



Controlador Fuzzy Tipo-2 Aplicado a Válvulas Redutoras de Pressão Para Controle Noturno em Sistemas de Abastecimento de Água

Victor Barreto⁽¹⁾

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

Douglas Jordão Barbosa⁽²⁾

Engenheiro Agrônomo pela UCDB – Universidade Católica Dom Bosco. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFRJ. MBA em Gestão Empresarial pela FGV. Gerente de Operações da Concessionária de Abastecimento Público e Tratamento de Água e Esgoto da Região dos Lagos - Prolagos/RJ.

Victor Hugo Oliveira Hoff⁽³⁾

Engenheiro Sanitarista e Ambiental – UCDB. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFRJ. MBA em Gestão Empresarial pela FGV. Gerente de Serviços da Concessionária de Abastecimento Público e Tratamento de Água e Esgoto da Região dos Lagos - Prolagos/RJ.

Thiago Augusto Maziero⁽⁴⁾

Engenheiro Civil, Mestre em Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Engenheiro de Segurança do Trabalho pela UEM. MBA em Gestão Empresarial pela FGV. Diretor da Concessionária de Abastecimento Público e Tratamento de Água e Esgoto 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

Sistemas de abastecimento de água apresentam grande potencialidade em se explorar características noturnas, visto a elevada pressão hidráulica encontrada em determinadas regiões. Dessa maneira, estratégias devem ser aplicadas visando à redução de pressão, diminuindo a quantidade de perdas e energia gasta com estes sistemas. A conectividade das cidades, graças a *Internet of Things (IoT)*, permite hoje a realização de um abastecimento de água inteligente, com tomada de decisões e análise de dados. Este artigo investiga o comportamento de um sistema do mundo real pertencente a este contexto. Um controlador *Fuzzy* Tipo-2 é aplicado a uma válvula redutora de pressão (VRP) objetivando realizar um controle com maior eficiência no período noturno de um setor de abastecimento de água, reduzindo a quantidade de transientes hidráulicos, vazamentos, perdas e energia gasta no sistema. Os resultados indicam que o controlador proposto apresentou resultados satisfatórios nos quesitos mencionados, atendendo aos objetivos desejados.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de Controle *Fuzzy* Tipo-2, Abastecimento de Água, Redução de Perdas.

INTRODUÇÃO

Visto os recursos hídricos serem cada vez mais escassos e importantes para a população (BEZERRA et al., 2010; PEREIRA 2016), agregado a necessidade econômica do país para redução dos gastos com energia elétrica, controlar de forma eficiente sistemas de abastecimento de água têm sido cada vez mais importante, sendo que para cada litro de água perdido, um custo significativo de energia está relacionado (NUÑEZ, 2007). Acompanhar e controlar estes sistemas em tempo real tem sido primordial, o uso de tecnologias para automação da Indústria 4.0 e a utilização de sensores junto a conectividade da *IoT*, permitem trazer economias significativas e aumento da eficiência com valores consideráveis. Hoje, diferentes conceitos tecnológicos como modelo de controle preditivo não linear (*Nonlinear Model Predictive Control- NMPC*), Algoritmos Genéticos, Sistemas de Controle *Fuzzy* Tipo-1 e Tipo-2, são utilizados visando agregar inteligência operacional nos serviços básicos dos municípios, como, água, esgoto e energia. Por exemplo, controlador automático para à redução de perdas de água, índice de vazamentos e a modelagem de processos frente a não linearidades (ÂNGULO et al., 2013, BARRETO et al., 2016, CERVANTES; CASTILLO, 2012, MORATORI et al., 2016, PEREIRA, 2016, QUADROS; PINTO, 2013).

