

# 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



**9º CONGRESSO**  
Brasileiro de P&D em  
**PETRÓLEO E GÁS**

**Maceió, AL**  
de 09 a 11 de novembro  
**2017**

*Realização:*



**ABPG**  
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM  
PETRÓLEO E GÁS



## **TÍTULO DO TRABALHO:**

Simulação do Controle de nível de Tanques Industriais utilizando Lógica Nebulosa

## **AUTORES:**

Cardozo Filho, Agnaldo<sup>1</sup>; Holanda Sondré, Cristiane<sup>3</sup>; José M. Gurgel Neto<sup>1</sup>; Leite, Manuela S.<sup>2</sup>;  
Morais Pereira, Thyago de<sup>1</sup>; Santos, Dheiver<sup>1</sup>; Vidal, Inés Maria González<sup>3</sup>.

## **INSTITUIÇÃO:**

<sup>1</sup>UNIT – Centro Universitário Tiradentes; <sup>2</sup>UNIT – Universidade Tiradentes; <sup>3</sup>UFAL – Universidade Federal de Alagoas

*Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.*

## SIMULAÇÃO DO CONTROLE DE NÍVEL DE TANQUES INDUSTRIAIS UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA

### Abstract

Among the various control systems in the chemical process industry, this paper seeks to demonstrate the efficacy of fuzzy logic as a control strategy for the studied process. In the field of study which involves constant variations, there's a need for a fine adjustment, validating the use of this logic as a great way to adjust parameters. As a motivation, in practical implementation, they are unique, faster and cheaper systems when compared to others. A successful application that uses fuzzy control is liquid level manipulation. The objective of this paper is to analyze a logic simulation system for level control of an industrial tank using the Fuzzy Logic Toolbox simulation package in the MATLAB program. This strategy can be used to control the level of a three-phase separator, used in the separation of the mixture from oil production, consisting of water, oil, solid waste and associated natural gas. To determine the best way to manipulate the level in the proposed system, some factors intrinsic to the liquid and control hardware should be considered, but this study only analyzes the logic involved. The fluid level was controlled using three rules initially. Further rules were extended for analysis verification and improvement of the analyzed system, in addition to different methods that were also used to design it, seeking the best relation between input and output variables. The results are satisfying and will contribute to new fuzzy controller designers.

### Introdução

No decorrer de sua existência, o homem busca o desenvolvimento de novas técnicas com o objetivo de substituir ou aperfeiçoar seu trabalho, visando uma maior qualidade e velocidade de produção. As vantagens econômicas com relação a diminuição de custo e tempo para a realização de tais atividades tornam o controle e a automação fundamentos característicos de um ambiente industrial. Devido ao tratamento das variáveis do conjunto *fuzzy* e a proximidade ao modo de pensar humano, o algoritmo preenche uma lacuna importante em métodos de projeto de engenharia que são deixados de lado devido às abordagens puramente matemáticas. Ou seja, técnicas de controle clássico, que buscam uma resposta absoluta a partir de cálculos complexos, agora podem ser abstraídas para uma linguagem simples, direta e sofisticada.

A capacidade de ponderar, atrelada à lógica nebulosa, permite um tratamento abstrato das variáveis a partir das regras do sistema, e o controlador pode ser aplicado, por exemplo, no controle de nível de um tanque industrial. Esse estudo é amplamente aplicado ao setor químico e de petróleo e gás, em plantas industriais como um separador trifásico, utilizado na separação da mistura proveniente da produção do petróleo, constituída de água, óleo, resíduos sólidos e gás natural associado.

Um dos primeiros estudos acerca de lógica *fuzzy* aplicada a análise de sistemas foi publicado em 1973, pelo matemático L. A. Zadeh, cujo processo não permitia a utilização de técnicas matemáticas convencionais. Nesse trabalho, o autor definiu o termo algoritmo *fuzzy* como “um conjunto ordenado de instruções *fuzzy* cuja execução produz uma solução aproximada para um determinado problema” (ZADEH, 1973).

