

I-137 – ABORDAGEM FUZZY-SUPERVISÓRIO APLICADA AO AJUSTE DINÂMICO DOS PARÂMETROS PID NO CONTROLE DE VAZÃO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS

Fábio Cosme Rodrigues dos Santos⁽¹⁾

Bacharel em Ciência da Computação pelo Centro Universitário FIEO – UNIFIEO. Engenheiro Elétrica pela Universidade Nove de Julho – UNINOVE. Especialista em Mecatrônica pela Universidade Nove de Julho – UNINOVE. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Nove de Julho – UNINOVE. Doutorando em Informação e Gestão do Conhecimento pela Universidade Nove de Julho – UNINOVE. Analista de Gestão na Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – SABESP

Cleber Gustavo Dias⁽²⁾

Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual Paulista – UNESP. Mestre em Engenharia Industrial pela Universidade Estadual Paulista – UNESP. Doutor e Pós-Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo – USP. Professor pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento da Universidade Nove de Julho – UNINOVE.

André Felipe Henriques Librantz⁽³⁾

Bacharel em Física pela Universidade de São Paulo – USP. Mestre e Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo – USP. Pós-Doutor em modelagem e otimização pela Universidade de São Paulo - USP. Diretor e Professor pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento da Universidade Nove de Julho – UNINOVE.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Victório Fornazaro, 3200 – Vila Lourdes – Carapicuíba – SP – CEP: 06397-000 - Brasil – Tel: (11) 4181-7111 – e-mail: fcrodrigues@sabesp.com.br

RESUMO

A água bruta transferida dos mananciais para as estações de tratamento de água ou destas para as redes de distribuição são feitas, geralmente, com grupos motobomba acionados por inversores de frequência. Os grupos motobomba são compostos de bombas centrífugas, as quais possuem características não lineares quando tem a rotação ajustada. Estes equipamentos são controlados e acionados por um CLP (Controlador Lógico Programável), que envia um sinal de referência aos inversores de frequência, com a finalidade de manter a referência de vazão ou pressão. Os controles são feitos com blocos PID implementados no CLP para se obter uma malha fechada. Em virtude do comportamento não linear destes processos, os ajustes do controle PID podem ser ineficientes, causando baixo rendimento na estabilidade do controle. Uma alternativa para a solução deste problema é a utilização de técnicas de Inteligência Computacional, mas especificamente a lógica Fuzzy em uma abordagem Fuzzy-Supervisório, que possibilita o ajuste dinâmico dos parâmetros do controle PID. Neste estudo foram utilizados 4 modelos Fuzzy com raciocínio de Takagi-Sugeno: (i) funções de pertinência triangulares com 5 termos linguísticos nas entradas; (ii) funções de pertinência triangulares com 7 termos linguísticos nas entradas; (iii) funções de pertinência trapezoidais com 5 termos linguísticos nas entradas; (iv) funções de pertinência trapezoidais com 7 termos linguísticos nas entradas. A abordagem Fuzzy-supervisório utilizada para os 4 modelos Fuzzy foi proposta por Zhao, Romizuka e Isaka (1993). Os 4 modelos apresentaram menor sobressinal em relação ao controle PID existente, além dos tempos de respostas mais favoráveis. Os modelos com 5 termos nas entradas apresentaram melhores resultados em relação dos de 7 termos, o que favorece a implementação devido ao custo computacional menor.

PALAVRAS-CHAVE: Lógica Fuzzy, Controle PID, Estações Elevatórias de Água.

INTRODUÇÃO

A água contida nos mananciais é imprópria ao consumo de maneira direta, devendo ser transferida à estação de tratamento de água (ETA), onde são retiradas as impurezas e micro-organismos nocivos à saúde dos consumidores para que possa ser distribuída à população (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Para a transferência dessa água do manancial para a estação de tratamento ou desta última para os consumidores são utilizadas, com frequência, estações de bombeamento, conhecidas por estações elevatórias de água (BEZERRA et al., 2015; JONES; TOMPECK, 2013).