Este artigo investiga um problema do mundo real de um setor de abastecimento de água da empresa Concessionária de Serviços Públicos de Água e Esgoto Prolagos S/A. Neste trabalho, um modelo de controle avançado *Fuzzy* Tipo-2



foi criado objetivando reduzir pressões sem comprometer o abastecimento de água no período noturno. O controlador foi aplicado a uma válvula redutora de pressão, na qual diferente de controles comumente encontrados, olhou variáveis adicionais como a pressão de entrada, visto que se trata de um sistema não linear e controladores com modelos simplificados tendem a ser instáveis e imprecisos em determinados momentos, graças há alterações constantes no modelo matemático da planta e uma sintonia feita previamente, pode não representar a realidade atual do abastecimento de água. Dessa maneira, foi avaliada a eficiência do modelo com base nas variáveis erro, pressão e vazão, ou seja, a precisão do sistema e perturbações presentes no controle.

DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O controlador *Fuzzy* Tipo-2 foi investigado em uma unidade de controle de água tratada do mundo real. A Figura 1 ilustra os componentes desta unidade, identificando o sistema de controle de pressão e seus respectivos sensores de leitura de pressão P1, P2 e vazão V. O sensor P1 faz a leitura da quantidade de água que chega à VRP definida como “Pressão Montante”. P2 mede a pressão de saída, ou seja, após o controle de pressão aplicada pela VRP, descrita como “Pressão Jusante”. V faz a leitura da vazão de água medida em l/s no abastecimento da VRP. Note que leituras em P1 e P2 são parâmetros relevantes para tomada de decisões e diferente de controles comumente encontrados com estratégias simplificadas, na qual considerariam somente P2 na tomada de decisão, a estratégia de controle avançado *Fuzzy* Tipo-2 permite a leitura de P1. Vale ressaltar que sua estratégia disponibiliza incertezas adicionais na definição das funções de pertinência, o que facilita a modelagem de sistemas do mundo real.

Por se tratar de um sistema em linha, diferentes perfis de abastecimento são encontrados frente à P1 e sistemas reservatórios de água não estão disponíveis para minimizar as variações encontradas, dificultando um controle de pressão eficiente. Dessa maneira, leituras em P1 podem impactar nas ações a serem realizadas na VRP, ajudando a identificar diferentes perfis de abastecimento presentes e realizando um controle inteligente, visto que após P2, novas perturbações por variações no sistema de abastecimento são encontradas como efeito do processo de abastecimento local da cidade. O controle *Fuzzy* Tipo-2 modelado de acordo com heurísticas e experiência do especialista possibilita a redução de sintonias de controle no sistema de abastecimento de água, visto que em controladores clássicos como PID, sintonias são realizadas de acordo com o modelo matemático da planta, e consequentemente, sintonias previamente aplicadas podem não atender a novas variações de perfis apresentadas se tornando instáveis e insuficientes em determinados momentos.

Considerando o contexto apresentado e a dificuldade na realização de sintonias com controladores clássicos como PID, foi realizado um experimento com o controlador *Fuzzy* Tipo-2 para automação da VRP, permitindo mapear as decisões tomadas pelos operadores locais para manter a eficiência e estabilidade do processo de maneira simples (SANCHEZ et al., 2017; MORATORI et al., 2016, YU; THENOZHI, 2016; CERVANTES; CASTILLO, 2016, LIMA et al., 2007, MENDEL et al., 2006).

CONTROLADORES FUZZY PARA ABASTECIMENTO DE ÁGUA

O controlador *Fuzzy* Tipo-2 proposto utiliza informações da “Pressão de Montante” P1 e “Erro” ER para decidir o tempo de ativação dos atuadores elétricos da VRP (TE), delimitando um sistema com duas entradas e uma saída. P1 identifica diferenças nos perfis de abastecimento, ou seja, a saída TE é calculada não somente para reduzir o erro (ER), mas diferentes situações são estimadas com base no montante de água disponível. ER reflete a diferença entre o *Setpoint* desejado e P2.

