

## 27º. Encontro Técnico AESABESP

### DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR FUZZY PARA CONTROLE DE PRESSÃO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

#### **Victor Barreto<sup>(1)</sup>**

Analista de Sistemas, Mestrando em Engenharia de Sistemas Computacionais pela UFF - Universidade Federal Fluminense. Analista de Automação da Concessionária de Abastecimento Público e Tratamento de Água e Esgoto da Região dos Lagos - Prolagos/RJ.

#### **Douglas Jordão Barbosa<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Agrônomo pela UCDB – Universidade Católica Dom Bosco. Coordenador de Operações e Automação da Concessionária de Abastecimento Público e Tratamento de Água e Esgoto da Região dos Lagos - Prolagos/RJ.

#### **Thiago Augusto Maziero<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil – EESC-USP. Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Engenheiro de Segurança do Trabalho pela UEM. MBA em Gestão Empresarial pela FGV. Gerente de Operações da Concessionária de Abastecimento Público e Tratamento de Esgotos da Região dos Lagos - Prolagos/RJ.

#### **Victor Hugo Oliveira Hoff<sup>(4)</sup>**

Engenheiro Sanitarista e Ambiental – UCDB. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFRJ. Cursando MBA em Gestão Empresarial pela FGV. Coordenador operacional da Concessionária de Abastecimento Público e Tratamento de Esgotos da Região dos Lagos - Prolagos/RJ.

**Endereço:** Rodovia Amaral Peixoto, Km 107, quadra 20 - Lote 9 - Balneário, São Pedro da Aldeia – Rio de Janeiro – Brasil - CEP: 28940-000 – Brasil, e-mail: victor.barreto@prolagos.com.br

#### **RESUMO**

Este artigo apresenta a aplicação de um sistema de controle Fuzzy e um sistema de controle PID aplicados a uma unidade de abastecimento de água. Visto isso, objetiva mostrar e comparar o experimento aplicado à unidade através da análise dos dados propostos, provando a eficiência do sistema de inferência Fuzzy, sendo hoje muito utilizado na área de inteligência computacional. O controle foi desenvolvido em uma camada intermediária de aplicação através do uso de técnicas de telemetria aplicadas a unidade. O controle proposto, foi desenvolvido para manter a pressão em um ponto específico do sistema de abastecimento, para isso, foi utilizado técnicas e equipamentos de campo como, técnicas de monitoramento e controle em tempo real, e conversores de frequência. Os conversores de frequência, acoplados a conjuntos motor-bomba, são capazes de manter a pressão desejada em um ponto específico do sistema de abastecimento de água através da capacidade de variação de velocidade. Na unidade onde foi aplicado o controle, foram instalados equipamentos de rádio frequência, sensores de pressão e medidor de vazão, tornando assim possível, o total monitoramento e análise dos dados. Com a aplicação deste trabalho, foi possível perceber a eficiência dos controladores Fuzzy aplicado a sistemas de bombeamento de água não lineares, trabalhando de maneira satisfatória sobre as variações de demanda geradas no sistema, chegando a resultados como uma maior precisão no controle, estabilidade no decorrer da operação, pressurização do sistema mais eficiente e redução dos custos de manutenção.

**PALAVRAS-CHAVE** — Controlador Fuzzy, PID, Sistemas de Abastecimento de Água.

## INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A automação, parte do princípio da aplicação de técnicas em algum processo produtivo, na qual reduza a interferência humana, visando a otimização dos processos. Aplicada ao saneamento, a automação nos permite controlar, monitorar e analisar as unidades em tempo real, melhorando as questões operacionais e reduzindo custos (GOMES et al., 2009).

Visto a necessidade da inteligência operacional nos dias de hoje, cada vez mais sistemas automatizados vão sendo implantados, como consequência, surge cada vez mais a necessidade do controle automático. Encontrada a necessidade, este trabalho objetiva aplicar um controlador PID para controle de pressão em um sistema de bombeamento real. Após isso, será realizada a troca do controlador PID para um controlador Fuzzy, aplicado as mesmas condições, sendo possível após isso, realizar uma comparação direta entre as duas aplicações.

A lógica Fuzzy é um campo da inteligência artificial, que vem sendo cada vez mais difundida e tem atendido cada vez mais a demanda das mais diversas áreas. Graças a seu potencial, hoje, não é encontrada somente no meio acadêmico, mas também com diversas aplicações nos mais variados sistemas. Devido ao fato de emular a inteligência humana, muito se refere a lógica Fuzzy como inteligente (BEZERRA, 2009).

