

Aplicação de Sistemas de Controle Fuzzy para Sistemas de Distribuição de Água

Application of fuzzy controllers for water distribution systems

• **Data de entrada:**
11/07/2019



• **Data de aprovação:**
21/01/2021

Kamilla Henrique Mendonça¹ | Heber Pimentel Gomes¹ | Saulo de Tarso Marques Bezerra^{2*} |
Juan Moises Mauricio Villanueva¹

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.038>

ORCID ID

Mendonça KH  <https://orcid.org/0000-0002-7765-4526>
Gomes HP  <https://orcid.org/0000-0001-8374-1469>

Bezerra STM  <https://orcid.org/0000-0002-5815-5908>
Villanueva JMM  <https://orcid.org/0000-0002-8760-9390>

Resumo

O controle de pressão se destaca como uma das principais opções técnicas para aumentar a eficiência energética e hidráulica dos sistemas de distribuição de água (SDA). Esta pesquisa objetivou o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente, sob a ação da Lógica Fuzzy, para o controle de pressão em SDA por meio do uso simultâneo de válvulas e inversores de frequência. Para fins de comparação, foram desenvolvidos dois sistemas de controle: descentralizado (cada atuador sendo controlado individualmente) e centralizado. Os controladores foram aplicados em uma bancada experimental que simula um SDA setorizado, composto por duas zonas de pressão. A partir da análise dos resultados, constatou-se que os controladores mantiveram as pressões medidas próximas aos valores preestabelecidos como referência. O Sistema Controle Fuzzy centralizado apresentou melhores resultados que o descentralizado, pois os tempos de assentamento foram menores e a válvula manteve-se estável nos testes.

Palavras-chave: Abastecimento de água. Controle de pressão. Setorização.

Abstract

Pressure control stands out as one of the main technical options for increasing the energy and hydraulic efficiency of water distribution systems (SDA). This research aimed at the development of an intelligent control system, under the action of Fuzzy Logic, for the control of pressure in SDA through the simultaneous use of valves and frequency inverters. For purposes of comparison, two control systems were developed: a decentralized (each actuator being individually controlled) and a centralized one. The controllers were applied in an experimental workbench simulating a sectorial SDA composed of two pressure zones. From the analysis of the results, it was verified that the controllers kept the measured pressures close to the predefined values as reference. The centralized Fuzzy Control System presented better results than the decentralized system, because the accommodation times were smaller and the valve remained stable in the tests.

Keywords: Water supply. Pressure control. Sectorization.

¹ Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa - Paraíba - Brasil.

² Universidade Federal de Pernambuco - Caruaru - Pernambuco - Brasil.

* **Autor correspondente:** saulo.tarso@ufpe.br.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de distribuição de água (SDA) são responsáveis por um consumo intenso de água e energia. No Brasil, os prestadores de serviços de água são, normalmente, os maiores consumidores das empresas de distribuição de energia elétrica. Tradicionalmente, os sistemas de água e energia são projetados e operados como sistemas desacoplados (OIKONOMOU & PARVANIA, 2019). No entanto, esses sistemas são mutuamente interdependentes (SHIN et al., 2018); a água é geralmente utilizada em grandes quantidades no setor de energia para mineração, produção de combustível, geração em usinas hidrelétricas e resfriamento de termoeletricas. Por outro lado, a energia é um insumo indispensável nos SDA, uma vez que a eletricidade é usada para o bombeamento, o tratamento e a distribuição de água. Globalmente, a energia elétrica está entre os três principais itens de custo para os prestadores e, em muitos casos, representa a segunda despesa, sendo superada somente pelos custos com pessoal (SILVA et al., 2015).

A automação dos SDA se destaca como uma alternativa eficaz para aumentar a eficiência energética destes SDA. A automação de SDA envolve sistemas de controles; transdutores de nível, pressão e vazão; válvulas de controle; inversores de frequência; bem como um sistema de comunicação eficiente (MOURA et al., 2018).

Os sistemas automatizados permitem a adoção de técnicas de controle que interferem diretamente na operação dos SDA. As técnicas de controle são fundamentadas em algoritmos matemáticos que atuam diretamente nos dispositivos e atuadores sem a intervenção do operador, conforme as condições operacionais do sistema. A implementação de controladores garante não apenas a operação satisfatória do fornecimento de água, como também permite uma redução no consumo e nas perdas de água e energia.

Os SDA não operam de maneira linear, ou mesmo previsível. As demandas e pressões requeridas nos SDA não são, geralmente, uniformes ao longo do tempo. Com isto, o controle de pressão se destaca como uma das principais opções técnicas para aumentar a eficiência energética e hidráulica do SDA (BEZERRA et al., 2012; SARBU, 2016; SILVA et al., 2015; PAGE et al., 2016; BARROS FILHO et al., 2017; MOURA et al., 2018; MOREIRA et al., 2020). As alternativas mais comuns para controlar a vazão/pressão nos sistemas são o uso de válvulas redutoras de pressão e o acionamento de bombas com velocidade variável (para os casos onde o bombeamento é direto na rede).

A otimização dos sistemas com base no controle de pressão representa uma oportunidade significativa para os prestadores economizarem recursos financeiros e energia enquanto diminuem os custos de manutenção das instalações, aumentam a produtividade e reduzem as emissões de gases de efeito estufa. Diante do exposto, esta pesquisa objetivou o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente, sob a ação da Lógica Fuzzy, para o controle de pressão por meio do uso simultâneo de válvulas e inversor de frequência em SDA sujeitos à variação da demanda. Optou-se pelo Sistema de Controle Fuzzy (SCF), pois os métodos clássicos de controle, usualmente utilizados no setor de saneamento, apresentam limitações quando aplicados a processos com características complexas (não-linearidades, instabilidade, tempo morto elevado, comportamento não-estacionário e acoplamento entre as variáveis etc.).