O trabalho pioneiro de Mamdani e Papis (1977) na solução de problemas de controle a partir dos algoritmos *fuzzy*, deu início a uma nova estratégia baseada no conjunto de “regras intuitivas”, e relativamente simples que culminaram em um controlador que possuía como estrutura de tomada de

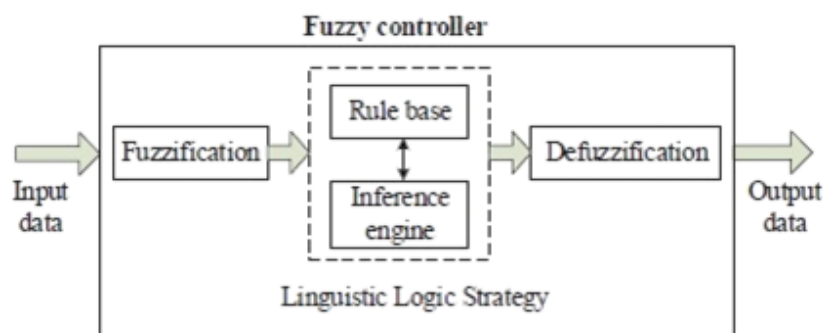
decisão, as regras do tipo “SE A ENTÃO B”, onde A e B são valores de variáveis linguísticas pertencentes ao conjunto difuso. Segundo Kaur e Bharti, o sucesso desse tipo de controle foi muito utilizado no controle de dispositivos eletrônicos que, na década de 1980, foi bem difundido nas grandes indústrias japonesas. Integrados principalmente em eletrodomésticos, a lógica nebulosa tornou-se rapidamente uma tecnologia relevante para o desenvolvimento de sistemas de controle sofisticados. Apresentando aplicações em diversos setores automáticos até os dias de hoje. A literatura apresenta diversos trabalhos de lógica nebulosa aplicada ao controle de nível, seja em tanques em série (FILHO et al., 2002) ou em um único tanque (SIQUEIRA et al., 2010). Mostrando eficiência na execução do código por ser uma ferramenta conceitual capaz de representar incertezas e imprecisões.

A razão para a eficiência da implementação da lógica difusa como estratégia de controle é simples. O algoritmo assemelha-se à tomada de decisão humana, ao tratar os valores de E/S (entrada e saída) como variáveis linguísticas. Segundo Jacques e Andrade, a capacidade de gerar soluções aproximadas que satisfazem o problema, com base nas regras pré-estabelecidas do sistema, simplifica o modelo.

Esse trabalho busca demonstrar a eficácia da lógica *fuzzy* como estratégia de controle de nível de um tanque industrial, e ainda analisar como os parâmetros das variáveis de entrada e saída do sistema, junto as regras de inferência podem afetar essa relação no controlador difuso.

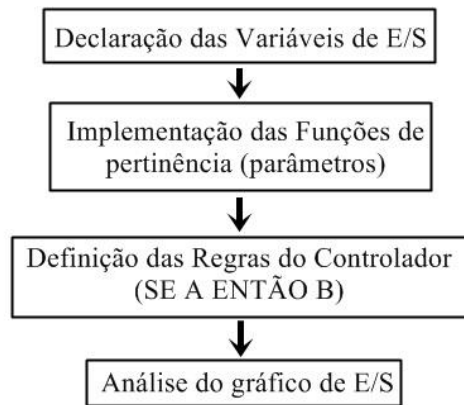
## Metodologia

A estrutura de um típico controlador difuso pode ser demonstrada pelo diagrama de blocos da Figura 1. Neste exemplo, as variáveis de entrada e saída pertencem ao conjunto *fuzzy*. Os termos “*fuzzification*” e “*defuzzification*” estão relacionados ao tratamento dos valores de entrada pelo controlador e posterior resposta do sistema, de forma linguística. As regras básicas representam o núcleo responsável pela dedução do sistema, ou capacidade de ponderação.



**Figura 1.** Diagrama de blocos de um típico controlador fuzzy

A análise ocorreu em cima de três casos, que se diferenciam com relação ao tratamento das variáveis, que pode afetar a velocidade de resposta do sistema até atingir o objetivo desejado. E ainda, perceber a eficiência da estabilização do sistema, ou seja, a capacidade de manter o nível do tanque o mais estável possível. O diagrama da Figura 2 é capaz de demonstrar a ordem sequencial das etapas que foram seguidas durante a execução do estudo, dentro do *software*, para cada um dos casos.



**Figura 2.** Diagrama das etapas realizadas no controlador

Visto que a *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB (plataforma utilizada para a execução da simulação) disponibiliza os controladores Mamdani e Sugeno, foi escolhido o primeiro citado, pois é amplamente difundido na literatura e ideal para explorar o tratamento linguístico das variáveis (Figura 1), já que diferencia estes controladores são as variáveis de saída, que o controlador de Sugeno trata como funções lineares da entrada, logo, a saída não pertence a um conjunto *fuzzy*.

