

# CONTROLE DO NÍVEL DE ÁGUA EM TANQUES UTILIZANDO LÓGICA NEBULOSA (FUZZY)

• IAGO LUCAS BATISTA GALVÃO • JHONAT HEBERSON AVELINO DE SOUZA  
• THIAGO DE ARAUJO BRITO • WILLIAM DA CUNHA RIBEIRO

Orientação: FABIO MENEGETTI UGULINO DE ARAÚJO

05 de janeiro de 2022

## Resumo

*Introduzido pelo cientista Lotfi A. Zadeh, a lógica fuzzy veio como melhora no controle de sistemas que demandavam respostas além de verdadeira ou falsa. Os conjuntos nebulosos possibilitam comandos ponderados para o controle, baseando-se em regras que mapeiam os estados dos sistemas. Os principais controladores aplicados para essa lógica, são o Mamdani e o Sugeno; neste artigo, são comparados ambos os modelos e com diferentes configurações iniciais. Discorre-se brevemente, também, dos principais conceitos para introduzir-se a este conteúdo e simplificar a compreensão dos métodos aplicados. O artigo faz parte do projeto da disciplina Controle Inteligente e Sistemas Mecatrônicos do Mestrado em Engenharia Mecatrônica na Universidade Federal do Rio Grande do norte.*

**Palavras-chaves:** lógica fuzzy, Mamdani, Tagaki-Sugeno-Kang, nebulosa, difusa.

## I. INTRODUÇÃO

Apresentado por volta da década de 60 pelo pesquisador Lotfi A. Zadeh, o conceito de conjuntos nebulosos apresentou uma nova maneira de interpretar e visualizar problemas de sistemas de controle. Mais adiante todo esse ramo foi ganhando corpo com a introdução de novos conceitos para tomada de decisão partindo de conjuntos nebulosos e principalmente com o desenvolvimento do primeiro controlador *Fuzzy* para sistemas reais.

Conforme se percebeu a facilidade de implementação e sua possível aplicação onde o controle clássico tinha bastante impedimento, como por exemplo em aplicações onde não há modelagem matemática bem definida do sistema, as aplicações com os controladores *Fuzzy* foram se popularizando cada vez mais. Atualmente, a lógica nebulosa é uma tecnologia bastante difundida e extremamente útil no desenvolvimento de sistemas para controle de processos complexos.

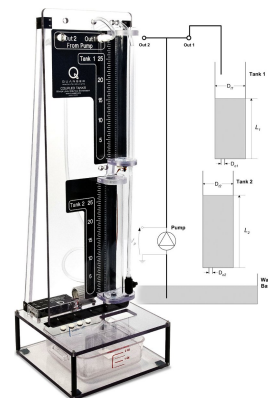
O objetivo deste trabalho será explorar as características de dois tipos de controlador *Fuzzy* em algumas configurações diferentes em uma aplicação de controle a fim de se comparar as melhores implementações.

## II. MODELAGEM DO PROBLEMA

O problema abordado nesse trabalho se baseia no kit didático da *Quanser*, o qual consiste em um conjunto com

dois tanques acoplados, um reservatório de água, uma bomba e um conjunto de tubos flexíveis e conexões. O conjunto possibilita diferentes configurações, mas o abordado nesse trabalho é a configuração exibida na Figura 1, no qual a bomba capta a água do reservatório e descarrega no tanque 1. Este reservatório possui um orifício no fundo, o qual a água pode passar livremente por gravidade para o tanque 2. O segundo reservatório possui o mesmo orifício, possibilitando que a água retorne para o depósito logo abaixo. Nesse trabalho, o nível a ser controlado é o do tanque 2.

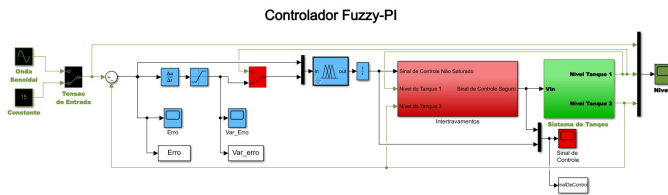
**Figura 1:** Sistema de tanques acoplados.



Fonte: [www.quanser.com/products/coupled-tanks](http://www.quanser.com/products/coupled-tanks) (Acesso em: 06/01/2022).

Todo o trabalho foi desenvolvido por meio de simulações computacionais utilizando o *software* Simu-link da Matlab. A modelagem computacional do sistema pode ser observada na Figura 2.

Figura 2: Sistema simulado.



Fonte: Autores, 2021.

Para maior fidedignidade com um sistema real, foi utilizado um sistema de intertravamentos o qual garante a segurança do processo, evitando problemas como por exemplo, transbordo dos tanques, cavitação da bomba e envio de tensão maior do que a suportada pelo motor da bomba.

Para simular a entrada do *set-point*, foram utilizadas duas entradas de sinais. Uma das entradas possui valor constante (15 cm) e a outra é uma onda senoidal, podendo assim representar um sistema com *set-point* variando com o tempo durante o processo.

### III. LÓGICA NEBULOSA (FUZZY LOGIC)

O termo originou-se em 1965 da Teoria de Conjuntos Difusos de Lotfi A. Zadeh; todavia, tem sido estudada por Lukasiewicz e Tarski como a lógica infinito-valorada desde meados da década de 20. Como o próprio nome remete, é um conceito onde os resultados são difusivos, onde as variáveis *booleanas* (0 para falso e 1 para verdadeiro, geralmente) diferem na proposição de ser apenas dois valores possíveis. Esta lógica é multi valorada, ou seja, pode resultar em qualquer valor real entre 0 e 1 [8].

Em muitos sistemas de controles, principalmente naqueles mais complexos, a lógica verdadeiro ou falso (usualmente, alta e baixa tensões, respectivamente) não resultam em um controle mais adequado por não representarem todas as gradações envolvidas no sistema. Dessarte, têm-se uma maior flexibilidade para relevar mais as incertezas e imprecisões do sistema [1]. Então, têm-se uma resposta "parcialmente verdadeira" e "parcialmente falsa", o que torna-se mais preciso na aplicação proporcional do controle.

A lógica do cérebro humano assemelha-se a esta lógica. Por isso, ao implementá-la, os dispositivos eletrônicos passam a ser acionados com os estados indeterminados. Assim, é possível analisar situações não quantificáveis como argumentação, sentimentos, veracidade, condições subjetivas e etc. A aplicação na indústria iniciou-se na Europa em 1970, passando pelo Japão, até meados de 1990 o Estados Unidos mostrou interesse [6]. A primeira aplicação notável, foi o Trem Bala de Sendai, a qual houve uma melhoria na eficiência, precisão e conforto durante o percurso.

Sua arquitetura base é constituída de quatro partes. A Regra Base, que lida com um conjunto de regras com a condição "SE-ENTÃO" (*IF – THEN*), ou seja, toma partido das decisões, baseando-se em uma condição. A Fuzzificação, esta converte os sinais de entradas (dados providos pelos sensores) que são números *crisp* em definições *fuzzy*. A *Inference Engine* (traduzindo, Motor de Inferência), ela determina o nível de cada entrada difusa, baseando-se em cada regra, para decidir quais condições serão implementadas na lógica; posteriormente, estas regras são combinadas para tomada de decisão. E por fim, a Defuzzificação, como o nome infere, é o inverso da Fuzzificação onde ocorre a conversão das definições *fuzzy* em sinais de saídas para atuação do sistema [7].

## IV. CONTROLADORES EMPREGANDO LÓGICA NEBULOSA

Primeiramente, nesse tópico, é esclarecido o emprego os principais controladores que implementam a lógica nebulosa. É explanado o que são as Funções de Pertinência, Fuzzificação e Defuzzificação; os quais são fundamentais para compreender os métodos experimentados.

### I. Funções de pertinência

Simoes e Shaw (1999) [2] sugerem que as funções de pertinência triangulares e trapezoidais são as mais comumente utilizadas, mas que isso não é regra e a escolha do tipo de função de pertinência vai de acordo com base em experiência prévia, da natureza do processo que se deseja controlar ou por meio de entrevista com especialistas. Os autores destacam que essa não é uma atividade simples de ser realizada e sugerem algumas dicas a serem seguidas:

- Um número prático de funções de pertinência entre 2 e 7;
- Por serem gerados com mais facilidade, os formatos triangulares e trapezoidais são comumente utilizados.

