

XI-027 - LÓGICA FUZZY APLICADA NA OTIMIZAÇÃO OPERACIONAL DE REDE SETORIZADA DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

José Kleber Costa de Oliveira⁽¹⁾

Tecnólogo em Automação Industrial pelo IFRN. Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação pela UFRN. Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB. Professor do IFRN, campus Caicó.

Renato de Sousa⁽²⁾

Engenheiro Mecânico pela UFPB. Mestrando em Engenharia Mecânica pela UFPB.

Kenny Rogers da Silva Henriques⁽³⁾

Engenheiro Ambiental pela UFCG. Mestrando em Engenharia Mecânica pela UFPB. Servidor público da UFPB.

Moisés Menezes Salvino⁽⁴⁾

Engenheiro Civil e Analista de Sistemas pela UFPB. Mestre em Engenharia Mecânica pela UFPB. Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPB. Sócio – diretor da empresa Hidrainfo Consultoria e Serviço LTDA.

Heber Pimentel Gomes⁽⁵⁾

Engenheiro Civil pela UFPB. Doutor em Engenharia Hidráulica, Professor da UFPB, campus Central.

Endereço⁽¹⁾: Rua Professor Manoel Fernandes, 385 – Maynard – Caicó - RN - CEP: 59300-000 - Brasil - Tel: (84) 999263294 - e-mail: jose.kleber@ifrn.edu.br.

RESUMO

Este trabalho apresenta a solução para o problema do excesso de pressão em sistemas de abastecimento de água, que têm injeção de água diretamente na rede ou com bombas instaladas em série na rede de modo que essas operações resultam no aumento do número de vazamentos, desperdício de água e de energia elétrica. Essa solução é de fundamental importância para a melhoria e continuidade do abastecimento de água nas comunidades afetadas pela escassez hídrica. Utilizou-se a técnica de controle *fuzzy* no conjunto motor-bomba e em válvulas reguladoras de pressão (VRPs), que se mostrou uma excelente solução para o controle da pressão em um valor constante, com redução do consumo de energia elétrica. A pesquisa foi desenvolvida em uma rede que simula um sistema real, sendo dividida em três setores, e nas entradas de dois deles foram instaladas as VRPs para auxiliar no controle, fazendo um ajuste fino quando o controlador da bomba não estivesse mais atuando. A arquitetura do sistema de controle foi projetada com dois controladores *fuzzy*, sendo um aplicado no conjunto motor-bomba modulando a velocidade do motor e um segundo controlador, denominado de *fuzzy* “eficiente”, atuando nas VRPs para controlar a abertura e o fechamento da passagem da água. O *fuzzy* “eficiente” teve como objetivo transferir o excesso da energia de pressão de um setor para o outro, por meio do fechamento da seção da válvula. A relevância do trabalho está também no benefício que tal estudo irá propiciar às empresas de saneamento, como a redução média de 19,46% no consumo de energia elétrica quando aplicado em sistemas semelhantes ao da pesquisa. Como resultado final no ganho energético, foi aplicado o Índice de Consumo Específico, apresentando uma redução de 23% entre a operação sem controle e sob a ação do controle *fuzzy*.

PALAVRAS-CHAVE: Rede Setorizada, Controle de pressão, Lógica *fuzzy*, Válvulas Reguladoras de Pressão, Inversor de Frequência.

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.

Para dificultar cada vez mais a qualidade do atendimento ao consumidor, além do crescimento populacional existe também o problema da diminuição da pressão nas áreas onde as cotas do terreno são elevadas, ali ocorre à diminuição da pressão nos horários de maior demanda de água.

Segundo Carrijo et al. (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 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, onde 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, 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 um sistema de controle para a pressão em uma rede de distribuição de água setorizada que é alimentada diretamente por um conjunto motor-bomba e tem válvulas reguladoras de pressão VRP instaladas nas entradas dos setores. O sistema de controle utiliza a técnica de controle *fuzzy* aplicado no controle de velocidade do motor e no controle da abertura e no fechamento das válvulas. O sistema de controle busca manter as pressões nos setores em um valor pré-definido (set point) mesmo ocorrendo à variação do consumo de água, além de minimizar os transientes hidráulicos e elétricos provocados pelo acionamento da bomba ou abertura e fechamento das válvulas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Rede de Distribuição de Água

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.