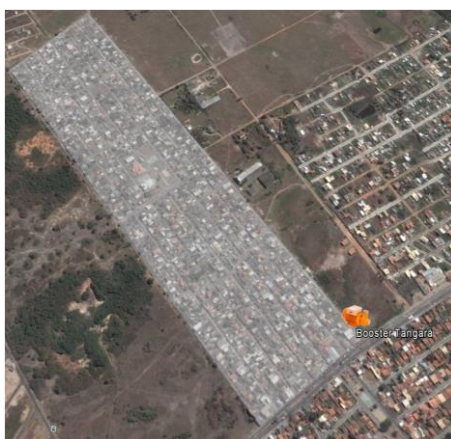
Como particularidade dos sistemas de abastecimento, temos as unidades localizadas a quilômetros de distâncias umas das outras, com vistas a atender os pontos estratégicos e críticos em relação às necessidades sanitárias. Através disto, identificou-se o desenvolvimento e estudo deste controle em uma camada intermediária de aplicação como adequado, sendo possível dessa maneira, se comunicar com facilidade a qualquer ponto de medição e controle que possa ser necessário, e a partir disso, aplicar a lógica Fuzzy como método de controle principal nestes sistemas, verificando sua grande capacidade de trabalho em sistemas multivariáveis.

O sistema proposto foi aplicado em uma unidade da empresa Concessionária de Serviços Públicos de Água e Esgoto Prolagos S/A, com sede localizada na cidade de São Pedro da Aldeia-RJ. Esta, cada vez mais investindo em tecnologias para atender à crescente demanda da região e a maior demanda de todas sendo a sazonalidade turística. Com a sazonalidade turística da região, um dos maiores problemas encontrados na unidade onde foi aplicado o sistema de controle, foi a não linearidade do mesmo, que faz com que seja necessário o ajuste frequente dos controladores PID. Caso não seja realizado o ajuste devido, controladores PID que controlam bem o sistema no inverno, podem sofrer dificuldades ao realizar o mesmo controle no verão, visto que em regiões turísticas a população pode chegar a três ou quatro vezes mais.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade na qual foram testados os sistemas de controle é responsável por aproximadamente 1140 economias, abastecendo, partes altas e baixas e sendo afetada diretamente pelo turismo da região. O controle proposto tem o objetivo de manter a pressão a jusante do sistema de abastecimento.

**Figura 1 – Região de aplicação do sistema de controle**



Para análise da aplicação, será testado e comparado um controlador Fuzzy e um controlador PID, para que dessa maneira, possa ser validada a eficiência do sistema de controle Fuzzy. Foram coletados dados de cada controlador referente a unidade de abastecimento totalizando 1 hora e 30 minutos para análise. Como consequência, o teste foi realizado em dias não consecutivos, porém com o perfil de consumo próximo um do outro.

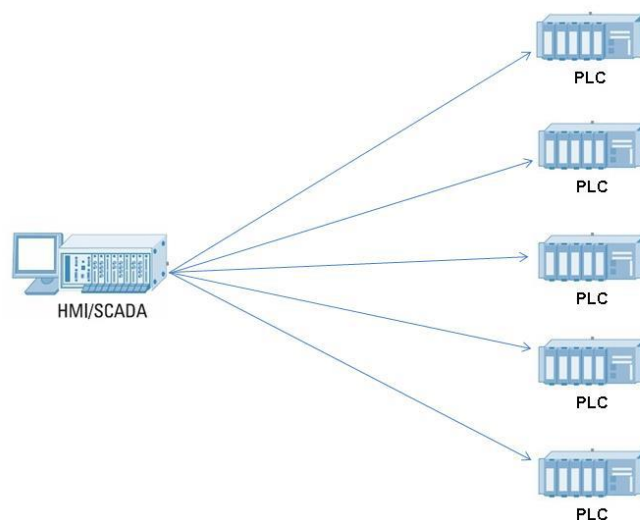
### Comunicação via OPC

Com a ideia de padronizar a comunicação entre os equipamentos instalados na indústria, e diminuir o trabalho no desenvolvimento de drivers específicos para diversos equipamentos, várias empresas de automação se juntaram para apoiar e criar uma fundação sem fins lucrativos, na qual, deu origem a tecnologia OPC (SOUZA; FILHO; PENA, 1998).

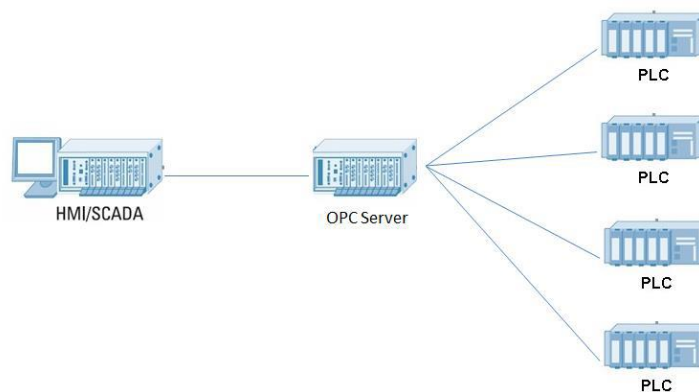
A OPC Foundation, organização responsável por determinar os padrões da tecnologia OPC (PUDA, 2009) surgiu por volta de 1996 e até hoje é responsável pela elaboração de novas especificações relacionadas à tecnologia em questão.

