

## XI-015 - LÓGICA FUZZY APLICADA NA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

**José Kleber Costa de Oliveira<sup>(1)</sup>**

Doutorando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, e Tecnólogo em Automação Industrial pelo IFRN, atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN, campus Caicó.

**Kenny Rogers da Silva Henriques<sup>(2)</sup>**

Mestrando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, atualmente é Engenheiro da Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

**Moisés Menezes Salvino<sup>(3)</sup>**

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

**Heber Pimentel Gomes<sup>(4)</sup>**

Doutor pela Universidade Politécnica de Madri - Espanha, Mestre em Recursos Hídricos pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB, atualmente é professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do Centro de Tecnologia da UFPB e coordenador do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (LENHS) na UFPB.

**Geraldo de Araújo Moura<sup>(5)</sup>**

Doutorando em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB, atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB, campus João Pessoa.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua: Jociara Telino, 370, Condomínio Água Azul, bloco 23, Apto 203 - Bairro: Bancários, João Pessoa, PB - CEP: 58051-100 - Brasil - Tel: +55 (83) 98828-4771 - e-mail: jkleber2010@gmail.com.

### RESUMO

Este trabalho apresenta a técnica de controle *fuzzy* aplicada a uma Rede Piloto de Distribuição de Água (RPDA) dividida em dois setores, a qual é alimentada diretamente por um conjunto motobomba e com duas Válvulas Reguladoras de Pressão (VRP) instaladas na entrada dos setores. O controlador *fuzzy* atuante na bomba tem como objetivos manter a pressão constante na saída dos ramais de água dos setores em um valor predefinido e condicionar que a bomba funcione com uma melhor eficiência energética. Na entrada de cada setor foi instalada uma Válvula Reguladora de Pressão (VRP) para controlar a pressão a jusante de sua instalação nas saídas dos ramais de água quando ocorrer à diminuição do consumo. A arquitetura do sistema de controle foi projetada de forma que um controlador *fuzzy* atuará na modulação da velocidade do conjunto motobomba, adequando-a em função das pressões de saída dos setores e buscando mantê-la constante, como também nas VRPs, controlando as pressões na saída do setor, buscando mantê-la em um valor predefinido. O excesso de energia de pressão de um setor poderá ser transferido para o outro através da VRP. Os controladores atuam de forma independente entre eles, porém, apresenta em comum o mesmo sinal de entrada, as pressões nos ramais. Ao final foram feitos testes e seus resultados comprovaram que o sistema operando sob a ação dos controladores apresentou uma redução de no mínimo 14% no consumo de energia elétrica. Finalmente foi avaliado o ganho energético do sistema operando com a ação do controlador em comparação com o sistema operando sem o controle.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controlador *fuzzy*, Eficiência Energética, Setorização da RPDA, Controle da pressão.

### INTRODUÇÃO

A água potável, por ser um recurso natural e se apresentar limitado em algumas regiões nos dias atuais, deve ser distribuída de forma eficiente em quantidade e pressão suficientes para atender às necessidades de consumo da população. Entretanto, as companhias de abastecimento têm dificuldades de manter a qualidade do serviço

devido ao envelhecimento e desgaste das estruturas, equipamentos e tubulações que compõem o sistema de abastecimento.

Outro fator que também dificulta o bom atendimento da distribuição de água pelas empresas está relacionado com o crescimento populacional, que, no Brasil, tem como média 3% ao ano. Contudo, em alguns bairros nos grandes centros urbanos se observam taxas de crescimento acima dessa média, como é o caso do bairro do Bessa na cidade de João Pessoa – PB, que apresentou uma taxa de crescimento de 8,5 ao ano, segundo dados do censo do IBGE de 2000 a 2010.

Uma técnica utilizada pelas empresas de saneamento para contornar essas dificuldades operacionais de abastecimento é a instalação de *boosters* nas redes de distribuição. Dessa forma, os trechos da rede a jusante de sua instalação são pressurizados, anulando a necessidade de se fazer ampliação dos projetos em vigor e atendendo a população de localidades mais afastadas com cotas de terreno mais elevadas.

Ainda na busca de solucionar os problemas citados, algumas empresas, mesmo diante da carência de recursos financeiros, projetam e constroem novos sistemas de abastecimentos mais econômicos. Esses sistemas suprimem os reservatórios de distribuição que podem variar entre 20% e 40% dos custos do valor final de um sistema.