Essas estações elevatórias possuem bombas centrífugas horizontais, verticais ou submersas. A vazão nominal de cada instalação depende de vários fatores, como a quantidade de conjuntos motobomba instalados e a capacidade nominal de cada um, entre outros. As bombas centrífugas possuem características não lineares e a vazão máxima depende da altura manométrica ou pressão no recalque (BEZERRA et al., 2015; CUNHA; DÓREA, 2015).

Essas bombas, em sua maioria, são acionadas por meio de inversores de frequência com a finalidade de manter a vazão ou pressão de recalque, visando garantir o abastecimento adequado à planta de tratamento de água ou à população, quando se trata de distribuição (BORKOWSKI; WETULA; BIENÍ, 2012; PRICE; OSTFELD, 2014).

O controle da pressão ou vazão no recalque é feito por malha fechada com PID (Proporcional-Integral-Derivativo) implementada em CLP (Controlador Lógico Programável). A saída do PID atua diretamente nos inversores de frequência das bombas, buscando o valor definido como set-point de pressão ou de vazão, dependendo do parâmetro fixado para o controle (BEZERRA et al., 2015; BORKOWSKI; WETULA; BIENÍ, 2012; OSTOJIN; MOUNCE; BOXALL, 2011).

O controle PID ainda é utilizado em aproximadamente 90 % dos processos que possuem automação na indústria, em virtude da simplicidade de implementação e baixo custo. No entanto, se o processo tem características não lineares ou complexas, o controle PID pode apresentar baixo desempenho em relação à estabilidade do sistema, principalmente se os parâmetros de ajustes forem fixos (KUMAR; MITTAL, 2011).

Uma forma de melhorar o desempenho dos controles PID, quando submetidos a processos não lineares, é empregar as técnicas de inteligência computacional, como a lógica Fuzzy. Essas técnicas podem atuar diretamente nos ajustes dos parâmetros do PID de maneira dinâmica ou com propostas de variantes do controle (KUMAR; MITTAL, 2011; OSTOJIN; MOUNCE; BOXALL, 2011).

O emprego da lógica Fuzzy foi amplamente estudado, visando melhorar a estabilidade do controle diante das perturbações e situações de não linearidade da planta sob controle. Os modelos Fuzzy desenvolvidos em substituição ao controle PID convencional mostraram robustez e estabilidades favoráveis à utilização (DWORKAK, 2014; MAROUF et al., 2016; MOHAN; SINHA, 2008; SALGADO et al., 2014).

De acordo com Kumar e Mittal (2011), um modelo baseado em Fuzzy Integral menos Fuzzy Proporcional menos Fuzzy Derivativo, em substituição do controle PID convencional, apresenta melhor supressão de ruídos e baixo custo computacional proporcionando viabilidade à implementação em tempo real.

Um modelo que atua dinamicamente nos parâmetros de ajuste do controle PID foi proposto por Zhao, Romizuka e Isaka (1993). A proposta, conhecida como *gain scheduling*, mostra que um modelo Fuzzy pode atuar nos valores K_p (termo proporcional), K_i (termo integral) e K_d (termo derivativo) em função das entradas estabelecidas, reduzindo o tempo de estabilização do controle e o sobressinal. Esta abordagem também pode ser chamada de Fuzzy-supervisor (SIMÕES; SHAW, 2007).

Estudos tiveram resultados relevantes ao aplicar a metodologia de Fuzzy-supervisor (SAVRAN, 2013). Ding et al. (2009) melhoraram os efeitos do controle da operação automática de um canal de transferência de água. Zhou et al. (2008) mostraram melhores resultados em relação à adaptabilidade dos parâmetros de ajuste do PID no controle de pressurização em uma indústria de metal leve. A aplicação com caldeiras proposta por Jin et al. (2013) mostrou alta precisão no controle com a utilização do Fuzzy-supervisor.

A proposta deste trabalho é modelar um sistema Fuzzy-supervisor a partir da função de transferência da planta, para ajuste em tempo real dos parâmetros PID da malha de controle da vazão do sistema de bombeamento de água bruta da ETA Alto Cotia. A abordagem utilizada é a proposta por Zhao, Romizuka e Isaka (1993).