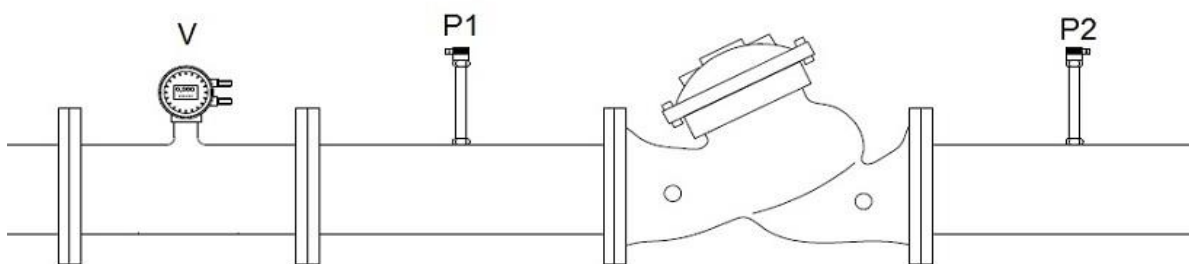


Figura 1: Componentes do sistema de controle para redução de pressão.



Os conjuntos do sistema *Fuzzy* Tipo-2 e universos de discurso definidos para cada uma das variáveis estão graficamente representados na Figura 2. Observe que sete rótulos linguísticos foram definidos para delimitar as características das variáveis de entrada P1 e ER, que incluem: (MMB) menor que muito baixo; (MB) muito baixo; (B) baixo; (M) médio; (A) alto; (MA) muito alto e (MMA) maior que muito alto e sete rótulos linguísticos foram definidos para delimitar as características da variável de saída TE que incluem: (MLN) muito longo negativo; (LN) longo negativo; (CN) curto negativo; (ZE) zero; (CP) curto positivo; (LP) longo positivo; (MLP) muito longo positivo.

A Tabela 1 representa a base de conhecimento modelada com as características do sistema de abastecimento de água, onde os conjuntos das variáveis de entrada P1 e ER são combinados para calcular o tempo de atuação na VRP, TE. 21 regras foram definidas utilizando o método de defuzzificação “centro de gravidade”, permitindo um controle mais suave na redução de pressão noturna.

EXPERIMENTO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados deste trabalho refletem amostras que foram coletadas durante um experimento para o controlador *Fuzzy* Tipo-2 (F2) em um intervalo de aproximadamente 360 minutos no período noturno, ou seja, amostras foram coletadas das 00:00 h às 06:00 h. Inicialmente a variável Erro verifica a precisão dos controladores frente a comportamentos esperados determinados pelo especialista do processo. Após isso, são avaliados resultados gerais do experimento, analisando as variáveis Pressão de Montante, Jusante, *Setpoint* e Vazão.

A variável Erro é medida através da diferença entre um *Setpoint* delimitado pelo operador (objetivo) e a pressão de saída após a VRP P2. Dessa maneira, quanto menor o valor do erro, maior a precisão e eficiência no processo de redução e controle de pressão, possibilitando uma potencial economia de água e redução de perdas pelo controle de pressão inadequado.

A Tabela 2 apresenta resultados para a variável Erro, destacando a média e desvio padrão obtidos, o total de erros encontrados dentro e fora da faixa ideal determinada de 0,5 mca, ou seja, intervalo ideal de operação e valores máximos e mínimos atingidos pelas amostras do controlador F2. Adicionalmente, o gráfico da Figura 3 ilustra o comportamento do controlador na linha do tempo. Observe que a linha contínua delimita o comportamento ideal esperado, ou seja, onde o erro obtido possui valor nulo.

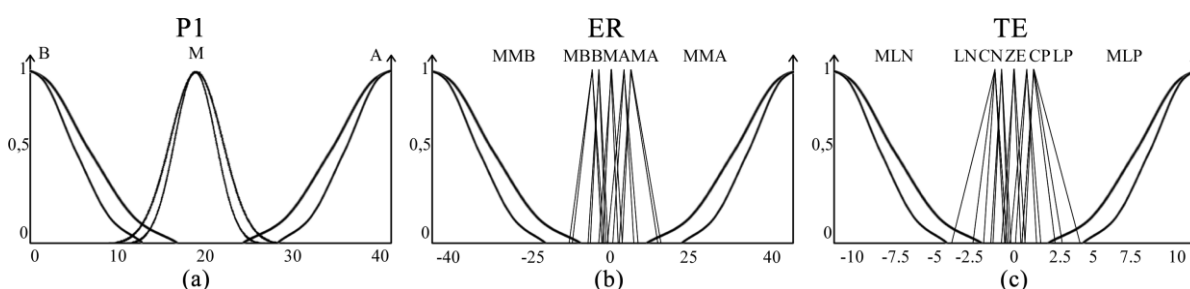


Figura 2: Modelagem do sistema *Fuzzy* Tipo-2.

