressão de referência), enquanto a válvula CVc elimina o excesso de pressão no ponto de medição do ramal 1.

MODELAGEM DO SISTEMA DE CONTROLE

As técnicas especiais utilizadas neste trabalho permitem o desenvolvimento do controlador sem o conhecimento prévio do modelo matemático correspondente. O controlador atua na definição da altura manométrica de bombeamento e no ângulo de abertura da válvula de controle, controlando a pressão nos pontos de medição do sistema.

Para o controle do processo descrito, foi desenvolvido um sistema supervisor. O sistema supervisor utiliza quatro entradas e três saídas analógicas do DAQ. As entradas analógicas recebem o sinal dos transdutores de pressão PT1 e PT2, e os ângulos de abertura das válvulas CVc e CVs. As saídas analógicas são utilizadas para variar a posição/abertura das válvulas de controle e a frequência da tensão de alimentação do motor elétrico.

O sistema de controle desenvolvido é formado por dois controladores fuzzy. O primeiro é responsável pela determinação da frequência de acionamento do conjunto motor-bomba, enquanto que o segundo atua na válvula de controle CVc. Os controladores fuzzy foram implementados no *Toolkit Fuzzy Logic Controller Design* do programa Labview™. Vale ressaltar que o conversor de frequência (CF) é responsável por manter a altura manométrica do sistema de bombeamento em um valor ótimo (mínimo possível), enquanto a válvula CVc tem a função de eliminar o excesso (sobra) de pressão no outro ponto da bancada.

As entradas lingüísticas dos controladores são diferentes das entradas do supervisor. As variáveis lingüísticas foram escolhidas de maneira a possibilitar o controle da pressão em dois pontos da bancada experimental. As variáveis lingüísticas de entrada dos controladores são:

- ✓ Pressão no ponto mais desfavorável do sistema (**PM**). Variável definida como a pressão no transdutor com maior déficit de pressão.
- ✓ Frequência de acionamento do conjunto motor-bomba (**FR**). A frequência da tensão de alimentação é proporcional à rotação do motor, considerando um escorregamento constante.



- ✓ Diferença de pressão (**DP**). Variável definida com base nas medições dos transdutores de pressão e representa o valor da diferença de pressão que definirá um novo ângulo de abertura da válvula de controle.
- ✓ Posição angular da válvula de controle acionada pelo sistema fuzzy (**AV**). Variável medida através do sinal de posição da válvula.

As variáveis lingüísticas de saída dos controladores fuzzy são:

- ✓ Acréscimo (valor positivo) ou decréscimo (valor negativo) no valor da frequência da tensão de alimentação do conjunto motor-bomba (**DF**). Variável denominada de *Delta de Frequência*.
- ✓ Acréscimo (valor positivo) ou decréscimo (valor negativo) no ângulo de abertura da válvula de controle acionada pelo SF (**DA**). Variável denominada de *Delta Angular*.

As variáveis lingüísticas de entrada e de saída do sistema fuzzy (SF), a quantidade e o formato das funções de pertinência e o universo de discurso foram escolhidos com base em recomendações da literatura, na natureza do processo a ser controlado, análises heurísticas e ensaios experimentais. Na modelagem dos controladores foi utilizado o método de inferência MAX-MIN (MAMDANI e ASSILIAN, 1974). O método de defuzzificação foi o Centro de Gravidade (C-o-A).

MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY DO CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

Através de uma análise qualitativa dos padrões de comportamento da pressão em função da variação da velocidade de rotação de CMB, determinaram-se duas entradas para o controlador fuzzy do conversor de frequência - PM e FR. A primeira representa o déficit ou excesso de pressão no ponto mais desfavorável do sistema, enquanto que a segunda indica o valor da frequência atual para o controlador. As variáveis de entrada, variável de saída e a base de regras são apresentadas a seguir.

Variável Lingüística de Entrada PM

A variável de entrada PM é definida como a pressão no ponto mais desfavorável do sistema. Adotou-se 20 como valor de referência (*set-point*) padrão para a variável PM, ou seja, o controlador foi desenvolvido considerando o valor de 20 como ótimo para a variável em questão. Para valores de pressão requerida (valor de referência) diferentes de 20 m, é necessário que as medições de pressão tenham seus valores alterados para a compatibilização com o valor de referência padrão do controlador. Esta nova pressão foi denominada de pressão equivalente (Pe) e é a soma do valor medido mais a diferença entre 20 e a pressão requerida. Os valores das pressões equivalentes são determinados pela Eq. (1). A variável PM será igual à menor das pressões equivalentes.

$$Pe_i = Pmed_i + 20 - Preq_i \quad \text{equação (1)}$$

Onde Pe_i é a pressão no ponto de medição i , $Pmed_i$ é a pressão medida no ponto de medição i ; e $Preq_i$ é a pressão requerida no ponto de medição i .

Um número recomendado de conjuntos fuzzy lingüísticos (funções de pertinência ou termos) é algo entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão, entretanto, segundo SHAW e SIMÕES (1999), a partir de valores maiores que 7, não há melhorias significativas. Portanto, adotou-se o número de 7 conjuntos fuzzy para PM.

