

LÓGICA FUZZY APLICADA AO CONTROLE DE NÍVEL DE RESERVATÓRIO DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

ABIGAIL TRINDADE DE ALMEIDA¹, CARLOS R. DA SILVEIRA¹

1. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás,
Departamento de Áreas Acadêmicas IV, Engenharia Elétrica
CEP 74055-110, Rua 75, n.º 46, Setor Central, Goiânia, GO, Brasil
(e-mail: abigailtrindade@gmail.com, carlos.junior@ifg.edu.br).

Abstract: In view of the current contemporary scenario where companies must seek to adapt to the requirements of society, the sanitation sector has been striving to improve its efficiency and become more competitive, and for this it is necessary to automate its process controls, especially inspired by the functioning of the human mind for solving complex problems, such as Fuzzy logic. Thus, the present study aims to demonstrate the efficiency of automation through the Fuzzy logic implemented in python language to promote the level control of the water supply reservoir, through the monitoring of three variables (level, level variation and Frequency) aiming at operational optimization and reduction of energy consumption. Based on the results, a relation of the Fuzzy logic employed with the variables is obtained and the different combinations of the inference rules indicate how a controller of this type can easily solve complex problems, thus enabling its application.

Resumo: Tendo em vista o atual cenário contemporâneo onde empresas devem buscar se adaptar às exigências da sociedade, o setor de saneamento tem se esforçado para melhorar a sua eficiência e tornar-se mais competitivas, e para isso se faz necessária a automatização dos seus controles de processos, especialmente inspirados no funcionamento da mente humana para uma resolução de problemas complexos, tal como a lógica Fuzzy. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo demonstrar a eficiência da automatização por meio da lógica Fuzzy implementada em linguagem python para promoção do controle de nível de reservatório de abastecimento de água, por meio do monitoramento de três variáveis (nível, variação do nível e frequência) visando a otimização operacional e redução do consumo energético. Com base nos resultados obtém-se uma relação da lógica Fuzzy empregada com as variáveis e as diferentes combinações das regras de inferência indicam como um controlador deste tipo pode facilmente solucionar problemas complexos, viabilizando assim sua aplicação.

Keywords: Automation; Level Control; Artificial intelligence; Fuzzy logic; Simulation.

Palavras-chaves: Automatização; Controle de Nível; Inteligência Artificial; Lógica Fuzzy; Simulação.

1. INTRODUÇÃO

Com a revolução industrial e com as mudanças nos processos de fabricação oriundas das inovações implementadas por Henry Ford e tantos outros pioneiros, os processos produtivos foram impactados, começando as mudanças pela indústria automobilística e, mais tarde, extrapoladas para praticamente todos os setores de atividade econômica. Desde então, as empresas buscam se adaptar às exigências da sociedade e ao novo contexto empresarial apresentado nos últimos tempos, visando melhorar a sua eficiência e se tornarem mais competitivas (Rogers, 2017).

A automação de processos representa uma iniciativa para o aperfeiçoamento do processo, exibindo resultados efetivos quando bem executados. Assim, a automatização configura-se como uma aplicação tecnológica que tem como finalidade automatizar processos de negócios, visto que,

permite a configuração de um software para interpretar sistemas, capturar dados para processamento de transações, manipulação de informações, desencadeamento de respostas e comunicação com outros sistemas digitais (Silva et al., 2020).

Dentro desse contexto, empresas de saneamento utilizam desses processos automatizados para gerir seus sistemas de tratamento e abastecimento de água e coleta de esgoto. Um sistema de abastecimento de água constitui na captação em algum manancial, posteriormente é realizado o seu tratamento e distribuída por gravidade aos clientes através de reservatórios. Nos locais onde a água não chega por gravidade geralmente são instaladas estações elevatórias de água, conforme apresentado na Figura 1.

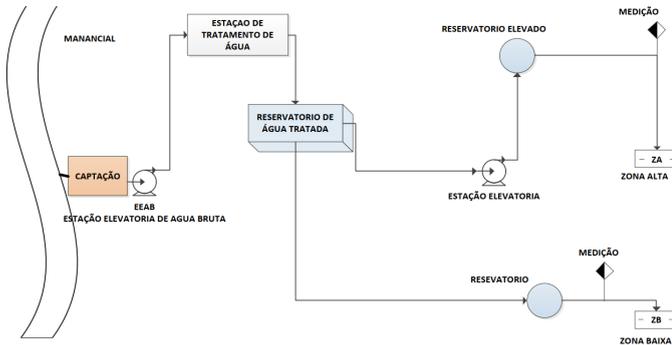


Figura 1. Arranjo geral de um sistema de abastecimento de água. Fonte: Próprio Autor

O presente estudo busca demonstrar o desenvolvimento de um algoritmo por meio da lógica Fuzzy para controle de nível de um reservatório de distribuição de água tratada para abastecimento público. A maioria dos trabalhos acadêmicos se baseiam no uso do controlador PID para controle de nível, contudo há também pesquisas utilizando o controlador fuzzy com resultados satisfatórios em sistemas de controle de nível de líquido em plantas didáticas (Luiz, 1997; Filho et. al., 2002; Souza, 2010; Brito, 2015).