2 LÓGICA FUZZY

Em 1965, Lotfi A. Zadeh publicou a primeira pesquisa com as bases da Lógica Fuzzy (ZADEH, 1965). Em 1972, formou-se no Japão o primeiro grupo de pesquisa coordenado por Toshiro Terano. Em 1974, Ebrahim H. Mamdani, da Uni-

versidade de Londres, aplicou pela primeira vez a Lógica Fuzzy no controle de sistemas (MAMDANI, 1974). O controlador de Mamdani foi baseado na seguinte estrutura: “SE x é A e y é B , ENTÃO z é C ”, na qual tanto a proposição antecedente como a conseqüente são variáveis linguísticas de dois diferentes conjuntos Fuzzy. A partir daí, surgiram as primeiras aplicações da Lógica Fuzzy no controle de sistemas. O controle de fornos para produção de cimento pela empresa dinamarquesa F. L. Smidth, em 1976, foi a primeira aplicação industrial (HOLMBLAD & OSTERGAARD, 1982). Em seguida, Takagi & Sugeno (1983), em contrapartida ao sistema de inferência Mamdani, sugeriram uma metodologia em que o antecedente das regras de inferência é formado por variáveis Fuzzy, enquanto o resultado de cada regra representa valores numéricos.

Em 1984, foi desenvolvido um controlador Fuzzy para estações de tratamento de água no Japão. No ano seguinte foi implementado no Laboratório Bell (EUA) o primeiro chip Fuzzy por Togai & Watanabe (1986). Em 1987, foi inaugurado o primeiro trem controlado por um sistema Fuzzy no metrô de Sendai (Japão), e o helicóptero não tripulado Yamaha-50, totalmente operado por um controlador Fuzzy. Mas foi em 1990 que a teoria atingiu a popularidade com o lançamento no mercado de máquinas de lavar roupas da Matsushita Electric, televisores da Sony e câmeras fotográficas da Fujitsu, marcando o início do desenvolvimento de produtos de consumo.

Com o intuito de tornar a Lógica Fuzzy mais difundida nos meios acadêmicos e comerciais, Katbab (1995) publicou em 1995 uma revisão da literatura que trouxe uma série de casos de controladores fundamentados na Lógica Fuzzy. Atualmente, são dezenas de milhares de pesquisas aplicadas com sucesso em processos complexos de diversas áreas da engenharia, como, por exemplo, geração de energia (ARCOS-AVILES

et al., 2018; SARRIAS-MENA et al., 2019), robótica (XIANG et al., 2018; AZAR et al., 2018), transporte (GOYAL et al., 2018; PATIL & SOMA, 2018) e automobilista (DOMÍNGUEZ-NAVARRO et al., 2018; SETIAWAN et al., 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Bancada Experimental

Esta pesquisa foi desenvolvida na bancada experimental - Sistema Automatizado de Distribuição de Água (Fig. 1) do Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento da Universidade Federal da Paraíba - LENHS/UFPB. A bancada simula um sistema real de distribuição de água setorizado, composto por duas zonas de pressão, cujos ramais de descarga possuem cotas topográficas diferenciadas. A zona baixa (ZB) possui cota de 1,50 m e a zona alta (ZA) uma cota de 6,50 m.

A bancada experimental possui dois transdutores de pressão (PT-3 e PT-5) e três válvulas proporcionais, cujos dados são apresentados na Tabela 1. A válvula CV-1, localizada à entrada da zona de consumo, foi adotada como atuador para controlar a pressão na ZB, enquanto as válvulas CV-2 e CV-3 atuarão na variação da demanda. A leitura dos parâmetros hidráulicos fornecidos pelos sensores e as ações nos atuadores é realizada a partir da comunicação estabelecida entre as placas de aquisição de dados da *National Instruments* e o software supervisor LabVIEW®, bem como a execução de ações de comando sobre as válvulas proporcionais e os inversores de frequência. O sistema possui medidores de vazão e um medidor de grandezas elétricas instalados; entretanto, como o objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de controle inteligente para o controle de pressão, esses dados não foram coletados e processados.