Os formatos das funções de pertinência mais freqüentemente encontrados são triangulares e trapezoidais, pois são geradas facilmente, segundo SHAW e SIMÕES (1999), só é primordial o uso de outras funções quando o desempenho suave é de importância crítica. Logo, adotaram-se funções de pertinência com formatos triangulares e trapezoidais, simétricas em relação ao valor de referência. O universo de discurso (U) foi baseado na faixa de medição dos transdutores de pressão, em metros de coluna de água.

As funções de pertinência de FR foram determinadas através de recomendações da literatura e conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de simulações e ensaios experimentais. Este método de determinação das funções é amplamente recomendado pela literatura, sendo, inclusive, citado como uma das vantagens da Lógica Fuzzy em relação a outras metodologias de controle de sistemas.



Variável Lingüística de Entrada FR

Como já foi citado, a variação da frequência de acionamento do conjunto motor-bomba é realizada através de um conversor de frequência, cujo controle é realizado por uma tensão elétrica contínua que varia de 0 a 8,8 Vcc. Deste modo, foi escolhido o intervalo [0, 8,8] como universo de discurso para a variável FR.

Assim como a variável PM, as funções de pertinência de FR foram determinadas através de recomendações da literatura e conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de simulações e ensaios experimentais. Optou-se pela escolha de seis termos para caracterizar qualitativamente a variável, com formatos trapezoidais. À medida que a variável FR se aproxima do valor máximo, há um particionamento fuzzy mais refinado nessas regiões, isto é, as faixas são menores.

Variável Lingüística de Saída DF

A primeira saída do sistema de controle é o acréscimo/decréscimo da frequência da tensão de alimentação denominada de Delta de Frequência (DF) e está diretamente relacionada com as medições de pressão do sistema e a velocidade de rotação do motor. A forma heurística de procura da variável de saída é baseada no seguinte conceito:

“Se a pressão é inferior a desejada, o controlador aumenta a velocidade de rotação do CMB; se a pressão é superior a desejada, o controlador diminui a velocidade de rotação do CMB”.

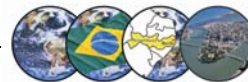
As funções de pertinência foram determinadas através de recomendações da literatura e sintonizadas através de ensaios experimentais. O conjunto de funções de pertinência segue um formato típico apresentado na literatura, onde os termos fronteiros são trapezoidais e o restante dos termos é triangular e vão diminuindo a faixa de atuação à medida que se aproximam do valor zero. A este respeito, SIMÕES e SHAW (1999) afirmam que esta configuração é um típico conjunto de funções de pertinência para uma variável de posição de um servo-sistema; destacando que perto do ponto central de equilíbrio os termos são mais densos, garantindo uma maior sensibilidade para um ajuste preciso de posição, enquanto um ajuste mais grosseiro é aceitável em regiões mais distantes do ponto de equilíbrio. Optou-se pela escolha de nove termos para caracterizar qualitativamente a variável de saída, a fim de suavizar o sinal de saída. Esta suavização é importante para evitar picos de correntes no motor elétrico.

O universo de discurso da variável cobre valores negativos e positivos e está compreendido no intervalo [-0,30, 0,30], que corresponde a valores reais de tensão elétrica. A soma do valor de DF mais FR (varia entre 0 e 8,8) corresponderá ao valor da tensão enviada ao conversor através da DAQ.

Foram estabelecidas 28 regras de inferência fuzzy para determinação da variável de saída DF, que relacionam as 7 funções de pertinência da PM com as 6 funções da FR. O Quadro 1 apresenta a matriz associativa fuzzy. As regras foram adotadas buscando uma simetria na variável de saída do controlador.

Quadro 1 - Matriz associativa fuzzy do controlador do conversor de frequência

		Variável PM						
		MB	BA	PB	OT	PA	AL	MA
Variável FR	R1	DFPA	DFPA	DFPB	-	-	-	-
	R2	DFPA	DFPO	DFPB	DFZE	DFNB-	-	-
	R3	DFPA	DFPB	DFPB+	DFZE	DFNB-	DFNB	DFNB
	R4	DFPO	DFPB	DFPB+	DFZE	DFNB-	DFNE	DFNE
	R5	-	-	DFPB+	DFZE	DFNB	DFNE	DFNA
	R6	-	-	DFZE	DFZE	DFNB	DFNA	DFNA



MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY DA CVc

Para a modelagem do controlador fuzzy da CVc torna-se fundamental definir as variáveis de entrada e de saída. Através de uma análise qualitativa dos padrões de comportamento da pressão em função da abertura da válvula, determinaram-se duas entradas para o controlador fuzzy da válvula de controle - DP e AV. As variáveis de entrada, variável de saída e a base de regras são apresentadas a seguir.

Variável Lingüística de Entrada DP

A variável de entrada DP é definida com base nas medições dos transdutores de pressão e representa o valor da diferença de pressão que definirá um novo ângulo de abertura da válvula de controle. A variável DP é calculada através da Eq. (2) e corresponde ao excesso ou déficit de pressão a jusante da válvula CVc. A DP tem zero como valor desejado.

$$DP = (P_1 - P_{1req}) - (P_2 - P_{2req}) \quad \text{equação (2)}$$

Onde P_1 é a pressão medida no ponto de medição a jusante da CVc (PT1); P_{1req} é a valor de referência do ponto de medição a jusante da CVc (PT1); P_2 é a pressão medida no ramal 2 (PT2); e P_{2req} é a pressão mínima no ramal 2 (PT2).