Tabela 1: Base de conhecimento do controlador *Fuzzy* Tipo-2.

		<i>Erro Controle</i>						
		MMB	MB	B	M	A	MA	MMA
<i>Pressão Montante</i>	B	CN	CN	CN	ZE	CP	LP	CN
	M	CN	CN	ZE	ZE	ZE	CP	CP
	A	CN	CN	ZE	ZE	ZE	CP	CP



Tabela 2: Resultados variável erro.

Média (mca)	0,27
Desvio Padrão (mca)	0,43
Total de Erros no Controle Menores que 0,5 mca	350,00
Total de Erros no Controle Maiores que 0,5 mca	10,00
Erro Máximo (mca)	3,80
Erro Mínimo (mca)	0,00

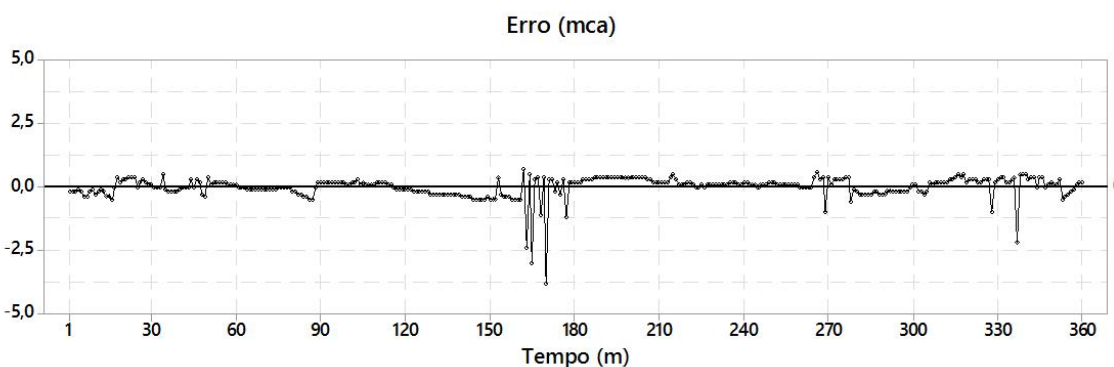


Figura 3: Comportamento da variável erro.

De uma maneira geral, F2 atingiu os resultados esperados no experimento, realizando um controle com erro relativamente baixo e produzindo valores reduzidos para a média em 0,27 mca e desvio padrão em 0,43 mca. Note que das 360 amostras, 10 valores ficaram fora da faixa ideal esperada com erro maior que 0,5 mca, ou seja, sua taxa de erro foi de 2,85%, valor máximo de 3,80 mca e mínimo nulo 0,00 mca. O tratamento refinado das incertezas presentes em F2 possibilita a realização de controle em sistemas não lineares do mundo real trazendo resultados satisfatórios. A aplicação deste tipo de controle na válvula possibilitou a redução de pressão com baixo erro ao longo do experimento, apresentando potencialidade para explorar as características encontradas.

P1 disponibiliza informações da quantidade de água a montante da VRP, ou seja, a pressão de entrada, P2 representa a quantidade de pressão de saída, após a redução de pressão ou controle aplicado pela válvula, ou seja, a pressão de jusante na qual objetiva obter valores do *Setpoint* e V disponibiliza informações de vazão. As informações de pressão disponibilizadas por P2 caracterizam o déficit ou excesso de pressão no setor de abastecimento de água envolvido pela região do controle, estas informações, medidas em tempo real auxiliam na operação estratégica na qual objetivam a redução da pressão desnecessária aplicadas na rede de água, reduzindo perdas, vazamentos, problemas operacionais, custos com manutenção, e gastos com energia elétrica.