O OPC, não substitui o protocolo nativo do CLP, ele serve de gateway em relação ao sistema SCADA, tornando necessário, a implantação de um servidor de comunicação OPC (PUDA, 2009), sendo este, de uso necessário nesta aplicação.

**Figura 2 – Integração sem a padronização da comunicação através da tecnologia OPC**



**Figura 3 - Integração com a padronização da comunicação através da tecnologia OPC**



A arquitetura OPC se divide em clientes e servidores. Os clientes leem as informações de campo, os servidores reconhecem os dados da rede e traduzem para o padrão OPC (QUINTINO; SILVA, 2013).

## A Lógica Fuzzy

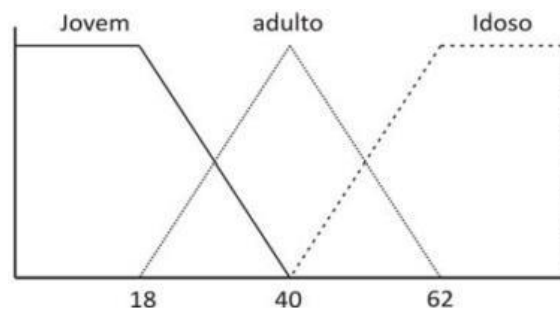
A teoria dos conjuntos Fuzzy (ZADEH, 1965), e os Conceitos da Lógica Fuzzy (ZADEH, 1973) servem como solução para sistemas não lineares, referentes a problemas de controle, graças a seus princípios de incerteza e habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações imprecisas (BEZERRA, 2009).

A diferença entre a lógica clássica e a lógica Fuzzy, refere-se a pertinência dos elementos aos conjuntos (MÜHLBAUER, 2015) 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] (BEZERRA, 2009).

Podemos representar um conjunto Fuzzy, sendo U um conjunto não vazio e A um subconjunto clássico de U.

$$X_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A, \\ 0 & \text{se } x \notin A, \end{cases}$$

Figura 4 – Lógica Fuzzy (BEZERRA, 2009)



## Sistemas de Controle Fuzzy

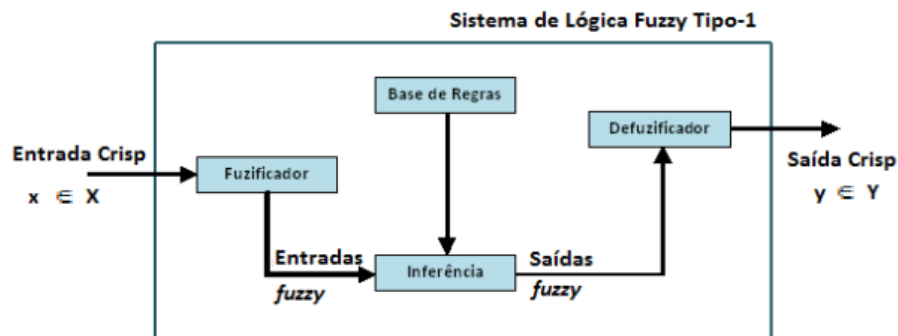
Os sistemas de Controle Fuzzy possuem três operações básicas: fuzzificação, sistema de inferência e defuzzificação (EARL COX, 1994).

A fuzzificação consiste em transformar os dados de entrada para variáveis linguísticas, considerando quais conjuntos Fuzzy devem ser considerados de acordo com o grau de pertinência (MÜHLBAUER, 2015).

Na inferência, consideram-se as regras cujo resultado seja diferente de zero (MÜHLBAUER, 2015), e após isso é selecionado o tipo de conectivo ou método, sendo o Mandani o mais comum.

Na defuzzificação, os dados são transformados para um valor numérico, compatível com a lógica clássica, podendo ocorrer de diversas maneiras, centro de gravidade, média dos máximos ou média dos pontos de suporte (FERREIRA, 2012).

Figura 5 – Esquema de um Controlador Fuzzy (RIZOL; MESQUITA; SAOTOME, 2011)