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 Figura 1.

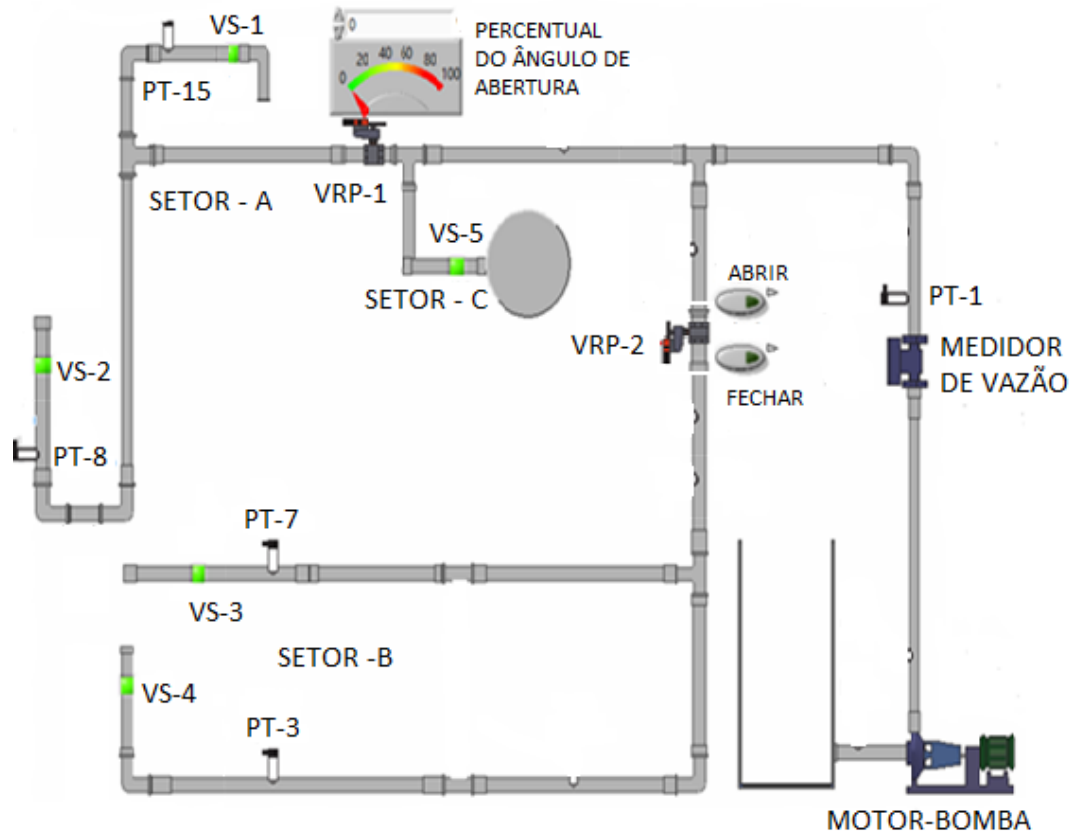


Figura 1 - Desenho da Rede Piloto de Distribuição de Água.

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 Ampères. 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 Figura 2 observa-se o conjunto motor-bomba com o detalhe da sua interligação ao sistema.

SISTEMA FUZZY

A técnica de controle *fuzzy* não trabalha com modelos matemáticos para controlar processos, mas, sim, utiliza um método de traduzir expressões verbais, vagas e imprecisas, comuns na comunicação humana, em forma compreensível pelos computadores. Dessa forma, os sistemas *fuzzy* 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*. O sistema *fuzzy* projetado para esta pesquisa foi dividido em dois tipos. O primeiro, para o controle do conjunto motor-bomba, que pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 2.