O controlador fuzzy apresenta maior simplicidade de utilização e implementação se comparado com as técnicas de controle PID pois se baseia no conhecimento humano para a definição de regras e funções de pertinência para controle do sistema. Por fim, deseja-se obter resultados satisfatórios para o controle do nível de um dos reservatórios, de forma que este seja controlado a partir da utilização desse algoritmo, permitindo um controle mais simples e eficiente do bombeamento de água do reservatório.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Controle

O conceito básico do sistema de controle pode ser apresentado pelo diagrama de blocos da Figura 2, onde o objetivo do sistema é controlar a variável de saída de uma maneira definida pelo sinal de acionamento através dos elementos do sistema de controle (Ogata, 2009).

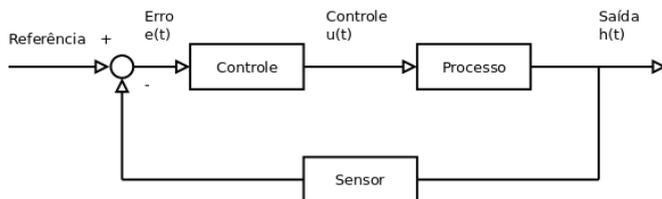


Figura 2. Componentes básicos de um sistema de controle. Adaptado de Ogata (2009).

Em termos mais comuns, a saída do sistema $h(t)$, é a variável de saída, que pode ser nível, pressão, temperatura dentro outros, o sensor é um dispositivo que realiza a medição da variável saída, a referência é o valor desejado na saída, o erro

é a diferença entre o valor desejado e o valor medido na saída do sistema, o controle é a função matemática que modela a lógica escolhida atuando no bloco processo do sistema por meio da variável controlada. Uma classificação dos sistemas de controle pode ser feita de acordo com o procedimento lógico aplicado pelo controlador para gerenciar a estabilidade do processo (Teixeira, 2010).

Um sistema de malha fechada é composto de uma ou mais conexões de feedback é chamado de sistema de malha fechada, onde essas conexões consistem no sistema controlado como apresentado na Figura 3. O sinal deve ser realimentado e comparado com a entrada de referência, e um sinal de acionamento proporcional à diferença entre a saída e a entrada deve ser enviado através do sistema para corrigir a variação.

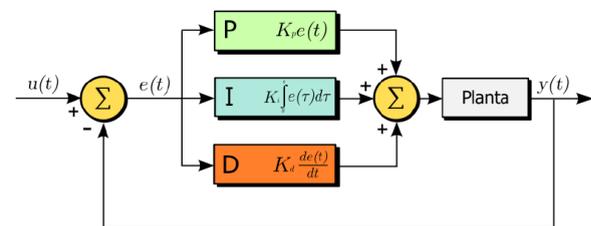


Figura 3. Elementos de um sistema de controle em malha fechada. Adaptado de Ogata (2009).

Um sistema de controle avançado é denominado como aquele sistema que se apresenta como uma alternativa aos sistemas tradicionais, quando as técnicas convencionais de controle apresentam diferentes problemas quanto a atrasos ou distúrbios, por exemplo. Sua aplicação permite obter benefícios na automação de uma planta, como economia de energia, redução de custos operacionais e aumento da capacidade fabril, entre outros (Creus, 2011).

Um exemplo desse tipo de controle avançado, cuja aceitação tem sido muito boa em nível industrial, é o lógica de controle Fuzzy, que se baseia na aplicação da álgebra fuzzy proposta por Lofti Zadeh em 1965, no que se refere à representação do pensamento lógico humano, e que se tornou o sistema de controle avançado mais amplamente aceito no meio industrial pois nos últimos 50 anos mais de 50.000 patentes para esta metodologia foram geradas no Japão e nos Estados Unidos. (Fundacion BBVA, 2013). Resumidamente, um sistema de controle Fuzzy consiste em uma técnica inteligente de automatização, na qual se simula modos de raciocínio aproximados e manipula-se o conhecimento do especialista, comportamento da planta ou por manipulação de regras de inferência para a solução de problemas (Batista e Meneghetti, 2018).

2.2 Controlador Fuzzy

Controlador Fuzzy é um sistema de controle avançado baseado nos conceitos de conjunto fuzzy, ou seja, um conjunto sem um limite claro que pode conter elementos com certo grau de pertinência. A figura 4 apresenta o diagrama de

blocos da estrutura de um controlador fuzzy, composta basicamente dos seguintes componentes: um módulo de Fuzzificação, um sistema de Conhecimento (base de regras), um sistema de Decisão (mecanismo de inferência) e um módulo de Defuzzificação (Pires, 2007).