Em ambas as situações evidenciadas, as pressões na rede variam em função do consumo, isto é, quanto maior o consumo, menor a pressão e vice-versa. Essa operação tem como consequência o surgimento de vazamentos e o desperdício de energia elétrica.

Segundo Carrijo et al. (2003), a operação de um sistema urbano de abastecimento de água em tempo real é uma tarefa muito complexa e tem exigido uma maior consideração por parte de pesquisadores e de outros profissionais da área. Essa importância tem como focos principais o suprimento da necessidade de atendimento dos consumidores nas pressões desejadas capazes de atendê-los nos pontos mais desfavoráveis com relação aos desníveis do terreno e a economia de energia elétrica com o uso de equipamentos com tecnologia de ponta.

Ainda de acordo com Carrijo et al. (2003), na busca de uma maior eficiência para os sistemas de abastecimento de água, novas técnicas hidráulicas associadas a algoritmos de otimização têm sido estudadas e desenvolvidas no intuito de estabelecer maior confiabilidade no desenvolvimento de regras para operação de sistemas de abastecimento de água.

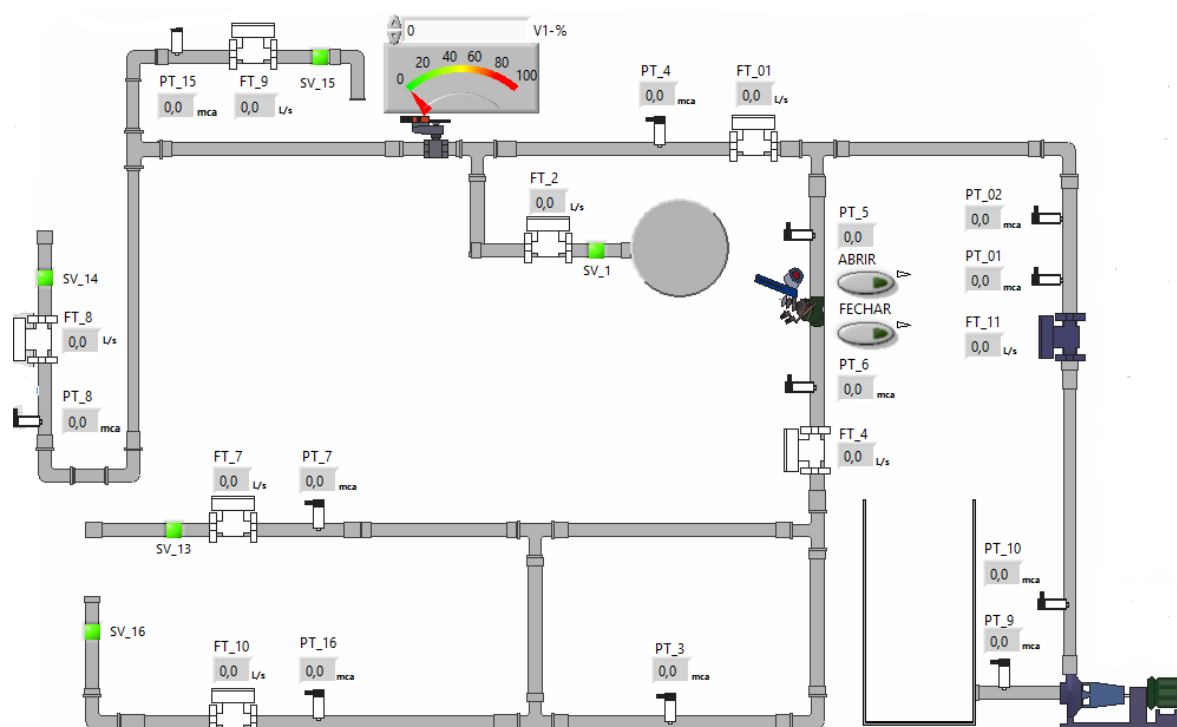
Yang, et al. (2010) ratificam que os sistemas de abastecimento convencionais, em que as velocidades das bombas não se alteram, não são capazes de se ajustarem à variação de consumo dos usuários. Além de não otimizarem o fornecimento de água, são responsáveis pela aplicação de excessos de carga no sistema, provocando desperdício de energia e danos às redes, canalizações auxiliares e equipamentos nela instalados.