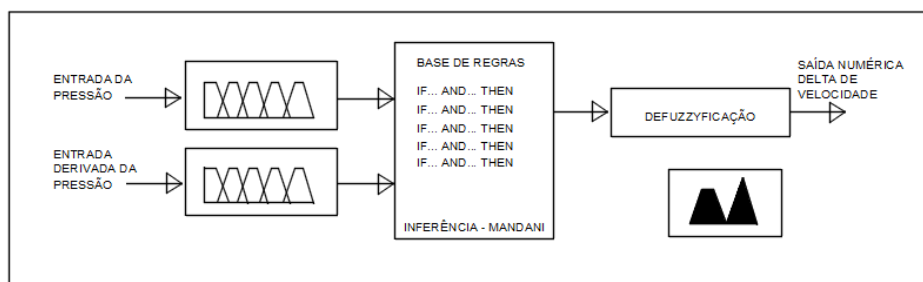


Figura 2 - Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* incremental para o motor-bomba

O segundo tipo de controlador *fuzzy* foi desenvolvido para ser aplicado nas válvulas, sendo que cada válvula recebeu um controlador *fuzzy* para executar a ação de abertura e fechamento de sua seção através da modificação do seu ângulo de abertura e fechamento. Esse *fuzzy* para as válvulas está representado no diagrama de blocos da Figura 3.

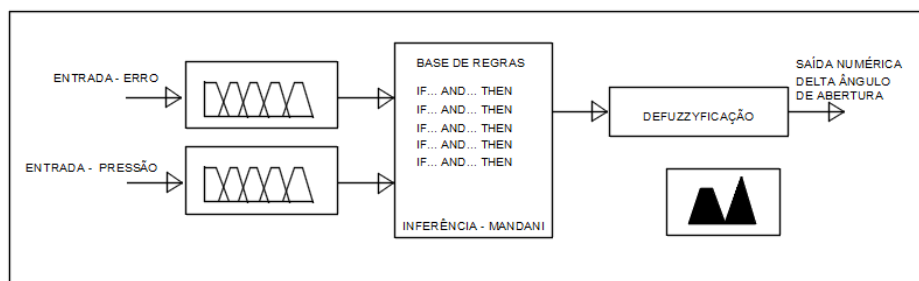


Figura 3 - Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* incremental para as válvulas V1 e V2

CONTROLADOR FUZZY

O sistema *fuzzy* desenvolvido para ser aplicado no controle da pressão da rede de distribuição utilizou a estrutura de regras baseada no modelo Mamdani com conectores “e” na fuzzyficação e “ou” (Máx-Min) na defuzzificação. Nesse controle, foi construído um sistema de regras de inferência *fuzzy* baseado em premissas e consequências, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de regras do sistema *fuzzy* para conjunto motor-bomba.

Derivada da pressão Pressão	Saídas				
	Negativo Alto	Negativo	Nulo	Positivo	Positivo Alto
Muito Baixa	PA	PO	PO	PA	PA
Baixa	PO	PO	PO	PO	PA
Ótima	NE	NE	NE	NE	NE
Alta	NA	N	N	N	N
Muito Alta	NA	NA	N	N	NA

Nessa perspectiva, o projeto do sistema *fuzzy*, para atender os objetivos dessa pesquisa, foi estruturado com os controladores trabalhando de forma autônoma entre os atuadores, sem interdependência entre si, ou seja, são descentralizados em suas ações e dessa forma a ação, por exemplo, do controlador da válvula V1 não dependeu da ação dos demais controladores.

Assim, se o controlador *fuzzy* de V1 necessitar atuar fechando, ou abrindo, a válvula os outros dois controladores, o da bomba e o de V2 estiverem desativados, mesmo assim, V1 irá operar sem nenhuma restrição. Esse mesmo comportamento de ação se estende aos demais controladores.

O projeto do sistema *fuzzy* para o controle do conjunto motor-bomba foi estruturado com base na regulação da rotação do motor. Ele foi desenvolvido para ter como entradas o valor da pressão nos quatro pontos de saídas dos dois setores e a derivada dessa pressão. As pressões foram determinadas para os seguintes transdutores de pressão, do tipo apresentado na Figura 3.4, que são: PT-15, PT-08, PT-07 e PT-03.