As funções de pertinência foram determinadas através de recomendações da literatura e de conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de simulações e ensaios experimentais. O conjunto de funções de pertinência segue um formato típico apresentado na literatura, onde os termos fronteiros são trapezoidais e o restante dos termos é triangular e vão diminuindo a faixa de atuação à medida que se aproximam do valor zero. O valor desejado é zero, portanto, para o valor equivalente fuzzificado à função de pertinência ZE tem grau 1 (um) e 0 (zero) para as demais funções. O espaço ou universo de discurso, para estas funções de entrada, foi delimitado entre -5 e 5; que corresponde à faixa em valores reais medidos em metro de coluna d'água.

Variável Lingüística de Entrada AV

A válvula de controle utilizada neste trabalho é do tipo proporcional e tem seu ângulo de abertura variando linearmente com a tensão elétrica de controle imposta a mesma, que varia de 2 a 10 Vcc. A abertura total da válvula corresponde a um ângulo de 90° para uma tensão de controle de 10 Vcc, e 0° para 2 Vcc.

A variável de entrada AV corresponde ao ângulo de abertura da válvula controlada pelo sistema fuzzy, denominada de CVc. Apesar de a CVc ser controlada por uma tensão 2 a 10 Vcc, observou-se, com base no levantamento experimental da variação angular de abertura versus a pressão a jusante, que só há variação de pressão no intervalo de 17° a 60°. Portanto, o intervalo do U é [17, 60].

Avaliando a pressão a jusante da CVc, observou-se que entre 0° e 17° a CVc está praticamente fechada. No intervalo de 60° a 90° a CVc está praticamente aberta e a perda de carga se aproxima de zero. Esta análise é imprescindível para a definição das funções de pertinência e do processo de decisão no controle do sistema. Com base nas informações acima, foram estipuladas sete funções de pertinência. As funções foram definidas com o formato trapezoidal, de modo que para cada função de pertinência houvesse uma faixa central sem superposição. No caso desta variável, optou-se por uma variação mais sensível à medida que esta se aproxima das fronteiras.

Na região central dos termos não há sobreposição de funções, para que a variável de saída seja determinada apenas por uma regra da variável AV. Os termos foram assim determinados para facilitar a análise experimental de cada regra. A válvula utilizada possuía folga e zona morta considerável, requerendo diversos ajustes nos conjuntos fuzzy. Uma das vantagens do controlador fuzzy é permitir que o tamanho de passo de busca decresça adaptativamente, de forma que o rastreamento atinja uma rápida convergência. O controle fuzzy, devido a sua robustez, conseguiu superar limitações dos equipamentos com eficiência. Adotou-se o número de sete termos, que é recomendado pela literatura.

Foi estabelecido que as funções de pertinência fronteiriças do Universo de Discurso tivessem grau de pertinência 1 e não fossem sobrepostas pelas demais; isso porque, neste caso, é conveniente que a variável de entrada AV possua apenas um termo que interfira na variável de saída.

Variável Lingüística de Saída DA

A saída, denominada de Delta Angular (DA), refere-se ao acréscimo/decréscimo do ângulo de abertura da válvula CVc instalada a montante do transdutor de pressão (PT1). A forma heurística de procura da variável de saída DA é baseada no seguinte conceito:

“Se há excesso de pressão a jusante da válvula de controle, esta deve diminuir o ângulo de abertura; se há déficit de pressão a jusante da válvula de controle, esta deve aumentar o ângulo de abertura.”.

A CVc é responsável por acrescentar perda de carga (perda de energia) ao ramal 1 (ver **Figura 1**), o que proporciona à redução de pressão a jusante da mesma, diminuindo a pressão ao longo da rede hidráulica. O acréscimo de perda de carga (energia) no sistema será analisado dando prioridade à diminuição da velocidade de rotação do conjunto motor-bomba.

Para a determinação dos conjuntos de funções de pertinência, realizou-se um ensaio onde foi enviado um sinal de tensão para a válvula variar a abertura de 0° para 90° e de 90° para 0°, que resultou em um tempo de abertura e fechamento total de 90 segundos. Com base na curva tempo *versus* ângulo de abertura da válvula, conclui-se que a variação é linear, e que cada segundo corresponde a 1° de abertura da válvula. Entretanto, através de avaliações experimentais, verificou-se que na prática a válvula se move na proporção de ¼ do sinal que é enviado para ela. Portanto, foi estipulado o intervalo [-4,5, 4,5] para o universo de discurso (U). Os termos foram determinados com base em outros trabalhos e conhecimento heurístico extensivamente sintonizado através de ensaios experimentais.

Foram estabelecidas 37 regras de inferência fuzzy para determinação da variável de saída DA, que relacionam as 7 funções de pertinência da DP com as 7 funções da AV. O Quadro 2 apresenta a matriz associativa fuzzy. As regras foram adotadas buscando uma simetria na variável de saída do controlador.