### Metodologia

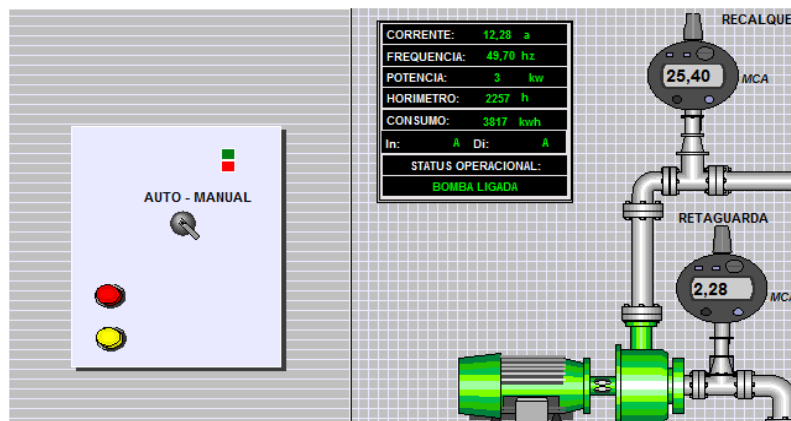
A técnica de controle PID, foi aplicada diretamente ao conversor de frequência da unidade. Para desenvolvimento do controlador Fuzzy, optou-se pela aplicação do sistema de inferência em uma camada de aplicação intermediária, e não um sistema embarcado em um Controlador Lógico Programável.

Este tipo de técnica se mostrou o mais apto para aplicação, pelo fato dos sistemas de automação nas empresas de saneamento, serem tipicamente diferentes de indústrias, onde são encontrados painéis de controles centralizados em no máximo algumas unidades.

Nas empresas de saneamento, as unidades são distintas, chegando a ter quilômetros umas das outras, tendo em alguns momentos, necessidades de monitoramento e controle de várias unidades ao mesmo tempo, portanto, visto essa necessidade, optou-se por este tipo de aplicação, onde facilita a integração entre diversos sistemas, sejam estes de campo, ou sistemas supervisórios.

Para monitoramento e controle do sistema aplicado, foi desenvolvido um sistema de supervisão e controle, onde foi possível acompanhar, coletar dados e controlar a unidade em tempo real.

Figura 6 – Sistema supervisório para controle do sistema de abastecimento



Através deste sistema, foi possível avaliar o controlador, recebendo as informações dos sensores através do servidor OPC.

## MODELAGEM DO CONTROLADOR FUZZY

O controlador Fuzzy faz a leitura de duas variáveis de entrada, Pressão de Retaguarda e Erro. A leitura da pressão de retaguarda indicará ao controlador Fuzzy a pressão em mca da entrada do sistema, e dessa maneira, ao realizar o controle, o sistema possa entender rapidamente suas variações, evitando problemas por falta de pressão.

A variável de saída Velocidade será correspondente ao controle do inversor de frequência, atuando diretamente.

**Tabela 1 – Matriz de Associação das Regras**

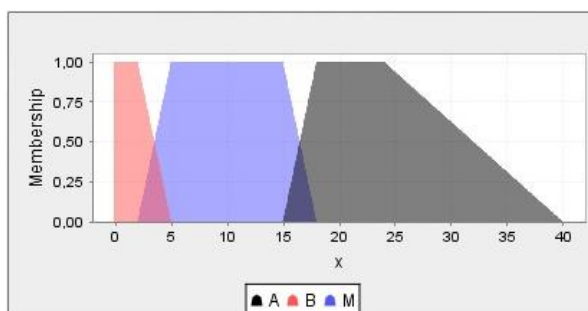
|         |   | Erro |    |   |   |   |    |     |
|---------|---|------|----|---|---|---|----|-----|
|         |   | MMB  | MB | B | M | A | MA | MMA |
| Pressão | B | MMB  | MB | B | M | A | MA | B   |
|         | M | MB   | B  | B | M | A | A  | MA  |
|         | A | MMB  | MB | B | M | A | MA | MMA |
|         |   |      |    |   |   |   |    |     |

**Tabela 2 – Características do controlador Fuzzy**

|                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| Controlador:               | Fuzzy                    |
| Método de inferência:      | MAX-MIN                  |
| Número de entradas:        | 2                        |
| Número de saídas:          | 1                        |
| Variáveis de Entrada:      | PressaoRetaguarda e Erro |
| Variável de Saída:         | Velocidade               |
| Número de regras:          | 21                       |
| Métodos de defuzzificação: | C-o-A                    |

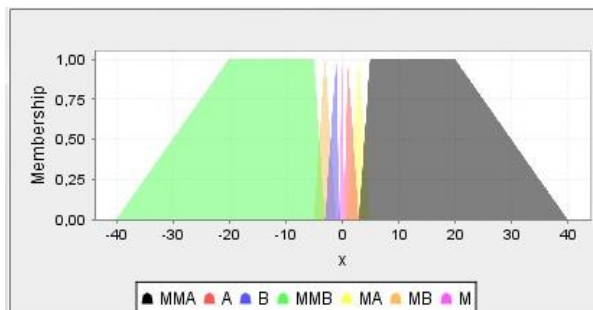
A variável PressaoRetaguarda, no sistema de controle Fuzzy, irá interferir diretamente a saída do controle, visto que esta, será a responsável por indicar ao sistema a quantidade mínima necessária de água existente a montante do sistema de bombeamento, sendo responsável por indicar ao controlador se pode ou não aumentar o valor da variável velocidade.