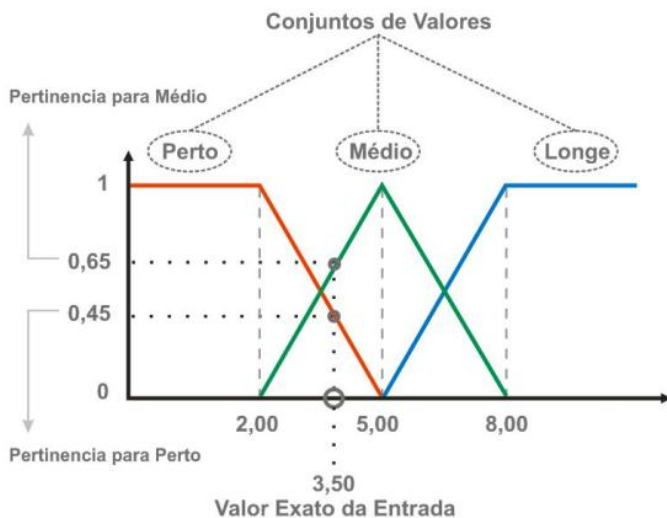
Porém, onde não se deseja variações bruscas e se deseja um desempenho suave se utilizam funções do tipo  $\cos^2(x)$ , gaussiana, sigmoide e *spline cúbico S-shape*;

- O grau de superposição entre as funções de pertinência no mínimo de 25% e no máximo 75%.

## II. Fuzzificação

O processo de *fuzzificação* consiste em transformar os números reais do universo de discurso para o domínio *fuzzy*. A Figura 3 representa um exemplo de *fuzzificação*, onde o valor real 3.50 é transformado no domínio *fuzzy*. Nesse exemplo, para a função de pertinência "Perto" o grau de pertinência é de 0.45, enquanto que para a função "Médio" têm-se 0.65 de grau de pertinência. Dessa forma, o resultado é um vetor *fuzzy* com os respectivos graus de pertinência para cada função cruzada pelo valor de entrada. [2]

Figura 3: Processo de Fuzzificação.



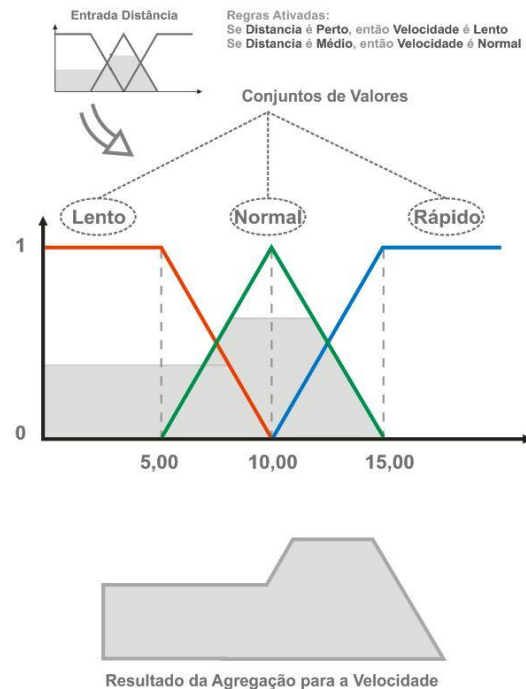
Fonte: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) (Acesso em: 06/01/2022).

## III. Defuzzificação

O processo de defuzzificação é o inverso da fuzzificação. Ou seja, a defuzzificação traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto. Os métodos mais comumente utilizados para defuzzificação são: centro de área (centroide), centro do máximo e média do máximo. A Figura 4 representa um exemplo de defuzzificação, onde nela mostra a figura fuzzy gerada como resultado. Se o método centroide for utilizado para defuzzificação, será então cal-

culado o centro de área da figura resultante e o resultado será um número real. [2]

Figura 4: Processo de Defuzzificação.



Fonte: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net) (Acesso em: 06/01/2022).

## IV. Controlador Mamdani

O nome deriva do seu criador Ebrahim Mamdani, da Universidade de Londres, que em 1973 introduziu um sistema de controle com lógica difusa. Atualmente, esta é a técnica de mais utilizada de inferência *fuzzy*. Este processo é aplicado em quatro etapas [5]:

1. Fuzzificação das variáveis de entrada;
2. Inferência (análise das regras);
3. Composição (agregar as saídas das regras);
4. Defuzzificação.

Cada regra do algoritmo *fuzzy* é uma proposição condicional e as diferentes relações entres estas podem ser derivadas. O operador define previamente a regra a ser implementada para a função de implicação, a qual definirá o seguinte. O controle deste método é a resultante da agregação das regras do programa, gerando um conjunto *fuzzy* que define a saída do controlador por meio da defuzzificação [4].

## V. Controlador Tagaki-Sugeno-Kang

Em 1983, o controlador Sugeno ou modelo difuso TSK (Takagi, Sugeno e Kang) foi implementado como uma simplificação do modelo Mamdani. Este sugere um *singleton* difuso, ou seja, um único ponto como função de pertinência consequente da regra [5]. Dessa maneira, o resultado não é mais um conjunto *fuzzy* de uma centroide bidimensional, esta assume apenas um valor numérico.

Com tal abordagem, dispensa-se a definição de implicação específica, onde a saída final do controlador é resultante da média ponderada das respostas de cada regra, não sendo necessário a defuzzificação. Como mencionado, o modelo de inferência é similar ao método baseado, o qual altera-se apenas o consequente da regra. O formato desse estilo é:

$$\text{SE } x \text{ é } A \text{ E } y \text{ é } B \text{ ENTÃO } z \text{ é } f(x, y)$$

onde:

- $x$ ,  $y$  e  $z$  são termos linguísticos;
- $A$  e  $B$  são variáveis linguísticas de  $X$  e  $Y$ , respectivamente;
- $f(x, y)$  é uma função matemática *crisp*.

O resultado de  $z$  é definido como uma constante que representa com um único valor o conjunto *fuzzy* e os demais com pertinência zero, sem alterar a determinação simplificada da resposta final do controlador.

## V. IMPLEMENTAÇÃO E SINTONIA DOS CONTROLADORES

Neste tópico é explanado como foi aplicado os controladores e ajustado a sintonia para um melhor resultado empiricamente.

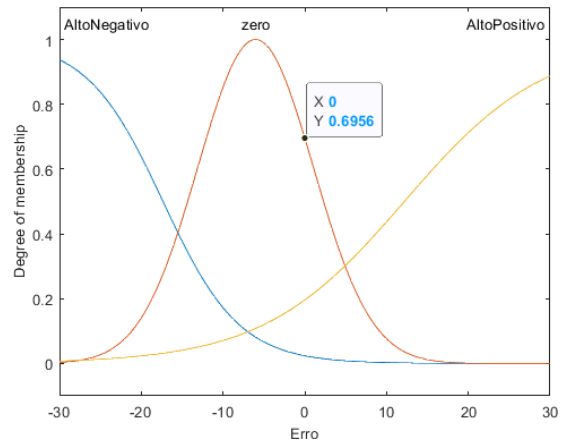
### I. Controlador Mamdani com duas entradas e funções de pertinência Sigmoid e Gaussianas

Este controlador foi construído com 3 funções de pertinência para cada entrada e saída. As funções foram alocadas nos extremos dos intervalos e próximo ao zero. Dessa forma, tem-se as funções *AltoNegativo* e *AltoPositivo*, com valor negativo e positivo, respectivamente; bem como, a função *Zero*, sendo próximo ao zero. Os primeiros testes realizados foram executados com poucas alterações nos parâmetros iniciais das funções de pertinência, porém estes não obtiveram resultados bons. A sintonia do controlador foi feita de forma empírica, analisando a teoria *fuzzy*

para deslocar os pontos de inflexão das funções *Sigmoid* e *Gaussianas* de forma que o controlador tenha resultados satisfatórios.

Na Figura 5 e possível notar que as funções foram pouco alteradas. Já na Figura 6, nota-se o mínimo impacto que a função *AltoPositivo* tem sobre a derivada do erro, as regras que foram utilizadas está na Tabela 1.

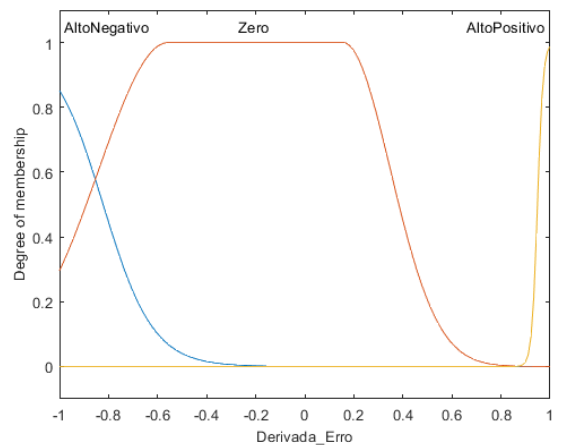
Figura 5: Função de pertinência entrada 1 (Erro).