Para o sistema *fuzzy*, por sua vez, os valores numéricos das entradas da pressão e da derivada da pressão foram transformados em variáveis linguísticas, às quais se dá o nome de fuzzyficação. Na fuzzyficação, foram definidas as variáveis linguísticas considerando a sua faixa de utilização, que, no sistema *fuzzy*, é chamado de universo de discurso. No gráfico da Figura 4, mostrado a seguir, pode ser observada a primeira variável de entrada, denominada de “PRESSÃO”, cujo universo de discurso variou de 0 a 20 mca, sendo este o valor máximo que a pressão poderia alcançar.

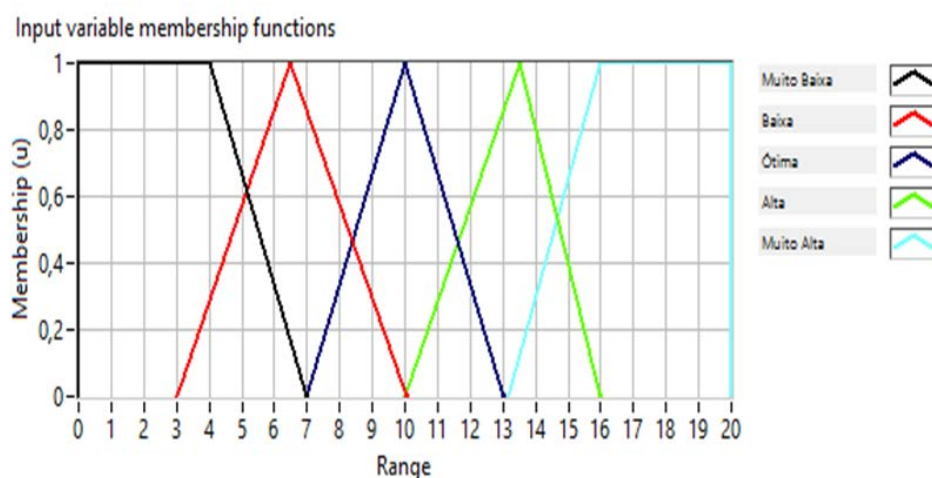


Figura 4 - Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* incremental para a bomba.

A segunda variável linguística definida para a entrada do controlador foi denominada de derivada da pressão, que pode ser observada no gráfico da Figura 5, cujo universo de discurso variou de -2 a 2 mca.

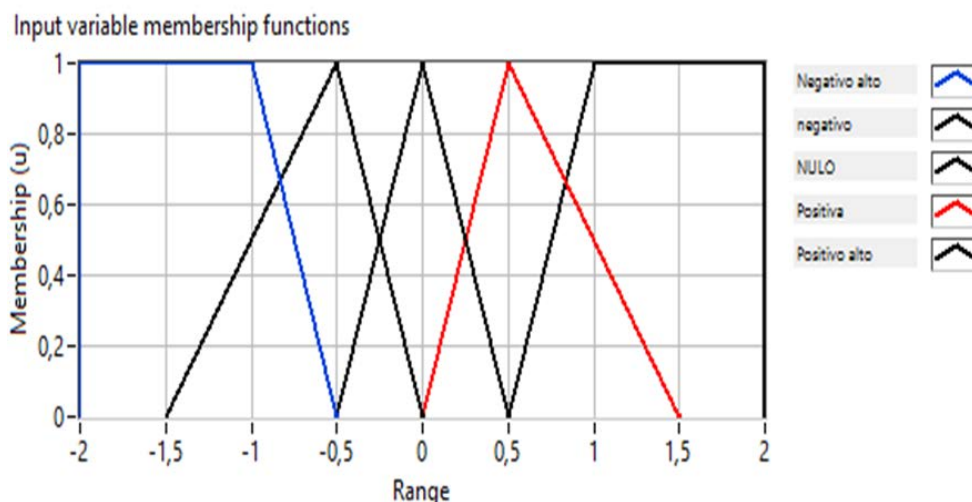


Figura 5 - Diagrama de blocos do controlador *fuzzy* incremental para as válvulas

Na saída do controlador da bomba 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 Figura 6.