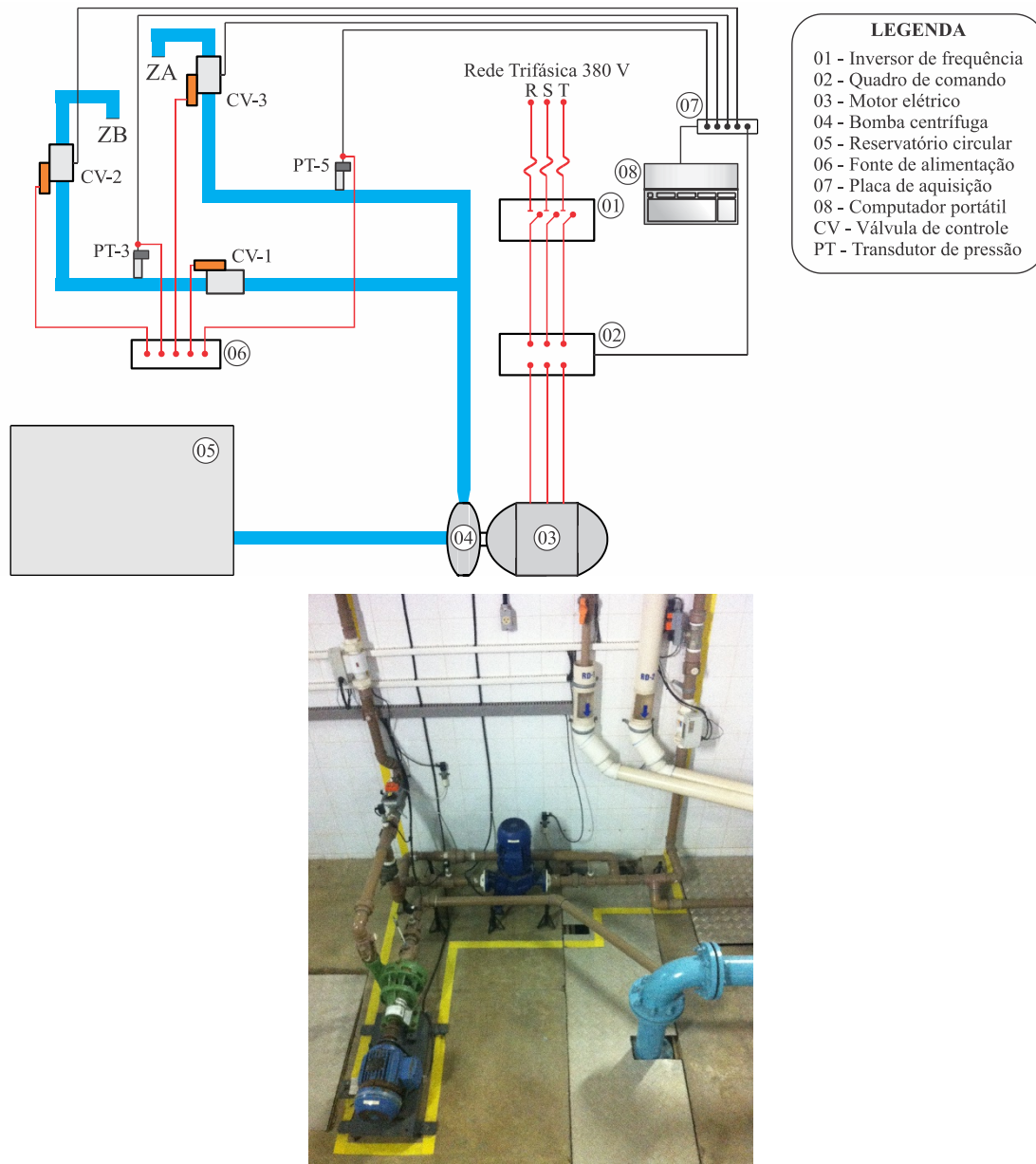


Figura 1 - Bancada experimental - Sistema automatizado de distribuição de água

Tabela 1 - Características de dispositivos eletrônicos da bancada experimental

Dispositivo	Transdutor de pressão	Válvula de controle
Fabricante	Acros	Belimo
Modelo	TP-ST18	ARX24-SR(-T)
Tensão de alimentação	0V – 10V	24V
Sinal de controle	4 mA – 20 mA	4 mA – 20mA
Faixa de medição	0 mca – 40 mca	90°

O conjunto motobomba (CMB) é composto por uma bomba centrífuga e um motor de indução trifásico, cujos dados são descritos na Tabela 2. O acionamento do CMB é realizado por meio de um inversor de frequência, que permitirá o controle da pressão de serviço nos pontos de medição, adequando, assim, o funcionamento da elevatória

às variações de demanda. Desta forma, evitam-se sobrepressões e gastos energéticos dispensáveis.

Tabela 2 - Características do conjunto motobomba

Fabricante	Schneider
Modelo	BC-21 R 1 ½
Potência do motor	3 cv
Frequência de alimentação	60 Hz
Diâmetro nominal de recalque	1 ½"
Diâmetro nominal de sucção	2"
Vazão mínima (frequência nominal)	17 m³/h
Vazão máxima (frequência nominal)	34 m³/h
Altura manométrica mínima (frequência nominal)	15 mca
Altura manométrica máxima (frequência nominal)	23 mca

Para fins de comparação, foram desenvolvidos dois Sistemas de Controle Fuzzy: o primeiro é descentralizado (cada atuador sendo controlado individualmente), enquanto o segundo é centralizado (um controlador Fuzzy atuou no controle simultâneo da CV-1 e do CMB). O valor adotado para o tempo de amostragem em ambos os casos foi de 100 ms.

3.2 Sistema de Controle Fuzzy Descentralizado

O Sistema de Controle Fuzzy descentralizado foi composto por dois controladores MISO, com múltiplas entradas e uma saída, aplicada em

cada uma das zonas de pressão. Para a zona baixa, as variáveis de entrada determinadas foram: Erro_ZB - diferença entre o *setpoint* (valor de referência) estabelecido e o valor medido no PT-3, e Der_Erro_ZB - que relaciona a diferença entre dois pontos consecutivos na medição de pressão com o tempo de amostragem. Como variável de saída tem-se a alteração do ângulo de abertura da CV-1 - Δ_Ang .

O segundo controlador MISO do SCF descentralizado foi aplicado no controle de pressão da zona alta. As variáveis de entrada desse controlador foram semelhantes ao da zona baixa: Erro_ZA - diferença entre o *setpoint* estabelecido e o valor registrado da pressão no PT-5, e a Der_Erro_ZA. Como variável de saída, tem-se a frequência de acionamento do motor do CMB - Δ_Freq .

As variáveis linguísticas de entrada e saída dos controladores e as funções de pertinência foram definidas com base em recomendações da literatura, na natureza do processo controlado (avaliação do comportamento das pressões para diferentes configurações operacionais do sistema), e em análises heurísticas e experimentais. Diante disso, foram adotadas funções de pertinência triangulares e trapezoidais, que são apresentadas nas Fig. 2 a 4.