**Figura 7 - A variável PressaoRetaguarda**



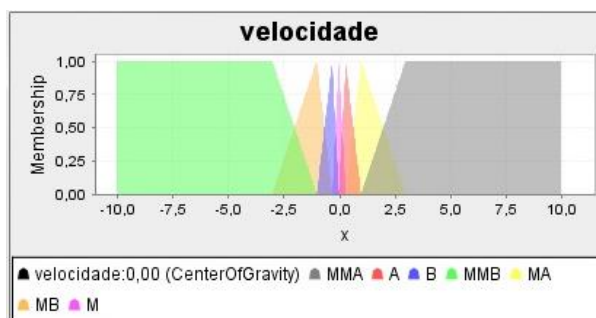
A variável Erro (Setpoint - Pressão de Recalque) traz para o controle Fuzzy a indicação do erro referente ao objetivo desejado, ou seja, representando o déficit ou excesso de pressão no sistema de abastecimento.

**Figura 8 - A variável Erro**



A variável Velocidade representa o acréscimo ou decréscimo de velocidade ao sistema de bombeamento.

**Figura 9 - A variável velocidade**



## RESULTADOS

A primeira relação para análise gráfica consiste em comparar os dados Pressão de Recalque, Setpoint, Frequência e Pressão de Retaguarda, de ambos os controles.

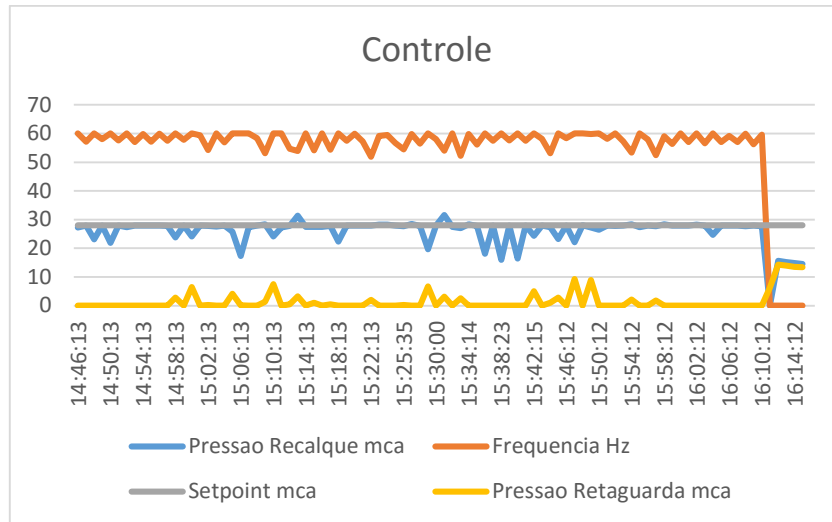
Comparados os dados abaixo referentes aos gráficos das figuras 10 e 11, é possível perceber com facilidade a diferença de trabalho entre o controlador PID e o controlador Fuzzy.

Em ambas as situações analisadas, a demanda do sistema de abastecimento era alta e fazia com que o sistema de bombeamento trabalhasse com valores elevados de pressão, exigindo o máximo do mesmo.

No controle PID, por tentar manter a pressão desejada no sistema e não enxergar outras variáveis do mesmo, em praticamente todos os momentos trabalhava-se com frequências de 60hz ou próximo disso, ao atingir a pressão desejada e com as variações de demanda no sistema de abastecimento, o mesmo trabalhou com variações acima do esperado, o que dificultou o controle nos períodos de alta demanda, sendo necessário o desligamento do equipamento ao final da análise pela falta de estabilidade.

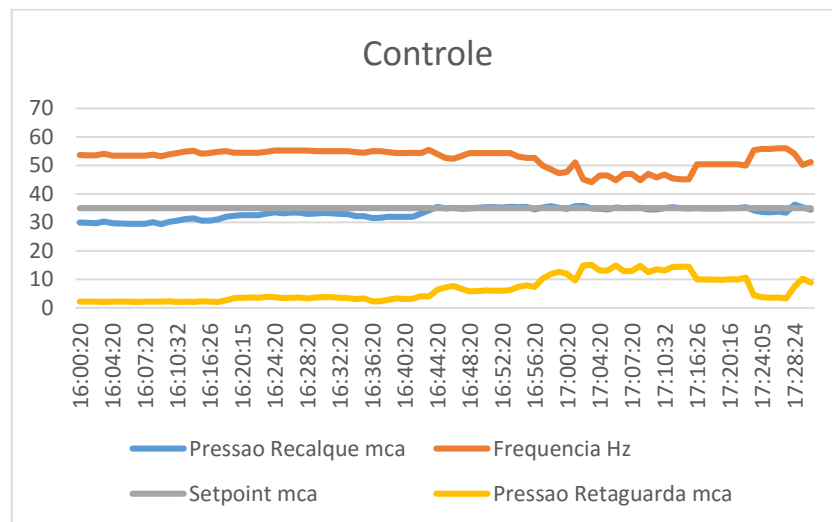
Ainda sobre o controle PID, é possível adicionar regras, ou seja, heurísticas externas ao controle, para que dessa maneira seja possível amenizar situações como esta, porém pelo fato de não participarem diretamente ao controle, não foi tratado neste artigo.