Quadro 2 - Matriz associativa fuzzy do controlador da CVc

		Variável DP						
		NG	NE	NP	ZE	PP	PO	PG
Variável AV	A1	DAPG	DAPG	DAPO	DAZE	-	-	-
	A2	DAPG	DAPG	DAPP	DAZE	DANP	DANP	DANP
	A3	DAPG	DAPG	DAPP	DAZE	DANP	DANE	DANE
	A4	DAPG	DAPO	DAPP	DAZE	DANP	DANE	DANG
	A5	DAPO	DAPO	DAPP	DAZE	DANP	DANG	DANG
	A6	DAPP	DAPP	DAPP	DAZE	DANP	DANG	DANG
	A7	-	-	-	DAZE	DANE	DANG	DANG

As representações gráficas das funções de pertinência das variáveis são apresentadas por BEZERRA (2009).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados três experimentos, a fim de validar o sistema de controle proposto. São eles:

- ✓ Experimento 1 - Ensaio em malha aberta (sem atuação do sistema de controle), com a válvula a jusante do PT1 (CVs) variando sua abertura de forma a simular a demanda de vazão de sistemas de abastecimento urbano de água.
- ✓ Experimento 2 - Ensaio em malha fechada, com uma entrada tipo degrau igual a 20 m para a variável PM, apenas com o controlador fuzzy do conversor de frequência atuando. A válvula a jusante do PT1 (CVs) varia sua abertura de forma a simular a demanda de vazão de sistemas de abastecimento urbano de água.
- ✓ Experimento 3 - Ensaio em malha fechada para excitação tipo degrau, com valor igual a 20 m para os dois transdutores de pressão.



EXPERIMENTO 1

O Experimento 1 foi realizado com o sistema em malha aberta, ou seja, sem nenhum tipo de controle atuando para posterior comparação com os Experimentos 2 e 3. O experimento simula a operação diária de um sistema de abastecimento urbano de água. Destarte, foi desenvolvido no Labview™ um instrumento virtual para simular a demanda de um sistema real através da operação remota da CVs. A curva de abertura da CVs foi baseada no perfil da curva de consumo de água, de 24 horas, do setor de Itaim Paulista, Região Metropolitana de São Paulo (TSUTIYA, 2004). O tempo do ensaio foi de 12 minutos (cada minuto corresponde a 2 horas). A Figura 2 mostra a curva teórica e a curva real de abertura da CVs do ensaio.

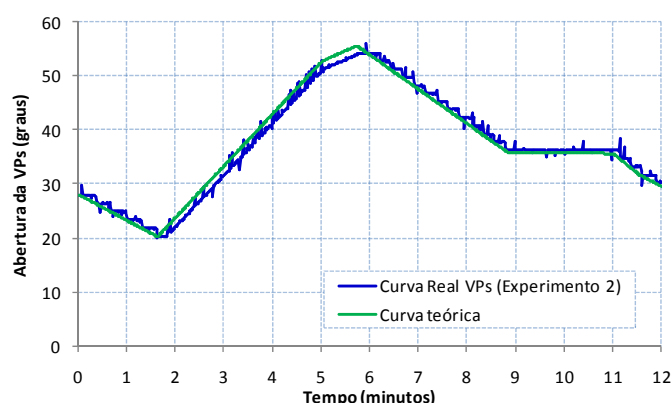


Figura 2 - Curva de abertura da válvula CVs do Experimento 1

A Figura 3 e Figura 4 apresentam, respectivamente, a pressão e a vazão nos ramais 1 e 2 do Experimento 1. Como se esperava, a vazão do ramal 1 segue o mesmo padrão da curva de abertura da CVs. A CVs tem a função de simular consumidores, logo à medida que a válvula abre, a vazão aumenta e a pressão diminui, e vice-versa.

A pressão no PT2 é sempre menor que no PT1 porque o registro a montante do PT2 está parcialmente fechado, provocando uma perda de energia localizada. Os experimentos foram assim realizados para que houvesse uma diferença de pressão nos dois pontos de medição. Obviamente, a carga hidráulica fornecida no início dos ramais é igual, por isso que apesar da pressão em PT1 ser sempre maior que PT2, a vazão em FT1 (ramal 1) pode ou não ser maior que em FT2 (ramal 2), dependendo da abertura da CVs.

Considerando a pressão de projeto de 20 m, têm-se que as pressões médias em PT1 (40,02 m) e PT2 (34,94 m) são 100% e 75%, respectivamente, superiores à ideal. A vazão média foi 3,84 m³/h no ramal 1 e 3,89 m³/h no ramal 2, perfazendo uma vazão média total de 7,73 m³/h.