A Tabela 3 apresenta resultados para as variáveis mencionadas, destacando a média e desvio padrão obtidas. Adicionalmente, o gráfico da Figura 4 ilustra o comportamento da vazão do sistema de abastecimento referente ao controlador F2 na linha do tempo. Por último, o gráfico na Figura 5 representa a variação dos dados observados nas Pressões.

Na Tabela 3, a Pressão Montante obteve seu valor médio de 43,76 mca e seu desvio padrão foi de 3,54 mca, ou seja, o alto valor médio e a alta variabilidade dos dados representados pelo desvio padrão descrevem características comumente encontradas em sistemas de abastecimento de água não lineares, onde variações em ofertas e demanda são encontradas ao longo do dia, a Pressão Jusante, obteve seu valor médio de 10,59 mca sendo que seu desvio padrão foi de 0,43 mca, ou seja, a utilização de F2 sobre a VRP foi capaz de reduzir a pressão em aproximadamente 75,80% com baixo desvio padrão, dados destacados na Figura 5. Vale destacar que o baixo desvio padrão na saída da válvula representa um controle estável, evitando gerar rompimentos no sistema de abastecimento de água e diminuindo custos com manutenção. O valor médio do *Setpoint* foi de



10,60 mca sendo que a vazão média disponibilizada ao longo do experimento foi de 0,97 l/s com desvio padrão de 0,37 mca.

Note que com o valor médio de Pressão Jusante de 10,59 mca e valor de *Setpoint* para 10,60 mca, o controlador F2 representa potencialidade e precisão para controle em sistemas do mundo real mesmo frente às variações constantes no processo. Visto que a água é um recurso caro e cada vez mais escasso, é importante olhar para este tipo de sistema de maneira similar a indústrias, buscando aumento de eficiência e reduzindo custos operacionais.

O gráfico na Figura 4 apresenta os resultados da variável vazão ao longo dos 360 minutos no período noturno do experimento, note que somente nos minutos do intervalo 160-179 o sistema apresentou alta variação dos dados, obtendo como valor máximo 2,23 l/s e mínimo 0,00 l/s. É importante destacar que nesse período, um baixo consumo de água é encontrado e o sistema tentou manter um mínimo de vazão necessário.

Em conclusão, observou-se que mesmo havendo uma elevada dispersão no processo de pressurização frente a demandas presentes na aplicação do mundo real, F2 reduziu pressões de maneira satisfatória, e a sua estratégia de controle avançado foi eficiente.

Tabela 3: Resultados gerais.

Pressão Montante (mca)	0,27
Pressão Jusante (mca)	0,43
<i>Setpoint</i> (mca)	350,00
Vazão (l/s)	10,00

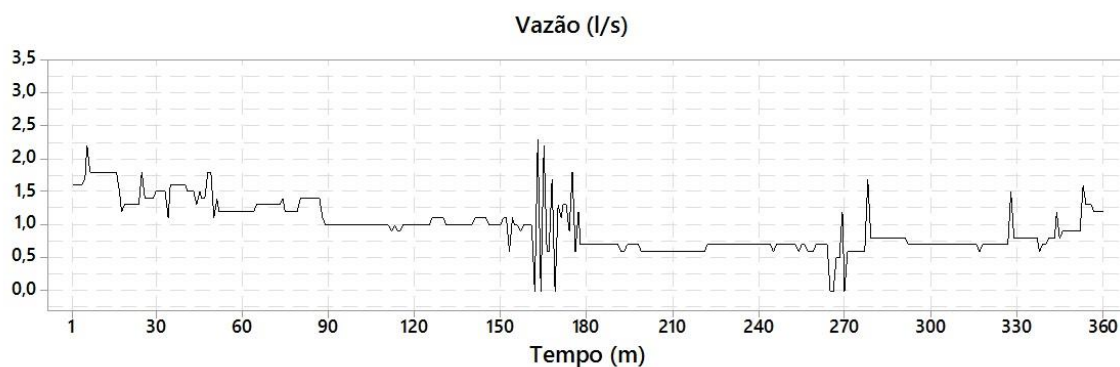


Figura 4: Comportamento da variável vazão.

