



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

LÓGICA FUZZY APLICADA NA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA PARA ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA

Renato de Sousa

José Kleber Costa de Oliveira

robert-renato@hotmail.com

jkleber2010@gmail.com

Universidade Federal da Paraíba

Rua Jociara Telino, 370, Apto203 Blo 23, Bancários, 58051-100, Paraíba, João Pessoa, Brasil.

Heber Pimentel Gomes

heberp@uol.com.br

Kenny Rogers da Silva Henriques

Kennyrogers.cg@gmail.com

Fábio Araújo de Lima

fabioarsp@gmail.com

Universidade Federal da Paraíba

Rua Jociara Telino, 370, Apto203 Blo 23, Bancários, 58051-100, Paraíba, João Pessoa, Brasil.

Resumo: *Este trabalho apresenta a técnica de controle fuzzy aplicadas a uma Rede Piloto de Distribuição de Água (RPDA) dividida em dois setores, alimentada diretamente por um conjunto motor bomba e com duas Válvulas Reguladoras de Pressão (VRP) instaladas na entrada dos setores. O controlador fuzzy da bomba tem como objetivo manter a pressão na saída dos ramais de água dos setores constante em um valor pré definido e condicionar que a bomba funcione com uma melhor eficiência energética. A arquitetura do sistema de controle foi projetada de forma que um fuzzy atuará na modulação da velocidade do conjunto motor bomba, adequando-a em função das pressões de saída dos setores, buscando mantê-la constante e nas VRPs controlando também as pressões na saída do setor, buscando mantê-la em um valor pré definido. Os controladores atuam de forma independente entre eles, porém apresenta em comum o mesmo sinal de entrada, as pressões nos ramais.*

Palavras chave: *Fuzzy, Eficiência Energética, Controle de Pressão.*

1 INTRODUÇÃO

A água potável, por ser um recurso natural, hoje já limitado em algumas regiões, 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 tem como média 3% ao ano aqui no Brasil. Contudo, em alguns bairros nos grandes centros urbanos se observam taxas de crescimento bem a cima dessa média, como por exemplo, no bairro do Bessa na cidade de João Pessoa – PB que apresentou uma taxa de crescimento de 8,5% ao ano, segundo dados do censo 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, que pressuriza os trechos da rede a jusante de sua instalação. Dessa forma, não necessita fazer ampliação dos projetos em vigor e atende a população de localidades mais afastadas com cotas do 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 custam entre 20 e 40 por cento do valor final de um sistema.

Em ambas as situações, instalações de boosters e a construção de sistemas sem reservatório de distribuição, as pressões na rede variam em função do consumo, quanto maior o consumo, menor a pressão e vice-versa. Essa operação tem como consequente aparição de vazamentos e o desperdício de energia elétrica.

Segundo CARRIJO (2003), a operação de um sistema urbano de abastecimento de água, em tempo real, é uma tarefa muito complexa que vem recebendo atenção especial por parte de pesquisadores e de outros profissionais da área, com o intuito de suprir a necessidade de atendimento dos consumidores com demandas de água que possuam pressões desejadas capazes de atendê-los nos pontos mais desfavoráveis com relação aos desníveis do terreno e também à economia de energia elétrica com o uso de equipamentos com tecnologia de ponta para adiar a ampliação das unidades produtoras desde que não haja aumento do número de pessoas atendidas.

Ainda de acordo com CARRIJO (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 (2010) ratifica que os sistemas de abastecimento convencionais, onde as velocidades das bombas não se alteram, não são capazes de se ajustarem à variação de consumo dos usuários. Além de não otimizar o fornecimento de água, ainda são responsáveis pela aplicação em um excesso de carga no sistema, provocando desperdício de energia, além de causar danos às redes, canalizações auxiliares e equipamentos nela instalados.