MATERIAIS E MÉTODOS

LÓGICA FUZZY

A lógica Fuzzy pode ser definida como uma técnica de Inteligência Computacional que representa a forma humana de raciocinar. Os modelos Fuzzy podem ser construídos com base no conhecimento humano por meio de regras definidas por especialista de determinado processo (YU, 2009).

Os conceitos da lógica Fuzzy utilizam termos linguísticos em vez das variáveis numéricas, os quais são representados por funções de pertinências distribuídas e limitadas por um universo de discurso. As funções de pertinência podem ser feitas por meio de funções triangulares e/ou trapezoidais, dentro do universo de discurso (SIMÕES; SHAW, 2007). A Figura 1 ilustra os termos linguísticos e as funções de pertinência triangular e trapezoidal, respectivamente, no universo de discurso da variável vazão.

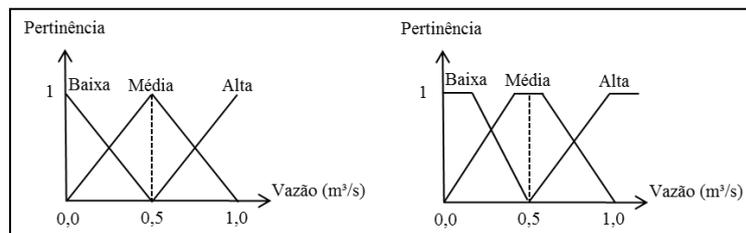


Figura 1: Funções de pertinência triangular e trapezoidal para o universo de discurso vazão.

Um dos métodos de modelos Fuzzy é o raciocínio de Takagi-Sugeno, o qual propõe que os resultados das regras ativadas com a fuzzificação sejam calculados por meio de polinômios ou constantes. Em geral, uma regra é definida conforme mostra a Equação 1. A defuzzificação é feita calculando a média ponderada, fornecendo o valor de saída do modelo Fuzzy (DWORKAK, 2014).

$$\text{Se } x_1 \text{ é } F_1 \ \& \ x_2 \text{ é } F_2 \ \& \ \dots \ \& \ x_n \text{ é } F_n \ \text{então } y = A_0 + Ax_1 + Ax_2 \quad \text{equação (1)}$$

a qual: F_1 a F_n correspondem às funções de pertinência, y um conjunto de constantes ou uma função polinomial. Os antecedentes x_1 a x_n representam os valores na entrada do modelo Fuzzy.

CONTROLE PID

O controle PID é amplamente utilizado em indústrias que possuem processos com automação incorporada, devido ao baixo custo e fácil implementação em equipamentos como CLPs. A Equação 2 mostra os termos proporcional, integral e o derivativo no domínio do tempo (ZHAO; ROMIZUKA; ISAKA, 1993).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{equação (2)}$$

a qual: $u(t)$ é a saída do controlador, K_p o termo proporcional, K_i o termo integral, K_d o termo derivativo e $e(t)$ o erro no instante t .

A performance da resposta do controle PID pode ser medida por meio de indicadores de sobressinal, que corresponde ao valor máximo gerado pela resposta em comparação ao valor de referência; do tempo de resposta, que consiste no tempo necessário para que a resposta do controle se estabilize na faixa de 2 a 5 % do valor do set-point e a integral do erro do instante inicial (t_0) até o infinito denominada integral absoluta do erro (IAE), mostrada na Equação 3 (KARASAKAL et al., 2013).

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad \text{equação (3)}$$

a qual: $e(t)$ é o erro no instante t .

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A ETA Alto Cotia está localizada no município de Cotia e tem a capacidade de produção nominal de 1,25 m³/s. Possui dois sistemas de adução de água bruta, sendo um por gravidade com vazão média de 0,70 m³/s e outro por bombeamento (EEAB), com a vazão média de 0,55 m³/s. Em função de procedimentos operacionais, o sistema por gravidade é mantido com vazão fixa e o sistema de bombeamento tem sua vazão ajustada para atender as demandas de produção.