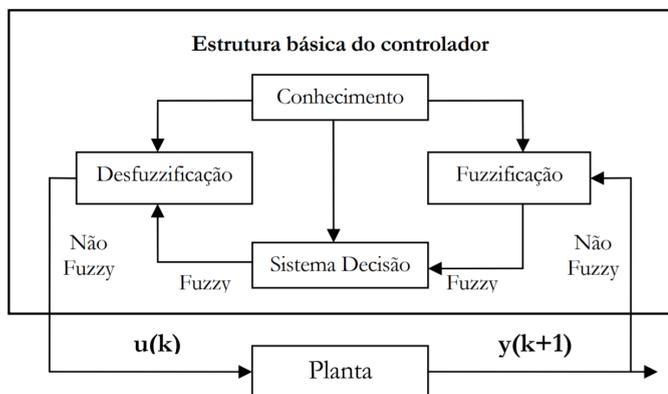


Figura 4. Diagrama de blocos da estrutura básica de um controlador fuzzy. (Pires, 2007)

A função de pertinência associada a conjuntos concretos pode ter apenas dois valores: 1 ou 0, enquanto em conjuntos fuzzy pode ter qualquer valor entre 0 e 1. Sendo que um elemento pode pertencer (parcialmente) a um conjunto fuzzy e simultaneamente pertencer (parcialmente) a um complemento do referido conjunto, o que não é possível em conjuntos clássicos, uma vez que constituiria uma violação do terceiro princípio excluído.

As variáveis linguísticas são fundamentais para manipulações de lógica fuzzy, contêm os valores que estão distribuídos uniformemente entre 0 e 1, dependendo da relevância de um termo linguístico dependente do contexto; por exemplo, pode-se dizer que a sala está quente e o forno está quente, e a variável linguística “quente” tem diferentes significados dependendo se refere-se à sala ou ao interior do forno. O valor atribuído de 0 significa que o termo linguístico não é verdadeiro e o valor atribuído de 1 indica que o termo é verdadeiro; essas variáveis linguísticas transmitem informações relativas ao ambiente ou a um objeto sob observação e podem transmitir uma quantidade surpreendente de informações conforme pode ser observado na Figura 5 (Banks & Hayward, 2002).

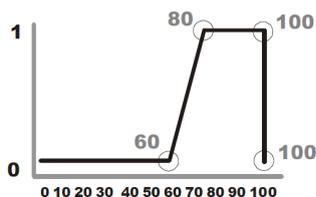


Figura 5. Relação entre a temperatura e a variável linguística “quente”. Adaptado de Banks & Hayward (2002).

2.2.1 Funções de pertinência

Um conjunto fuzzy A definido no universo de discurso X é caracterizado por uma função de pertinência μ_A , a qual mapeia os elementos de X para o intervalo [0,1].

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$$

Desta forma, a função de pertinência associa a cada elemento x pertencente a X um número real $\mu_A(x)$ no intervalo [0,1], que representa o grau de pertinência do elemento x ao conjunto A, isto é, o quanto é possível para o elemento x pertencer ao conjunto A (Simões, 2007)

A única condição que uma função de associação deve realmente satisfazer é que deve variar entre 0 e 1. A função em si pode ser uma curva arbitrária cuja forma pode-se definir como uma função do ponto de vista da simplicidade, conveniência, velocidade e eficiência. (MathWorks, Inc., 2018). As funções características mais comumente utilizadas devido à sua simplicidade matemática e capacidade de gerenciamento são: triangular, trapezoidal, gaussiana, sigmoideal, gama, pi, sino e outras, conforme apresentado na Figura 6, sendo dentre elas a triangular é a forma mais usada para uma função de pertinência.

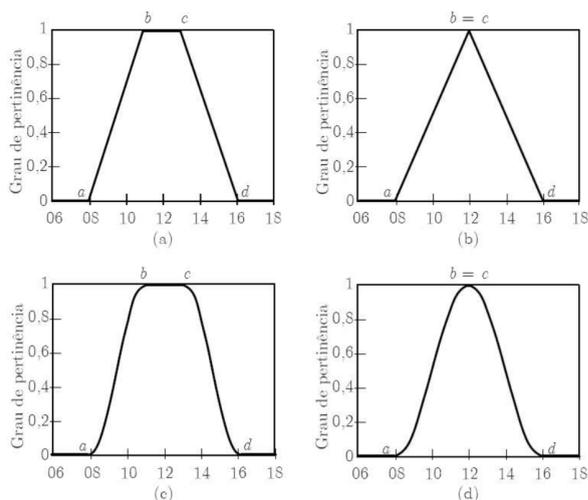


Figura 6. Diferentes tipos de funções de associação. (a) trapezoidal (b) triangular (c) trapezoidal suave (d) triangular suave. Adaptado de Abreu (2015).

2.2.2 Fuzzificação

Nessa primeira etapa, a fuzzificação tem a função de transformar entradas discretas em saídas fuzzy, com diferentes graus de pertinência. Para tal transformação se faz necessário a definição dos termos linguísticos a serem considerados na mensuração da variável, e sua respectiva função de pertinência conforme apresentado na Figura 7. A próxima etapa desse processo é a inferência, onde regras difusas se aplicam.