Assim, este trabalho vai permear por essas problemáticas operacionais buscando encontrar soluções através da aplicação de técnica de controle *fuzzy* para uma rede de

distribuição de água, a fim de controlar os pontos de sobre pressão no sistema quando ocorrer à variação do consumo. Além de minimizar os transientes provocados pelo acionamento das bombas ou abertura e fechamento das válvulas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Bancada Experimental

A bancada experimental consiste de uma Rede Piloto de Distribuição de Água (RPDA) pressurizada por um conjunto motor bomba, totalmente instrumentalizada, como pode ser observada na Fig. 1.

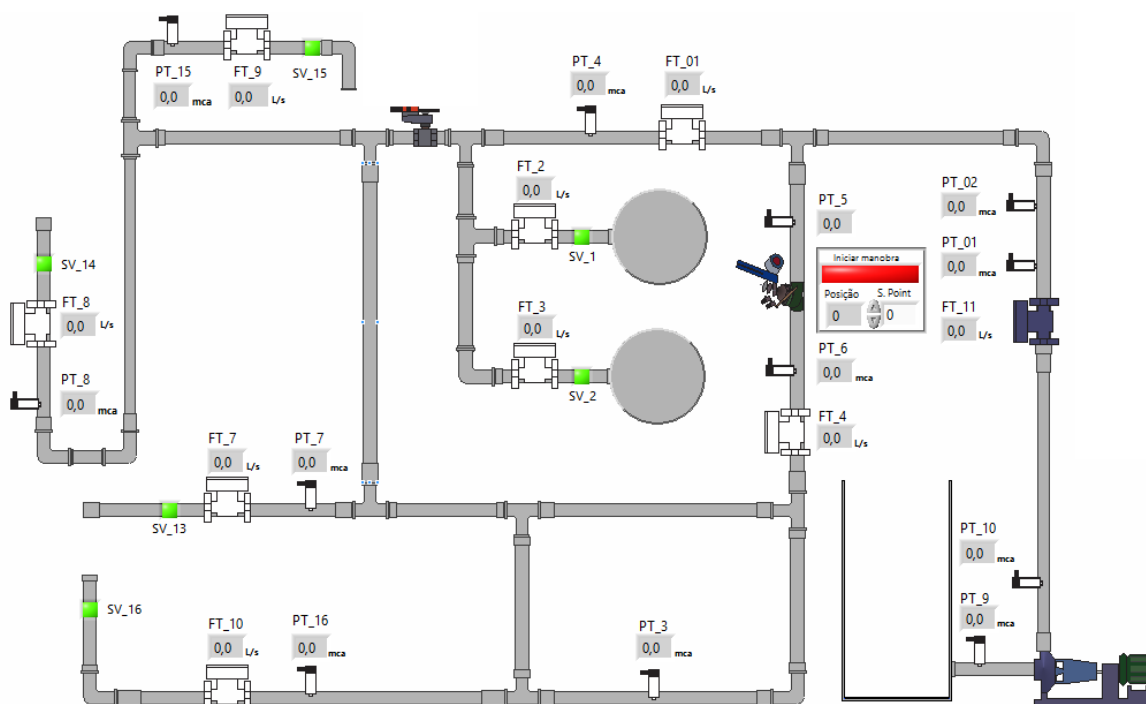


Figura 1 - Planta da Rede Piloto de Distribuição de Água.

2.2 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 06 (seis) saídas de água (pontos de consumo), todas controladas por registros (manuais) e/ou válvulas solenoides além de 02 (duas) válvulas controladoras de pressão (VRPs), 12 (doze) transdutores de pressão, 09 (nove) medidores de vazão eletromagnéticos tipo carretel, 01(um) medidor de vazão ultrassônico e 06 (seis) válvulas solenoides.

2.3 Sistema de Bombeamento

O sistema de bombeamento é composto de um conjunto motor bomba, com motor de 05 CV, de alto rendimento 88%, de fabricação WEG, de 1720 rpm, fator de serviço 1.15, corrente nominal 8 A. A bomba fabricada pela KSB impulsiona a água diretamente para a rede de distribuição com uma vazão de 50 m³/h e uma pressão de 17 mca. Na Fig. 2 observa-se o conjunto motor bomba com o detalhe da sua interligação ao sistema.