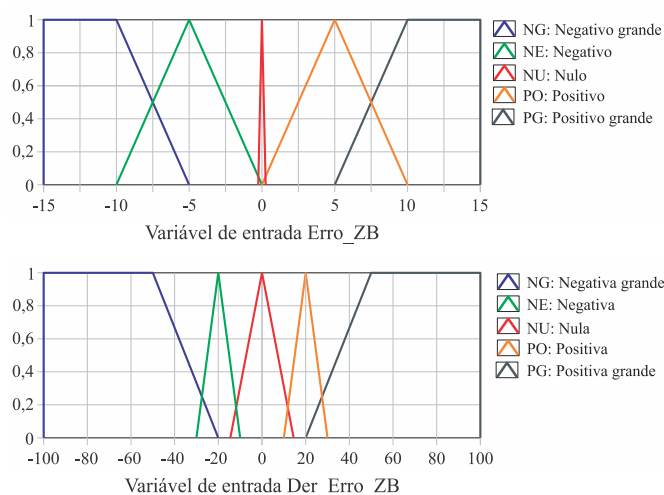


Figura 2 - Variáveis de entrada do controle descentralizado para a zona baixa

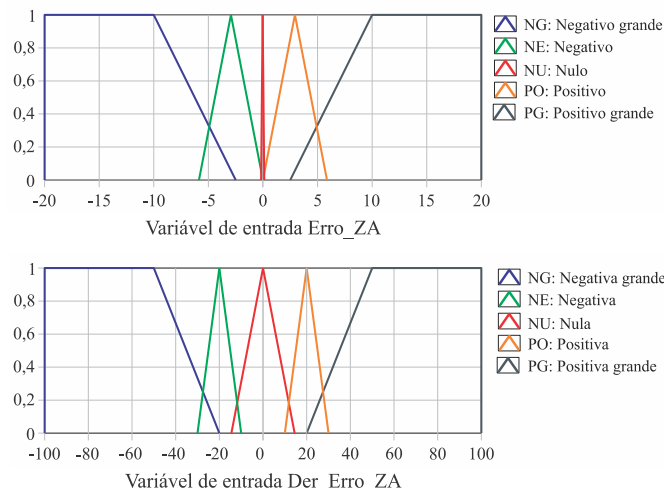
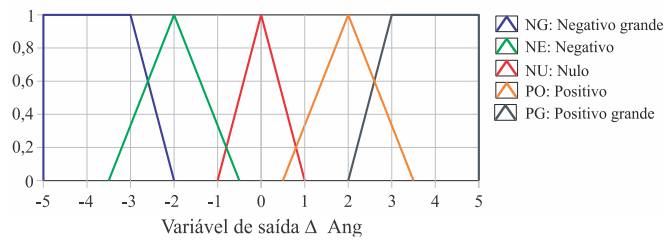


Figura 3 - Variáveis de entrada do controle descentralizado para a zona alta

(a) Zona baixa



(a) Zona alta

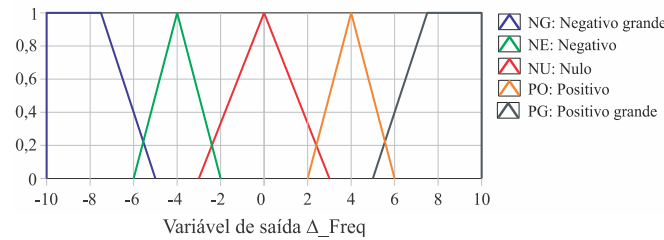


Figura 4 - Variável de saída do controle descentralizado para as zonas baixa e alta

As regras inseridas no processo de inferência *Fuzzy* foram definidas com base na experiência de operadores sobre este tipo de planta. Sabe-se que quando o consumo é alto, haverá uma maior necessidade de pressurização na rede, devendo a velocidade de rotação do CMB e/ou ângulo de abertura da CV-1 serem maiores. Em contrapartida, quando o consumo cai (pressão aumenta), à noite, por exemplo, é necessária a redução da frequência de acionamento do CMB e/ou fecha-

mento parcial da válvula. Ao todo, foram estabelecidas 25 regras de inferência *fuzzy* para cada um dos controladores, que relacionam as funções de pertinência das variáveis de entrada com as da variável de saída. As Tabelas 3 e 4 apresentam as matrizes associativas *fuzzy* dos controladores do inversor de frequência e da válvula de controle CV-1, respectivamente. O controle de pressão nos dois pontos de medição será por meio da ação simultânea dos dois controladores.

Tabela 3 - Matriz associativa fuzzy do controlador da ZB

		Erro_ZB				
		NG	NE	NU	PO	PG
Der_Erro_ZB	NG	PG	PO	PO	PO	PO
	NE	PO	PO	PO	PO	PO
	NU	NU	NU	NU	NU	NU
	PO	NE	NE	NE	NE	NE
	PG	NE	NE	NE	NE	NG

Tabela 4 - Matriz associativa fuzzy do controlador da ZA

		Erro_ZA				
		NG	NE	NU	PO	PG
Der_Erro_ZA	NG	NG	NG	NG	NG	NG
	NE	NG	NG	NG	NG	NG
	NU	NU	NU	NU	NU	NU
	PO	PO	PO	PO	PO	PO
	PG	PO	PO	PO	PO	PG

3.3 Controlador Fuzzy Centralizado

O segundo sistema de controle é composto por um controlador Fuzzy MIMO, ou seja, possui múltiplas entradas e múltiplas saídas e atuou no controle simultâneo do ângulo de abertura da CV-1 e da frequência de acionamento do motor do CMB. As variáveis de entrada do sistema foram: Dif_P - diferença de pressão entre as duas zonas, e o Erro_ZA - diferença entre o *setpoint* estabelecido e o valor registrado da pressão no PT-5. Como variáveis de saída, tem-se o Δ_Ang e o Δ_Freq . Na Fig. 5, mostra-se os gráficos das variáveis de entrada, enquanto a Fig. 6 representa a saída do controle.