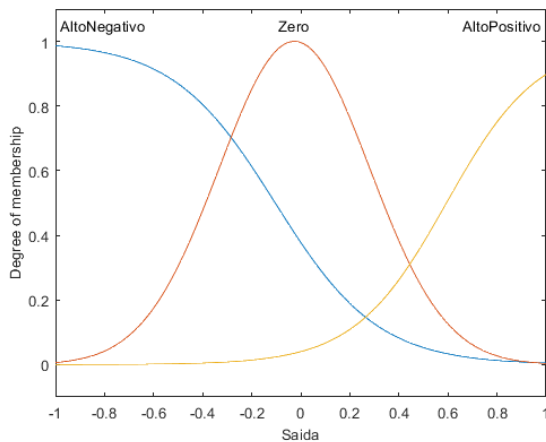
Fonte: Autores, 2021.

Além disso, foram plotados os gráficos de superfície na Figura 8 e Figura 12, os quais demonstram um comportamento parecido entre si. Quanto maiores os valores do *Erro* e da *Derivado do Erro*, maior o sinal de controle, que é proporcional ao valor *AltoNegativo* ou *AltoPositivo*.

Figura 6: Função de pertinência entrada 2 (Variação do Erro).

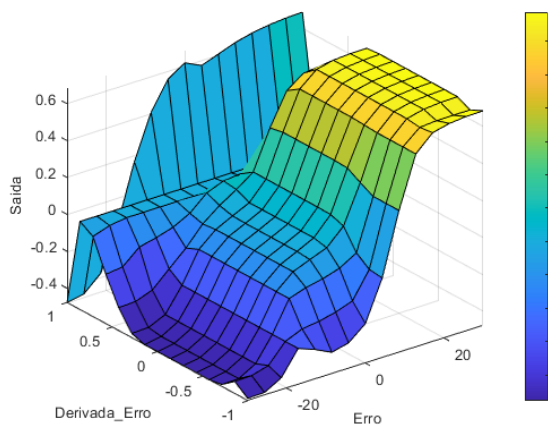


Fonte: Autores, 2021.

**Figura 7:** Função de pertinência saída (tensão).

Fonte: Autores, 2021.

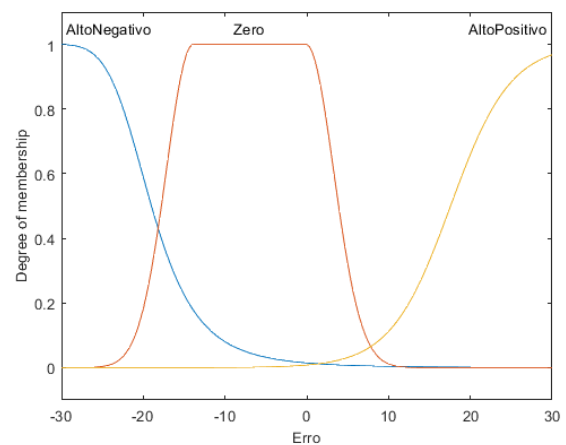
Erro	Operador	Derivada do Erro	Sinal de Controle
AltoNegativo	And	AltoNegativo	AltoNegativo
AltoNegativo	And	Zero	AltoNegativo
AltoNegativo	And	AltoPositivo	AltoNegativo
Zero	And	AltoNegativo	AltoNegativo
Zero	And	Zero	Zero
Zero	And	AltoPositivo	AltoPositivo
AltoPositivo	And	AltoNegativo	AltoPositivo
AltoPositivo	And	Zero	AltoPositivo
AltoPositivo	And	AltoPositivo	AltoPositivo

**Tabela 1:** Regras Mamdani.**Figura 8:** Gráfico de superfície.

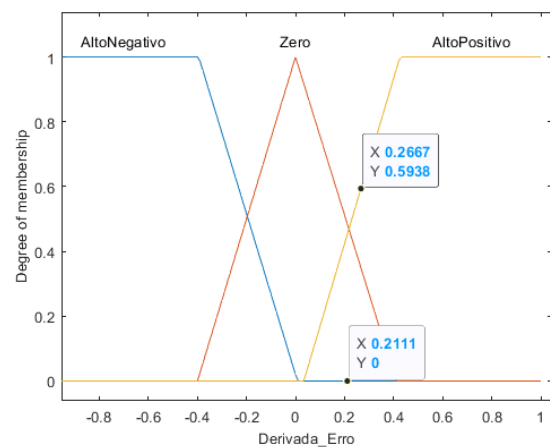
Fonte: Autores, 2021.

## II. Controlador Mamdani com duas entradas e funções de pertinência Sigmoid e Gaussianas e Triangulares, Z, Pi

Este controlador também foi construído com 3 funções de pertinência para cada entrada e saída. As funções seguem o mesmo padrão de nomes do controlador anterior. Ademais, apenas as saídas possuem funções de pertinência com formato Z, Pi e gaussiana. Para a entrada da derivada do erro as funções triangulares e trapezoidais apresentaram desempenho ligeiramente superior.

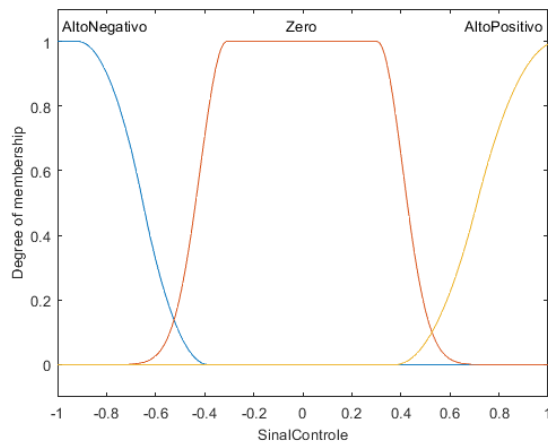
**Figura 9:** Função de pertinência entrada 1 (Erro).

Fonte: Autores, 2021.

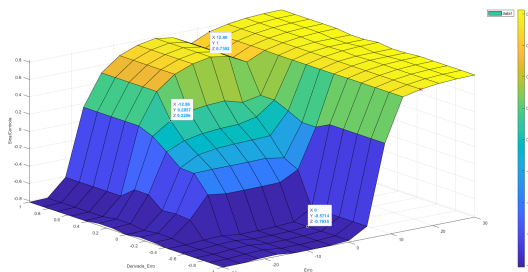
**Figura 10:** Função de pertinência entrada 2 (Variação do Erro).

Fonte: Autores, 2021.

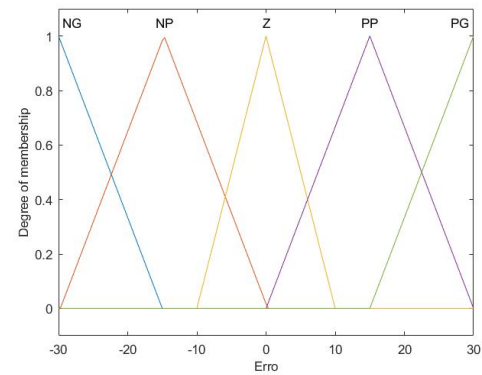


**Figura 11:** Função de pertinência saída (tensão).

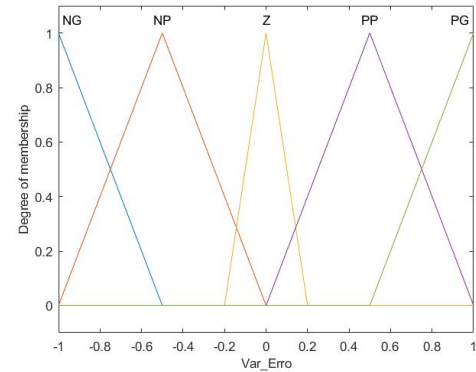
Fonte: Autores, 2021.

**Figura 12:** Gráfico de superfície.

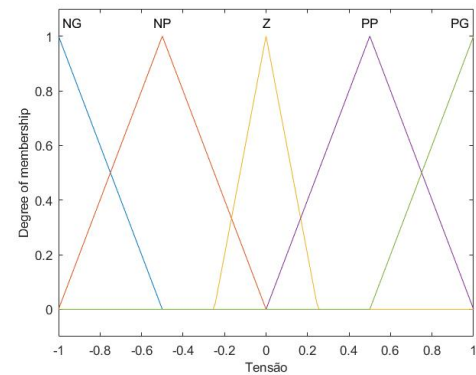
Fonte: Autores, 2021.

**Figura 13:** Função de pertinência entrada 1 (Erro).

Fonte: Autores, 2021.

**Figura 14:** Função de pertinência entrada 2 (Variação do Erro).

Fonte: Autores, 2021.

**Figura 15:** Função de pertinência saída (tensão).

Fonte: Autores, 2021.

### III. Controlador Mamdani com duas entradas e funções de pertinência triangulares

Para a sintonia desse controlador Mamdani, foram utilizadas duas variáveis de entrada, sendo a primeira a variável *Erro*, ilustrada na Figura 13 e a segunda *Variação do Erro*, demonstrada na Figura 14. Em ambas entradas, foram utilizadas cinco funções de pertinência do tipo triangular. Para os gráficos e tabela apresentados nesse tópico, os termos usados possuem as seguintes nomenclaturas: NG - Negativo Grande, NP - Negativo Pequeno, Z - Próximo a Zero, PP - Positivo Pequeno e PG - Positivo Grande.