Figura 2 - Conjunto motor bomba com detalhe da interligação

2.4 Painel de Acionamento

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



Figura 3 - Painel com detalhe do inversor de frequência

2.5 Sistema Fuzzy

Capaz de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, em valores numéricos. Pode-se pontuar alguns pontos principais sobre a Lógica fuzzy.

- ✓ Converte a experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores, além de viabilizar a aplicação de estratégias de tomada de decisão em problemas complexos.
- ✓ É multivalente. Não impõe limites bruscos. O gerenciamento de incertezas ocorre pela expressão de termos com grau de certeza num intervalo numérico $[0,1]$, onde a certeza absoluta é representada pelo valor 1.
- ✓ Regula com base em regras.
 - Tais regras se apresentam em uma linguagem natural baseadas em características distinguíveis: lógica fuzzy.
 - As regras são criadas pelo operador ou pelo engenheiro de projeto.
 - Controle fuzzy é um ramo de controle inteligente.
 - Lógica fuzzy, permite uma graduação desde falso a verdadeiro. Assim, um condicionador de ar fuzzy pode reconhecer “quente” e “frio”.

2.6 Controlador Fuzzy

A não linearidade de um sistema de abastecimento de água se torna difícil para controladores clássicos conseguirem atuar de forma eficiente no controle de suas variáveis de pressão ou vazão. As combinações do controle Proporcional e Integral (PI), Proporcional e Derivativo (PD), ou Proporcional, Integral e Derivativo (PID) quando aplicados a esses

sistemas não mantem a estabilidade das variáveis. Assim, os sistemas *fuzzy* são utilizados na solução do problema da não linearidade. Eles são robustos, versáteis e de grande adaptabilidade. Se um operador de um processo for capaz de criar regras da forma “se, então” para poder controlar seu processo. Logo será possível a implementação de um algoritmo computacional *fuzzy*. Um sistema fuzzy pode ser representado pelo diagrama de bloco da Fig. 4.

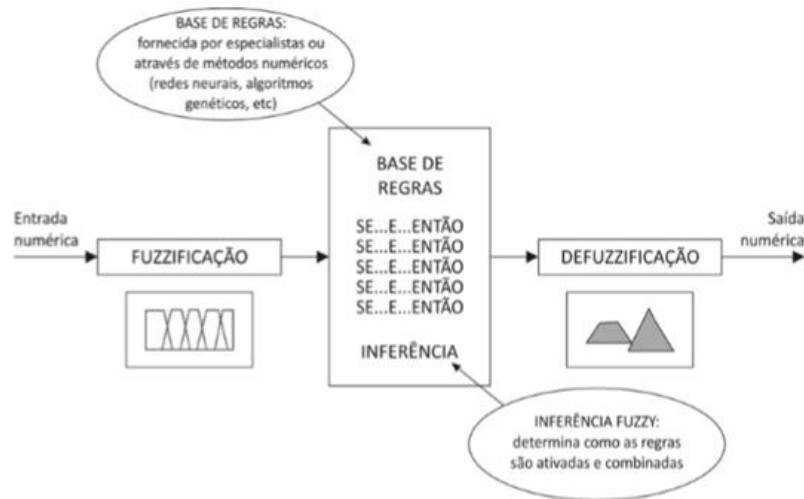


Figura 4 - Diagrama esquemático de um sistema fuzzy.

A fuzzificação ou as inferências usam duas variáveis de entrada, sendo a primeira entrada a pressão, cujo universo de discurso ficou de [0 a 25], valor correspondente à faixa da pressão na rede que pode ser vista no gráfico da Fig. 5.