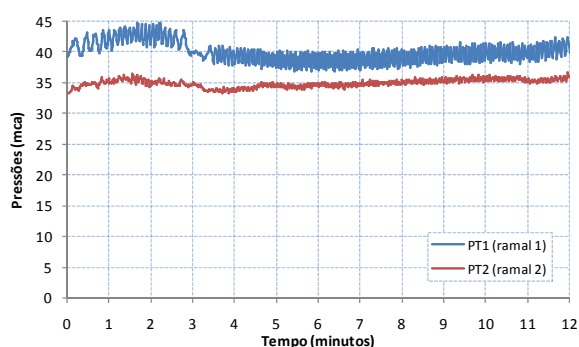


Figura 3 - Curvas de pressão do Experimento 1

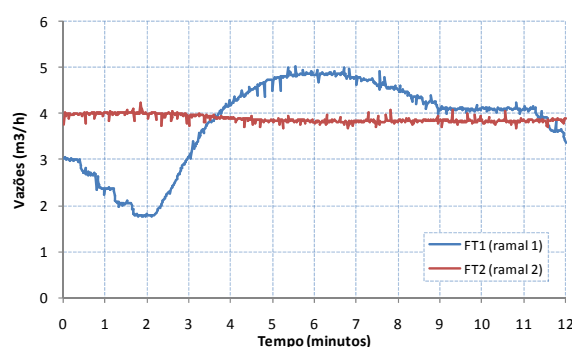


Figura 4 - Curvas de vazão do Experimento 1

EXPERIMENTO 2

O Experimento 2 foi realizado com as mesmas condições de operação do Experimento 1, porém com o controlador fuzzy do conversor de frequência atuando. Trata-se de um ensaio em malha fechada, com uma entrada tipo degrau igual a 20 m para a variável PM. Inicialmente, a frequência da tensão de alimentação do

motor foi 50 Hz e a CVC totalmente aberta. A variação do ângulo de abertura da CVs foi a mesma do Experimento 1, assim, pode-se analisar a resposta dos controladores a distúrbios (alterações no sistema) e a redução do consumo de energia elétrica.

A Figura 5 e Figura 6 apresentam, respectivamente, a pressão e a vazão nos ramais 1 e 2 do Experimento 2. A variável PM é igual à pressão medida no PT2, porque as pressões mínimas determinadas para os pontos de medição (PT1 e PT2) são iguais e o valor da pressão em PT2 é sempre menor que em PT1. A curva de vazão do FT2 manteve o mesmo padrão da curva de abertura da CVC, pois o medidor FT2 está localizado no mesmo ramal da válvula. A vazão média foi 3,22 m³/h no ramal 1 e 3,71 m³/h no ramal 2, perfazendo uma vazão média total de 6,93 m³/h. As pressões médias dos pontos de medição PT1 e PT2 foram, respectivamente, 27,04 m e 20,00 m.

O sistema de controle apresentou resposta satisfatória, o erro de regime permanente foi de 3,11% (0,62 m). O erro médio foi de 1,02%.

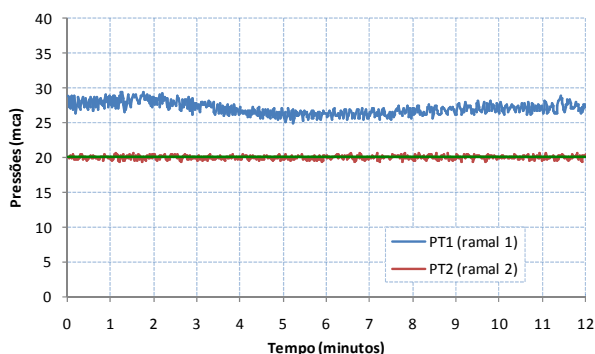


Figura 5 - Curvas de pressão do Experimento 2

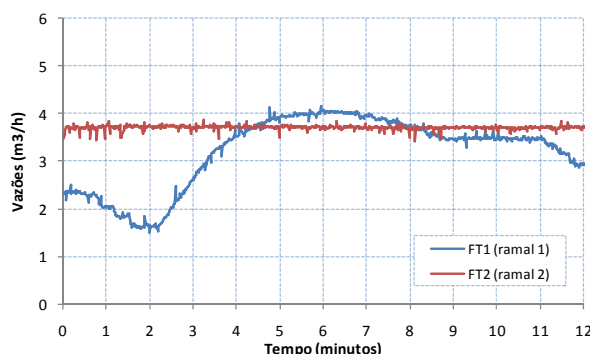


Figura 6 - Curvas de vazão do Experimento 2

As curvas das vazões totais dos experimentos 1 e 2 são apresentadas no gráfico da Figura 7.

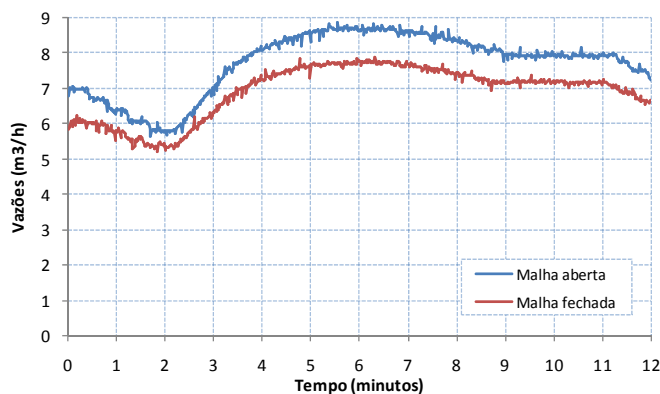


Figura 7 - Curvas de vazões totais dos experimentos 1 e 2

EXPERIMENTO 3

Com o CMB partindo do repouso, a válvula de controle CVC fechada e a CVs com 45° de abertura, aplicou-se uma excitação do tipo degrau de 20 m, para os dois pontos de medição da pressão. Com este procedimento, obtiveram-se os índices de desempenho do sistema de controle (sobre-sinal, tempo de assentamento e erro de regime permanente). A Figura 8 mostra as curvas de resposta ao degrau obtidas nos dois transdutores de pressão.

