

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**LUAN MIGUEL ARRUDA**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CONTROLE DE VENTILADORES DE UMA TORRE  
DE RESFRIAMENTO INDUSTRIAL COM MODELAGEM FUZZY**

**Alegrete  
2025**

**LUAN MIGUEL ARRUDA**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CONTROLE DE VENTILADORES DE UMA TORRE  
DE RESFRIAMENTO INDUSTRIAL COM MODELAGEM FUZZY**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Giovani Guarienti Pozzebon

**Alegrete  
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A773e Arruda, Luan Miguel

Eficiência energética no controle de ventiladores de uma  
torre de resfriamento industrial com modelagem fuzzy / Luan  
Miguel Arruda.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade  
Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2025.

"Orientação: Giovani Guarienti Pozzebon".

1. Controle fuzzy. 2. Eficiência energética. 3. Torre de  
resfriamento. 4. Ventiladores. 5. Processos industriais. I.  
Título.

**LUAN MIGUEL ARRUDA**

**EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO CONTROLE DE VENTILADORES DE UMA  
TORRE DE RESFRIAMENTO INDUSTRIAL COM MODELAGEM FUZZY**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de  
Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal do Pampa,  
como requisito parcial para  
obtenção do Título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Trabalho defendido e aprovado em: 7 de julho de 2025.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon

Orientador

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto

UNIPAMPA

---

Prof. Dr. Micael Márcio Oliveira

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **FELIPE BOVOLINI GRIGOLETTO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2025, às 14:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **MICAEL MARCIO OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2025, às 14:39, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



Assinado eletronicamente por **GIOVANI GUARIENTI POZZEBON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/07/2025, às 14:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1773437** e o código CRC **414042B4**.

---

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e a colaboração de pessoas essenciais ao longo desta jornada.

Primeiramente, expresso minha gratidão ao professor Giovani Guarienti Pozzebon, pela orientação dedicada, pelos ensinamentos valiosos e pelo incentivo constante durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e comprometimento foram fundamentais para minha evolução acadêmica.

Agradeço também à professora Natalia Braun Chagas, por gentilmente permitir o uso da estrutura do laboratório do EIRE, viabilizando a realização do estudo.

Meu reconhecimento ao professor Bruno Boessio Vizzotto, pelas orientações e sugestões importantes nos primeiros passos deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos à servidora fonoaudióloga Marcele Finamor dos Santos, pelo incentivo e apoio para a concretização desta pesquisa.

Um agradecimento especial à Alegretense Shirley Melo de Oliveira, por sua calorosa hospitalidade durante minha estadia em Alegrete. Sua generosidade e acolhimento tornaram minha experiência na cidade muito mais leve e agradável.

Não poderia deixar de expressar minha imensa gratidão aos meus pais, pelo apoio incondicional em todas as etapas desta caminhada. Pelo incentivo, paciência e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo nos momentos mais desafiadores.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, obrigado!

"Nossa maior fraqueza está em desistir. O caminho mais certo de vencer é tentar mais uma vez."

Thomas Edison

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um controlador com lógica *fuzzy* para otimizar o ajuste de rotação dos ventiladores de uma torre de resfriamento em uma siderúrgica, visando melhorar a eficiência energética do processo. A torre utiliza ventiladores acoplados a motores elétricos para controlar a temperatura da água de saída, que deve permanecer abaixo de 49°C. O controle atual, com apenas duas velocidades, não maximiza o potencial energético do sistema, apesar de contar com inversores de frequência. A proposta é integrar a temperatura de saída da água no controle *fuzzy* e permitir ajustes intermediários na rotação dos ventiladores. Para isso, foi utilizado um modelo matemático da torre, simulado no software PSIM, para analisar o comportamento da planta e comparar o consumo de energia entre o controle atual e o novo, estimando a economia de energia gerada pelo controle *fuzzy*. Os resultados da simulação comprovaram que o controlador proposto é eficaz na redução do consumo energético e dos custos operacionais, ajustando dinamicamente a rotação dos ventiladores conforme a demanda real de resfriamento.

Palavras-chave: Controle *fuzzy*. Eficiência energética. Torre de resfriamento. Ventiladores. Otimização de processos industriais.

## **ABSTRACT**

This work aims to develop a fuzzy logic controller to optimize the fan speed adjustment of a cooling tower in a steel mill, with the goal of improving the energy efficiency of the process. The tower uses fans coupled to electric motors to control the outlet water temperature, which must remain below 49°C. The current control system, with only two speed settings, does not maximize the system's energy potential, despite having frequency inverters. The proposed solution integrates the outlet water temperature into the fuzzy control system and allows for intermediate fan speed adjustments. A mathematical model of the tower was used, simulated in the PSIM software, to analyze the plant's behavior and compare energy consumption between the current and new control systems, estimating the energy savings generated by the fuzzy control. The simulation results confirmed that the proposed controller is effective in reducing energy consumption and operational costs by dynamically adjusting the fan speed according to the actual cooling demand.