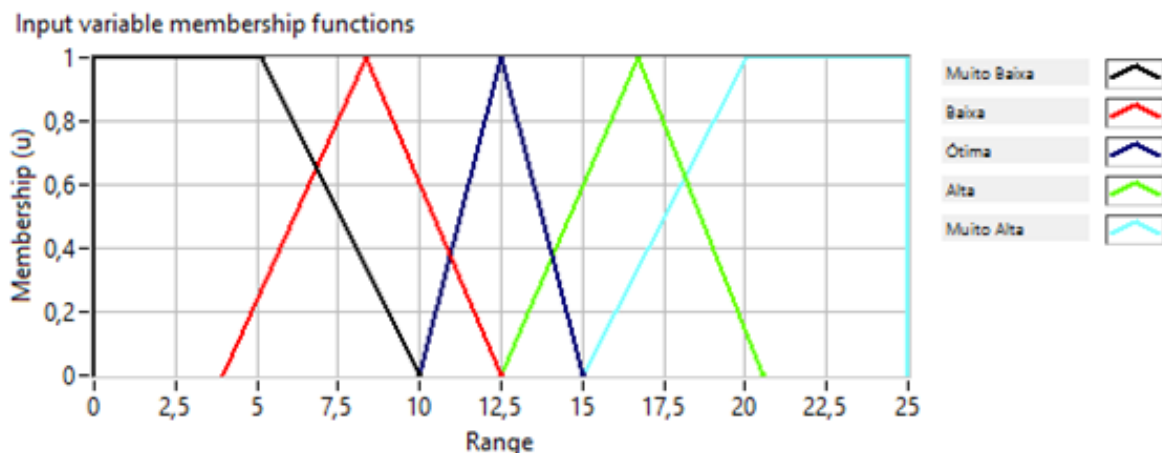


Figura 5 - Detalhe da variável de entrada pressão.

A segunda entrada do controlador fuzzy foi definida como sendo a DERIVADA DA PRESSÃO com seu universo de discurso variando de [-3 a 3]. Como pode ser observado no gráfico da Fig. 6.

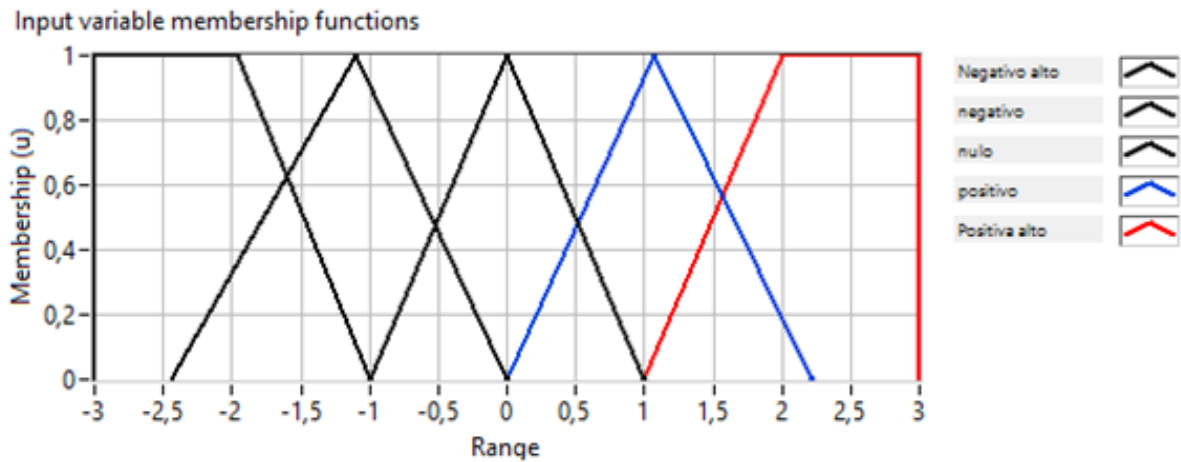


Figura 6 - Detalhe da variável de entrada derivada da pressão.

Na saída do controlador ocorre a defuzzificação, onde se utilizou o modelo com a média dos máximos (MoM). O universo de discurso ficou entre [-1 a 1], com funções trapezoidais nos extremos, e no centro as funções triangulares, como pode ser visto na Fig. 7. Esse sinal de saída irá incrementar ou decrementar um delta na velocidade do motor que será executado através do inversor de frequência.