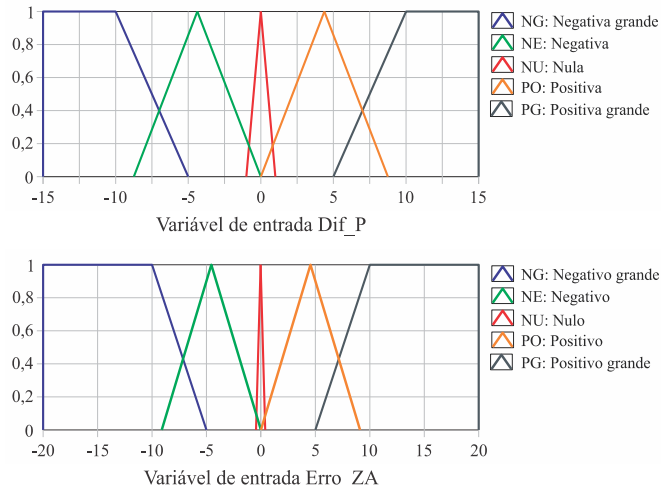


Figura 5 - Variáveis de entrada do controle centralizado

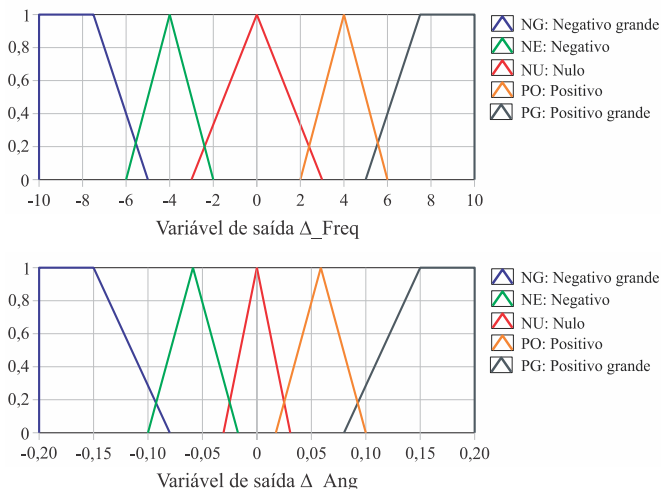


Figura 6 - Variáveis de saída do controle centralizado

As regras que relacionam as variáveis de entrada com as variáveis de saída para o sistema centralizado estão relacionadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz associativa fuzzy do controlador centralizado

		Erro_ZB				
		NG	NE	NU	PO	PG
Der_Erro_ZB	NG			$\Delta_Ang=PG/\Delta_Freq=PO$	$\Delta_Ang=PO/\Delta_Freq=NU$	$\Delta_Ang=PG/\Delta_Freq=PG$
	NE		$\Delta_Ang=PO/\Delta_Freq=PO$	$\Delta_Ang=PG/\Delta_Freq=PO$	$\Delta_Ang=PO/\Delta_Freq=PO$	$\Delta_Ang=PO/\Delta_Freq=PG$
	NU	$\Delta_Ang=NU/\Delta_Freq=NG$	$\Delta_Ang=NU/\Delta_Freq=NE$	$\Delta_Ang=NU/\Delta_Freq=NU$	$\Delta_Ang=NU/\Delta_Freq=PO$	$\Delta_Ang=NU/\Delta_Freq=PG$
	PO	$\Delta_Ang=NE/\Delta_Freq=NG$	$\Delta_Ang=NE/\Delta_Freq=NE$	$\Delta_Ang=NE/\Delta_Freq=NU$	$\Delta_Ang=NE/\Delta_Freq=PO$	$\Delta_Ang=NE/\Delta_Freq=PG$
	PG	$\Delta_Ang=NG/\Delta_Freq=NG$		$\Delta_Ang=NG/\Delta_Freq=NU$	$\Delta_Ang=PG/\Delta_Freq=PO$	

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os SCF desenvolvidos foram aplicados nas seguintes situações: com a máxima demanda, ou seja, as válvulas CV-2 e CV-3 totalmente abertas, e com a mínima demanda – válvulas CV-2 e CV-3 com de ângulo de abertura em 60°. O valor de abertura foi estabelecido após a realização de testes na bancada que garantiram que os valores acima não alteravam os resultados.

Além das duas situações acima descritas, foram realizadas perturbações na planta, com o intuito de constatar o comportamento do controlador e sua capacidade em manter as pressões de

serviço preestabelecidas, mesmo após variações bruscas de demanda.

4.1 Sistema operando sem a atuação de controladores

O primeiro nível de operação adotou o sistema sem a atuação dos controladores e a máxima demanda. Com isto, o CMB operou com a frequência nominal (60 Hz) e todas as válvulas de controle totalmente abertas. O comportamento da pressão nos pontos monitorados é apresentado na Fig. 7.

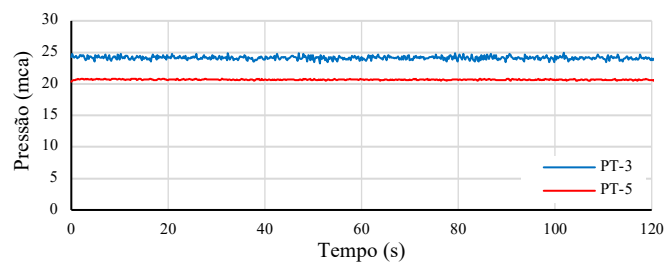


Figura 7 - Comportamento das pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus respectivos valores de referência, para a máxima demanda, sem a atuação de controladores

Além da operação do sistema, com as válvulas CV-2 e CV-3 simulando a máxima demanda, também foram realizados experimentos para a simulação de

mínima demanda, ou seja, CV-2 e CV-3 com ângulo de abertura igual a 60°. Na Fig. 8, apresentam-se os valores das pressões registradas para esse cenário.

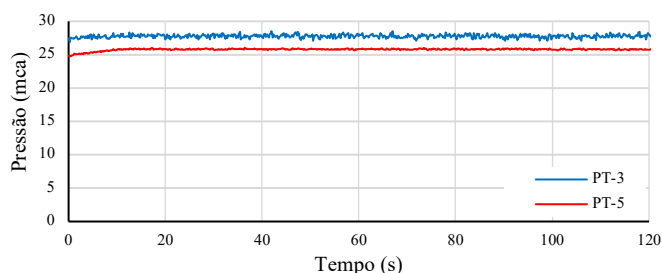


Figura 8 - Comportamento das pressões de serviço nas duas zonas de pressão e seus respectivos valores de referência, para a mínima demanda, sem a atuação de controladores

4.2 Sistema de Controle Fuzzy Descentralizado

O SCF descentralizado atuou controlando, simultaneamente, a pressão nas duas zonas, cujas pressões de referência foram 16,5 e 11,5 mca para os pontos de medição das zonas baixa e alta, respectivamente. Na Fig. 9, mostra-se o comportamento das variáveis do sistema para a condição de máxima demanda, onde é possível observar que os tem-

pos de assentamento dos controladores (para um erro no regime estacionário de 3%) do inversor de frequência e da CV-1 foram de 51 e 161 segundos. A pressão do PT-3 atingiu o valor desejado, porém a CV-1 permaneceu instável ao longo do experimento. A oscilação do ângulo de abertura da válvula ocorreu, provavelmente, por causa do desacoplamento do sistema em dois controladores.

