

# Relatório de Design - Projeto Sistema de Controle Fuzzy MISO para Refrigeração em Centros de Dados

Lanna C. e S., Lucas L. Gadbem, Virgínia L. A.

## Introdução

O presente documento tem como objetivo justificar o design de funções de pertinência, explicar a base de regras desenvolvida, analisar a estratégia de controle implementada e apresentar diagramas de fluxo do algoritmo

## Considerações Iniciais

Inicialmente foram analisados os universos de discurso, a resolução de controle e as características dos sistemas CRAC.

### Universos de discurso:

Variável	Universo	Unidade
Setpoint	[16; 22; 25; 32]	°C
$\Delta$ temperatura	[16, 32]	°C
Potência CRAC	[0, 100]	%

Com isso, temos que:

- valor mínimo do setpoint ( $SP_{\min}$ ) é 16°C;
- valor máximo do setpoint ( $SP_{\max}$ ) é 32°C;
- valor mínimo da variação da temperatura ( $PV_{\min}$ ) é 16°C;
- valor máximo da variação da temperatura ( $PV_{\max}$ ) é 32°C;

A resolução de controle da potência do sistema CRAC é 1% de potência, logo foi definida a precisão de 1% no sistema fuzzy implementado.

Os sistemas CRAC possuem um controle preciso de temperatura ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ), logo foi definida a tolerância de  $\pm 1^\circ\text{C}$  para o erro, a tolerância de  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  para a variação do erro e variação máxima de temperatura de  $2^\circ\text{C}$  entre medidas.

## Design de Funções de Pertinência

Após as considerações iniciais, foram definidas as funções de pertinência. Para isso, foi necessário definir a forma exata das funções, estabelecer os parâmetros específicos de cada função e escolher o número de termos linguísticos.

### Forma das funções e termos linguísticos

A definição das formas das funções e número de termos linguísticos foram baseados no “Sistema de Controle Fuzzy Malha Fechada para Aquecedor” desenvolvido durante a Aula 11 da disciplina Sistemas Embarcados (C213), por se tratar de uma lógica semelhante, ao lidar com ajuste de temperatura em um ambiente fechado.

Dessa forma, para as variáveis de entrada Erro e  $\Delta$ Erro, temos 5 termos linguísticos, sendo eles:

- Muito negativo (MN) - função trapezoidal;
- Pouco negativo (PN) - função triangular;
- Zero (ZE) - função triangular;

- Pouco positivo (PP) - função triangular;
- Muito positivo (MP) - função trapezoidal;

E para a variável de saída Potência do Sistema CRAC temos 5 termos linguísticos, sendo eles:

- Muito baixa (MB) - função triangular;
- Baixa (B) - função triangular;
- Média (M) - função triangular;
- Alta (A) - função triangular;
- Muito alta (MA) - função triangular;

### Cálculo dos parâmetros

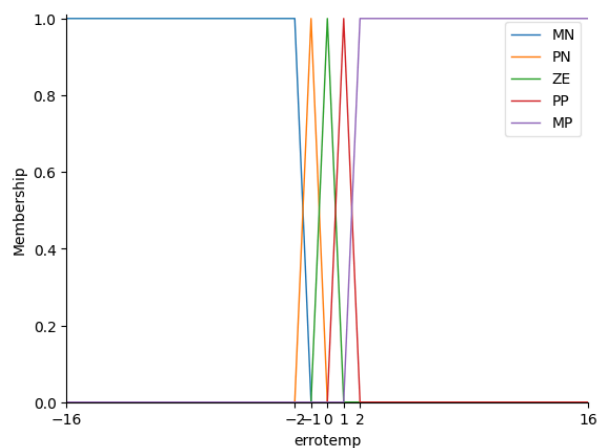
O cálculo dos limites do erro pode ser visto a seguir:

$$E_{\min} = PV_{\min} - SP_{\max} = 16 - 32 \rightarrow E_{\min} = -16^{\circ}\text{C}$$