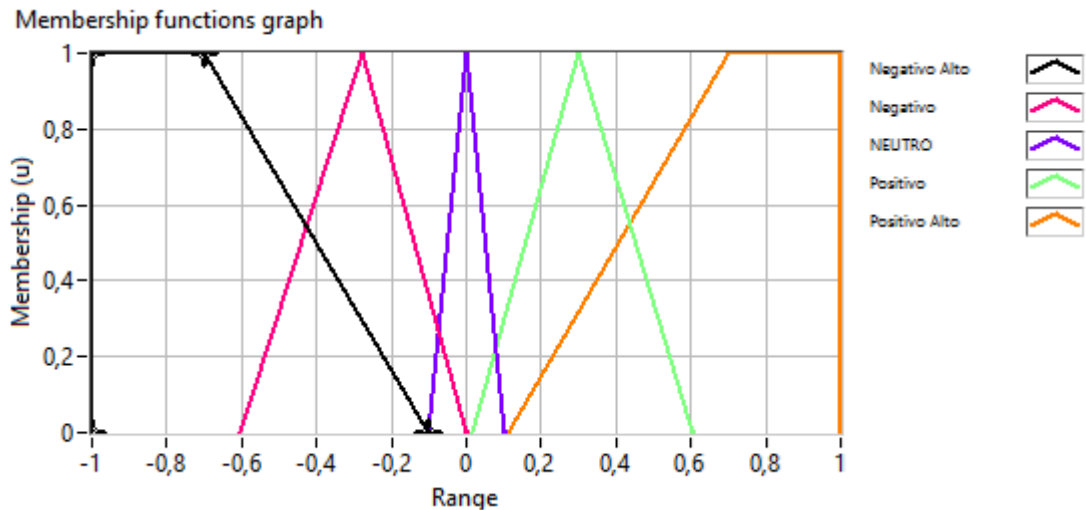


Figura 7 - Detalhe da variável de saída delta de velocidade.

2.7 Metodologia Experimental

A bancada experimental foi submetida a uma variação de consumo com e sem a atuação do controlador desenvolvido. A análise de sua eficiência foi obtida pela leitura da potência, em regime permanente, dentro de cada um dos cenários de operação no atendimento de cada ponto de consumo.

3 RESULTADOS OBTIDOS

O sistema de impulsão foi acionado com uma velocidade constante de 1720 rpm. Quando ocorreu a estabilização do sistema, o valor da pressão foi de 14,5 mca e a vazão em 42 m³/h, a potência requerida pela bomba nesse ponto de operação foi de 4,2 kW. Esse ponto representa a máxima demanda e os demais patamares de consumo serão inferiores a esse, sendo esta a condição mais crítica do sistema.

Com a modificação do consumo, a pressão e a vazão foram alterados para pontos intermediários, até atingir o valor 0 m³/h (zero) para vazão e 17,6 mca para pressão, nesse ponto de operação de *shut off*, a potencia registrada foi de 2,4 kW. Os valores da vazão, pressão e potência, de cada um dos cenários operacionais simulados, estão presentes na Tabela 1.

A próxima etapa foi submeter o sistema de distribuição, com bombeamento direto sob a ação do controlador desenvolvido *fuzzy*, no qual a velocidade de rotação do motor foi variada tendo esse valor ajustado pelo sistema de controle que tem por referência um valor de pressão na entrada da rede. Essa nova operação apresentou valores de vazão, pressão e potência diferentes dos já registrados no outro tipo de operação. Novos dados foram coletados, conforme é apresentado na Tabela 2. Esses valores confirmam que, com o aumento da pressão de serviço, tanto os vazamentos quanto o consumo, são afetados, portanto, uma das consequências positivas do controle, além da redução do consumo energético é a redução do desperdício de água.