2.2.3 Inferência fuzzy

Os graus de pertinência que foram calculados na fuzzificação são unidos pelo operador fuzzy e, na maioria dos

controladores, o mínimo é usado para calcular o “E” (AND) e o máximo para o “OU” (OR). A vinculação de funções de pertinência para uma série de regras é conhecida como inferência. Uma operação lógica OR ou a formação de um máximo é usada aqui como regra aritmética. Uma operação de composição é executada com a ajuda deste método comum de inferência máximo-mínimo (Marro, 2010).

Esta operação permite que as partes efetivas de todas as regras entrem em jogo. A sobreposição das funções de fechamento de associação de uma série de regras somadas para formar uma única função de associação resultante (Siemens AG, 2006).

Essas declarações de regra “se-então” são usadas para formular as declarações condicionais que compreendem a lógica difusa, que toma a forma: Se “x” é A, então “y” é B; onde A e B são valores linguísticos definidos por conjuntos fuzzy nas faixas (universos de discurso) X e Y, respectivamente. A parte “se” da regra “x é A” é chamada de antecedente ou premissa, enquanto a parte “então” da regra “y é B” é chamada de consequência ou conclusão, conforme explicitado na Figura .7

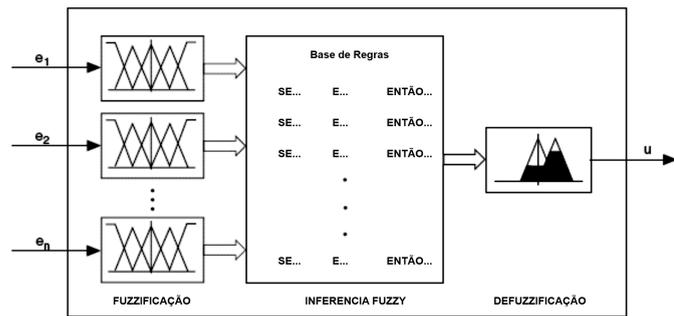


Figura 7. Estrutura Interna de um Controlador Fuzzy. Adaptado de Brito (2015).

Um exemplo dessa regra poderia ser: “Se o serviço for bom, a gorjeta é mediana”. O conceito “bom” é representado como um número entre 0 e 1, então o antecedente é uma interpretação que retorna um único número entre 0 e 1. Ao contrário, o conceito “média” é representado como um conjunto fuzzy, então o consequente é uma atribuição que atribui todo o conjunto difuso B à variável de saída y. Na regra “se-então”, a palavra é usada de duas maneiras completamente diferentes, dependendo se aparece no antecedente ou no consequente.

Em geral, a entrada para uma regra “se-então” é o valor atual da variável de entrada (neste caso, serviço) e a saída é um conjunto fuzzy completo (neste caso, média), este conjunto será defuzzificado posteriormente, atribuindo um valor à saída. Interpretar uma regra “se-então” envolve duas etapas: avaliar o antecedente ou fuzzificar as entradas e aplicar os operadores fuzzy necessários; e a aplicação do resultado ao consequente. (MathWorks, 2018).

2.2.4 Defuzzificação

Depois de calcular as regras de inferência e avaliar as variáveis linguísticas, resultando em saídas fuzzy, é necessário traduzir esses valores de volta para o mundo real. Em sistemas fuzzy, essa informação pouco clara deve ser convertida em um valor numérico representativo porque, por exemplo, uma variável manipulada não pode processar uma função de pertinência. Este cálculo de valores numéricos é conhecido como defuzzificação, onde é requerido uma função de pertinência para cada uma das variáveis de saída conforme ilustrado na Figura 8.

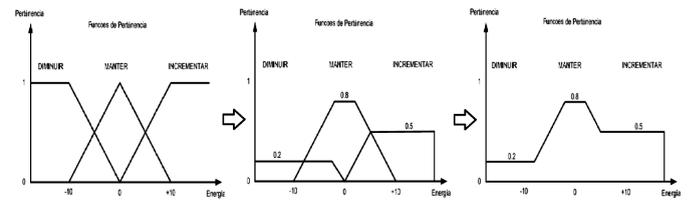


Figura 8. Processo de defuzzificação. Adaptado de Campos (2010).

3 METODOLOGIA

3.1 Aspectos gerais

O controlador fuzzy genérico é apresentado no diagrama de blocos da Figura 9. Sua forma genérica é comum, pois geralmente têm a mesma forma de design, independentemente do processo que você deseja controlar. A diferença é o ajuste das regras do controlador fuzzy e isso será feito de acordo com a experiência do operador humano. A entrada do controlador é a variação, pois com eles pode-se determinar o comportamento do sistema, que são fuzzificados, para serem enviados a um controlador de lógica fuzzy (simulado em python), que por meio de regras fuzzy calcular os valores das saídas e convertido no sinal de saída do controlador.