Para o primeiro caso, foi considerada uma variável de entrada “Nível” e uma variável de saída “Vazão”. A variável “Nível”, representa o nível do tanque e possui três funções de pertinência (“Baixo”, “Certo” e “Alto”), por sua vez a variável “Vazão”, que representa a entrada do fluido contempla as funções (“Mínima”, “CTE” e “Máxima”).

O alcance funções de pertinência determinam a intensidade de cada elemento *fuzzy* dentro da variável. Para essa simulação, as funções da entrada foram do tipo gaussianas, contemplando todo o espaço (de -1 a 1) da variável “Nível”. Porém, com o máximo de intensidade em seus pontos representativos: -1 para Baixo, 0 para Certo e 1 para Alto. Na saída, foram implementadas funções triangulares, permitindo pontos de dupla atuação de funções de pertinência. Com um alcance de 0 a 100 (variável “Vazão”), o ponto zero representou a máxima intensidade da pertinência “Mínima” (e intensidade mínima no ponto 40). “CTE” alcança seu pico em 50 (com extremos em 10 e 90). Por sua vez, a função “Máxima” com auge no ponto 100 e menor intensidade no ponto 60.

As regras de inferência representam o núcleo do controlador *fuzzy*, pois é a partir delas que o sistema poderá ponderar, com base nas funções de pertinência, a intensidade da variável de saída. A Tabela 1 mostra as regras de inferência utilizadas para o primeiro caso. O método de defuzzificação utilizado foi o *centroid* padrão.

**Tabela 1.** Regras e inferência e configuração do controlador (“Nível” → “Vazão”)

| Regras de Inferência |               |
|----------------------|---------------|
| Se [Nível]           | Então [Vazão] |
| Baixo                | Máxima        |
| Certo                | CTE           |
| Alto                 | Mínima        |

Para o segundo caso, foi considerada uma variável de entrada “Erro” e uma variável de saída “Vazão”. A variável “Erro” possui três funções de pertinência (“Negativo”, “Zero” e “Positivo”), por sua vez a variável “Vazão” contempla as mesmas funções, porém com o alcance alterado. O erro representa a diferença entre o nível desejado e o nível atual.

As funções da entrada são “Positivo” e “Negativo”, no espaço de -1 a 1 da variável “Erro”, atuaram com intensidade máxima em todos os pontos diferentes de 0. Na saída, foram implementadas funções triangulares, porém, sem pontos de dupla atuação de funções de pertinência. Com o mesmo alcance de 0 a 100 para a variável “Vazão”, o ponto zero representando a máxima intensidade da pertinência “Mínima” (e intensidade mínima no ponto 5). “CTE” alcançando seu pico em 50 (com extremos em 49 e 51). Por sua vez, a função “Máxima” com auge no ponto 100 e menor intensidade no ponto 95.

As regras de inferência são similares ao caso anterior e a configuração do controlador é a mesma. Dessa forma, definida a variável de entrada “Erro” como a diferença entre os níveis, um erro positivo significa que o nível desejado ainda não foi atingido, por outro lado, um erro negativo significa que o *set point* foi ultrapassado. A Tabela 2 mostra as regras de inferência utilizadas nessa simulação.

**Tabela 2.** Regras e inferência e configuração do controlador (“Erro” → “Vazão”)

| Regras de Inferência |               |
|----------------------|---------------|
| Se [Erro]            | Então [Vazão] |
| Negativo             | Mínima        |
| Zero                 | CTE           |
| Positivo             | Máxima        |

Para o terceiro e último caso, foram consideradas duas variáveis de entrada, uma delas é a mesma utilizada anteriormente (“Erro”), e a outra, definida como “Variação”, representa a variação entre o erro atual e o anterior lido pelo controlador ao longo do tempo com as funções de pertinência (“MNeg”, “Neg”, “Zero”, “Pos” e “MPos”). A variável de saída continua sendo a mesma (“Vazão”), porém com a opção de multivariáveis na entrada, existem mais possibilidades de saída. Como a lógica nebulosa, diferentemente da lógica tradicional, permite diferentes intensidades de valores entre verdadeiro e falso, a saída terá as funções (“Mín”, “Baixa”, “PBaixa”, “CTE”, “PAlta”, “Alta” e “Máx”).