Tabela 1 - Dados do sistema sem aplicação do controlador

Pontos	Vazão (m ³ /h)	Pressão (mca)	Potência (kW)
1	42	14,4	4,2
2	37,6	14,8	3,9
3	29,2	15,8	3,4
4	19,2	16,7	3
5	13,7	17	2,7
6	4,5	17,5	2,5
7	0	17,6	2,4

Tabela 2 - Dados Coletados com o Controlador Fuzzy Aplicado

Pontos	Vazão (m ³ /h)	Pressão (mca)	Potência (kW)
1	40	12,5	3,6
2	32,6	12,5	3,1
3	26,2	12,5	2,7
4	18,2	12,5	2,3
5	10	12,5	2
6	4,5	12,5	1,9
7	0	12,5	1,8

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 a maior diferença de 0,8 kW. A diminuição da potência, em valor percentual, de cada ponto está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Diferença das Potências.

Pontos	Sem Controle	Cont. Fuzzy	Dif. Potência (%)
1	4,2	3,6	14,3
2	3,9	3,1	20,5
3	3,4	2,7	20,6
4	3	2,3	23,3
5	2,7	2	25,9
6	2,5	1,9	24,0
7	2,4	1,8	25,0

O maior percentual na diferença das potências entre os dois tipos de operação ocorreu no ponto 7 que foi de 25 %. Nesse ponto a vazão está próxima de zero nos dois modelos de operação. Já a pressão ficou em 17,6 mca para o sistema que opera sem a presença do controlador e de 12,5 mca para o sistema que funciona sob a ação do controlador fuzzy. Já a

menor diferença percentual ocorreu no ponto 1, mesmo assim, essa diferença ficou acima dos 14 %. Nesse ponto a bomba estava operando na sua capacidade máxima de recalque com vazões de 42 e 40 m³/h respectivamente, para os dois modelos operacionais.

Na Fig. 8 encontra-se o 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.

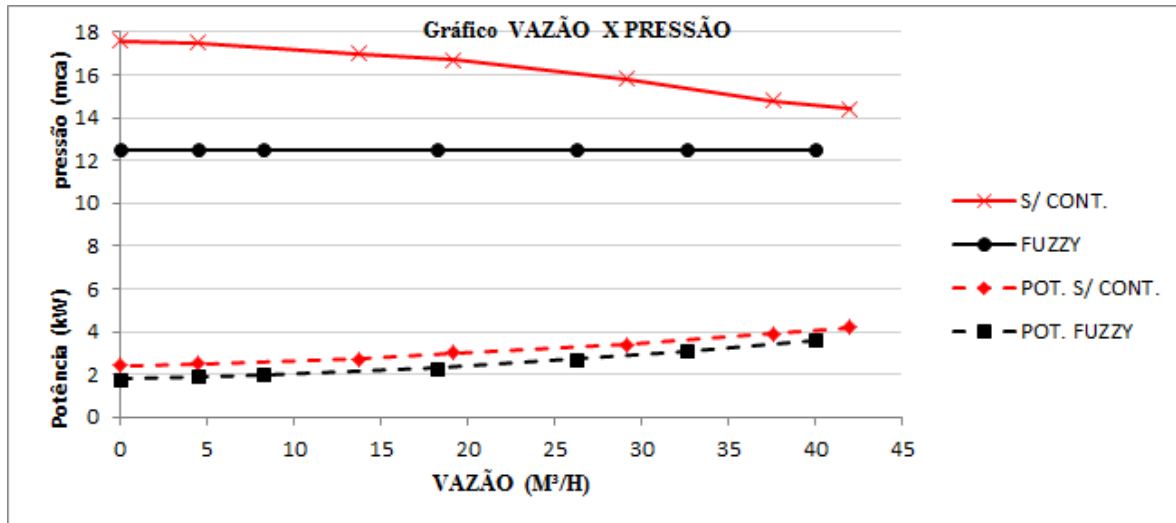


Figura 8 - Gráfico da curva da bomba com sistema operando sem controle fuzzy e com o controlador atuando.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados com o sistema operando sob a ação do controlador fuzzy se mostraram eficientes, houve uma redução de 14,3 na situação de vazão máxima e de 25 % para uma vazão mínima.