O tempo de assentamento foi de 90 segundos, o erro de regime permanente foi de 3,38% (0,68 m) e 3,47% (0,70 m), e o sobre-sinal de 16,80% (3,36 m) e 33,91% (6,78 m), ambos para os PT1 e PT2, respectivamente. Enquanto a pressão mínima do sistema é inferior a 20 m (intervalo de 0 a 69), a velocidade de rotação da bomba segue em ascendência, e a CVC atua para zerar a diferença de pressão nos pontos de medição. O valor



elevado do sobre-sinal no PT2 ocorre porque a elevação da pressão é drástica no intervalo de 33 a 37. Quando a pressão mínima atinge 19,98 m (instantes 67 e 68), a velocidade de rotação fica constante por 2 segundos, porém como a CVC continua abrindo, a pressão em PT1 ultrapassa o valor 20 no instante 69. No instante 69 a velocidade de rotação começa a diminuir para reduzir as pressões e a válvula continua abrindo para igualar as pressões. Quando as duas pressões se igualam (instante 80), a CVC pára de se mover e a frequência continua diminuindo até as pressões alcançarem 19,83 m e 20,23 m em PT1 e PT2, respectivamente.

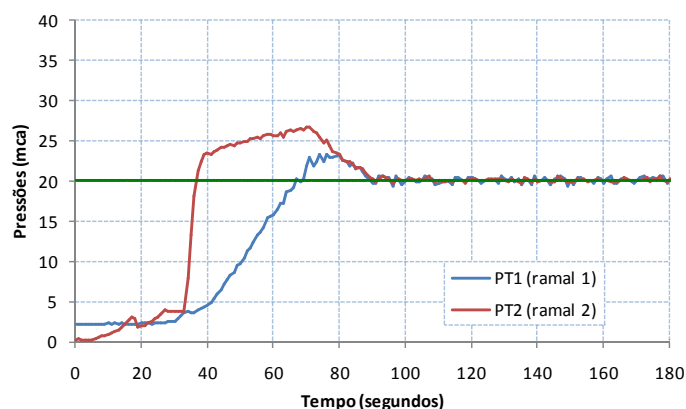


Figura 8 - Curvas de resposta do sistema de controle em malha fechada - Experimento 3

AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Para avaliar a eficiência energética do sistema experimental, com e sem o controlador do conversor de frequência (experimentos 1 e 2), foi medido *on-line* a potência consumida e calculado o índice de Consumo Específico de Energia Elétrica (kWh/m³).

O Consumo Específico de Energia Elétrica (CE) é largamente utilizado no setor de saneamento e é definido como a relação entre o consumo de energia (kWh) do sistema de bombeamento e o volume bombeado (m³), em um determinado tempo, e é expresso pela Eq. (3). Este indicador é bastante eficiente para acompanhamento de sistemas de bombeamento de água, porém é incorreto utilizá-lo para comparar a eficiência energética de sistemas de bombeamento diferentes.

$$CE = E / V$$

equação (3)

Onde E é a energia consumida no tempo t , em kWh; e V é o volume bombeado no tempo t , em m³.

Apesar do conversor de frequência consumir cerca de 5% da energia total e ocasionar um decréscimo de rendimento do conjunto motor-bomba. Verificou-se que o controle de rotação proporcionou uma redução no consumo de energia elétrica de 19.312 kWh/ano para 12.547 kWh/ano, resultando numa economia de 35,03%, com uma diminuição de 27,91% no indicador CE. A Figura 7 mostra o comportamento das vazões bombeadas (ramal 1 + ramal 2), a Figura 9 apresenta as curvas de potência, e a Figura 10 exibe a curva do CE. O Quadro 3 apresenta os valores dos parâmetros de avaliação energética dos experimentos 1 e 2. A redução no CE expressa à melhoria da eficiência do sistema. Como se trata de um sistema com uma demanda variável no tempo e o bombeamento direto na rede, a redução significativa no consumo energético era esperada, sendo esse estudo mais um trabalho que comprova a viabilidade do uso de conversores nestes casos.

Quadro 3 - Indicadores de consumo dos experimentos 1 e 2

	Sistema em malha aberta (Experimento 1)	Sistema em malha fechada (Experimento 2)	Diferença (%)
Vazão (m ³ /h)	7,7289	6,9268	10,38
Consumo de energia (kWh/ano)	19.312	12.547	35,03
CE (kWh/m ³)	0,2877	0,2074	27,91