A variável de saída é a tensão enviada para a bomba e nela também foram utilizadas cinco funções de pertinência do tipo triangular, conforme representado na Figura 15.

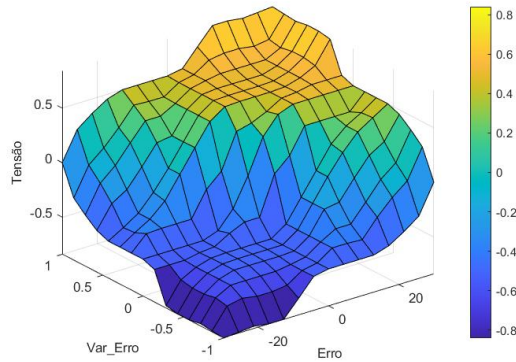
O conjunto de regras que relacionam as duas entradas com a saída é representado pela *Fuzzy Associative Matrix* (FAM) apresentado na Tabela 2.

	ERRO					
		NG	NP	Z	PP	PG
VAR-ERRO	NG	NG	NG	NP	NP	Z
	NP	NG	NP	NP	Z	PP
	Z	NP	NP	Z	PP	PP
	PP	NP	Z	PP	PP	PG
	PG	Z	PP	PP	PG	PG

**Tabela 2:** FAM controlador Mamdani.

O gráfico de superfície resultante é ilustrado na Figura 16.

**Figura 16:** Gráfico de superfície.



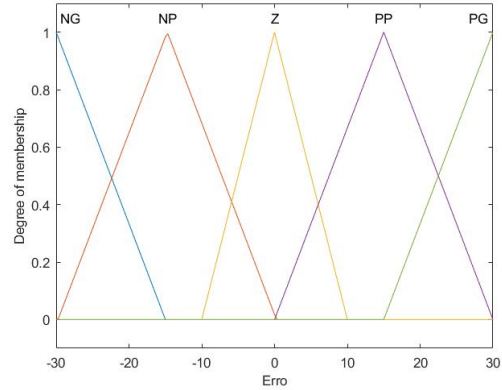
*Fonte: Autores, 2021.*

#### IV. Controlador Mamdani com nível do tanque 1 como entrada e funções de pertinência triangulares

Para testar um controlador com diferentes entradas, foi ajustada a sintonia do controlador Mamdani semelhante ao discutido no tópico anterior, porém com o nível do tanque 1 como uma das entradas. A primeira variável de entrada é o *Erro*, conforme exposto na Figura 17, a qual possui cinco funções de pertinência do tipo triangular. Para os gráficos e tabelas a seguir, os termos NG, NP, Z, PP e PG possuem os mesmos significados relatados no tópico anterior. Os demais termos possuem as seguintes

terminações: MB - Muito Baixo, B - Baixo, M - Médio, A - Alto e MA - Muito Alto.

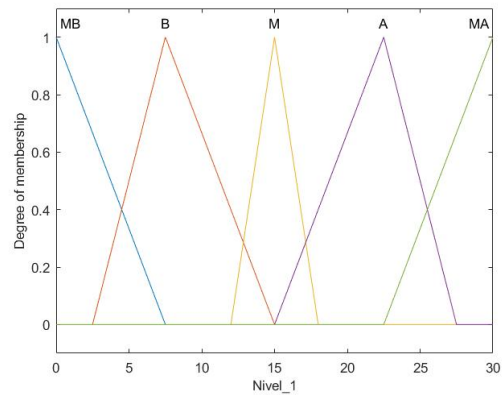
**Figura 17:** Função de pertinência entrada 1 (Erro).



*Fonte: Autores, 2021.*

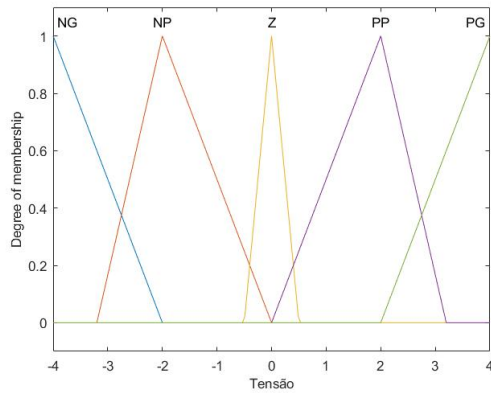
A segunda variável de entrada é o nível do tanque 1, mostrado na Figura 18, possuindo também cinco funções de pertinência do tipo triangular.

**Figura 18:** Função de pertinência entrada 2 (Nível tanque 1).



*Fonte: Autores, 2021.*

A variável de saída é a tensão enviada para a bomba que, também, possui cinco funções de pertinência do tipo triangular, conforme demonstrado na Figura 19.

**Figura 19:** Função de pertinência saída (tensão).

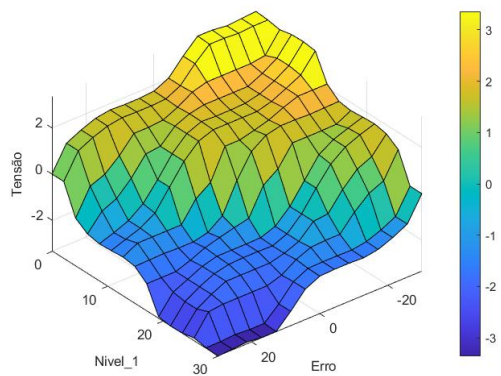
Fonte: Autores, 2021.

Na Tabela 3 pode ser observado a relação das regras entre variáveis de entrada e saída.

		ERRO				
NÍVEL		NG	NP	Z	PP	PG
	MB	PG	PG	PP	PP	Z
	B	PG	PP	PP	Z	NP
	M	PP	PP	Z	NP	NP
	A	PP	Z	NP	NP	NG
	MA	Z	NP	NP	NG	NG

**Tabela 3:** FAM controlador Mamdani.

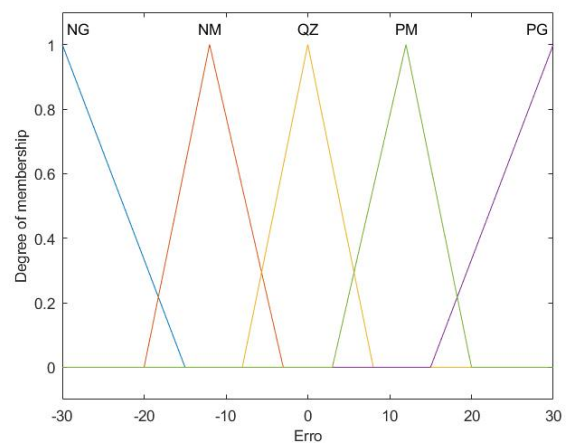
Na Figura 20 pode ser visto o gráfico de superfície para esse controlador.

**Figura 20:** Função de pertinência entrada 1 (Erro).

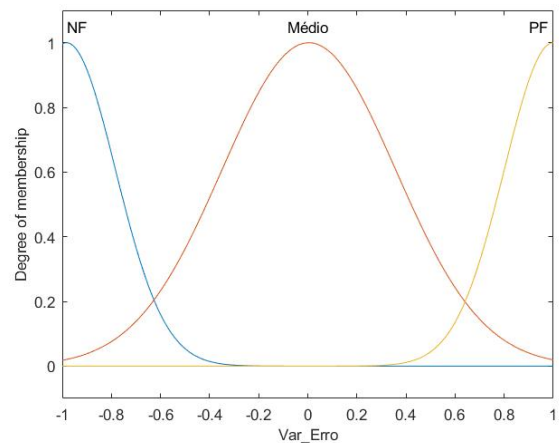
Fonte: Autores, 2021.

## V. Controlador Sugeno com duas entradas e funções de pertinência triangular e gaussiana

De forma similar ao controlador Sugeno anterior, para esse controlador também foram realizados diversos testes empíricos. Da mesma forma, também foram utilizadas duas entradas, uma representando a variável *Erro* e a outra a *Variação do Erro*. Porém, as funções de pertinências utilizadas foram diferentes, com o adendo de que para a entrada *Erro* foram utilizadas as funções do tipo triangular, conforme mostrado na Figura 21. Para a entrada *Variação do Erro* foram utilizadas funções do tipo gaussiana, conforme mostrado na Figura 22.

**Figura 21:** Função de pertinência entrada 1 (Erro).

Fonte: Autores, 2021.

**Figura 22:** Função de pertinência entrada 2 (Variação do Erro).

Fonte: Autores, 2021.



As funções Sugeno de saída são mostradas na Tabela 4, onde os coeficientes "C2", "C1" e "C0" seguem a mesma lógica do controlador Sugeno anterior.