As funções da entrada “Erro”, continuam as mesmas. Na entrada “Variação” foram definidas cinco pertinências, no espaço de -1 a 1, definidas em funções triangulares e aceitando pontos de dupla atuação. A intensidade de cada função de pertinência passa esse caso pode ser descrita na forma (a, b, c). Para a – intensidade mínima à esquerda, b – intensidade máxima e c – intensidade mínima à direita. Assim, suas funções de pertinência foram definidas com os parâmetros “MNeg” (-1.01, -1, -0.5), “Neg” (-1, -0.5, 0), “Zero” (-0.5, 0, 0.5), “Pos” (0, 0.5, 1) e “MPos” (0.5, 1, 1.01).

A variável de saída “Vazão”, possui as mesmas ultimas configuração mencionadas, no entanto, com a adição de novas funções de pertinência para preencher o espaço indefinido presente no segundo caso. Os parâmetros (funções triangulares) adicionados foram “Baixa” (5, 22, 39), “PBaixa” (39, 44, 49), “PAlta” (51, 56, 61), “Alta” (61, 78, 95).

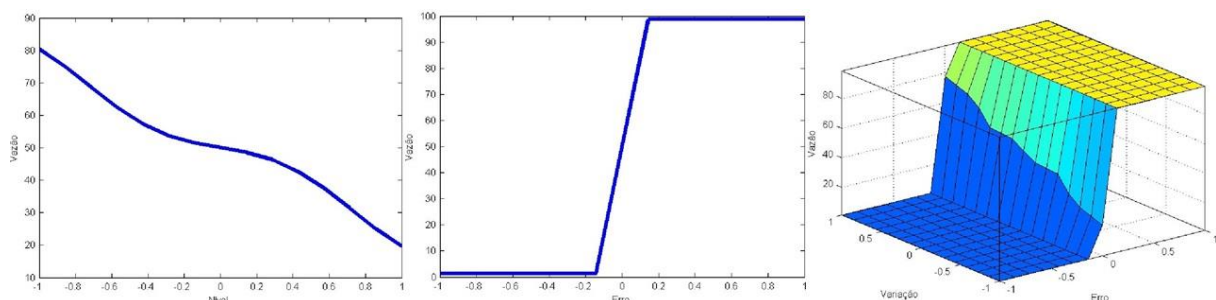
O grau de complexidade das regras de inferência para esse caso tende a aumentar, devido a adição de uma variável na entrada, no entanto a lógica ainda é intuitiva, por conta do tratamento linguístico do controlador. Nos outros casos foram usadas apenas condicionais do tipo “SE A ENTÃO B”. Agora, como existem três elementos, a condição será adaptada para “SE A E B ENTÃO C”, totalmente aceita pelo controlador, visto que a lógica nebulosa é bem aplicada ao tratamento de multivariáveis. A tabela 3 apresenta as regras definidas para essa simulação, é possível observar o objetivo (*set point*), onde as duas variáveis de entrada estão em zero.

**Tabela 3.** Regras e inferência e configuração do controlador (“Erro” + “Variação” → “Vazão”)

| Regras de Inferência |              |               |
|----------------------|--------------|---------------|
| Se [Erro]            | E [Variação] | Então [Vazão] |
| Negativo             | –            | Mín           |
| Positivo             | –            | Máx           |
| Zero                 | Zero         | CTE           |
| Zero                 | MPos         | Alta          |
| Zero                 | Pos          | PAlta         |
| Zero                 | MNeg         | Baixa         |
| Zero                 | Neg          | PBaixa        |

## Resultados e Discussão

Os gráficos da Figura 3 representam a relação entre a (s) variável (eis) de entrada e a de saída para cada um dos casos. Foram gerados após a defuzzificação da saída pelo controlador Mamdani.



**Figura 3.** Relações de E/S obtidos para cada uma das três simulações (“Nível” → “Vazão”), (“Erro” → “Vazão”) e (“Erro” + “Variação” → “Vazão”)

A partir da análise da figura 3, vale ressaltar o modo como as alterações no tratamento das variáveis e suas funções de pertinência influenciaram no gráfico de relação E/S. Para o primeiro caso (“Nível” → “Vazão”), é possível perceber que a vazão é alcançada de modo progressivo. Em outras palavras, para cada valor de nível abaixo ou acima do esperado, a tentativa de chegar na resposta esperada é obtida de forma gradual, seja aumentando ou diminuindo sua intensidade.

Observando a mesma relação para o segundo caso (“Erro” → “Vazão”), a resposta de vazão não ocorre de forma progressiva, pois sempre que o erro for negativo a saída tende a ser mínima, por outro lado, sempre que positivo a resposta será máxima. A vazão dita constante (resposta esperada) é obtida exatamente entre os extremos de máximo e mínimo da saída, quando o erro é igual a zero.