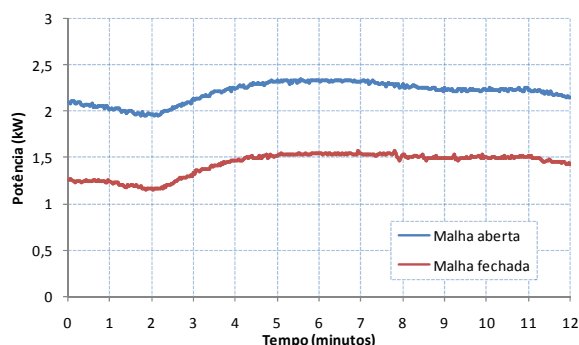


Figura 9 - Consumo energético do conjunto motor-bomba dos experimentos 1 e 2

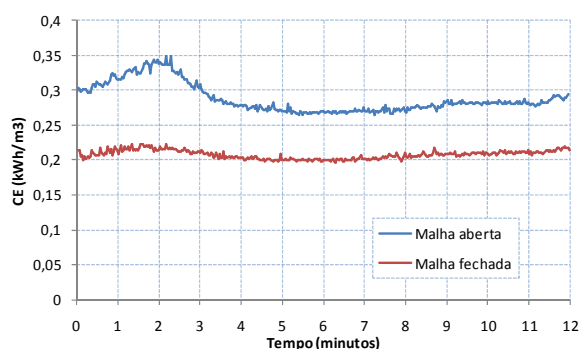


Figura 10 - Curvas do CE dos experimentos 1 e 2

AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA

O conversor de frequência, atuando de maneira isolado, não tem capacidade de otimizar a pressão em mais de um ponto de um sistema de distribuição de água, conforme se pôde observar na experiência 2. Os resultados do controlador fuzzy do conversor de frequência, na bancada experimental, apresentaram um excesso de pressão de 35,2% (7,04 m) no PT1 (ramal 1).

Utilizando a equação sugerida por MAY (1994), Eq. (4), e extrapolando os resultados para um SDA com vazamentos, com um valor de “N1” igual a dois (tubos de plástico), tem-se que o sistema fuzzy desenvolvido para o controle simultâneo do CF e da CV proporcionaria uma redução potencial de 75% (ramal 1) e 67% (ramal 2) do volume de vazamentos quando comparado com o sistema sem nenhum controle de pressão, e de 45% (ramal 1) do volume de vazamentos comparando-o com o sistema com controle de pressão através do conversor de frequência. O Quadro 4 apresenta a sinopse do potencial de volume de vazamentos e as pressões da bancada experimental para as diversas condições consideradas.

$$Q_1 / Q_2 = (P_1 / P_2)^{N1} \quad \text{equação (4)}$$

Onde Q é a vazão do vazamento; P é a pressão no sistema; e $N1$ é o expoente que depende do tipo de material.

Quadro 4 - Resumo das pressões e volume perdido por vazamentos (estimado)

SITUAÇÃO	Ramal 1		Ramal 2	
	Pressão média (m)	Volume de vazamento potencial	Pressão média (m)	Volume de vazamento potencial
Sistema de controle (CF+CVc) (Experimento 3)	20,00	x	20,00	y
Controlador fuzzy do CF (Experimento 2)	27,04	1,83*x	20,00	y
Sem controlador (Experimento 1)	40,02	4,00*x	34,94	3,05*y

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou um sistema fuzzy para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água. A aplicação da Lógica Fuzzy nestes sistemas aponta para o desenvolvimento de um sistema de controle robusto, que atua com quaisquer valores de referência de pressão, não havendo limite para o número de pontos monitorados e controlados, podendo, inclusive, variar os valores de referência com o tempo.

O sistema de controle apresentou resposta satisfatória, o erro de regime permanente máximo nos experimentos foi de 3,47% e em valores absolutos foi de 0,70 m, ou seja, as pressões se mantiveram próximas aos valores estabelecidos. O controle da pressão mínima do sistema, que é prioritariamente realizado pelo conversor de frequência, tem uma resposta rápida. No entanto, devido ao elevado tempo de resposta da válvula de controle,



a resposta global do sistema tornou-se, relativamente, lenta e com sobre-sinais elevados. O tempo de assentamento foi de aproximadamente 90 segundos - para o conjunto motor-bomba partindo do repouso, a CVc fechada e a CVs com 45° de abertura - sendo considerado muito pequeno para este tipo de aplicação. O sistema apresentou um sobre-sinal elevado, pois se priorizou a rapidez na elevação da pressão.

As variáveis de saída dos controladores mantiveram-se coerentes quando comparados os experimentos entre si, havendo uma perfeita sincronia entre os controladores fuzzy da válvula de controle e do conversor de frequência. Os resultados foram compatíveis com as simulações das modelagens realizadas.

Apesar do conversor de frequência consumir cerca de 5% da energia total e ocasionar um decréscimo de rendimento do conjunto motor-bomba, verificou-se que o controle da velocidade de rotação proporcionou uma redução no consumo estimado de energia elétrica de 19.312 kWh/ano para 12.547 kWh/ano, resultando numa economia de 35,03%, com uma diminuição de 27,91% no Consumo Específico de Energia Elétrica (kWh/m³).

O sistema fuzzy desenvolvido para o controle piezométrico de sistemas de distribuição de água, através do uso simultâneo de CF e CV, proporcionaria uma redução potencial, extrapolando os resultados da bancada experimental para um sistema de distribuição com vazamentos, de 75% (ramal 1) e 67% (ramal 2) do volume de vazamentos quando comparado com o sistema sem nenhum controle de pressão, e de 45% (ramal 1) do volume de vazamentos comparando-o com o sistema com controle de pressão através do conversor de frequência.

O desempenho do sistema fuzzy para o controle piezométrico se mostrou satisfatório, podendo ser implementado facilmente a outros sistemas de distribuição de água similares, apresentando como principais vantagens: a não necessidade de modelagem do sistema a ser controlada, a possibilidade de poder incorporar conhecimentos heurísticos do operador humano e sua aplicabilidade em sistemas de dinâmica complicada.