Para uma avaliação melhor do sistema foi proposto a utilização do indicador do Consumo Específico de Energia (CE), que representa a razão da potência elétrica pelo volume bombeado (kW/ m³). Esse indicador já está sendo bem difundido como ferramenta de análise hidro energética para sistemas de produção de água.

Para o primeiro ponto analisado, o indicador CE foi de 0,010 kW/m³, e para os outros pontos de operação estão dispostos na Tabela 4.

Analisando os dados apresentados 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. Esses valores das diferenças do CE, que representam os ganhos energéticos foram todos positivos, com exceção do ponto 5, onde o valor ficou praticamente igual nos dois modos de operação. Neste ponto o controlador fuzzy não tem muita influencia. Porém, nos demais o fuzzy se mostra sempre vantajoso.

Tabela 4 - Indicador Consumo Específico nas duas operações

Pontos	Sem Controle	Cont. Fuzzy	Dif. Potência (%)
1	0,10	0,09	0,01
2	0,10	0,10	0,00
3	0,12	0,10	0,02
4	0,16	0,13	0,03
5	0,20	0,20	0,00
6	0,56	0,42	0,14
7	X	X	X

Além da análise energética, o controle da pressão proporciona uma melhoria no serviço de abastecimento de água, no que se refere a redução do desperdício de água e no prolongamento da vida útil da rede de distribuição, e nos acessórios nela instalados.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema de bombeamento quando operado sem a ação do controlador fuzzy apresenta um indicador de Consumo Específico CE maior do que sob a ação do sistema de controle.

Dessa forma, foi possível constatar um ganho energético de no mínimo 14,3 % na condição da vazão máxima, e de 25 % para a vazão mínima.

Com os dados registrados da vazão e da potência, foi possível calcular o indicador do Consumo Específico CE. Esse Indicador corroborou o ganho no modo de operação com fuzzy que variou de 0,13 à 0,01 (kW/m³).

Assim, é possível constatar que a técnica de controle fuzzy aplicada a sistema de distribuição de água possibilitará ganhos energéticos significativos ao sistema.

As recomendações para melhoria desse trabalho é que o mesmo fosse implantado em uma rede real com características semelhantes de distribuição, onde um conjunto motor bomba injete água diretamente na rede.

6 REFERENCIAS

- BEZERRA, S. M., & SILVA, S. A. (2009). Automação e Controle. In: H. P. GOMES, *Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética. 1ª ed.* João Pessoa, PB.
- CAMBOIM, W. L. (2008). Aplicações de Técnicas de Controle Fuzzy para Sistemas de Abastecimento de Água. In: *Dissertação de Mestrado.* João Pessoa, PB.
- 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.
- 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
- CARVALHO, P. S. (2012). Controle para Bombeamento Distribuído com Vistas à Minimização dos Custos Energéticos Aplicado a Sistemas de Abastecimentos de Água.
- CREACO, E., & FRANCHINI, M. (2013). A New Algorithm for Real-Time Pressure Control in Water Distribution Networks.
- 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.
- KANG, D. (2014). Real-Time Optimal Control of Water Distribution Systems.
- LUVIZOTTO JÚNIOR, E. (1995). Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador. São Paulo - SP.
- RALIZE, C. C., & MARQUES, R. S. (2006). Elementos de Automação. Módulo I - Conceitos. In: *Departamento de Engenharia de Manutenção. SABESP.* São Paulo, SP.
- SPOLAOR, M. T. (2011). Automação nos Sistemas de Abastecimento de Água. Caso do Controle da Reversão de Distribuição. In: *Dissertação de Mestrado - UNICAMP.* Campinas, SP, São Paulo, Brasil.
- TSUTIYA, M. T. (2006). *Abastecimento de Água.* São Paulo: Depart. de Eng^a Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Univ. de São Paulo, SP.
- YANG, Z., WU, L., & DONG, X. (2010). Control System Design for Constant Pressure Water Supply, second International Conference on Multimedia and Information Technology.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. On formation and control.