A EEAB da ETA Alto Cotia conta com 3 conjuntos motobomba de 92 kW e vazão máxima de 0,6 m³/s cada um. A regra de operação é 1F + 2R, ou seja, 1 em operação e 2 reservas.

A distância entre a EEAB, que está localizada na Barragem da Graça, e o instrumento de medição de vazão, localizado na ETA, é de aproximadamente 3000 m. Esta instalação tem sistema de automação com monitoramento e controle por meio do sistema de supervisão e controle. O técnico da operação insere o set-point de vazão e a malha de controle ajusta a frequência do inversor de frequência.

Atualmente, os parâmetros do controlador PID são fixos no CLP do sistema de automação e não consideram algumas perturbações ou alterações na EEAB, como nível operacional da Barragem da Graça, além do tempo de resposta ser importante em função da distância entre o acionamento e a medição da vazão de água bruta.

IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO FUZZY-SUPERVISÓRIO

As etapas previstas para o desenvolvimento deste estudo foram: (i) encontrar a função de transferência (FT) do processo; (ii) construir as funções de pertinências para as entradas e saídas; (iii) construir os modelos Fuzzy de acordo com a proposta de Zhao, Romizuka e Isaka (1993); (iv) simular os cenários previstos; (v) comparar as respostas com o controle PID convencional.

A função de transferência (FT) que possibilite reproduzir as características físicas do processo foi encontrada por meio de dados históricos no período de julho a novembro de 2016, utilizando a metodologia apresentada por Dias et al. (2016).

A FT utilizada foi de 2^a ordem com número de zeros igual a 1 e percentual de aproximação de 95,51 %, ilustrada na Equação 4. O ganho crítico (K_u) e o tempo crítico (T_u) encontrados foram 240,89 e 8,02 respectivamente.

$$FT = \frac{-0,002785s + 0,001806}{s^2 + 0,6709s + 0,178} \quad \text{equação (4)}$$

As duas entradas previstas no modelo Fuzzy foram o erro e a derivada do erro. As três saídas estabelecidas foram: K_p' , K_i' e α . Ao todo foram construídos quatro modelos Fuzzy para serem submetidos à simulação com a FT encontrada. As principais diferenças entre os modelos são: (i) funções de pertinência triangulares com 7 termos nas entradas; (ii) funções de pertinência triangulares com 5 termos nas entradas; (iii) funções de pertinência trapezoidais com 7 termos nas entradas; (iv) funções de pertinência trapezoidais com 5 termos nas entradas.

As características comuns são: raciocínio de Takagi-Sugeno, saídas do tipo constantes, 25 regras para os modelos com 5 termos nas entradas e 49 regras para os modelos com 7 termos nas entradas. O universo de discurso utilizado foi de -1 a 1 para todas as configurações de funções de pertinência e termos.

As funções de pertinência triangular e trapezoidal, respectivamente, utilizadas no estudo com 7 termos linguísticos podem ser visualizadas na Figura 2.

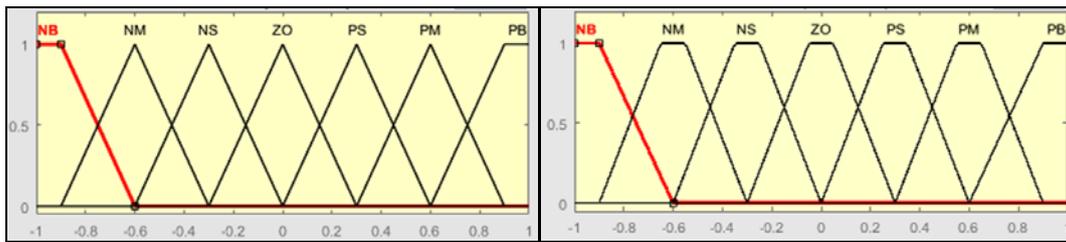


Figura 2: Funções de pertinência triangular e trapezoidal utilizadas nas entradas com 7 termos.