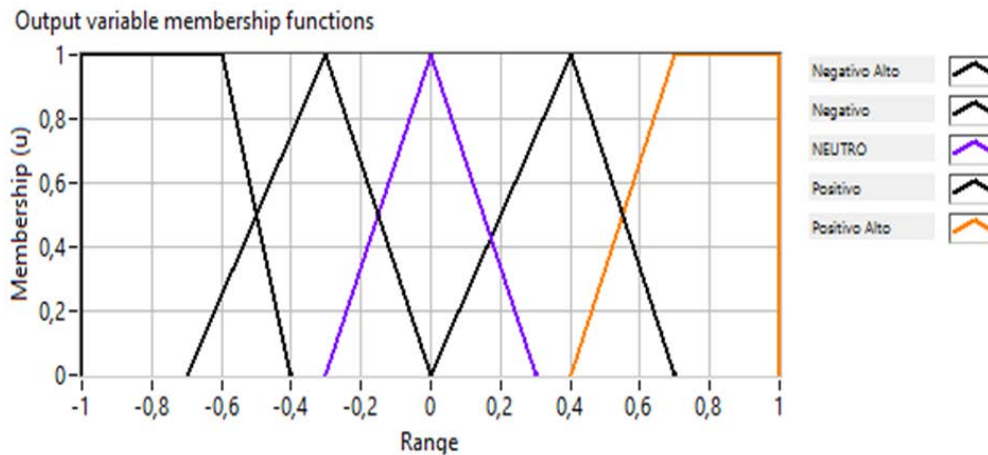


Figura 6: Gráfico da saída, controlador *fuzzy* para a bomba.

RESULTADOS OBTIDOS

Os primeiros dados apresentados são relativos ao momento em que o sistema operou em malha aberta e sob a ação do controlador *fuzzy* “eficiente”, mantendo a vazão distribuída constante, não sofrendo variação por parte do consumidor. Assim, na Tabela 2 são mostrados os valores para cada modelo de controle da operação, iniciando pela operação em malha aberta, na sequência sob a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” que atuou simultaneamente nas válvulas e na bomba.

Tabela 2 - Dados hidráulicos e elétricos da operação na vazão máxima e sem variação do consumo

Rede SEM perturbação	Potência (kW)	Pressão (mca)	Vazão (m ³ /h)	Freq. (Hz)	CE (kWh/m ³)
Sem controle	2,88	14,00	35,00	60,00	0,082
Controle <i>fuzzy</i> “eficiente”	2,37	10,10	33,40	52,00	0,071

A primeira análise feita relacionou os dados da potência elétrica, pressões, vazões e frequência de alimentação do motor e do CE que indica a eficiência energética da operação. O sistema estava funcionando com uma vazão máxima de 35 m³/h quando ocorreu a variação no consumo por parte dos usuários. Na ocasião o sistema estava operando em malha aberta com as duas válvulas reguladoras de pressão totalmente abertas e a velocidade do motor constante no valor de 1720 rpm. Esta velocidade implicou na frequência que alimentou o motor no valor de 60 Hz. Na segunda condição o sistema operava sob a ação do controle *fuzzy* “eficiente”, nesta ação as variáveis monitoradas já citadas apresentaram modificações bastantes acentuadas se comparadas com as do modelo anterior. Os dados dos dois modelos de operação podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados hidráulicos e elétricos da operação na vazão máxima com variação do consumo

Rede COM perturbação	Potência (kW)	Pressão (mca)	Vazão (m ³ /h)	Freq. (Hz)	CE (kWh/m ³)
Sem controle	1,55	16,50	18,00	60,00	0,086
Controle <i>fuzzy</i> “eficiente”	1,30	10,10	19,00	45,00	0,068

Na comparação entre os valores das Tabelas 2 e 3, é possível visualizar uma diminuição nos valores da potência para todos os pontos de operação do sistema, sendo a maior diferença de 0,51 kW que correspondeu a 18%.