Ao analisar atentamente os gráficos dos dois primeiros casos, pode-se concluir que o primeiro obterá o resultado esperado em um maior tempo porem de forma suave. O segundo alcançará o *set point* rapidamente, no entanto corre um alto risco de ultrapassagem, e provavelmente oscilará em cima do objetivo até estabilizar o sistema, pois há um salto brusco entre a vazão mínima e máxima.

Por fim, o comportamento do gráfico do terceiro caso (“Erro” + “Variação” → “Vazão”), traz uma opção com uma variável a mais na entrada gerando a possibilidade de um ajuste fino no sistema, justamente na região de transição entre as vazões máximas e mínimas, tentando estabilizar o erro em zero relacionando um tempo hábil de resposta com uma boa estabilização do sistema. O modo como a lógica fuzzy trata as variáveis e a diversidade de combinações das regras de inferência mostram como um controlador desse tipo pode atender, de forma simples, problemas complexos de controle, viabilizando sua aplicação na indústria. E ainda, podem ser utilizados para condicionar outras variáveis de processo de um tanque, como por exemplo temperatura e pressão, e relacionar essas diversas variáveis em um sistema único.

### Conclusões

- Na simulação da E/S (“Nível” → “Vazão”), observa-se uma variação gradual da saída com relação a entrada, devido a opção de pontos onde existe mais de uma função de pertinência atuando tanto na entrada quanto na saída. Em uma aplicação prática, o alcance nível desejado seria progressivo. Na região de proximidade do nível desejado seria rapidamente estabilizado (pouca oscilação em torno do objetivo).
- Considerando a relação E/S (“Erro” → “Vazão”), há uma rápida velocidade de correção quando o erro é diferente de zero, pois apenas uma função de pertinência atua na existência do erro, com valor máximo em toda a faixa de atuação. Por outro lado, o rápido alcance do *set point*, proveniente de uma vazão máxima, gera uma dificuldade de precisão na periferia do nível desejado.
- A relação de uma variável a mais na entrada, contemplada na simulação de multivariáveis na entrada, com relação E/S (“Erro” + “Variação” → “Vazão”), mostra uma situação mais balanceada entre velocidade de alcance do objetivo e estabilização em sua periferia, visto que uma entrada (“Erro”) atuará em erros grosseiros e outra (“Variação”) no ajuste fino do sistema.
- A vantagem de utilizar-se um controlador *fuzzy* em um processo desse tipo está na facilidade de tratamento das variáveis e suas funções de pertinência para obter o controle ideal de cada aplicação. Oferecendo ainda, a adição de outras variáveis ao sistema.
- O a interpretação linguística de E/S da lógica nebulosa, similar ao modo de pensar humano, possibilita uma inferência intermediária entre as respostas 0 ou 1 da lógica clássica (0 – falso e 1 – verdadeiro). Aceitando parâmetros como “mais verdadeiro” ou “menos falso”, a lógica nebulosa é aplicada a operações com conceitos subjetivos, gerando um melhor tratamento das imprecisões. O fato de necessitar de poucas regras e decisões, simplifica a aquisição da base do conhecimento. Portanto é economicamente viável no controle de processos industriais.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Universitário Tiradentes (UNIT) – Campus Amélia Maria Uchôa, especificamente ao departamento de Engenharia Mecatrônica por proporcionar toda a estrutura laboratorial necessária para a execução deste trabalho. E pelo incentivo à produção científica na graduação dos discentes.

## Referências Bibliográficas

- ANDRADE, M.; JACQUES, M. A. P. Estudo comparativo de Controladores de Mamdani e Sugeno para controle do tráfego em interseções isoladas. ANPET: Transportes, Vol. XVI, n. 2, p. 24-31, 2008.
- CARVALHO, A. S; SOUSA, A. L, FRANCISCO, L. E. S. Identificação e Controle Fuzzy de uma Planta Didática de Nível. VII SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2010.
- 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.
- KAUR, S.; BHARTI, G. *Two Inputs Two Output Fuzzy Controller System Design using MATLAB. IJAEST – International Journal of Advances in Engineering, Science and Technology*. Vol. 2, No. 3, 2012.
- OLIVEIRA, D. N.; BRAGA, A. P. S; ALMEIDA, O. M. Fuzzy implementado em LADDER com Funções de Pertinência Descontínuas. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Bonito – MS, 2010.
- PAPIS, C. P.; MAMDANI, H. *A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-7, N° 10, 1977.
- ZADEH, L. A. *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-3, N° 1, p. 28-44, 1973.