A Figura 3 ilustra as funções de pertinência triangular e trapezoidal, respectivamente, utilizadas no estudo com 5 termos linguísticos.

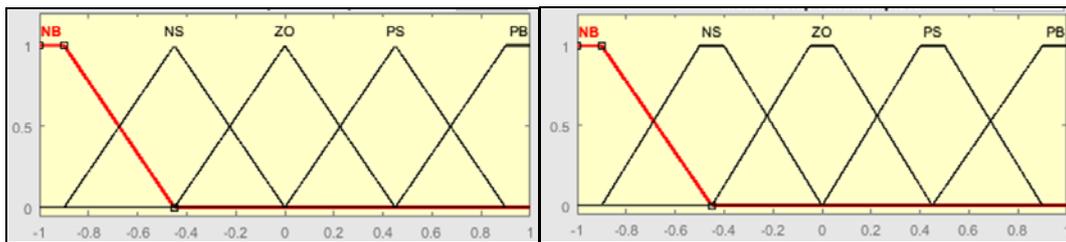


Figura 3: Funções de pertinência triangular e trapezoidal utilizadas nas entradas com 5 termos.

Os termos utilizados para saídas K_p' , K_i' foram as duas constantes -0,1 e 0,1, representadas pelos termos linguísticos “small” e “big”, respectivamente. A saída α contém 4 termos constantes, a saber: 2, 3, 4 e 5, representadas pelos termos linguísticos S, MS, M e B, respectivamente.

As saídas K_p , K_i e K_d , utilizadas no controle PID, são calculadas a partir das Equações 5, 6, e 7, as quais utilizam os valores fornecidos pelas saídas dos modelos Fuzzy (ZHAO; ROMIZUKA; ISAKA, 1993).

$$K_p = (K_{p\max} - K_{p\min})K_p' + K_{p\min} \quad \text{equação (5)}$$

$$K_d = (K_{d\max} - K_{d\min})K_d' + K_{d\min} \quad \text{equação (6)}$$

$$K_i = \frac{K_p^2}{\alpha K_d} \quad \text{equação (7)}$$

Os valores máximos e mínimos de K_p e K_d , utilizados pelas nas Equações 5, 6 e 7 foram obtidos pelas Equações 8, 9, 10 e 11.

$$K_{p\min} = 0,32K_u \quad \text{equação (8)}$$

$$K_{p\max} = 0,6K_u \quad \text{equação (9)}$$

$$K_{d\min} = 0,08K_u T_u \quad \text{equação (10)}$$

$$K_{d\max} = 0,18K_u T_u \quad \text{equação (11)}$$

RESULTADOS e DISCUSSÕES

Todos os modelos Fuzzy previstos foram simulados com a FT encontrada para possibilitar a análise da resposta do controle em relação ao sobressinal, do tempo de resposta e da IAE. As respostas do controle PID convencional e com o PID Fuzzy-supervisório foram analisadas para cada cenário.

A Figura 4 ilustra as respostas dos modelos com 7 termos nas entradas com as funções de pertinências triangular e trapezoidal, respectivamente.

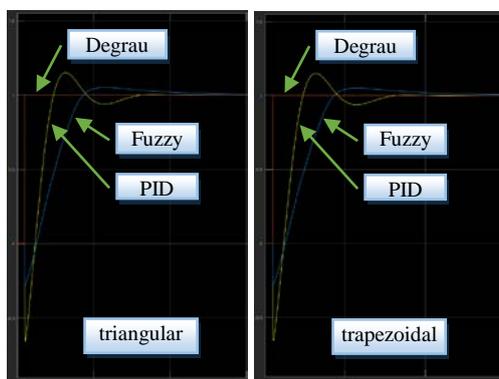


Figura 4: Respostas do controle para as entradas com 7 termos.

As respostas dos modelos com 5 termos nas entradas com as funções de pertinências triangular e trapezoidal, respectivamente, podem ser visualizadas na Figura 5.