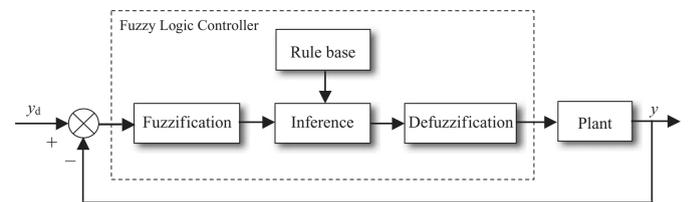


Figura 9. Estrutura de um controlador fuzzy genérico. Siddique (2013).

Esse trabalho se baseou no exemplo da biblioteca *skfuzzy* chamado Problema da Gorjeta, (Pythonhosted, 2021). Foi utilizada a linguagem de programação python para o desenvolvimento destes trabalho pois essa linguagem apresenta diversas vantagens como: a inclusão diversas estruturas de alto nível e uma vasta coleção de biblioteca prontos para uso, frameworks de terceiros que podem ser adicionados, além disso, possui recursos encontrados em

outras linguagens modernas, tais como: geradores, introspecção, persistência e unidades de teste e, por fim, se trata de um software de código aberto (Borges, 2014).

Quanto à análise em questão, ela se deu pelas seguintes etapas executadas dentro do código: a) declaração das variáveis de entrada e saída; b) implementação dos parâmetros; c) definição das regras do controlador e d) análise do gráfico de entrada e saída.

Para o abastecimento de água do reservatório, é utilizado uma bomba centrífuga do fabricante Whorthing, modelo 12LN32, acoplada ao motor trifásico de 1.100 Cavalos, 760 Volts, que por sua vez é acionada eletricamente por um inversor de frequência, responsável por controlar a rotação do eixo do conjunto motor-bomba através da manipulação da frequência do motor. A faixa de funcionamento do inversor está entre os valores de 35 Hertz a 53 Hertz, pois são os pontos de operação da bomba.

3.2 Variáveis linguísticas

Para a composição das variáveis linguísticas, foram considerados três variáveis para implementação do controlador, sendo duas de entrada, “Setpoint” e “Erro”, e uma terceira variável, na saída, considerada “Frequência”. Os valores foram retirados a partir dos relatórios operacionais e da experiência dos empregados da SANEAGO responsáveis pela operação do bombeamento e reservatório.

A função *setpoint* corresponde a referência de nível a ser alcançado pelo sistema de bombeamento cujo valor é dado em metros. O reservatório possui uma altura operacional de 6,50 m, e a partir da análise dos relatórios operacionais tabulou-se os dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Funções de Pertinência Setpoint.

Função Setpoint (SP)	Descrição	Parâmetros
Muito Alto	SP de nível muito alto	[4.5, 5.5, 6.5]
Alto	SP de nível ligeiramente alto	[4, 4.5, 5.5]
Normal	SP de nível com o valor de operação normal	[3.5, 4.0, 4.5]
Baixo	SP de nível ligeiramente baixo	[2.5, 3.5, 3.8]
Muito Baixo	SP de nível muito baixo	[2.0, 3.0, 3.5]

A função delta provém da diferença entre o *setpoint* (nível a ser alcançado) e o valor medido proveniente do sensor de medição do nível do reservatório. O delta é positivo se o nível do reservatório estiver acima do setpoint; e é negativo se o nível do reservatório estiver abaixo desse valor conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Funções de Pertinência Delta.

Função Delta	Descrição	Parâmetros
Muito Alto	Delta positivo muito alto	[0.20, 1, 6.5]

Alto	Delta positivo ligeiramente alta	[0.1, 0.20, 0.25]
Estável	Delta estável	[-0.15, 0, 0.15]
Baixo	Delta negativo ligeiramente baixo	[-.25, -.2, -.1]
Muito Baixo	Delta negativo muito baixo	[-6.5, -1, -.20]

A variável linguística “frequência” é a resposta do controlador às duas variáveis de entrada, ela fornece um sinal que serve como um comando de variação para o controle de velocidade do atuador, ou seja, o sinal indicará o valor a ser aumentado ou diminuído na frequência de saída do acionador do inversor de frequência, o que provoca uma variação na quantidade de água que entra no reservatório e, portanto, seu nível conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Funções de Pertinência Frequência.

Função Frequência	Descrição	Parâmetros
Muito Alto	Elevar muito a frequência	[50, 53, 55]
Alto	Elevar a frequência	[46, 49, 51]
Estável	Manter Frequência	[42, 45, 47]
Baixo	Abaixar frequência	[39, 41, 43]
Muito Baixo	Abaixar muito a frequência	[35, 38, 40]

3.3 Inferência

As regras aplicadas requerem o conhecimento da planta a ser controlada, ou seja, a forma como ela se comportaria em caso de alteração em alguma de suas variáveis. Não existe uma regra formal que indique o número de variáveis linguística que deve ser utilizada, contudo fica ao critério do projetista do controlador conhecido do equipamento, além do que se deseja obter como resposta. Para o desenvolvimento das regras, uma ou ambas as variáveis de entrada podem ser utilizadas, ligadas por conectores lógicos “AND” e “OR”, onde cada regra resultará em uma função de associação da saída.