Assim, este trabalho busca encontrar soluções para a problemática operacional exposta através da aplicação de técnica de controle *fuzzy* para uma rede de distribuição de água, com o propósito de controlar os pontos de sobrepressão no sistema na medida em que ocorrer variações no consumo. Além disso, o estudo também se propõe em minimizar os transientes provocados pelo acionamento das bombas ou abertura e fechamento das válvulas e transferir o excesso da energia de pressão de um setor para o outro.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Bancada experimental

A rede de distribuição de água utilizada no trabalho foi montada no laboratório de Hidráulica e Eficiência Energética (LENHS) da Universidade Federal da Paraíba – UFPB em uma bancada experimental. A rede é dividida em dois setores com ramais de saída em diferentes cotas do terreno o que se assemelha a um sistema real de distribuição de água. Ela é alimentada por um conjunto motobomba e tem um monitoramento gerenciado por um sistema supervisorio desenvolvido no software LabVIEW que integra a instrumentação com CLP e o supervisorio. A Instrumentação e a tela do supervisorio podem ser observadas na Figura 1.



**Figura 1 - Desenho da Rede Piloto de Distribuição de Água RPDA – no interior do LENHS.**

### Rede de distribuição

A rede de abastecimento emula uma rede real. Ela possui 155 metros de comprimento, sendo distribuída da seguinte forma: tubulações de PVC DN 50 - 140 m, DN 100 - 5 m e ferro dúctil DN 100 - 10 m. O sistema possui 05 (cinco) saídas de água (pontos de consumo) em 03 cotas do terreno diferentes, todas controladas por registros (manuais) e/ou válvulas solenoides. Foram instaladas 02 (duas) válvulas controladoras de pressão (VRPs) na entrada de cada setor e distribuídos nos dois setores: 12 (doze) transdutores de pressão, 09 (nove) medidores de vazão eletromagnéticos tipo carretel, 01 (um) medidor de vazão ultrassônico e 05 (cinco) válvulas solenoides.

### Sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento é composto de um conjunto motobomba, com motor de 05 (cv), com alto rendimento, de fabricação WEG, com velocidade de 1720 (rpm), fator de serviço 1.15 e corrente nominal de 8 (A). A bomba fabricada pela KSB impulsiona a água diretamente para a rede de distribuição com uma vazão máxima de 50 (m³/h) e uma pressão de 17 (mca). Na Figura 2 observa-se o conjunto motobomba com o detalhe da sua interligação ao sistema.



**Figura 2 - Foto do conjunto motor bomba com detalhe da interligação de saída para a rede.**

#### Painel de acionamento

O painel elétrico opera em conformidade com o sistema. Ele foi projetado tanto para servir de painel de interface entre os instrumentos da rede hidráulica e o supervisor como para servir de painel de comando e proteção do motor e equipamentos elétricos eletrônicos, como o inversor de frequência. Na Figura 3 pode-se observar a parte interna do painel.



**Figura 3 - Foto do painel com detalhe do inversor de frequência.**

#### Válvulas Reguladoras de Pressão

As VRP's são fabricadas para operarem de modo aberto/fechado (*on/off*). O modelo apresentado na Figura 4 representa uma válvula que também é chamada de atuador e por não ter uma informação de sua posição é considerada em malha aberta. Existem também as válvulas com a indicação de posição. Elas operam em malha fechada, pois realimenta o sistema com a informação de sua posição de abertura, ou fechamento. Nesse sistema foram instalados os dois modelos de válvulas. Elas têm como objetivo manter a pressão constante a jusante de sua instalação, ou seja, nas saídas dos ramais de água. As pressões nesses pontos podem variar em função do aumento, ou da diminuição do consumo de água, quando ocorrer uma diminuição dessa demanda de água a pressão na rede irá aumentar e a atuação da válvula garante que esta seja controlada para valores pré definidos.