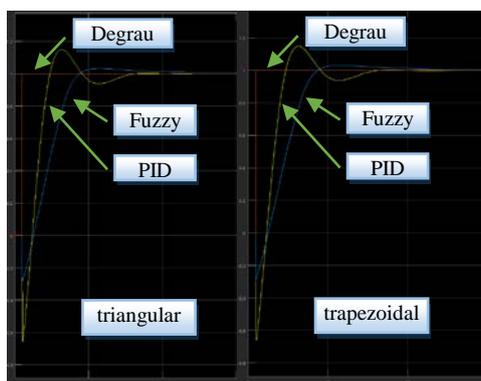


Figura 5: Respostas do controle para as entradas com 5 termos.

Como pode-se observar nas Figuras 4 e 5, as respostas dos controles Fuzzy-supervisor foram semelhantes em relação ao sobressinal e tempo de resposta. As respostas do controle PID convencional são idênticas para todos os cenários e foram inseridas com intuito de comparar com os resultados do modelo Fuzzy.

A Tabela 1 exibe os indicadores calculados referentes às respostas dos modelos Fuzzy com 5 e 7 termos nas entradas. Com essas informações pode-se avaliar com maior precisão o desempenho de cada cenário.

Tabela 1: Indicadores das respostas do controle.

Parâmetros	PID convencional	Triangular – 7 termos	Trapezoidal – 7 termos	Triangular – 5 termos	Trapezoidal – 5 termos
Sobressinal (%)	14,94	5,01	5,01	3,14	3,07
Tempo de resposta (s)	12,77	11,75	11,72	7,84	7,84
IAE	3,55	4,90	4,89	4,64	4,63

Os dados da Tabela 1 mostram que todos os cenários simulados obtiveram percentuais de sobressinal menores em comparação com o controle PID convencional. Da mesma forma, os valores de tempo de resposta também foram menores, mas os modelos com 5 termos na entrada obtiveram reduções mais significativas, mostrando que o controle estabiliza mais rapidamente.

Os resultados do IAE de todos os cenários dos modelos Fuzzy-supervisor apresentaram valores piores em relação ao controle PID convencional. Isso pode estar relacionado com o tempo em que a resposta atinge o valor do set-point, isto é, o degrau inserido na simulação, o qual o controle PID alcançou com tempo menor.

Embora as respostas visualizadas nas Figuras 4 e 5 sejam semelhantes, os dados da Tabela 1 mostram que os modelos com 5 termos nas entradas tiveram desempenho melhor em relação aos modelos com 7 termos, nos indicadores de sobressinal, tempo e resposta e o IAE.

O modelo mais favorável à implementação é o que possui funções de pertinência do tipo trapezoidal, com 5 termos nas entradas, em virtude dos bons resultados de sobressinal e tempo de resposta. Além disso, pode-se obter a redução do custo computacional com a utilização da quantidade menor de termos.

Diante do exposto, a alteração na metodologia de Zhao, Romizuka e Isaka (1993) mostrou que pode-se obter resultados mais satisfatórios no controle do processo estudado.