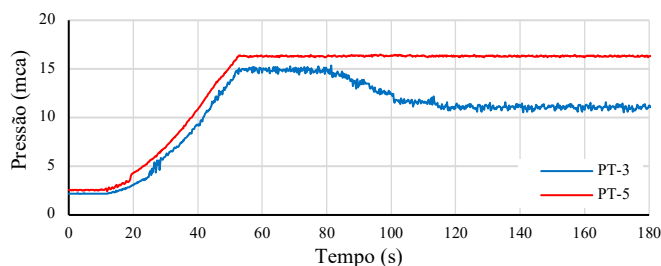


Figura 9 - Resultados da atuação do SCF descentralizado para o sistema operando com máxima demanda - Comportamento das pressões de serviço nas duas zonas de pressão

O controlador obteve uma resposta mais eficiente e atuante no PT-5, visto que nesse ponto não houve registro de sobressinal e seu tempo de assentamento foi inferior ao do PT-3. Apesar do tempo de assentamento do controlador fuzzy da ZB ter sido quase o triplo, em relação à ZA, este atuou de maneira satisfatória, mantendo a pressão em um valor próximo ao estabelecido ao longo do experimento.

Com base no comportamento das pressões medidas (respostas dos transdutores PT-3 e PT-5),

pode-se afirmar que o sistema possui um tempo morto de, aproximadamente, 17 segundos, quando acionado em repouso. Com isso, o erro medido, bem como sua derivada, apresenta os maiores valores de correção no início dos testes, o que gerou um maior incremento por parte do delta de frequência de acionamento do motor e do delta de angulação da CV-1. Em contrapartida, ao atingir valores próximos aos de referência, o sistema apresentou um erro e uma derivada do erro próximos a zero, os incrementos foram nulos, atingindo assim o regime estacionário.

Esse comportamento é compatível com as regras estabelecidas nas matrizes associativas *fuzzy* (Tabelas 3 a 5), que estabelecem incrementos altos para erros altos e incrementos nulos para erros medidos próximos a zero.

A Fig. 10 apresenta os resultados obtidos para a bancada experimental operando com a mínima demanda. Observou-se que o PT-3 apresentou sobressinal; no entanto, após 117 segundos de acionamento do controle, este estabilizou, atingindo o valor de referência desejado de 11,5 mca. O PT-5, por outro lado, não registrou sobressinal,

e 46 segundos após o acionamento do controle, atingiu a pressão de referência de 16,50 mca. O PT-5 acompanha o desenvolvimento da frequência de acionamento do CMB, que registra 43,17 Hz quando a pressão do PT-5 atinge o estado estacionário. O comportamento da CV-1, de forma análoga, acompanha o desempenho do PT-3, estabilizando no regime estacionário. Na mínima demanda, é possível constatar que a válvula influencia diretamente e eficientemente no comportamento de PT-3, fazendo com que as pressões de serviço sejam atingidas, sem grandes variações no ângulo de abertura.

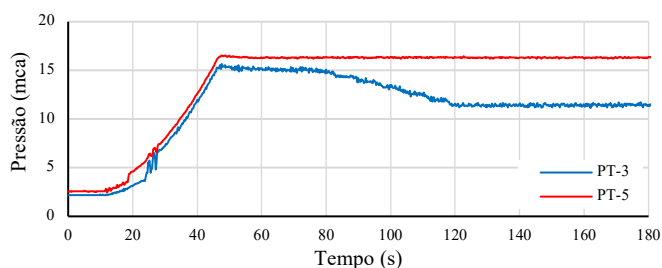


Figura 10 - Resultados da atuação do SCF descentralizado para o sistema operando com mínima demanda - Comportamento das pressões de serviço nas duas zonas de pressão

O experimento com demanda mínima obteve uma resposta mais eficiente e atuante no PT-5, visto que nesse ponto não houve registro de sobressinal, e seu tempo de assentamento foi inferior ao do PT-3. De forma análoga ao experimento com demanda máxima, o tempo de assentamento para a ZB foi quase o triplo do registrado para o controle de pressão da ZA.

A Fig. 11 apresenta o comportamento do sistema para variações bruscas nas demandas das zonas baixa e alta para as demandas máxima e mínima, respectivamente. As perturbações foram realiza-

das após as duas variáveis de estado terem atingido seus valores de referência. Na primeira perturbação, causada pelo fechamento do registro de saída da ZB, observa-se um aumento da frequência no CMB, visto que a vazão na ZB diminuiu. No segundo distúrbio, foi realizado o fechamento do registro de saída da ZA, o que inverteu a situação em termos de vazões, com a diminuição na ZA, o CMB se apresentou menos requisitado, logo, foi constatada uma redução na frequência. Apesar dessas alterações, o controlador se mostrou bastante eficiente, e permitiu que as pressões de serviço fossem mantidas após as perturbações.