Função saída	Fator de escala		
	C2	C1	C0
Forte	0.25	1	0
Médio	0.05	0.85	0
Fraco	0.01	0.1	0

**Tabela 4:** Funções Sugeno de saída.

As regras utilizadas para esse controlador são demonstradas na Figura 23.

**Figura 23:** Regras controlador Sugeno

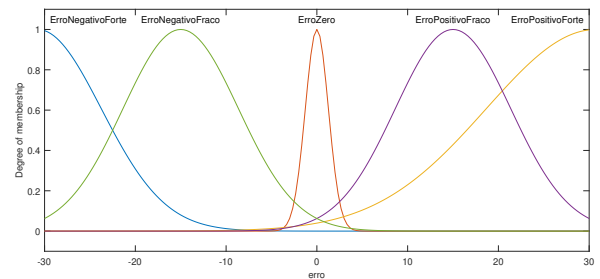
1. If (Erro is NG) and (Var_Erro is NF) then (Tensão is Grande) (1)
2. If (Erro is NG) and (Var_Erro is Médio) then (Tensão is Grande) (1)
3. If (Erro is NG) and (Var_Erro is PF) then (Tensão is Grande) (1)
4. If (Erro is NM) and (Var_Erro is NF) then (Tensão is Médio) (1)
5. If (Erro is NM) and (Var_Erro is Médio) then (Tensão is Médio) (1)
6. If (Erro is NM) and (Var_Erro is PF) then (Tensão is Médio) (1)
7. If (Erro is QZ) and (Var_Erro is NF) then (Tensão is Pequeno) (1)
8. If (Erro is QZ) and (Var_Erro is Médio) then (Tensão is Pequeno) (1)
9. If (Erro is QZ) and (Var_Erro is PF) then (Tensão is Pequeno) (1)
10. If (Erro is PG) and (Var_Erro is NF) then (Tensão is Grande) (1)
11. If (Erro is PG) and (Var_Erro is Médio) then (Tensão is Grande) (1)
12. If (Erro is PG) and (Var_Erro is PF) then (Tensão is Grande) (1)
13. If (Erro is PM) and (Var_Erro is NF) then (Tensão is Médio) (1)
14. If (Erro is PM) and (Var_Erro is Médio) then (Tensão is Médio) (1)
15. If (Erro is PM) and (Var_Erro is PF) then (Tensão is Médio) (1)

Fonte: Autores, 2021.

## VI. Controlador Sugeno com duas entradas e funções de pertinência gaussiana e trapezoidal (GT)

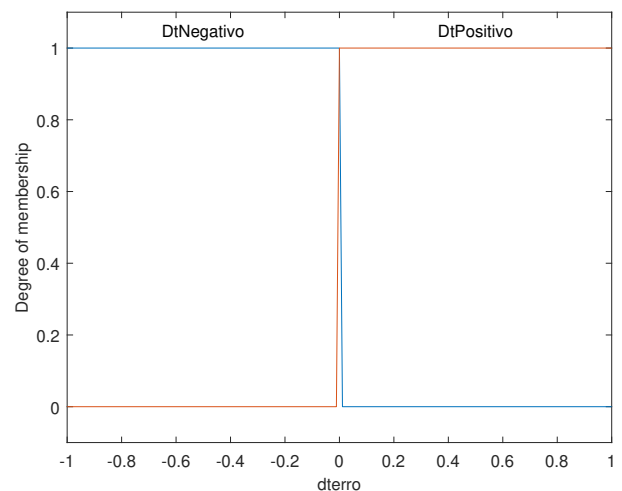
Foram realizados vários experimentos com valores empíricos para as funções de pertinência e as das saídas da Função Sugeno, a fim de encontrar um controlador adequado ao desempenho esperado. Na Figura 24 podemos observar os parâmetros utilizados para a criação do controlador, com base na entrada *erro* do sistema. Já para a entrada *dterro*, foram criadas as seguintes funções de pertinência, contidas na Figura 26.

**Figura 24:** Funções de Pertinência da primeira Entrada (GT).



Fonte: Autores, 2021.

**Figura 25:** Funções de Pertinência da segunda entrada (GT).



Fonte: Autores, 2021.

Uma vez definido os parâmetros, é necessário criar e adicionar as regras do nosso *Fuzzy* no sistema de simulação, onde podemos observar as regras na tabela 25. Essas regras são utilizadas justamente para realizar a sintonia do controlador, fazendo alterações entre elas, é possível melhorar ou piorar a sintonia do controlador. Os resultados exibidos na tabela são referentes ao melhor caso de controlador que conseguimos sintonizar com esses parâmetros.

**Figura 26:** Matriz de Associações Fuzzy (GT).

1. If (erro is ErroNegativoForte) and (dterro is DtPositivo) then (SinalControle is Forte) (1)
2. If (erro is ErroZero) and (dterro is DtNegativo) then (SinalControle is Medio) (1)
3. If (erro is ErroPositivoForte) and (dterro is DtNegativo) then (SinalControle is Medio) (1)
4. If (erro is ErroPositivoFraco) and (dterro is DtNegativo) then (SinalControle is Medio) (1)
5. If (erro is ErroNegativoFraco) and (dterro is DtNegativo) then (SinalControle is Medio) (1)
6. If (erro is ErroNegativoForte) and (dterro is DtPositivo) then (SinalControle is Medio) (1)
7. If (erro is ErroZero) and (dterro is DtPositivo) then (SinalControle is Medio) (1)
8. If (erro is ErroPositivoForte) and (dterro is DtPositivo) then (SinalControle is Medio) (1)
9. If (erro is ErroPositivoFraco) and (dterro is DtNegativo) then (SinalControle is Fraco) (1)
10. If (erro is ErroNegativoFraco) and (dterro is DtPositivo) then (SinalControle is Forte) (1)

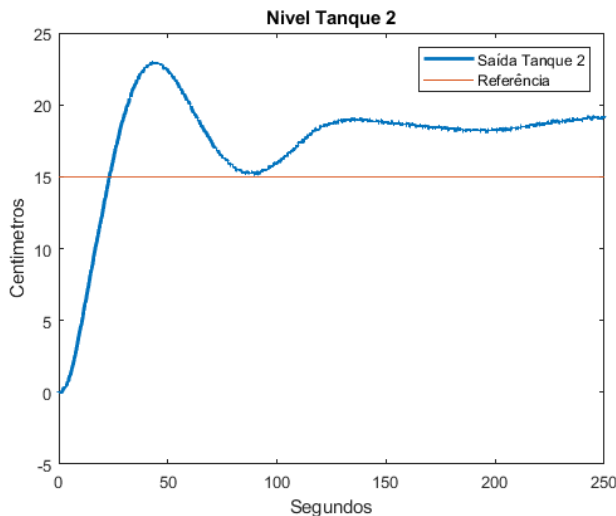
Fonte: Autores, 2021.

## VI. RESULTADOS

Nesta seção, discorre-se os resultado obtidos com as implementação de cada controlador e ilustra graficamente o comportamento das variáveis mais relevantes para comparativo de desempenho destes.

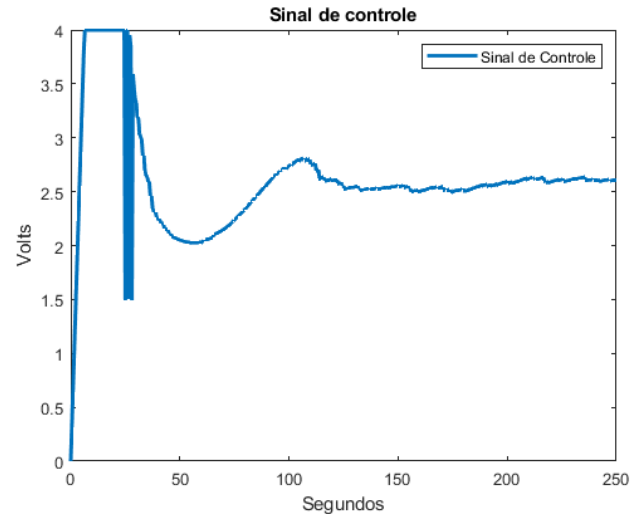
### I. Controlador Mamdani com duas entradas e funções de pertinência Sigmoid e Gaussianas

Em outro aspecto, ao analisar controladores Mamdani, é necessário atentar-se também, as funções de pertinência de saída e a forma com que esse valor é traduzido do espaço de configuração *fuzzy* para o espaço de configuração escalar. Abaixo, tendo o erro e a derivada do erro como entradas analisadas pelo modelo, a função de DeFuzzyficação escolhida foi centroide.

**Figura 27:** Nível do tanque 2, comparado com referencia.

Fonte: Autores, 2021.