Desta forma, concluímos pelo êxito da aplicabilidade dos sistemas fuzzy como ferramenta de otimização da operação de sistemas de distribuição de água, com vistas à redução do consumo de água e energia elétrica. A praticidade e a confiabilidade do sistema de controle apresentado na investigação podem ser traduzidas como um avanço tecnológico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Governo do Brasil, pelo apoio financeiro concedido através das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARAUJO, L.S, RAMOS, H., COELHO, S.T., 2006, "Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management". Water Resources Management, v. 20, n. 1, pp. 133-149.
2. BEZERRA, S.T.M., 2009, Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia. Tese de D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil. Disponível em <<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/serea/teses/tesesufpb.htm>>. Acesso em 18 de maio de 2009.
3. BRAGA, M.J.F., BARRETO, J.M., MACHADO, M.A.S., 1995, Conceitos da Matemática Nebulosa na Análise de Risco. Rio de Janeiro, Artes & Rabiscus (apud SILVA, 2005).
4. CUBILLOS, X.C.M., 2008, Investigação de técnicas de controle multivariáveis no controle de atitude de um satélite rígido-flexível. Dissertação de M.Sc., INPE/MCT, São José dos Campos, SP, Brasil.
5. ELETROBRÁS, 2008, Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Home Page do PROCEL SANEAR. URL: <http://www.eletronbras.com/elb/procel>. Acesso em 28 de outubro de 2008.
6. ESMPU - ESCOLA SUPERIOR DO MINISTÉRIO PÚBLICO DA UNIÃO, 2005, Boletim Científico, ano 4, n. 16, jul./set., Brasília.
7. FORMIGA, K.T., 2005, Otimização multiobjetivo de projetos de redes de distribuição de água. Tese D.Sc., Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil.



8. GARZÓN CONTRERAS, F., THORNTON, J., 2006, "Influencia de la presión en las pérdidas de agua en sistemas de distribución". In: Anais do Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Punta del Este, pp. 26-30.
9. GERMANPOULOS, G., JOWITT, P.W., 1989, "Leakage reduction by excess pressure minimization in a water supply network". In: Proceedings Instn. Civ. Engrs, Part 2, pp. 195-214, Jun.
10. GIDDENS, A., 1999, Introduction to sociology. New York, W.W. Norton & Company.
11. GOMES, H.P., 2005, Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos. 1ª ed, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Editora da ABES Nacional.
12. HOVSTADIUS, G., 2007, "Tackling soaring energy costs in North America". World Pumps, pp. 38-40, Set.
13. JAMES, K., CAMPBELL, S.L., GODLOVE, C.E., 2002, Água e Energia - Aproveitando as Oportunidades de Eficientização de Água e Energia não Exploradas nos Sistemas
14. MAMDANI, E.H., ASSILIAN, S., 1974, "An experiment in linguistic synthesis with a Fuzzy Logic controller". International Journal of Man-Machine Studies, v. 7, pp. 1-13, pp. 1-13.
15. MAY, J., 1994, "Pressure Dependent Leakage". World Water and Environmental Engineering, Out.
16. PEDROSA FILHO, L.A., 2006, Um Modelo de Operação de Sistemas Adutores de Abastecimento de Água com vistas a Minimização dos Custos Energéticos. Tese de D.Sc., Programa Institucional de Doutorado Temático em Recursos Naturais, Campina Grande, PB, Brasil.
17. PELLI, T., HITZ, H.U., 2000, "Energy indicators and savings in water supply". Journal AWWA, v. 92, n. 6, pp. 55-62 (apud RODRIGUES, 2007).
18. PILCHER, R., HAMILTON, S., CHAPMAN, H., et al., 2007, Leak Location and Repair - Guindace Notes. IWA, Mar.
19. REYERO, R., NICOLÁS, C.F., 1995, Sistemas de Control Basados em Lógica Borrosa: Fuzzy Control, Omron Eletronic S.A., Espanha (apud IVANQUI, 2005).
20. RODRIGUES, W., 2007, Critérios para o uso Eficiente de Inversores de Frequência em Sistemas de Abastecimento de Água. Tese de D.Sc., FEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.
21. SAVIC, D.A., WALTERS, G.A., 1995. "An Evolution Program For Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks". Engineering Optimization, v. 24, n. 3 (Jul), pp. 197-219.
22. SHAW, I.S., SIMÕES, M.G., 1999, Controle e modelagem fuzzy, 1ª ed., São Paulo, SP, Brasil, Editora Edgard Blücher Ltda.
23. SILVA, M.A.B., 2005, Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
24. THORNTON, J., 2002, Water Loss Control Manual. McGraw-Hill Professional, Jun.
25. TSUTIYA, M.T., 2004, Abastecimento de Água. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.
26. TSUTIYA, M.T., 2008, Abastecimento de Água: Gerenciamento de Perdas de Água e Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento. In: Guia do Profissional em Treinamento: Nível 2. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (eds). RECESA, Salvador, BA, Brasil.
27. VITKOVSKY, J.P., SIMPSON, A.R., LAMBERTET, M.F., 2000, "Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms". Journal of Water Resources Planning and Management, v. 126, n. 4, pp. 262-265.
28. ZADEH, L.A., 1965, "Fuzzy Sets". Information and Control, v. 8, n. 3 (Jun), pp. 338-353.
29. ZADEH, L.A., 1973, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes". IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, v. SMC-3, n. 1 (Jan), pp. 28-44.