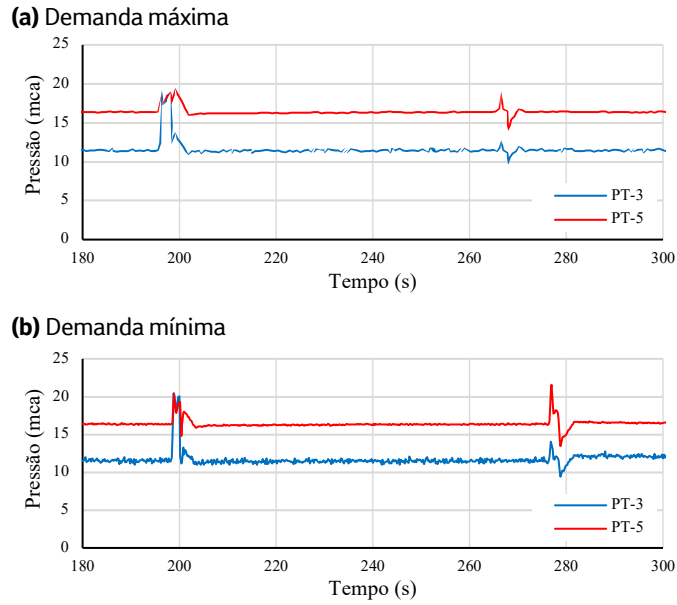


Figura 11 - Comportamento das pressões de serviço com o SCF descentralizado respondendo à perturbação momentânea

4.3 Sistema de Controle Fuzzy Centralizado

A Fig. 12 apresenta o comportamento do SCF centralizado para o sistema operando com a demanda máxima e mínima. De acordo com os gráficos da Fig. 12a, observou-se uma resposta rápida da CV-1 e do CMB, levando as pressões aos seus valores de referência. Os tempos de assentamento dos controladores da CMB e CV-1 foram de 15 e 17

segundos. De forma análoga, a Fig. 12b apresenta os resultados do SCF centralizado para o sistema operando com mínima demanda. Observa-se que o CMB eleva rapidamente as pressões aos seus valores de referência, demorando 15 segundos para os pontos de medição PT-3 e PT-5 atingirem os valores preestabelecidos. Não foi necessária a atuação da CV-1, que se manteve estável.

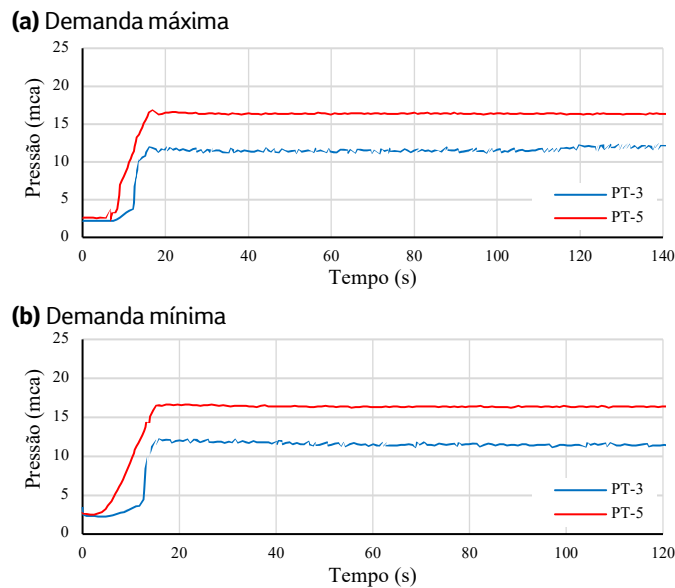


Figura 12 - Resultados da atuação do SCF centralizado - Comportamento das pressões de serviço nas duas zonas de pressão

Os experimentos com perturbações realizados no sistema operando com o SCF centralizado atuando foram similares aos anteriores (SCF descentralizado). Os resultados são apresentados na Fig. 13, e demonstram que o SCF respondeu satisfatoriamente, garantindo a estabilidade do sistema e a manutenção das pressões de serviço próximas aos valores pré-estabelecidos. Após essas interrupções, é possível detectar a diminuição simultânea na frequência do CMB e sua ágil resposta ao retorno das condições normais de operação.

A partir da análise dos dados experimentais registrados, constatou-se que os controlado-

res mantiveram as pressões medidas próximas aos valores preestabelecidos como referência. O Sistema de Controle Fuzzy centralizado apresentou melhores resultados que o descentralizado, pois os tempos de assentamento foram menores e a válvula CV-1 manteve-se estável em todos os testes daquele, pois o Controle Fuzzy centralizado apresentou tempos de assentamento menores e sobressinais imperceptíveis nos testes experimentais quando comparados aos resultados gerados pelo controle descentralizado, garantindo ao sistema uma melhor resposta e maior estabilidade.

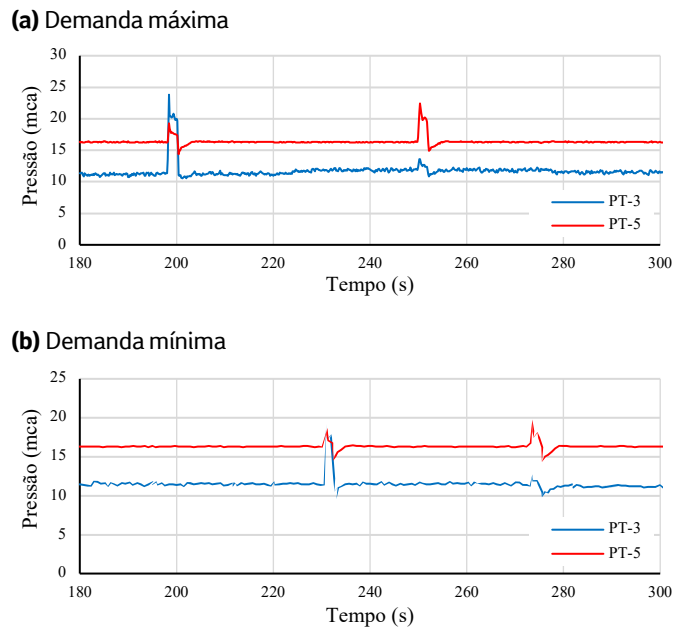


Figura 13 - Comportamento das pressões de serviço com o SCF centralizado respondendo à perturbação momentânea

5 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, foram propostos, desenvolvidos e aplicados dois sistemas de controle *Fuzzy* com o intuito de controlar as pressões em um sistema automatizado de distribuição de água, que simulou duas zonas topográficas diferenciadas. O controle tinha como base de regras requisitos hidráulicos, o que garante uma operação mais eficiente do que as realizadas no dia a dia da maioria dos SDA.