Percebe-se que o nível do tanque 2 na Figura 27, tem um grande *overshoot* do controlador obtendo um nível de água até quase 25cm, também percebe que a uma leve acomodação no ponto de operação (*SetPoint*), entretanto, não significativa.

**Figura 28:** Saída de Controlador.

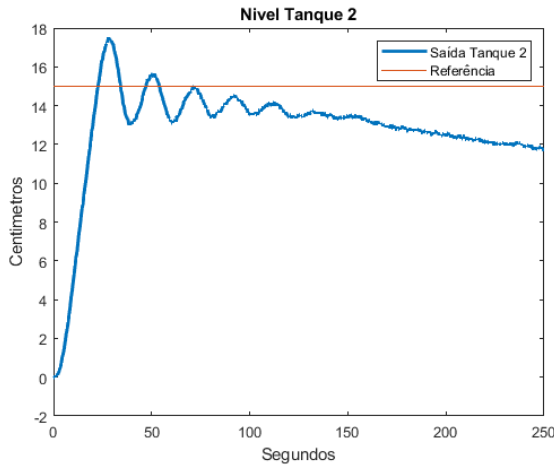
Fonte: Autores, 2021.

### II. Controlador Mamdani com duas entradas e funções de pertinência Sigmoid e gaussianas e triangulares, Z, Pi

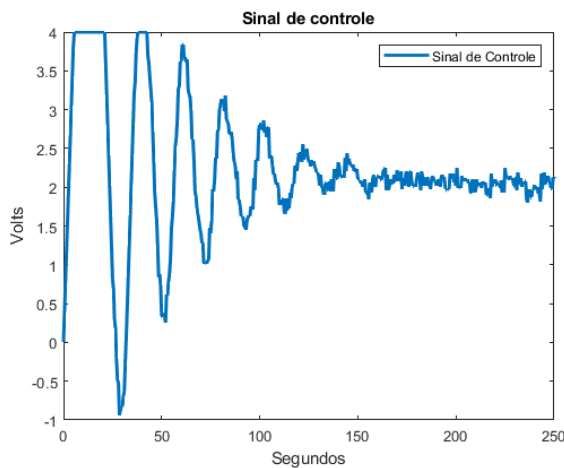
Observando o nível do tanque 2, Figura 29, destaca-se um *overshoot* baixo, menos de 3 cm acima do *setpoint*, e com tempo de acomodação menor. Percebe-se que as funções de pertinências tem um fator importante para melhor desempenho do controlador *Fuzzy*.

Ressalta-se, também, que esse controlador tente a cair em comparação do valor do ponto de operação, logo esses controladores inicialmente projetados não é uma boa escolha, neste Artigo iremos mostrar melhores soluções de controladores.

Os resultados da simulação deste controlador com funções de pertinência nesses formatos a Figura 30 mostra o comportamento do sinal de controle com um comportamento relativamente mais oscilatório que o controlador anterior.

**Figura 29:** *Nível do tanque 2, comparado com referência.*

Fonte: Autores, 2021.

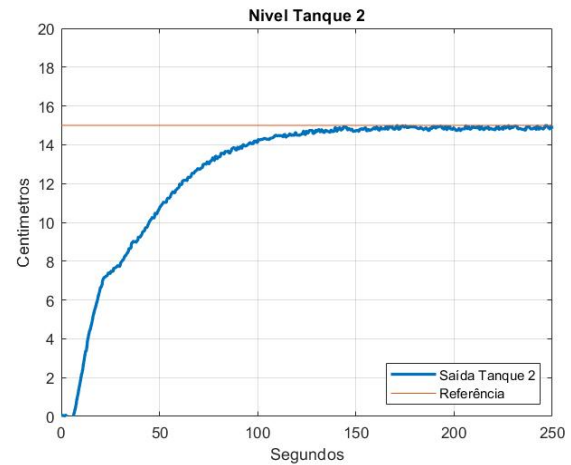
**Figura 30:** *Saída de Controlador.*

Fonte: Autores, 2021.

### III. Controlador Mamdani com duas entradas e funções de pertinência triangulares

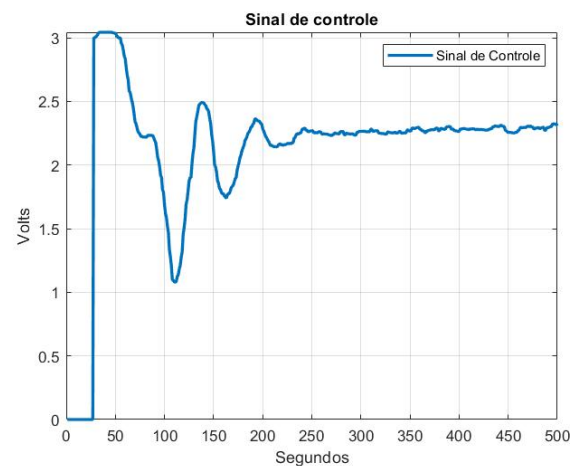
A resposta do sistema pode ser observada na Figura 31, onde mostra o nível do tanque 2. É possível observar que não houve *overshoot* enquanto no regime transiente. Além disso, o sistema tende de forma suave para o regime permanente no *set-point* definido de 15 cm. A resposta do sistema para atingir o regime permanente não foi de forma rápida, levando cerca de 150 segundos para atingir o valor definido como *set-point*. Apesar de não apresentar rapidez, o controlador se demonstra válido para aplicações em que

o tempo para atingir o *set-point* não seja crítico para o processo, pois demonstrou boa estabilidade após atingir o valor desejado.

**Figura 31:** *Nível tanque 2.*

Fonte: Autores, 2021.

É possível observar na Figura 32, onde é ilustrado o sinal de controle enviado para o processo, que no início da simulação é quando ocorre o maior pico de sinal enviado, sendo esse de aproximadamente 3 volts e em seguida tendendo para uma estabilização juntamente com a estabilização do nível do tanque controlado.

**Figura 32:** *Sinal de controle.*

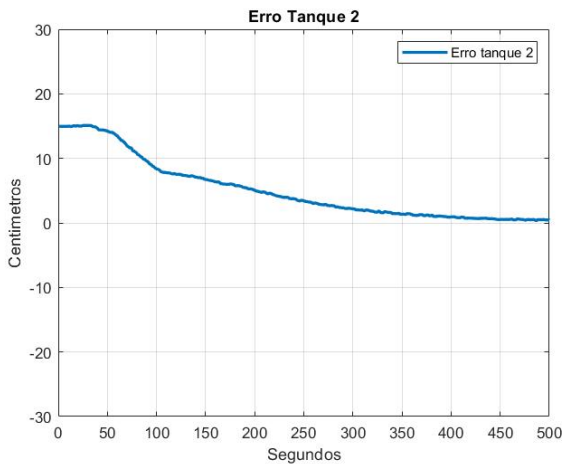
Fonte: Autores, 2021.

Assim, é possível validar mais uma vez a aplicação do controlador, uma vez que, foi demonstrado que não

apresenta picos de sinal de forma desnecessária, o que representaria perda de energia no processo, pois esse sinal seria saturado nos intertravamentos e limitado entre  $-4v$  e  $+4v$  (limite para segurança do processo).

Na Figura 33 é mostrado o erro do tanque 2, o qual demonstra a tendência e permanência em zero, o que representa a estabilização do tanque no nível desejado.

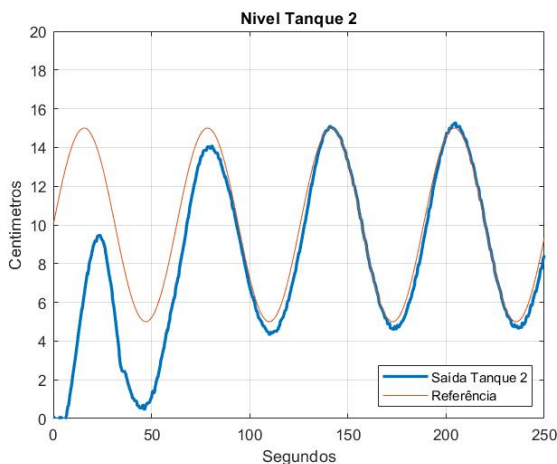
Figura 33: Erro tanque 2.



Fonte: Autores, 2021.

A Figura 34 demonstra o uso do controlador para um sinal de referência variante, nesse caso uma onda senoidal.

Figura 34: Nível tanque 2 para entrada variante.



Fonte: Autores, 2021.