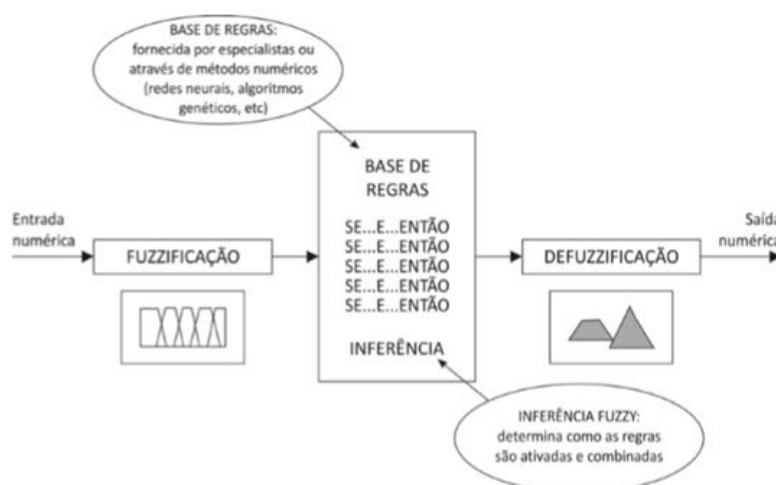


**Figura 4 - Foto da Válvula Redutora de Pressão (VRP) de fabricação BELINO**

### Controlador fuzzy

Os sistemas de abastecimento de água não apresentam linearidade nas suas variáveis de pressão ou vazão quando em operação. Por isso, se torna difícil para os controladores clássicos conseguirem atuar de forma eficiente. As combinações do controle Proporcional e Integral (PI), Proporcional e Derivativo (PD), ou Proporcional, Integral e Derivativo (PID) quando aplicados a esses sistemas não se mostram eficazes para toda faixa de operação. Por isso, os sistemas *fuzzy* são utilizados na solução do problema da não linearidade, porque eles são robustos, versáteis e de grande adaptabilidade. Se o operador de um processo for capaz de criar regras da forma: “SE”, como antecedente e “ENTÃO” como consequente para controlar seu processo, será possível a implementação de um algoritmo computacional *fuzzy* para atuar no controle desse processo.

Um sistema *fuzzy* pode ser representado pelo diagrama de bloco da Figura 5.



**Figura 5 - Desenho do diagrama de bloco do sistema *fuzzy*.**

O controlador projetado para essa planta foi dividido em três sistemas *fuzzy* com atuação separada, sendo um para o controle da velocidade do conjunto motobomba e os outros dois para controlar a pressão em cada setor através das válvulas VRP.

O controlador da bomba foi planejado para ter duas variáveis de entrada, sendo a primeira delas as pressões que foram medidas nas saídas dos ramais de cada setor e a segunda variável a derivada do erro da pressão. A saída desse controlador, chamada de defuzzificação, faz variar a velocidade através do incremento ou decremento de um delta de velocidade.

O controlador projetado para a válvula V1, a VRP que permite informar sua posição de fechamento, teve como entradas: a pressão no trecho de saída dos ramais do setor que ela foi instalada, a diferença entre a pressão de montante e a de jusante da válvula e a velocidade do conjunto motobomba. A saída desse controlador gera um sinal de incremento ou decremento na posição de abertura ou no fechamento da válvula.

Essas entradas foram necessárias para possibilitar ao controlador alterar a posição da válvula toda vez que a pressão nos ramais de saída estiver acima do valor da referência e necessitar de correção. Nesta condição, a válvula deve ser fechada permitindo que a pressão nos ramais diminua até igualar com a pressão de referência e parar o processo de fechamento da válvula, mantendo-a nessa posição.

Essa mesma lógica de controle foi aplicada também na válvula V2, a VRP que não tem a informação da posição de operação. Para a válvula V2 o controlador *fuzzy* não foi eficiente e apresentou uma instabilidade no controle da pressão, deixando-a oscilando. Por isso, fez-se necessário associar o *fuzzy* ao controlador Proporcional Integral e Derivativo – PID para anular as oscilações e minimizar o erro entre a pressão e a referência da pressão. E assim, foi possível apresentar resultados satisfatórios, pois sem a informação da posição, a ação de parar a abertura ou o fechamento estava comprometendo o desempenho do controlador, deixando-o muito instável. Nesse controlador da válvula V2, o *fuzzy* tem como entradas a Derivada do Erro, a Pressão de saída dos ramais e a Diferença da Pressão medidas antes e depois da válvula. Essas três entradas depois de passarem pelo sistema de regras do *fuzzy* faz gerar um sinal de abertura ou o fechamento da VRP que é somado à saída do controlador PID para finalmente entrar na ação de comando da válvula.

## RESULTADOS

O experimento iniciou com a bomba operando na máxima velocidade de 1720 (rpm) e as duas válvulas totalmente abertas. Quando ocorreu a estabilização do sistema, o valor da pressão medida foi de 15,6 (mca) e a vazão 28,5 (m<sup>3</sup>/h). A potência requerida pela bomba nesse ponto de operação foi de 3,23 (kW). Esse ponto representa a máxima demanda e potência, já os demais patamares de consumo serão inferiores a esse, sendo esta a condição a mais crítica para fornecimento de água do sistema.