**Figura 10 – Controle PID**



No controle Fuzzy, foi inserido como entrada do sistema, além do erro do controle, a variável referente a pressão de retaguarda, ou seja, a pressão anterior ao sistema de abastecimento. Através desta, foi possível, ao calcular a saída esperada, considerar o ponto máximo de saída do controle. Na figura 11, podemos perceber que em alguns instantes (início do controle), o sistema ainda não estava em operação de acordo com o objetivo (setpoint), porém graças à baixa pressão anterior ao sistema de abastecimento, o Fuzzy foi capaz de modelar a saída com valor inferior, mesmo enxergando a necessidade de saída com valores mais altos. Como consequência, o sistema se manteve estável, conseguindo atingir seu objetivo aos poucos, o que permitiu que o mesmo trabalhasse de maneira mais eficiente, ao decorrer da operação de pressurização do bairro em questão. Graças a essa estabilidade, foi possível manter a unidade ligada por mais tempo, sem se preocupar com queimas por trabalho a seco e demais problemas nos equipamentos.

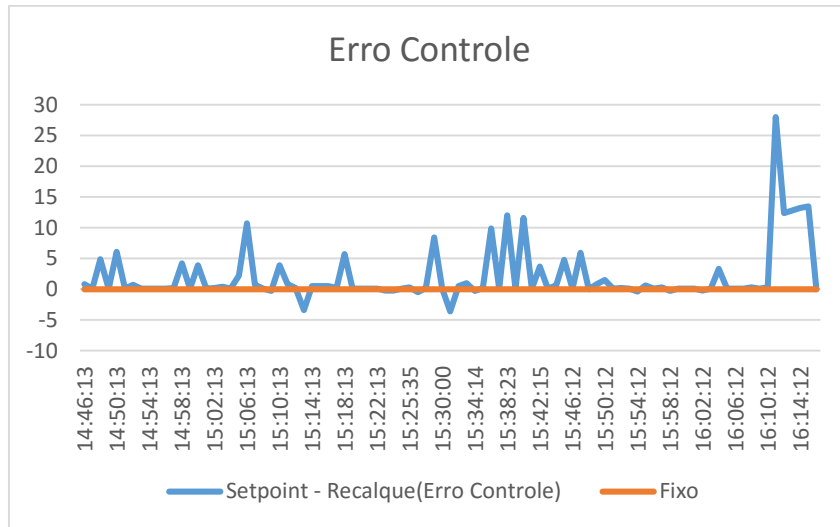
**Figura 11 – Controle Fuzzy**



Na figura 12, verifica-se o erro referente ao controle PID, este, equivale ao Setpoint – Pressão de Recalque. Com este controle, ignorando os dados finais (desligamento do sistema), foram obtidos picos de até 12mca, e trabalhando somente em alguns momentos próximo do seu ponto ótimo.

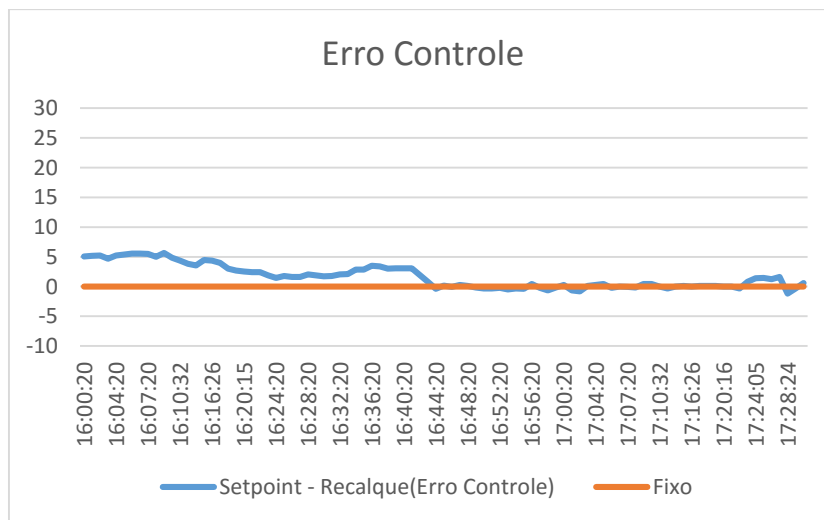


**Figura 12 – Erro Controle PID**



Observa-se na figura 13, o erro referente ao controle Fuzzy, este, obteve um pico máximo de 5,64 mca gerado propositalmente pela falta de pressão a montante do sistema de abastecimento.