As regras são baseadas na linguagem natural que o operador da estação de bombeamento é especializado: se o nível estiver no valor desejado, a frequência de saída do inversor de velocidade não deve ser alterada; se o nível estiver um pouco abaixo do valor desejado, a frequência deverá ser aumentada um pouco, e se estiver muito baixa, a frequência deverá ser aumentada consideravelmente.

Da mesma forma, se o nível estiver acima do *setpoint*, diminuindo um pouco a frequência até que o nível se igualasse ao setpoint; e diminuindo muito se a diferença fosse muito alta. Quando o nível estiver próximo do valor desejado, se o delta for negativo, a frequência deve ser aumentada lentamente para evitar que devido à inércia do processo de bombeamento da planta o nível fique abaixo da referência, e quando uma regra reversa entra em operação, ela causa instabilidade ou oscilação em torno do ponto de ajuste. Todo

esse processo linguístico é transcrito como regras fuzzy conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Regras de Inferência.

Se [Setpoint]	E [Delta]	Então [Frequência]
muito baixo	muito baixo	muito alta
muito baixo	baixo	muito alta
baixo	muito baixo	muito alta
muito baixo	estável	alta
muito baixo	alto	alta
baixo	baixo	alta
baixo	estável	alta
estável	baixo	alta
estável	muito baixo	alta
alto	muito baixo	alta
muito baixo	muito alto	estável
baixo	alto	estável
estável	estável	estável
alto	baixo	estável
muito alto	muito baixo	estável
baixo	muito alto	baixo
estável	muito alto	baixo
estável	alto	baixo
alto	alto	baixo
alto	estável	baixo
muito alto	estável	baixo
muito alto	baixo	baixo
alto	muito alto	muito baixo
muito alto	muito alto	muito baixo
muito alto	alto	muito baixo

Ressalta-se que neste caso, considerando que há duas entradas, a complexidade das regras de inferência tende a ser maior, mas devido ao processamento da linguagem do controlador, a lógica ainda é muito intuitiva. E ainda, com relação às regras de inferência, elas representam o núcleo do controlador fuzzy, pois permitem que o sistema considere a força da variável de saída com base na função de correlação. Deve-se notar que o método de defuzzificação usado é o centro de identificação padrão. Uma vez que a estrutura do sistema de inferência fuzzy foi desenvolvida, ela é implementada no código python.

3.4 Simulando o controlador fuzzy

Para simulação do controlador fuzzy desse trabalho, foi utilizada a plataforma *Google Colaboratory*, de uso gratuito, ele é um ambiente de notebooks Jupyter que não requer configuração e é executado na nuvem. Essa solução permite a escrita e a execução de códigos em Python, além de

possibilitar o compartilhamento do código e suas análises, tudo isso em um navegador web¹.

Como a lógica difusa é diferente da lógica tradicional, ela permite que valores de diferentes intensidades sejam fornecidos entre verdadeiro e falso, de modo que a saída terá as seguintes funções: “muito alto”, “alto”, “estável”, “baixo”, “muito baixo”. Nas figuras 10, 11 e 12 observou-se de forma gráfica a implementação das funções de pertinência *setpoint*, *delta* e *frequência* a partir dos dados das tabelas 1, 2 e 3.

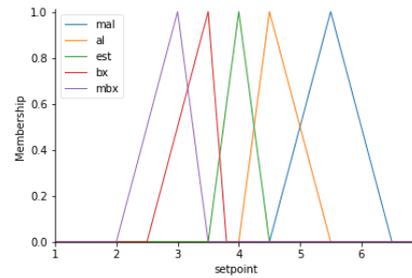


Figura 10. Função de pertinência da entrada setpoint. Sendo muito baixo (mbx), baixo (bx), estável (est), alto (ma), muito alto (mal).

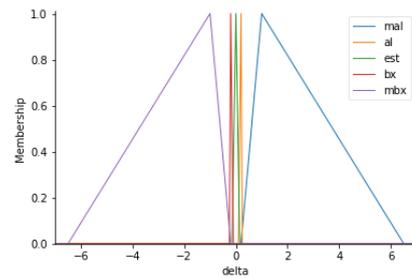


Figura 11. Função de pertinência da entrada delta. Sendo muito baixo (mbx), baixo (bx), estável (est), alto (ma), muito alto (mal).

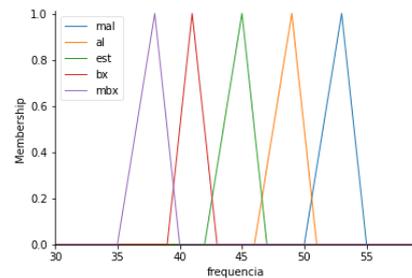


Figura 12. Função de pertinência da saída frequência. Sendo muito baixo (mbx), baixo (bx), estável (est), alto (ma), muito alto (mal).