Dando continuidade ao experimento, variamos o consumo para três pontos distintos, mas mantendo as válvulas abertas. Com essa variação, a pressão foi alterada para pontos intermediários maiores, até que atingiu o valor máximo, próxima de 17,5 (mca). Nesse ponto de operação, chamado de *shut off*, a potência registrada foi de 1,9 (kW). Os valores da vazão, pressão e potência de cada ponto intermediário do cenário operacional simulado, estão presentes na Tabela 1.

**Tabela 1 - Dados do sistema operando sem ação do controlador.**

SISTEMA SEM CONTROLE			
PONTOS	VAZÃO (m <sup>3</sup> /h)	PRESSÃO (mca)	POTÊNCIA (kW)
1	28,5	15,6	3,23
2	24	16,5	2,7
3	16,4	17,1	2,4
4	0	17,5	1,9

A etapa seguinte do teste foi submeter o sistema sob a ação dos controladores *fuzzy* aplicado ao conjunto motobomba e as válvulas V1 e V2. Nesse teste a vazão foi diminuída para os três pontos distintos do experimento anterior com a velocidade de rotação do motor variando em função das pressões na saída dos ramais de água. As válvulas também fizeram a modulação de abertura e fechamento para manter a pressão constante na saída de cada ramal. Essa nova operação apresentou valores de vazão, pressão e potência diferentes dos já registrados no primeiro teste. Os novos dados foram coletados e são apresentados em forma de tabela. Esses dados (Tabela 2) confirmam que o aumento da pressão de serviço na saída dos ramais pode ser aproveitado para provocar a diminuição da velocidade da bomba e por consequência a redução na potência útil do motor.



**Tabela 2 - Dados coletados com o controlador *fuzzy* aplicado.**

SISTEMA COM CONTROLE FUZZY			
PONTOS	VAZÃO (m³/h)	PRESSÃO (mca)	POTÊNCIA (kW)
1	28	10	2,64
2	19	10,1	1,9
3	12	10	1,62
4	0	10	1,5

Na comparação entre os valores das Tabelas 1 e 2, é possível visualizar uma diminuição nos valores da potência em todos os pontos levantados no sistema, sendo 0,8 (kW) a maior diferença apresentada. A diminuição da potência, em valor percentual, de cada ponto, pode ser observada na Tabela 3.

**Tabela 3 - Diferença das Potências.**

QUADRO DAS POTÊNCIAS REGISTRADAS (kW)			
PONTOS	SEM CONTROLE	CONT. FUZZY	DIF. POTÊNCIA %
1	3,23	2,64	18,3
2	2,7	1,9	29,6
3	2,4	1,62	32,5
4	1,9	1,5	21,1

O maior percentual na diferença das potências entre os dois tipos de operação ocorreu no ponto 3 representando 32,5 %. Nesse ponto, a vazão se aproxima de 12 (m³/h) na operação com o controle *fuzzy* ativo e de 16,4 (m³/h) sem o controle. Foram registradas pressões nesse ponto de 10 (mca) e 17,1 (mca) para o sistema que opera com e sem a presença do controlador, respectivamente.

O menor percentual entre as potências ocorreu no primeiro ponto, mas mesmo assim, essa diferença ficou acima dos 14 %. Nesse ponto, a bomba estava operando com uma vazão de 28 e 28,5 (m³/h), para o sistema com e sem o controle, respectivamente.

Uma apresentação resumida desses dados pode ser vista na Figura 6, onde é mostrado um gráfico com os dados de vazão, pressão e potência do sistema quando estava operando sem a ação do controlador *fuzzy* e sob a ação do mesmo.