**Figura 13 – Erro Controle Fuzzy**

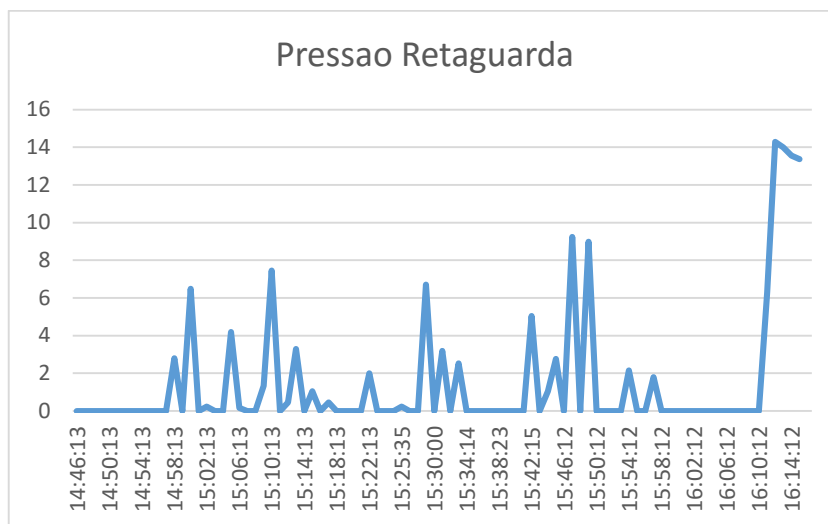


Nas figuras 14 e 15, a pressão anterior ao sistema de abastecimento. No controle PID, figura 14, trabalhou-se em alguns momentos com a pressão a montante com valor referente a 0 mca, o que como consequência, pode trazer malefícios ao sistema de controle, geração de falhas com bastante influência, entre outros.

Na análise do controle Fuzzy, figura 15, percebe-se que a pressão a montante se estabiliza lentamente, de acordo com o aumento de velocidade, o que ocorre não só de acordo com o necessário, mas sim de acordo com o que é possível, pelo tratamento de falta d'água.

Após a estabilização, o sistema identifica a possível subida de pressão e reduz lentamente a velocidade, fazendo com que a pressão de retaguarda chegue a um ponto máximo de 15 mca com o sistema ligado.