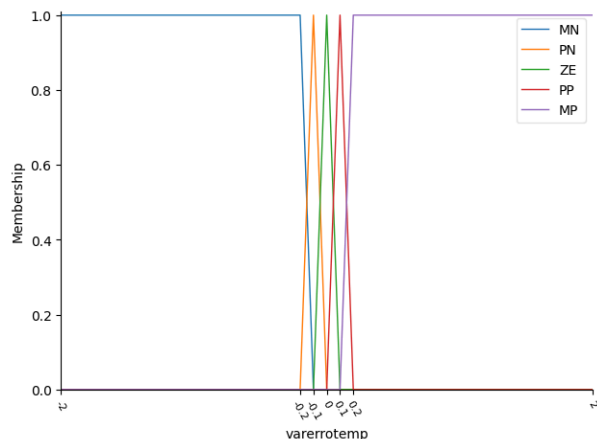
$$E_{\max} = PV_{\max} - SP_{\min} = 32 - 16 \rightarrow E_{\max} = 16^{\circ}\text{C}$$

### Gráfico das funções de pertinência

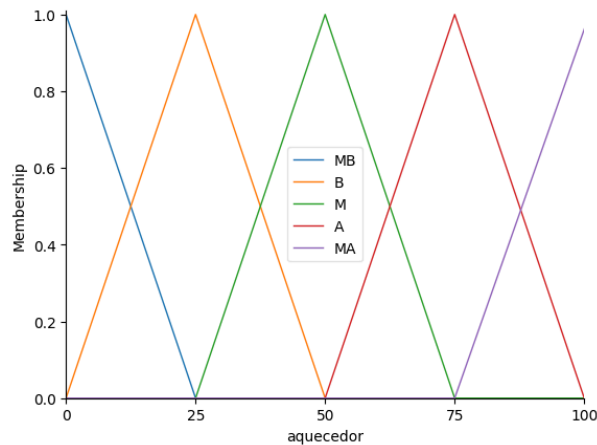
Com os limites do erro calculados e a definição da tolerância do erro, foi estabelecido o seguinte gráfico para a variável de entrada Erro:



Com a definição da variação máxima de temperatura e da tolerância da variação do erro, foi estabelecido o seguinte gráfico para a variável de entrada  $\Delta\text{Erro}$ :



Para a saída Potência do Sistema CRAC, foi definido 25% potência para os limites entre os termos linguísticos, estabelecendo o seguinte gráfico:



### **Definição da Base de Regras**

Para a definição da base de regras, foram analisadas as entradas e a saída do sistema de forma separada e, em seguida, como elas se relacionam.

#### **Análise da entrada Erro**

- Erro positivo → a saída é maior do que o setpoint, ou seja, a temperatura está acima da esperada, necessitando maior refrigeração;
- Erro negativo → a saída é menor do que o setpoint, ou seja, a temperatura está abaixo da esperada, necessitando menor refrigeração;

#### **Análise da entrada $\Delta$ Erro**

- $\Delta$ Erro positiva → a saída atual é maior do que saída anterior, ou seja, a temperatura está aumentando;
- $\Delta$ Erro negativa → a saída atual é menor do que saída anterior, ou seja, a temperatura está diminuindo;

#### **Análise da saída Potência do Sistema CRAC**

Os Sistemas CRAC são unidades especializadas de ar condicionado, sendo sua potência inversamente proporcional à temperatura. Dessa forma, quanto maior a potência, menor será a temperatura e quanto menor sua potência, maior será a temperatura.

Podemos dividir em 2 casos:

- **Diminuição da temperatura:**

Quando não há necessidade de esforço para diminuir a temperatura, a potência de saída será média.

Quando há necessidade de pouco esforço para diminuir a temperatura, a potência de saída será média.

Quando há necessidade de médio esforço para diminuir a temperatura, a potência de saída será alta.