O primeiro Sistema de Controle *Fuzzy* foi composto por dois controladores desacoplados que controlavam, de maneira independente, as pressões em cada zona de pressão, enquanto o segundo foi um sistema centralizado do tipo MIMO, cujo objetivo de funcionamento era controlar, ao mesmo tempo e de forma dependente, as pressões nas duas zonas. Pelos resultados apresentados, o segundo controle se mostrou mais eficiente e

teve respostas mais robustas, quando comparado ao SCF descentralizado. Nas duas situações, foi possível constatar a influência mais significativa do CMB na pressurização das duas zonas; no entanto, a válvula de controle era indispensável na regulação simultânea das pressões.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Eletrobras e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Mendonça KM, Gomes HP, Bezerra STM e Villanueva JMM; **Metodologia:** Mendonça KM, Gomes HP, Bezerra STM e Villanueva JMM; **Investigação:** Mendonça KM, Gomes HP, Bezerra STM e Villanueva JMM; **Redação - primeira versão:** Mendonça KM; **Redação - revisão & edição:** Mendonça KM, Bezerra STM; **Aquisição de financiamento:** Gomes HP; **Supervisão:** Gomes HP.

8 REFERÊNCIAS

ARCOS-AVILES, D. et al. Fuzzy logic-based energy management system design for residential grid-connected microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 2, p. 530-543, 2016. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2555245>

AZAR, A. T.; AMMAR, H. H.; MLIKI, H. Fuzzy logic controller with color vision system tracking for mobile manipulator robot. In: *International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications*. Springer, Cham, 2018. p. 138-146. **Anais...** https://doi.org/10.1007/978-3-319-74690-6_14

BARROS FILHO, E. G. et al. Intelligent system for control of water distribution networks. *Water Science and Technology – Water Supply*, v. 18, p. ws2017188, 2017. <https://doi.org/10.2166/ws.2017.188>

BEZERRA, S. T. M.; SILVA, S. A.; GOMES, H. P. Operational optimization of water supply networks using a fuzzy system. *Water SA*, v. 38, n. 4, p. 565-572, 2012. <https://doi.org/10.4314/wsa.v38i4.12>

DOMÍNGUEZ-NAVARRO, J. A. et al. Fuzzy-logic strategy control for switched reluctance machine. In: *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE, 2018. p. 1-5. **Anais...** <https://doi.org/10.1109/EVER.2018.8362403>

GOYAL, M. et al. An ingenious traffic control system using fuzzy logic control with emergency override feature. In: *2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA)*. IEEE, 2018. p. 1-6. **Anais...** <https://doi.org/10.1109/ICSCAN.2018.8541252>

HOLMBLAD, L. P.; ØSTERGAARD, J.-J. Control of a cement kiln by fuzzy logic. In: *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*. Morgan Kaufmann, 1993. p. 337-347. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-1450-4.50039-0>

KATBAB, A. Fuzzy logic and controller design-a review. In: *Proceedings IEEE Southeastcon'95. Visualize the Future*. IEEE, 1995. p. 443-449. **Anais...** <https://doi.org/10.1109/SECON.1995.513133>

MAMDANI, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In: *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. IET, 1974. p. 1585-1588.

MOREIRA, H. A. M. et al. Real-time neuro-fuzzy controller for pressure adjustment in water distribution systems. *Water Science and Technology – Water Supply*, v. 20, 2020. <https://doi.org/10.2166/ws.2020.379>

MOURA, G. A. et al. Neural network using the Levenberg-Marquardt algorithm for optimal real-time operation of water distribution systems. *Urban Water Journal*, v. 15, n. 7, p. 692-699, 2018. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1539503>

OIKONOMOU, K.; PARVANIA, M. Optimal coordination of water distribution energy flexibility with power systems operation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 10, n. 1, p. 1101-1110, 2018. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2824308>

PAGE, P. R.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; YOYO, S. Real-time adjustment of pressure to demand in water distribution systems: Parameter-less P-controller algorithm. *Procedia Engineering*, v. 154, p. 391-397, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.498>

PATIL, S. S.; SOMA, S. Traffic Congestion Re-Routing Control System Using Fuzzy Logic. In: *International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things*. Springer, Cham, 2018. p. 778-785. **Anais...** https://doi.org/10.1007/978-3-030-03146-6_89

SARBU, I. A study of energy optimization of urban water distribution systems using potential elements. *Water*, v. 8, n. 12, p. 593, 2016. <https://doi.org/10.3390/w8120593>

SARRIAS-MENA, R. et al. Design of a Supervisory Control System Based on Fuzzy Logic for a Hybrid System Comprising Wind Power, Battery and Ultracapacitor Energy Storage System. In: *Advanced Control and Optimization Paradigms for Wind Ener-*

gy Systems. Springer, Singapore, 2019. p. 189-212. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5995-8_8

SETIAWAN, J. D. et al. Modeling and analysis of lateral control system on electronic differential for 2-independent-wheel drive electric urban bus. In: 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). IEEE, 2018. p. 36-40. **Anais...** <https://doi.org/10.1109/ICEVT.2018.8628428>

SHIN, S. et al. A systematic review of quantitative resilience measures for water infrastructure systems. **Water**, v. 10, n. 2, p. 164, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10020164>

SILVA, M. J. G. et al. Generalized minimum variance control for water distribution system. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 3, p. 651-658, 2015. <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7069088>.

SUGENO, M.; TAKAGI, T. A new approach to design of fuzzy controller. In: **Advances in Fuzzy Sets, Possibility Theory, and Applications**. Springer, Boston, MA, 1983. p. 325-334. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3754-6_20

TOGAI, M.; WATANABE, H. A VLSI implementation of a fuzzy-inference engine: Toward an expert system on a chip. **Information Sciences**, v. 38, n. 2, p. 147-163, 1986. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(86\)90017-4](https://doi.org/10.1016/0020-0255(86)90017-4)

XIANG, X. et al. Survey on fuzzy-logic-based guidance and control of marine surface vehicles and underwater vehicles. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 20, n. 2, p. 572-586, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40815-017-0401-3>

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.