**Figura 14 – Pressão de Retaguarda Controle PID**

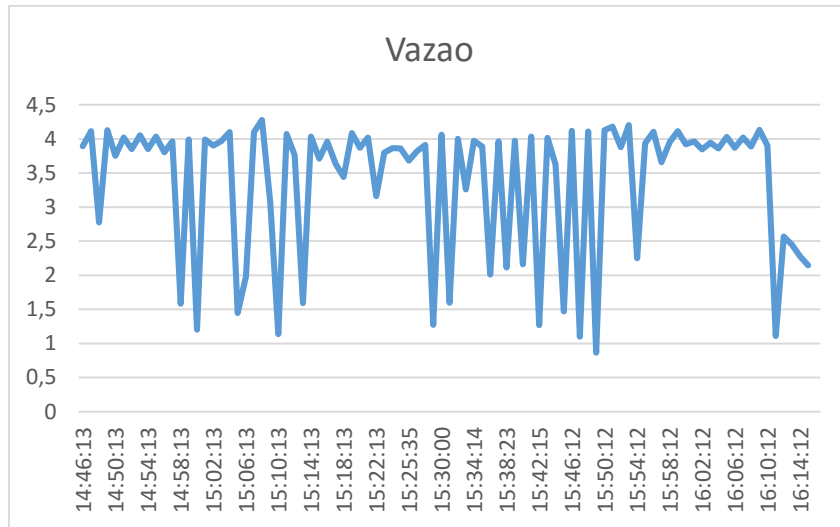


**Figura 15 – Pressão de Retaguarda Controle Fuzzy**



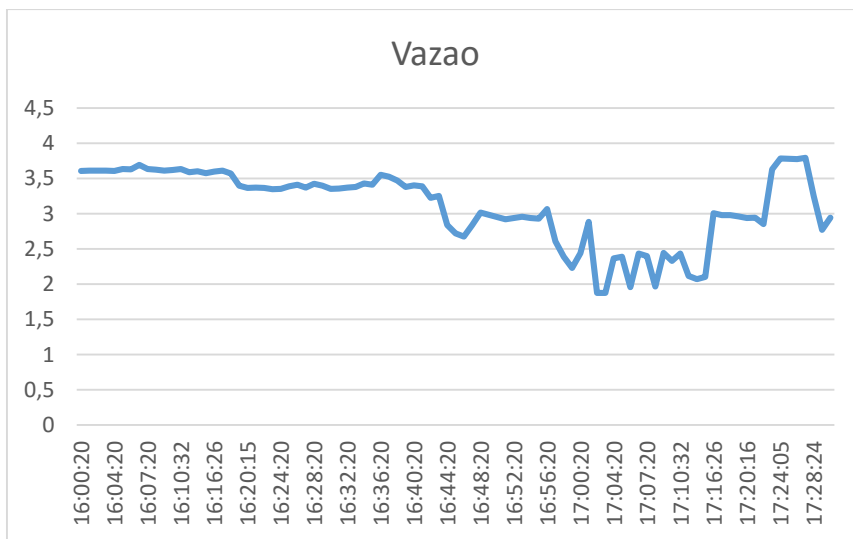
O gráfico com os dados de vazão, referente ao controle PID, exposto na figura 16, apresenta picos elevados acima e abaixo do sistema de bombeamento, ocasionados pela falta de estabilidade no controle de velocidade. Através desta variação, o sistema não consegue manter uma vazão constante para que possa ser realizado um abastecimento mais eficiente, chegando a gerar problemas como vazamentos visíveis ou não visíveis, rompimentos no sistema de adução, entre outros.

**Figura 16 – Vazão Controle PID**



O controle Fuzzy mais uma vez se mostrou visivelmente satisfatório através da análise da vazão bombeada na aplicação, se mostrando estável em todo o processo.

**Figura 17 – Vazão Controle Fuzzy**



**Tabela 3 – Vazão total bombeada**

|              | Controle Fuzzy      | Controle PID        |
|--------------|---------------------|---------------------|
| Vazão Total: | 16,5 m <sup>3</sup> | 18,2 m <sup>3</sup> |

Entendendo que em ambas as situações a necessidade dos recursos hídricos no bairro aonde foi aplicado o controle no momento da coleta de dados, era maior do que o enviado avaliou-se a maneira mais eficiente de controle. Após análise da tabela acima, foi possível perceber que mesmo o sistema de abastecimento

necessitando de cargas de pressão acima do estipulado, o controle Fuzzy avaliou a maneira mais eficiente de trabalho no sistema de abastecimento. O controle PID, trabalhou unicamente para atingir um objetivo, o que consequentemente conseguiu enviar uma vazão maior.

## CONCLUSÃO

Foi possível perceber como resultado da aplicação deste trabalho o poder dos sistemas de controle Fuzzy aplicado a sistemas de bombeamento de água não lineares. Os controladores PID, hoje os mais utilizados na indústria, trabalham de maneira eficiente se bem configurados e com boa análise referente a planta para realização de sintonias. Nos sistemas de abastecimento afetados por sazonalidades turísticas, temos variações de demandas muitas das vezes inesperadas, o que faz com que este tipo de controle tenha dificuldade na operação do processo, sendo necessário o ajuste frequente, o que pode ser trabalhoso e levar a grande demanda operacional. Sendo assim, com a aplicação do controlador foi possível obter uma maior precisão no controle, manter o sistema mais estável no decorrer da operação, uma pressurização do sistema mais eficiente visto que este é capaz de enxergar objetivos distintos, e como consequência da eficiência aplicada, uma redução dos custos de manutenção.

## REFERÊNCIAS

- BEZERRA, S. Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, 2009.
- EARL COX, M. O. The Fuzzy Systems Handbook: a practitioner's guide to building, using, and maintaining Fuzzy systems. **New York: AP Professional**, p. 1–6, 1994.
- FERREIRA, H. DOS S. Aplicação da Lógica Difusa para Avaliação de Maturidade de Processos de TI: Um Estudo de Caso. p. 1–6, 2012.
- GOMES, H. P. et al. Sistemas de Bombeamento - Eficiência Energética. 1ª edição. João Pessoa: Editora Universitária UFPB. 460 p., 2009.
- MÜHLBAUER, R. Avaliação de Maturidade de Processos de TI Aplicação de Lógica Difusa Utilizando a Biblioteca jFuzzyLogic. p. 1–6, 2015.
- PUDA, A. P. Padronização da Comunicação Através da Tecnologia Opc. **ISATEC Rio de Janeiro**, p. 1–6, 2009.
- QUINTINO, J.; SILVA, A. Aplicabilidade Foss: Protocolo OPC, Java e Scilab na Educação em Sistemas de Controle Industriais. **XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, p. 1–6, 2013.
- RIZOL, P. M. S.; MESQUITA, L.; SAOTOME, O. Lógica Fuzzy Tipo-2. **Revista SODEBRAS**, v. v. 6, p. 1–6, 2011.
- SOUZA, L.; FILHO, C.; PENA, R. Padrão de acesso a dados OPC e sua implementação em um driver OPC-Modbus. **II Congresso Mineiro De Automação, V Simpósio Regional de Instrumentação da ISA-BH/GRINST-MG**, p. 1–6, 1998.
- ZADEH, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. **Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on**, v. SMC-3, n. 1, p. 1–6, 1973.
- ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 1–6, 1965.