Quando há necessidade de grande esforço para diminuir a temperatura, a potência de saída será muito alta.

- **Aumento da temperatura:**

Quando não há necessidade de esforço para aumentar a temperatura, a potência de saída será média.

Quando há necessidade de pouco esforço para aumentar a temperatura, a potência de saída será média.

Quando há necessidade de médio esforço para aumentar a temperatura, a potência de saída será baixa.

Quando há necessidade de grande esforço para aumentar a temperatura, a potência de saída será muito baixa.

### **Análise das relações entre as entradas Erro e $\Delta$ Erro**

Para essa análise, foram divididos 4 casos:

- **Caso 1:** Erro positivo e  $\Delta$ Erro negativa  $\rightarrow$  a temperatura está acima da esperada e diminuindo. Logo, está acontecendo o esperado, mas a temperatura ainda precisa diminuir.

Dentro desse caso, ainda podemos separar em 4 ocasiões:

- Erro pouco positivo e  $\Delta$ Erro muito negativo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está próxima da esperada e se aproximando rápido. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e não é necessário esforço.
  - Erro muito positivo e  $\Delta$ Erro muito negativo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está distante da esperada e se aproximando rápido. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário pouco esforço.
  - Erro pouco positivo e  $\Delta$ Erro pouco negativo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está próxima da esperada e se aproximando devagar. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário pouco esforço.
  - Erro muito positivo e  $\Delta$ Erro pouco negativo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está distante da esperada e se aproximando devagar. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário médio esforço.
- **Caso 2:** Erro negativo e  $\Delta$ Erro positiva  $\rightarrow$  a temperatura está abaixo da esperada e aumentando. Logo, está acontecendo o esperado, mas a temperatura ainda precisa aumentar.
- Dentro desse caso, ainda podemos separar em 4 ocasiões:
- Erro muito negativo e  $\Delta$ Erro pouco positivo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está distante da esperada e se aproximando devagar. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e é necessário médio esforço.
  - Erro pouco negativo e  $\Delta$ Erro pouco positivo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está próxima da esperada e se aproximando devagar. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e é necessário pouco esforço.
  - Erro muito negativo e  $\Delta$ Erro muito positivo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está distante da esperada e se aproximando rápido. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e é necessário pouco esforço.
  - Erro pouco negativo e  $\Delta$ Erro muito positivo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está próxima da esperada e se

aproximando rápido. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e não é necessário esforço.

- **Caso 3:** Erro negativo e  $\Delta$ Erro negativa  $\rightarrow$  a temperatura está abaixo da esperada e diminuindo. Logo, está acontecendo o contrário do esperado e é preciso aumentar a temperatura.

Dentro desse caso, ainda podemos separar em 4 ocasiões:

- Erro muito negativo e  $\Delta$ Erro muito negativo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está distante da esperada e se distanciando rápido. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e é necessário grande esforço.
  - Erro pouco negativo e  $\Delta$ Erro muito negativo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está próxima da esperada e se distanciando rápido. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e é necessário grande esforço.
  - Erro muito negativo e  $\Delta$ Erro pouco negativo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está distante da esperada e se distanciando devagar. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e é necessário grande esforço.
  - Erro muito negativo e  $\Delta$ Erro muito negativo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é pequeno. Logo a temperatura está próxima da esperada e se distanciando devagar. Dessa forma, deve-se aumentar a temperatura e é necessário médio esforço.
- **Caso 4:** Erro positivo e  $\Delta$ Erro positiva  $\rightarrow$  a temperatura está acima da esperada e aumentando. Logo, está acontecendo o contrário do esperado e é preciso diminuir a temperatura

Dentro desse caso, ainda podemos separar em 4 ocasiões:

- Erro pouco positivo e  $\Delta$ Erro pouco positivo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está próxima da esperada e se distanciando devagar. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário grande esforço.
- Erro pouco positivo e  $\Delta$ Erro pouco positivo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está próxima da esperada e se distanciando devagar. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário grande esforço.
- Erro muito positivo e  $\Delta$ Erro pouco positivo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é pequena. Logo a temperatura está distante da esperada e se distanciando devagar. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário grande esforço.
- Erro pouco positivo e  $\Delta$ Erro muito positivo  $\rightarrow$  o erro é pequeno e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está próxima da esperada e se distanciando rápido. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário grande esforço.
- Erro muito positivo e  $\Delta$ Erro muito positivo  $\rightarrow$  o erro é grande e a variação do erro é grande. Logo a temperatura está distante da esperada e se distanciando rápido. Dessa forma, deve-se diminuir a temperatura e é necessário grande esforço.

### Montagem tabela de regras

Dadas as análises feitas, foi montada a seguinte tabela de regras:

$\Delta\text{Erro} \backslash \text{Erro}$	MN	PN	ZE	PP	MP
MN	MB	MB		M	M
PN	MB	B		M	A
ZE					
PP	B	M		A	MA
MP	M	M		MA	MA

Dessa forma, era necessário completar as informações restantes, considerando não deixar saltos entre linhas e colunas e dando prioridade para potências baixas para um menor consumo de energia.

Analizando cada cenário:

- Erro zero e  $\Delta\text{Erro}$  muito negativa  $\rightarrow$  estava entre “muito baixa” e “média”, sendo escolhida então a potência baixa.
- Erro zero e  $\Delta\text{Erro}$  pouco negativa  $\rightarrow$  estava entre “baixa” e “média”, sendo escolhida então a potência baixa.
- Erro zero e  $\Delta\text{Erro}$  pouco positiva  $\rightarrow$  estava entre “média” e “alta”, sendo escolhida então a potência média.
- Erro zero e  $\Delta\text{Erro}$  pouco negativo  $\rightarrow$  estava entre “média” e “muito alta”, sendo escolhida então a potência alta.
- Erro muito negativo e  $\Delta\text{Erro}$  zero  $\rightarrow$  estava entre “muito baixa” e “baixa”, sendo escolhida então a potência muito baixa.
- Erro pouco negativo e  $\Delta\text{Erro}$  zero  $\rightarrow$  estava entre “baixa” e “média”, sendo escolhida então a potência baixa.
- Erro pouco positivo e  $\Delta\text{Erro}$  zero  $\rightarrow$  estava entre “média” e “alta”, sendo escolhida então a potência média.
- Erro muito positivo e  $\Delta\text{Erro}$  zero  $\rightarrow$  estava entre “alta” e “muito alta”, sendo escolhida então a potência alta.
- Erro zero e  $\Delta\text{Erro}$  zero  $\rightarrow$  estava entre “baixa” e “média” e entre, sendo escolhida então a potência baixa.

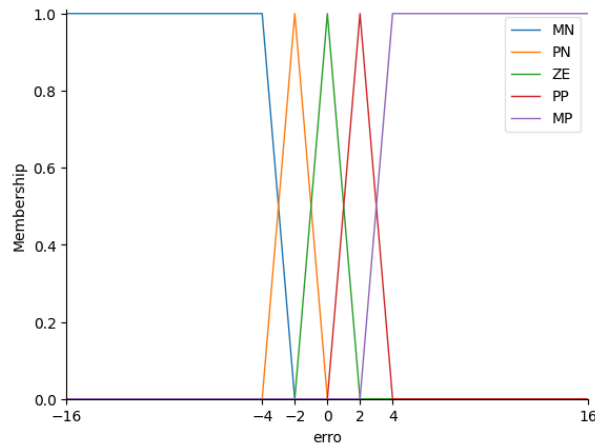
A tabela de regras finalizada pode ser vista a seguir.