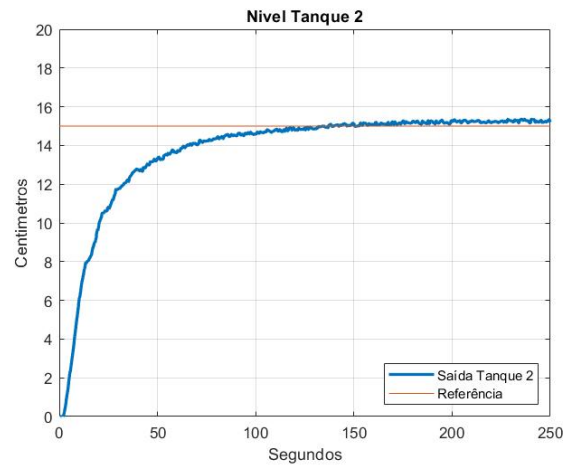
É possível observar que inicialmente há um grande erro transiente, mas após aproximadamente 150 segundos

o sistema passa a responder de forma que se aproxima ao *set-point*, mas apresentando um pequeno erro de regime.

#### IV. Controlador Mamdani com nível do tanque 1 como entrada e funções de pertinência triangulares

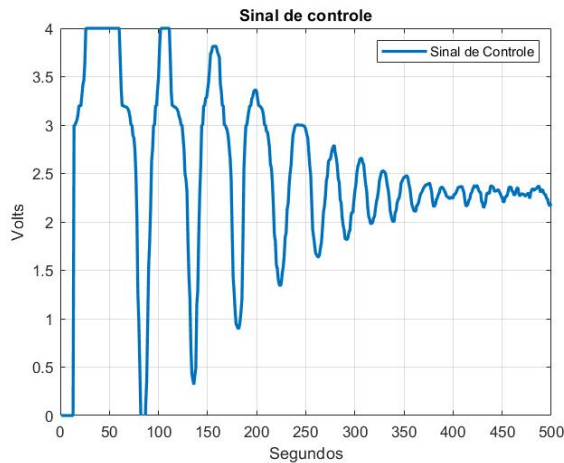
Para esse controlador, foi utilizado como entrada o nível do tanque 1 no lugar da variação do erro. Dessa forma, era esperado que as respostas fossem diferentes das encontradas no controlador relatado no tópico anterior. Conforme pode ser observado na Figura 35, o sistema respondeu de forma similar ao do tópico anterior, onde também não apresentou *overshoot* e tendeu de forma suave para o valor desejado. É possível identificar que o valor desejado foi atingido em um intervalo de tempo mais curto quando comparado com o controlador anterior, tendo esse atingido o *set-point* em aproximadamente 100 segundos. Porém, observa-se para esse controlador um pequeno erro de regime permanente, permanecendo em cerca de 0,2 cm acima do valor desejado.

Figura 35: Nível tanque 2.



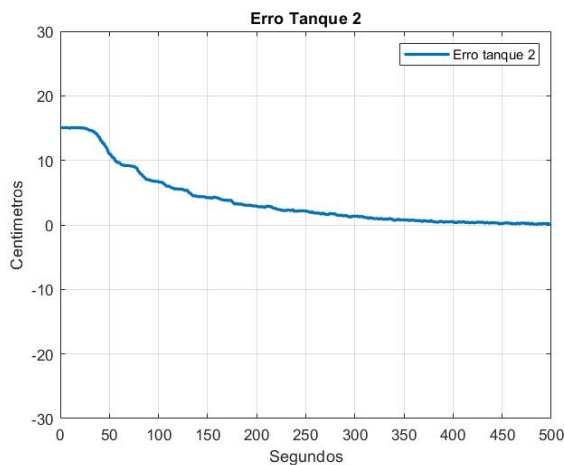
Fonte: Autores, 2021.

A Figura 36 apresenta o sinal de controle enviado para o sistema. É possível observar que diferentemente do controlador anterior, nesse o sistema apresentou diversos picos de sinais enviados para a planta, sendo dois deles saturados em  $+4v$ . Além disso, também apresentou muita oscilação e não demonstrou tendência de estabilização.

**Figura 36:** Sinal de controle.

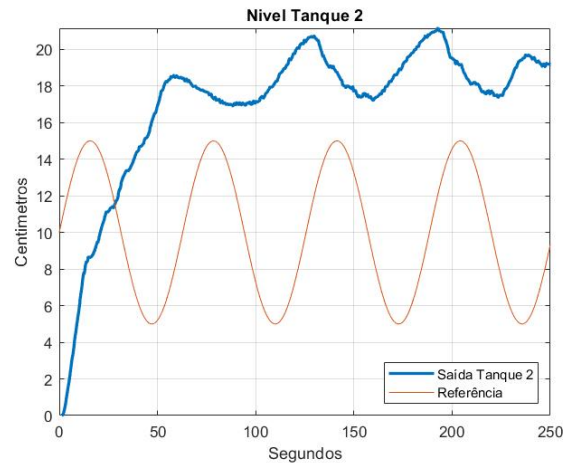
Fonte: Autores, 2021.

Na Figura 37 é possível observar o erro do nível no tanque 2, onde é visível uma tendência para zero, o que significa que o nível do tanque 2 tende para o valor desejado. Porém, assim como visto na Figura 35, o sistema permanece em um pequeno erro de regime.

**Figura 37:** Erro tanque 2.

Fonte: Autores, 2021.

Para testar a resposta a uma entrada variante, foi utilizado um sinal senoidal como entrada e o resultado é exibido na Figura 38. É possível observar que o controlador não conseguiu em nenhum momento seguir a variação do *set-point*, apresentando erro em regime transiente e permanente.

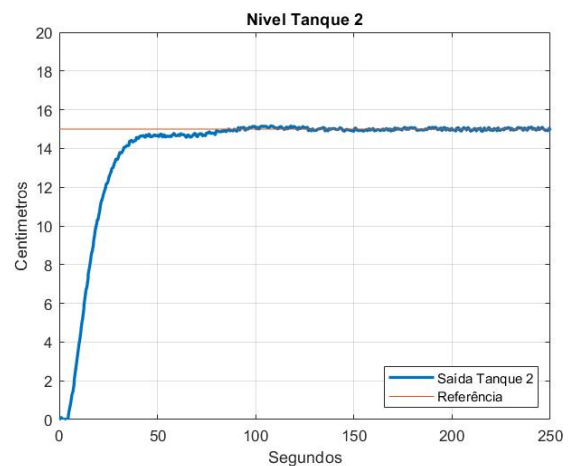
**Figura 38:** Nível tanque 2 para entrada variante.

Fonte: Autores, 2021.

Dessa forma, é possível deduzir que o controlador Mamdani do tópico anterior, o qual utiliza como entradas as variáveis *Erro* e *Variação do Erro*, se demonstra superior ao descrito nesse tópico.

## V. Controlador Sugeno com duas entradas e funções de pertinência gaussiana e triangular

O resultado do nível do tanque 2 controlado por esse método pode ser visto na Figura 39.

**Figura 39:** Nível tanque 2.

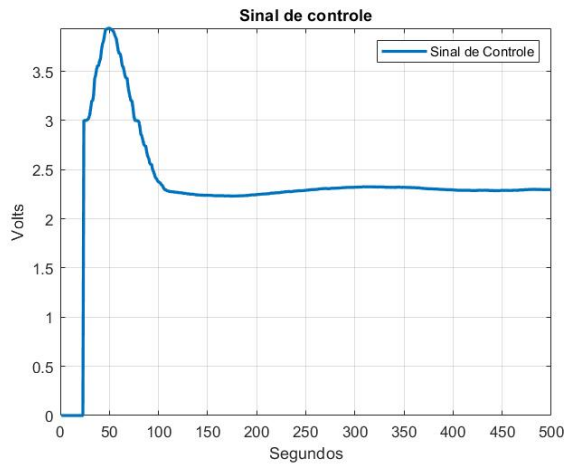
Fonte: Autores, 2021.

É possível observar que a resposta transiente do sistema ocorreu sem a formação de *overshoot* ou oscilações,



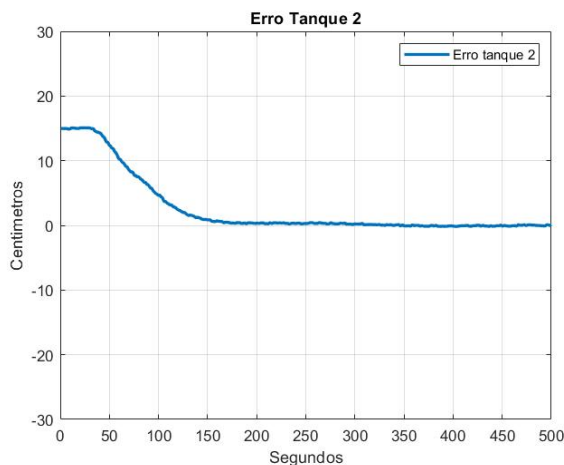
atingindo o *set-point* de forma suave sem variações bruscas e relativamente mais rápido do que os outros controladores (antes dos 100 segundos). O nível permanece em regime permanente no valor desejado, apresentando pequenas oscilações quase que imperceptíveis, possivelmente ocasionadas pelo ruído dos sensores.