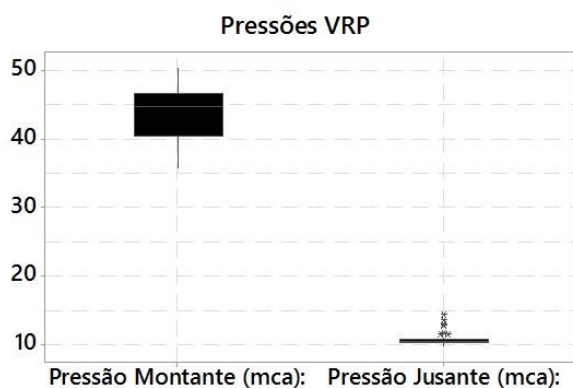


Figura 5: Pressões do sistema de controle.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho investiga a aplicação da técnica de controle avançada *Fuzzy* Tipo-2 em um sistema do mundo real, capaz de tomar decisões adequadas em sistemas não lineares, replicando o conhecimento humano em um ambiente puramente computacional. Os resultados indicam que este se mostrou eficiente através das variáveis analisadas viabilizando um controle refinado das incertezas presentes no contexto de distribuição de água. Como trabalho futuro, propõe-se a troca deste sistema para o método avançado de controle de processos *Model Predictive Control (MPC)* devido à dinâmica das características encontradas no abastecimento de água.

REFERÊNCIAS

Angulo, L., Castillo, O., e Pulido, M. (2013). Comparison of Fuzzy Controllers for the Water Tank With Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic. Proceedings of the 2013 Joint IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting, IFSA/NAFIPS 2013, pages 1062–1067.

Barreto, V., Agápito, A., Bernardini, F., Weitzel, L., Mattos, M., Reis, M., e Moratori, P. (2016). Previsão do quantitativo de veículos visando aplicações em cidades inteligentes. WORKPEDIA - II Workshop de Pesquisa e Desenvolvimento em Inteligência Artificial, Inteligência Coletiva e Ciência de Dados, (1): 21–30.

Bezerra, S., Silva, S., e Gomes, H. (2010). Controle Automático de Pressão em Sistemas de Distribuição de água em: Sistemas de Saneamento - Eficiência Energética. Editora da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

Cervantes, L. and Castillo, O. (2012). Type-2 Fuzzy Granular Approach for Intelligent Control : The case of Three Tank Water Control. Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), 1–6.

Cervantes, L. and Castillo, O. (2016). Hierarchical Type-2 Fuzzy Aggregation of Fuzzy Controllers. Springer International.

Lima, M., Fontes, C., and Schnitman, L. (2007). A Lógica Fuzzy do Tipo-2 e um Estudo de Caso Aplicado ao Controle de Tráfego Aéreo. VIII SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 1–6.

Mendel, J., John, R., and Liu, F. (2006). Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple. Fuzzy Systems, IEEE Transactions on, 14(6): 808–821.

Moratori, P., Barreto, V., Copetti, A., and Bertini, L. (2016). Melhorando a Eficiência de um Sistema de Controle de Abastecimento de Água Utilizando Sistemas Nebulosos. XIII ENIAC - Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional, 385–395.

Núñez, K. (2007). Otimização Energética de Operação de um Sistema Adutor de Água Tratada Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Pereira, C. (2016). Desenvolvimento de Controlador Preditivo não Linear para Aplicação em Válvulas Redutoras de Pressão e Implementação em HIL. Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos, Universidade de Brasília - UNB.

Quadros, A. e Pinto, A. (2013). Controle PID com Sintonia Automática e Adaptativa de Válvulas Redutoras de Pressão em Sistemas de Abastecimento de Água. Em Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, 1–6.

Sanchez, M., Castillo, O., e Castro, J. (2017). Type-2 Fuzzy Granular Models. Springer International Publishing, Tijuana.

Yu, W. and Thenozhi, S. (2016). Active Structural Control with Stable Fuzzy PID Techniques. Springer International Publishing.