4. RESULTADOS

¹ O código está disponível em: https://github.com/profcarlos/artigos/blob/main/SBAI_2021_logica_fuzzy.ipynb

Foram simuladas quatro situações operacionais distintas, sendo dois com valores extremos e dois com valores intermediários. Na primeira simulação, foi utilizado o valor 5,9 para entrada *setpoint* e 1,7 para entrada *delta*. Após a defuzzificação da saída pelo controlador, obtém-se o valor de 37,62 que indica uma frequência muito baixa conforme apresentado no gráfico da Figura 13 abaixo.

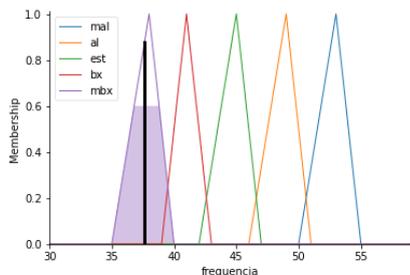


Figura 13. Saída frequência com valor de 37,62. Sendo muito baixo (mbx), baixo (bx), estável (est), alto (ma), muito alto (mal).

Na segunda simulação foi utilizado outro valor operacional: 3,93 para entrada “setpoint” e -1,88 para entrada “delta” indicando uma diferença negativa entre o nível do reservatório e o setpoint desejado. Após a defuzzificação da saída pelo controlador, obtém-se o valor de 48,65 que indica uma frequência alta conforme gráfico apresentado na Figura 14.

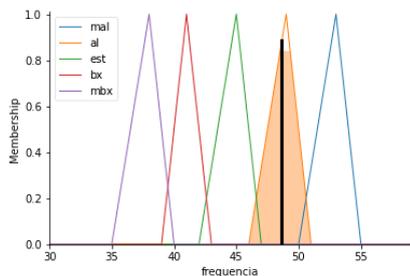


Figura 14. Saída frequência com valor de 48,65. Sendo muito baixo (mbx), baixo (bx), estável (est), alto (ma), muito alto (mal).

Prosseguindo a simulação, outro valor foi utilizado: 5,1 para entrada “setpoint” e -0,07 para entrada “delta” indicando que há uma pequena diferença entre o nível do reservatório e o setpoint desejado. Após a defuzzificação da saída pelo controlador, obtém-se o valor de 41,00 que indica uma frequência baixa conforme gráfico apresentado na Figura 15.

E, por fim, na quarta simulação operacional foi utilizado o valor de 2,1 para entrada “setpoint”, e -1,63 para entrada “delta” indicando uma pequena diferença positiva entre o nível do reservatório e o setpoint desejado. Após a defuzzificação da saída pelo controlador, obtém-se o valor de 52,52 que indica uma frequência muito alta conforme apresentado Figura 16.

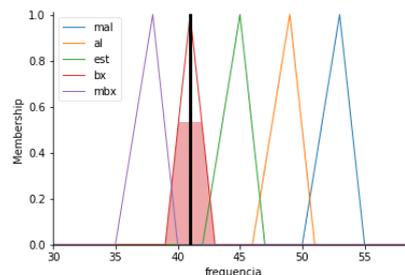


Figura 15. Saída frequência com valor de 41,00. Sendo muito baixo (mbx), baixo (bx), estável (est), alto (ma), muito alto (mal).

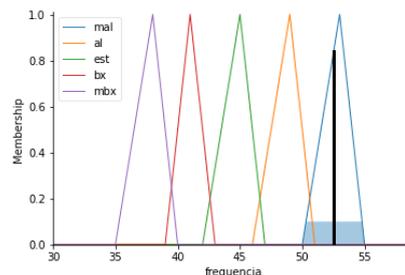


Figura 16. Saída “Frequência” com o valor 52,52. Sendo muito baixo (mbx), baixo (bx), estável (est), alto (ma), muito alto (mal).

5. DISCUSSÃO

Analisando os gráficos dos resultados das simulações observa-se que a resposta da saída do controlador fuzzy foi muito satisfatória, pois para cada nível abaixo ou acima do esperado, a tentativa de atingir a resposta esperada é gradativamente alcançada aumentando ou diminuindo sua frequência.

Com base nos resultados obtidos, pode-se observar que a forma como a lógica fuzzy trata as variáveis e as diferentes combinações de regras de inferência indicam como esse tipo de controlador pode atender problemas complexos de controle automático de processos de forma simples, possibilitando sua aplicação.

Comparando a literatura de outros trabalhos científicos, observou-se que o controlador PID é mais complexo de ser construído em relação ao controlador fuzzy, pois se faz necessário encontrar o modelo matemático e fazer os cálculos para as constantes K_p , K_i e K_d . Por outro lado, na aplicação do controlador fuzzy, se faz necessário conhecer o sistema e como ele se comporta de modo real, fazendo o estudo do sistema por meio dos relatórios operacionais foram feitas as regras fuzzy para encontrar as melhores regras para o controlador fuzzy.