Esses valores das potências elétricas registrados para os dois modelos de operação, com o sistema funcionando em malha aberta e sob a ação do *fuzzy* “eficiente” na presença da variação do consumo foram plotados em um gráfico (v. Figura 7)

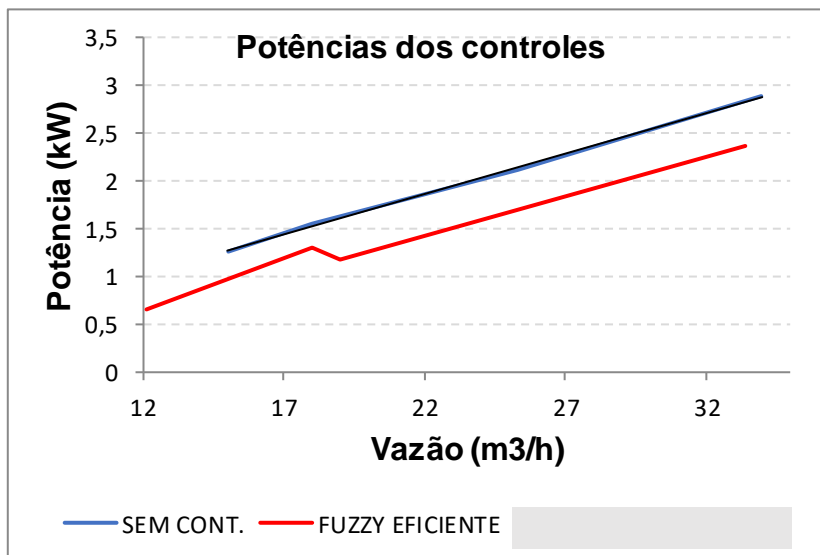


Figura 7 Gráfico das potências com operação variando o consumo

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados da operação sob a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” se mostraram melhores do ponto de vista energético, pois apresentou uma redução de 18 % nos valores das potências quando o sistema se encontrava aduzindo uma vazão máxima e de 16 % para uma vazão mínima.

Um outro processo para avaliação do desempenho energético da operação com a técnica de controle *fuzzy* “eficiente” foi proposto à 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.

Analisando os dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, é possível concluir que o sistema, quando operou sob a ação do controlador *fuzzy* “eficiente”, se mostrou mais vantajoso em relação a operação em malha aberta. Esses valores dos *CE*'s vistos na Tabela 4 foram divididos em duas categorias, sendo que a primeira linha, representada pelo ponto 1, listou os pontos da operação onde não ocorreu variação do consumo e na segunda linha, ponto 2, representou os valores que tiveram variação do consumo de água.

Tabela 4 - Diferença dos *CE* para os modelos de operação

INDICADOR CONSUMO ESPECÍFICO <i>CE</i> (KW/M ³)			
PONTOS	SEM CONTROLE	CONT. FUZZY “EFICIENTE”	DIF. <i>CE</i>
1	0,082	0,071	0,011
2	0,086	0,068	0,018

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O sistema de bombeamento quando operou sem a ação do controlador *fuzzy* “eficiente” apresentou um indicador de Consumo Específico *CE* maior do que na operação sob a ação do sistema de controle. Dessa forma, foi possível constatar um ganho energético de no mínimo 18 % na condição da vazão máxima, e de 16 % para a vazão mínima.

Com os dados registrados da vazão e da potência, foi possível calcular o indicador do Consumo Específico. Esse Indicador corroborou o ganho energético no modo de operação com *fuzzy* “eficiente”

para a máxima vazão consumida de 13 % e de 20% para a vazão mínima consumida. Dessa forma, é possível constatar que a técnica de controle *fuzzy* aplicada a um 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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
2. CREACO, E., & FRANCHINI, M. (2013). A New Algorithm for Real-Time Pressure Control in Water Distribution Networks.
3. KANG, D. (2014). Real-Time Optimal Control of Water Distribution Systems.
4. LUVIZOTTO JÚNIOR, E. (1995). Controle Operacional de Redes de Abastecimento de Água Auxiliado por Computador. São Paulo - SP.
5. TSUTIYA, M. T. (2006). Abastecimento de Água. São Paulo: Depart. de Eng^a Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Univ. de São Paulo, SP.
6. YANG, Z., WU, L., & DONG, X. (2010). Control System Desing for Contant Pressure Water Supply, second International Conference on Multimedia and Information Technology.
7. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets. On formation and control.