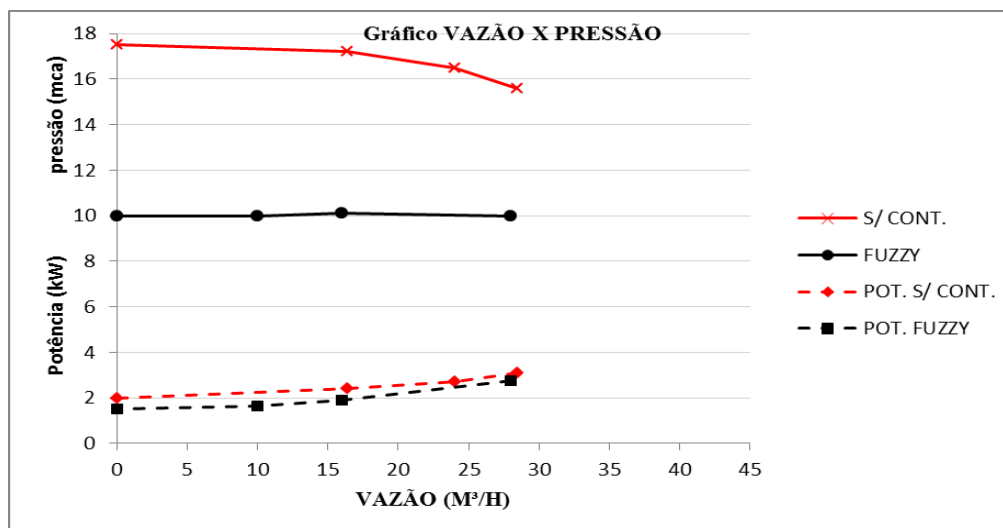


Figura 6- Gráfico da curva da bomba com sistema operando sem controle *fuzzy* e com o controlador atuando.

## ANALISE DOS RESULTADOS

Os resultados com o sistema operando sob a ação do controlador *fuzzy* se mostraram eficientes, ocorreu uma redução de 14,8 % na situação de vazão máxima e de 32,5 % para a mínima vazão, no terceiro ponto de operação.

Analisando os dados apresentados do indicador do Consumo Específico - CE, que representam os ganhos energéticos do processo, vistos na Tabela 4, é possível concluir que o sistema, quando operando sob a ação do controlador *fuzzy*, se mostrou mais vantajoso em relação ao sistema operando sem a ação do controlador.

Tabela 4 - Diferenças do Consumo Específico - CE

INDICADOR CONSUMO ESPECÍFICO CE (KW/M³)			
PONTOS	SEM CONTROLE	CONT. FUZZY	DIF. CE
1	0,11	0,09	0,02
2	0,11	0,10	0,01
3	0,15	0,14	0,01
4	*	*	*

Além da análise energética, o controle da pressão poderá proporcionar uma melhoria no serviço de abastecimento de água, no que se refere à redução do desperdício de água e no prolongamento da vida útil da rede de distribuição e nos acessórios nela instalados quando for aplicado a sistemas reais, pois possibilita a operação da rede com pressões menores.



## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema de bombeamento quando operado com a ação do controlador *fuzzy* apresenta um ganho energético de no mínimo 18,3 % na condição da vazão máxima, e de 32,5 % para a vazão intermediária.

Assim, é possível constatar que a técnica de controle *fuzzy* aplicada a sistema de distribuição de água com características de semelhança operacional poderá possibilitar ganhos energéticos significativos.

A implantação dessa técnica de controladores *fuzzy* em sistemas de abastecimento de água não necessita de grandes mudanças estruturais, apenas uma pequena adaptação no quadro elétrico de comando da bomba com a instalação de um inversor de frequência e de um CLP que tenha controlador *fuzzy* incorporado, além da instalação das válvulas reguladoras de pressão nos setores da rede de distribuição de água.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BEZERRA, S. M., & SILVA, S. A. (2009). Automação e Controle. In: H. P. GOMES, *Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética. 1ª ed.* João Pessoa, PB.
2. CAMBOIM, W. L. (2008). Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água. In: *Dissertação de Mestrado.* João Pessoa, PB.
3. CAMBOIM, W. L., SILVA, S. A., & GOMES, H. P. (2014). Aplicação de Técnicas Fuzzy no Controle de Pressão em Sistemas de Abastecimento de Água. João Pessoa, PB.
4. CARIJO, I. B., REIS, L. R., CHEUNG, P. B., SOARES, A. K., & SILVA, F. d. (2003). *Otimização da Operação de Sistemas de Distribuição de Água Utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo.* Acesso em 20 de novembro de 2014, disponível em [http://www.bwd.com.br/geasd/fotos/gea\\_publicacoes18.pdf](http://www.bwd.com.br/geasd/fotos/gea_publicacoes18.pdf)
5. CARVALHO, P. S. (2012). Controle para Bombeamento Distribuído com Vistas à Minimização dos Custos Energéticos Aplicado a Sistemas de Abastecimentos de Água.
6. CREACO, E., & FRANCHINI, M. (2013). A New Algorithm for Real-Time Pressure Control in Water Distribution Networks.
7. GOMES, H. P., Garcia, R. P., & Rey, P. L. (2007). Abastecimento de Água, o Estado da Arte e Técnicas Avançadas. Editora Universitária - UFPB, João Pessoa, PB.
8. Site: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/agsn2/>
9. TSUTIYA, M. T. (2006). *Abastecimento de Água.* São Paulo: Depart. de Engª Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Univ. de São Paulo, SP.
10. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. On formation and control.