$\Delta\text{Erro} \backslash \text{Erro}$	MN	PN	ZE	PP	MP
MN	MB	MB	B	M	M
PN	MB	B	B	M	A
ZE	MB	B	B	M	A
PP	B	M	M	A	MA
MP	M	M	A	MA	MA

## **Ajuste nas Funções de Pertinência**

Após a projeção do Sistema de Controle Fuzzy MISO, foram executados testes para a validação do sistema e análise ante a diferentes cenários, que são apresentados na documentação “Análise de Resultados”.

Com isso, foi definida uma alteração na tolerância ao erro para  $\pm 2^\circ\text{C}$ , estabelecendo o seguinte gráfico para a variável de entrada Erro:



## **Análise da Estratégia de Controle Fuzzy**

A estratégia de controle implementada apresenta uma ação preditiva, ao considerar a variação do erro como variável de entrada, que permite antecipar tendências, reduzindo overshoot e oscilações.

Além disso, possui transições suaves, por conta das regras de controle definidas, evitando mudanças bruscas de potência.

Outro ponto é a adequação física, por o controle Fuzzy e modelo térmico produzirem um comportamento compatível com um sistema CRAC real.

## **Diagramas de fluxo do algoritmo**

A Interface apresenta os gráficos de funções de pertinência, lê as variáveis de entrada do sistema (setpoint, temperatura inicial, temperatura externa e carga térmica) e:

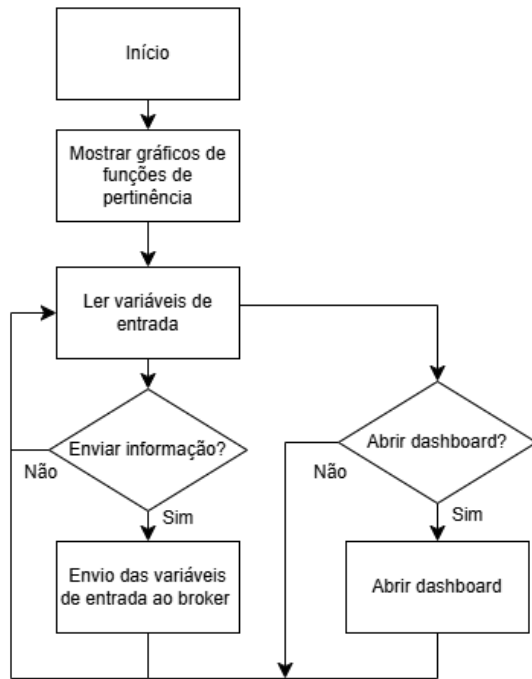
- Caso o usuário clique no botão de envio, envia essas informações ao broker e caso não, lê as variáveis novamente.
- Caso o usuário clique no botão de abrir o dashboard, abre a página do dashboard e lê as variáveis novamente e caso não, lê as variáveis novamente.

No intermédio, lê-se as variáveis de entrada do broker, calcula o erro e a variação do erro, fuzzifica o erro e a variação do erro, ativa as regras de agregação, defuzzifica a saída (potência do sistema CRAC), calcula a nova temperatura por meio da função de transferência e envia o erro e a temperatura atuais ao broker.

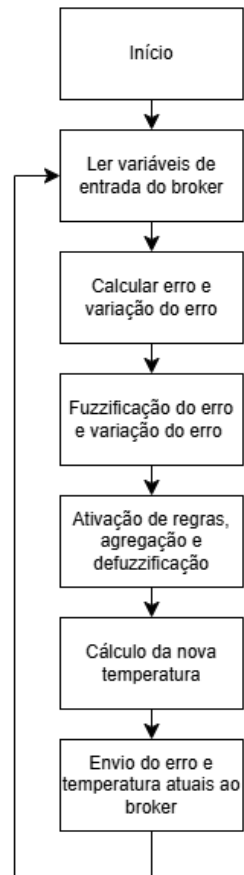
No dashboard, o erro e a temperatura atuais do broker e apresenta as informações.

O diagrama que representa esse fluxo está presente abaixo:

### Interface



### Intermédio



### Dashboard