CONCLUSÕES

Os resultados da aplicação do controle Fuzzy-supervisório no controle de vazão de uma EEAB mostraram a possibilidade de se obter a redução de sobressinal na resposta do controle, além de permitir o ajuste dinâmico dos parâmetros PID diante das perturbações e alterações do processo. Desta forma, a implementação do modelo no sistema de automação existente pode ser feita sem custos adicionais, em virtude da compatibilidade tecnológica dos equipamentos de automação da ETA. Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se estudar o comportamento do modelo Fuzzy-supervisório com outros tipos de funções de pertinência, aplicando o raciocínio de Mamdani e a alteração das regras com o objetivo de investigar possíveis reduções no tempo de resposta do controle e o IAE em comparação com o PID convencional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BEZERRA, S.T.M., SILVA, S.A.S., GOMES, H.P., SALVINO, M.M. Energy savings in pumping systems: application of a fuzzy system. *Science & Engineering Journal*, v.24, n.1, p.71–78, Oct. 2015.
2. BORKOWSKI, D., WETULA, A., BIEN A. Design, optimization, and deployment of a waterworks pumping station control system. *ISA Transactions*. v.51, n.4, p.539–549, Jul. 2012.
3. CUNHA, E.N., DÓREA, C.E.T. Modeling, Simulation and Control of Water Supply System. Part EN: IEEE First International Smart Cities Conference (ISC2), p.1–6, Oct. 2015.
4. DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D. B. *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*. 2. ed. São Paulo: Rima, 2005. 792p.
5. DIAS, C.G., SANTOS, F.C.R., LIBRANTZ, A.F.H., SOUSA, C.M., SILVA, L.C. Improving Process Management in a Water Treatment Plant Using Control Modelling. Part EN: International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS), p.138-145, Set. 2016.
6. DING, Z., WANG, C., TAN, G., GUAN, G. The Application of the Fuzzy Self-adaptive PID Controller to the Automatic Operation Control of Water Transfer Canal System. Part EN: Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, p.822–825, Oct. 2009.
7. DWORAK, P. A Type of Fuzzy T-S Controller for a Nonlinear MIMO Dynamic Plant. *Elektronika ir Elektrotechnika*, v.20, n.5, p.8–14, 2014.
8. JIN, J.J., HUANG, H., SUN, J., PANG, Y. Study on Fuzzy Self-Adaptive PID Control System of Biomass Boiler Drum Water. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, v.3, n.1, p.93–98, Mar. 2013.
9. JONES, P.H., TOMPECK, M.A. Water Treatment. Part EN: *Encyclopedia of Environmental Science and Engineering*, p.1309–1324, Oct. 2013.
10. KARASAKAL, O., GUZELKAYA, M., EKSIN, I., YESIL, E., KUMBASAR, T. Online tuning of fuzzy PID controllers via rule weighing based on normalized acceleration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v.26, p.184–197, Jan. 2013.
11. KUMAR, V., MITTAL, A.P. Architecture, performance and stability analysis of a formula-based fuzzy I - fuzzy P - fuzzy D controller. *Soft Computing*, v.15, n.3, p.517–531, Mar. 2011.
12. MAROUF, S., ESFANJANI, R.M., AKBARI, A., BARFOROOSHAN, M. T-S fuzzy controller design for stabilization of nonlinear networked control systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v.50, P.135–141, Apr. 2016.
13. MOHAN, B.M., SINHA, A. Analytical structure and stability analysis of a fuzzy PID controller. *Applied Soft Computing*, v.8, n.1, p.749–758, Jan. 2008.
14. OSTOJIN, S., MOUNCE, S.R., BOXALL, J.B. An artificial intelligence approach for optimizing pumping in sewer systems. *Journal of Hydroinformatics*, v.13, n.3, p.295–306, Jul. 2011.

15. PRICE, E., OSTFELD, A. Discrete Pump Scheduling and Leakage Control Using Linear Programming for Optimal Operation of Water Distribution Systems. *Journal of Hydraulic Engineering*, v.140, n.6, p.1–16, Mar. 2014.
16. SALGADO, I., CAMACHO, O., YÁÑEZ, C., CHAIREZ, I. Proportional derivative fuzzy control supplied with second order sliding mode differentiation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v.35, p.84–94, Oct. 2014.
17. SAVRAN, A. A multivariable predictive fuzzy PID control system. *Applied Soft Computing*, v.13, n.5, p.2658–2667, May. 2013.
18. SIMÕES, M.G., SHAW, I.S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2007. 186p.
19. YU, F.-M. The compact fuzzy filter design via Takagi–Sugeno fuzzy models. *Expert Systems with Applications*, v.36, n.3, p.4412–4416, Apr. 2009.
20. ZHAO, Z.-Y., TOMIZUKA, M., ISAKA, S. Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v.23, n.5, p.1392-1398, Sep. 1993.
21. ZHOU, Y.C., HAO, Q.T., LI, X.L., LI, J.H. Application of fuzzy PID self-adaptive controller in pressurization control system of counter gravity casting. *International Journal of Cast Metals Research*, v.21, n.5, p.381–386, Jul. 2008.