O controlador fuzzy tem vantagem em relação ao controlador PID por ser um controlador robusto que não depende da variação da vazão de saída das bombas para obter o controle de nível. O controlador PID depende da vazão das bombas e

todo o sistema conectado a ela (bombas, motores, inversores e medidores) para encontrar as constantes proporcional, integral e derivativa. Uma pequena alteração do sistema como troca de bomba ou motor, alterações do programa do inversor de frequência fazem com que os ganhos do controlador PID não atendam aos requisitos de projeto definidos inicialmente.

6. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados, pode-se concluir que o uso da lógica fuzzy é de grande importância para o processo de controle de nível em alternativa ao controle PID, podendo ser aplicado por meio de diferentes tipos de simulações. Portanto, no processo real de controle do nível de água do abastecimento de água, ele atingirá gradualmente o nível necessário e se estabilizará rapidamente no *setpoint* definido.

Frente a isso, o emprego dessas tecnologias computacionais se destaca diante dos outros tipos de automação pelo fato de envolver lógicas simples. Assim, para um melhor desempenho nos processos industriais e, também, para tomada de decisão mais assertiva, a automatização de controladores por meio da lógica Fuzzy apresenta-se como um diferencial diante de outras soluções.

Para trabalhos futuros propõe-se a implementação do controlador Fuzzy em Controladores Lógicos Programáveis (CLP) de uso industrial, além de alterar as regras de inferência com o objetivo de incrementar novas variáveis de entrada para modificar o comportamento de controlador e assim melhorar a resposta ao processo industrial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SANEAGO – Saneamento de Goiás S/A pela permissão do uso dos parâmetros da unidade de bombeamento Vila Adélia – GO e ao Instituto Federal de Goiás pelo apoio para publicação.

REFERÊNCIAS

Batista, R. G. e Meneghetti, C. R. Sistema comparativo de controle inteligente de nível aplicado às lógicas fuzzy e pid. Unisal.

Brito, T. S. P. Desenvolvimento de um controlador PID-FUZZY para o controle de nível de água de um pressurizador de um reator nuclear. 2015. 92f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

Campos, M. M. e Kaku Saito. Sistemas Inteligentes em controle e automação de processos. Ciência Moderna, 2004.

Filho, F. M. L.; Gosmann, H. L.; Bauchspiess, A. Controle fuzzy para sistema de nível de líquidos. XIV Congresso Brasileiro de Automática, Natal-RN, 2002.

Google Colaboratory. Disponível em <https://colab.research.google.com/drive/1MkEcsA71Y-16gJN>

CS3G3z6ig0rLvH7CL?usp=sharing . Acesso em: 28 fev. 2021

Luiz, C.C., Silva, A.C., Coelho, A.A.R., Bruciapaglia, A.H. Controle Adaptativo Versus controle Fuzzy: Um Estudo de Caso em um Processo de Nível. SBA Controle & Automação, v.8 n° 2, p. 43–51, 1997.

Marro, A. A., Souza, A. D. C., Cavalcante, E. D. S., Bezerra, G. S., Nunes, R. O. Lógica fuzzy: conceitos e aplicações. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), 2010.

Mathworks, Inc. Foundations of Fuzzy Logic. Disponível em: <https://mathworks.com/help/fuzzy/foundations-of-fuzzy-logic.html> . Acesso em: 28 fev. 2021

Siddique, N. H., e Hojjat Adeli. Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks, and evolutionary computing. John Wiley & Sons Inc, 2013.

Ogata, K. Engenharia de Controle Moderno. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Pires, A. V. Controladores Baseados em Técnicas de Inteligência Computacional: Análise, Projeto e Aplicações. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

Pythonhosted. Fuzzy Control Systems: The Tipping Problem. Disponível em: https://pythonhosted.org/scikit-fuzzy/auto_examples/plot_tipping_problem_newapi.html Acesso em: 28 fev. 2021

Rogers, D L. Transformação digital: repensando o seu negócio para a era digital. Tradução Afonso Celso da Serra. Ed. Autêntica Business: São Paulo, 2017.

Saneago. Apresentação Institucional: SANEAGO, 2021. Disponível em: <https://ri.saneago.com.br/informacoes-financeiras/apresentacoes> . Acesso em: 28 fev. 2021

Siemens Ag. Fuzzy Control User Manual. Disponível em https://cache.industry.siemens.com/dl/files/654/1135654/att_24995/v1/Fuzzy_e.pdf . Acesso em: 28 fev. 2021

Simões, Marcelo Godoy, and Ian S. Shaw. Controle e modelagem fuzzy. Editora Blucher, 2007.

Sousa, A. L. e Francisco, L. E. S. Identificação e Controle Fuzzy de uma planta didática de nível. Trabalho de Conclusão de Curso - Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2010.

Teixeira, Eng Herbert Campos Gonçalves. Controles típicos de equipamentos e processos industriais. Editora Blucher, 2010.