**Figura 40:** Sinal de controle.



Fonte: Autores, 2021.

**Figura 41:** Erro tanque 2.



Fonte: Autores, 2021.

A Figura 40 apresenta o sinal de controle enviado para a bomba. É visto que o maior pico de sinal ocorre no início da simulação, ficando próximo de +3,9V, seguido por uma diminuição e estabilizando próximo de +2,4V, onde consequentemente ocorre a estabilização do nível do tanque

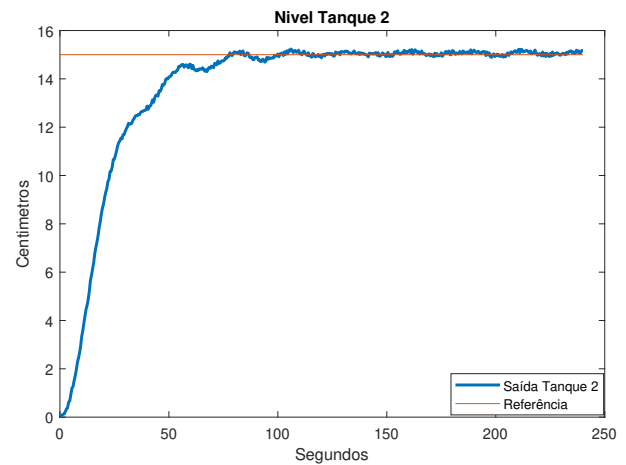
2 no valor desejado. Não ocorreu saturação do sinal, o que representa que o sinal calculado pelo controlador foi enviado para a planta, sem perda de energia.

O erro do nível do tanque 2 é mostrado na Figura 41, onde se identifica uma tendência de queda até atingir o zero e assim permanecendo. Isso significa que em regime permanente o nível permanece no *set-point* definido.

## VI. Controlador Sugeno com duas entradas e funções de pertinência gaussiana e trapezoidal (GT)

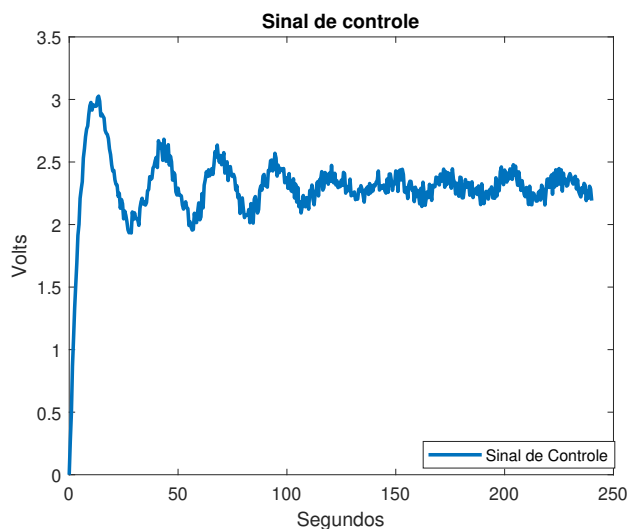
Na Figura 42 é possível observar a saída de interesse de controlador, o nível do tanque 2, onde o *setpoint* escolhido para o nível do tanque foi de 15 (quinze) centímetros de altura. O controlador GT foi capaz alcançar o *setpoint* desejado em um tempo hábil para o controle e sem a ocorrência de *overshoots*. Em contra partida, é possível observar uma demora para a acomodação no *setpoint*, ocasionando pequenas oscilações de nível, com estabilização para um maior tempo.

**Figura 42:** Controle nível tanque 2 (GT)



Fonte: Autores, 2021.

Já na Figura 43, é possível observar o sinal de controle gerado pelo controlador, nele observamos um valor de tensão variante, mas suavizado, onde não há o chaveamento brusco de tensão. Além disso, como estipulado, o sinal de controle encontra-se contido na faixa de segurança do sistema, abaixo do seu valor máximo de tensão.

**Figura 43:** Sinal de controle do controlador GT

Fonte: Autores, 2021.

## VII. CONCLUSÃO

Os sistemas de controle para a Indústria 4.0 necessitam de métodos mais dinâmicos e precisos. A lógica *fuzzy* é algo trabalhado há mais de meio século e mostra-se cada vez mais ideal para sistemas que necessitam de uma maior ponderação no controle, do que, por exemplo, o tradicional controle PID. Sua aplicação, permite uma maior interação entre o controle e a atuação; possibilitando diferentes abordagens para especificidades do propósito desejado.

Neste artigo, foram abordados vários exemplos dos controladores *Mamdani* e *Tagaki-Sugeno-Kang*, para diferentes tipos de entradas e funções de pertinências. Para o primeiro, foram aplicadas entradas e funções *Sigmoid* e *Gaussianas* com poucas alterações, apenas um pouco no *AltoPositivo*; porém, ao analisar o nível do tanque 2, o controle do sistema foi muito abrupto, resultando em um *overshoot* alto, sua estabilização foi longa e com elevada imprecisão.

Em seguida, foram aplicadas as mesmas entradas e funções de pertinência, acrescentando as *Triangulares*, *Z* e *Pi*; onde houveram melhoras nos desempenhos das funções triangulares e trapezoidais. Entretanto, o controle do nível do tanque 2 comportou-se de forma oscilatória, com picos de *overshoot* e o erro aumentando ao passar do tempo. Aplicando apenas as funções de pertinência triangulares para duas entradas, foram obtidos resultados similares; todavia, houve uma notória melhora na estabilização do nível do tanque 2, proporcionando uma acomodação

gradativa (erro tendendo a zero), sem oscilações bruscas, mas muito devagar (cerca de 150s para estabilizar). Para este controlador, por fim, manteve-se as funções de pertinência e utilizou o nível do tanque 1 como entrada. Os resultados foram muito similares ao anterior, com uma melhora no tempo de acomodação (cerca de 100s), porém com um pequeno aumento no erro (aproximadamente 0,2 cm), o controle mostrou-se instável e o teste senoidal apresentando erro alto, em regime transiente e permanente.

Mais dois experimentos foram realizados com o controlador *Sugeno* como comparativo. De início, foram definidas as mesmas configurações do primeiro experimento *Mamdani* (duas entradas e funções triangular e gaussiana), os resultados mostram-se melhores em comparação a este. O nível do tanque 2 atingiu o valor esperado em aproximadamente 50s com um pequeno erro, que em 150s aproximadamente, permaneceu em zero. Como também, o sinal de controle teve um único pico de tensão e logo estabilizou. No segundo experimento, alterou-se a função triangular para a função de pertinência trapezoidal. Este sucedeu em um desempenho inferior ao outro *Sugeno*, pois o tempo para referência foi superior e mais oscilatório; bem como, o sinal de controle mais ruidoso, porém, mantendo-se um melhor controle do que o *Mamdani*.

Como demonstrado, pode-se ter várias abordagens para os diferentes controladores. Com uma experimentação empírica, é possível sintonizar os controladores de acordo com as regras predefinidas e cabe a experiência e aplicabilidade para determinar os melhores parâmetros, para esse tipo de abordagem. Dito isto, para o controle de tanques, onde há uma dependência da vazão de um dos compartimentos; mostrou-se mais eficiente o controlador *Sugeno* com duas entradas e função de pertinência gaussiana e triangular. O conluimento segue de forma empírica e experimentada por diferentes pesquisadores; logo, cabe ao novo experimento, replicar com outras regras e métodos.

## REFERÊNCIAS

- [1] MENEGHETTI, Fábio U. A. Controle Inteligente. Universidade Federal do Rio grande do Norte, 2015. Natal-RN.
- [2] SIMOES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2. ed. rev. e aum. São Paulo: Blucher, 1999. 181 p.
- [3] NASCIMENTO JR., Cairo L.; YONEYAMA, Takashi. *Inteligência artificial em controle e automação*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2000. 218 p.

- [4] JACQUES, Maria Alice P. Estudo Comparativo de Controladores de Mamdani e Sugeno para Controle do Tráfego de Interseções Isoladas. Universidade de Brasília.
- [5] WIHELM, Volmir. Tópicos Especiais de Pesquisa Operacional I. Universidade Federal do Paraná.
- [6] WIKIPEDIA. Fuzzy Logic. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/L%C3%B3gica\\_difusa#Primeiras\\_aplica%C3%A7%C3%B5es](https://pt.wikipedia.org/wiki/L%C3%B3gica_difusa#Primeiras_aplica%C3%A7%C3%B5es). Acessado em 08/01/2022.
- [7] GEEKSFORGEEEKS. Fuzzy Logic —Introduction. Disponível em: <https://www.geeksforgeeks.org/fuzzy-logic-introduction/>. Acessado em 08/01/2022.
- [8] PUCSP. O Conceito “Fuzzy”. Disponível em: <https://www.pucsp.br/logica/Fuzzy.htm>. Acessado em 08/01/2022.