Keywords: Fuzzy control. Energy efficiency. Cooling tower. Fans. Industrial process optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfil de consumo de energia elétrica da indústria brasileira . . . . .	15
Figura 2 – Ativação dos ventiladores em função da temperatura . . . . .	16
Figura 3 – Representação de uma torre de resfriamento de contra fluxo induzido	20
Figura 4 – Ventilador do tipo axial de uma torre de resfriamento . . . . .	21
Figura 5 – Circuito de um inversor de frequência . . . . .	23
Figura 6 – Sistema de controle <i>fuzzy</i> . . . . .	24
Figura 7 – Placa do motor utilizado na torre de resfriamento . . . . .	27
Figura 8 – Modelo matemático da torre de resfriamento . . . . .	28
Figura 9 – Modelo matemático da torre de resfriamento para simulação . . . . .	33
Figura 10 – Modelo matemático da torre de resfriamento para simulação (ajustado)	33
Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de controle <i>fuzzy</i> proposto . . . . .	34
Figura 12 – Função de pertinência normalizada . . . . .	36
Figura 13 – Cálculo do valor de pertinência para as retas paralela e antiparalela no vetor discreto . . . . .	36
Figura 14 – Exemplo do processo de inferência para as 4 regras ativadas e a defuzzificação utilizando o cálculo do centro de gravidade . . . . .	39
Figura 15 – Simulação do projeto no PSIM . . . . .	41
Figura 16 – Relação entre potência e velocidade de rotação para cargas quadrá- ticas . . . . .	42
Figura 17 – Resposta dinâmica da temperatura de saída da água em função da variação da vazão de ar . . . . .	43
Figura 18 – Resposta térmica da planta com ventilação máxima . . . . .	44
Figura 19 – Variação da temperatura de entrada e saída da água em relação à temperatura de referência . . . . .	45
Figura 20 – Comportamento da vazão de ar com variação da temperatura de entrada da água . . . . .	46
Figura 21 – Ajuste da vazão de ar e indicação da frequência individual dos ven- tiladores . . . . .	47
Figura 22 – Relação entre potência, vazão de ar e frequência dos ventiladores para configurações de 3 a 6 ventiladores . . . . .	48
Figura 23 – Relação entre potência e temperatura da água para configurações de 3 a 6 ventiladores . . . . .	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais dados da torre de resfriamento . . . . .	26
Tabela 2 – Calores específicos . . . . .	30
Tabela 3 – Regras do controlador <i>fuzzy</i> . . . . .	37

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CA – Corrente Alternada  
CC – Corrente Contínua  
EE – Eficiência Energética  
Hz – Hertz  
MME – Ministério de Minas e Energia  
RPM – Rotações Por Minuto  
NG – Negativo Grande  
NM – Negativo Médio  
NP – Negativo Pequeno  
ZZ – Zero  
PP – Positivo Pequeno  
PM – Positivo Médio  
PG – Positivo Grande

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\dot{m}_{H_2O}$  – vazão de água [kg/s]  
 $\dot{m}_{ar}$  – vazão de ar [kg/s]  
 $T_{H_2O\_E}$  – temperatura de entrada da água [°C]  
 $T_{H_2O\_S}$  – temperatura de saída da água [°C]  
 $T_{ar\_E}$  – temperatura de entrada do ar [°C]  
 $T_{ar\_S}$  – temperatura de saída do ar [°C]  
 $T_{BU}$  – temperatura de bulbo úmido [°C]  
 $P_e$  – perda de água por evaporação [%]  
 $H_{ench}$  – altura do enchimento [m]  
 $H_{tor}$  – altura da torre [m]  
 $A_{b,ench}$  – área da base do enchimento [m<sup>2</sup>]  
 $Q$  – capacidade nominal [kJ/s]  
 $m_{H_2O}$  – massa da água [kg]  
 $m_{ar}$  – massa do ar [kg]  
 $Le_f$  — número de Lewis referente ao enchimento ou fator de Lewis [adimensional]  
 $NUT$  — número de Unidades de Transferência [adimensional]  
 $C_{H_2O}$  – calor específico da água [KJ/kg.°C]  
 $C_{ar}$  – calor específico do ar [KJ/kg.°C]  
 $L_m$  – calor latente da água [kJ/kg]  
 $V_T$  — volume total ou volume da torre [m<sup>3</sup>]  
 $R$  – resistência térmica [°C/W]  
 $h_c$  — coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m<sup>2</sup> .°C]  
 $A$  – área de contato entre os fluidos [m<sup>2</sup>]  
 $\omega_1$  – umidade específica do ar na entrada da torre [kg/kg]  
 $\omega_2$  – umidade específica do ar na saída da torre [kg/kg]  
 $\mu(x)$  – função de pertinência [adimensional]  
 $\varepsilon$  – efetividade do trocador de calor [adimensional]  
 $e_k$  – erro atual [adimensional]  
 $e_{k-1}$  – erro anterior [adimensional]  
 $\Delta_e$  – variação do erro [adimensional]  
 $f_k$  – frequência de ajuste dos ventiladores (atual) [Hz]  
 $f_{k-1}$  – frequência de ajuste dos ventiladores (anterior) [Hz]  
 $\delta f_k$  – valor de ajuste frequência dos ventiladores [adimensional]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivo geral	17
1.2	Objetivos específicos	17
1.3	Justificativa	17
1.4	Organização do trabalho	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
2.1	Torre de resfriamento	19
2.1.1	Princípio de funcionamento de uma torre de resfriamento	19
2.1.2	Terminologia de torre de resfriamento	20
2.1.3	Ventilador	21
2.1.3.1	Motor elétrico	22
2.2	Lógica <i>fuzzy</i>	24
2.2.1	Conjuntos <i>fuzzy</i> e funções de pertinência	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
3.1	Especificações da torre de resfriamento Alpina	26
3.1.1	Cálculo da vazão de ar estimada	27
3.2	Modelo matemático de torre de resfriamento	28
3.3	Projeto final do controlador	34
3.4	Simulação	39
3.5	Consumo de cargas quadráticas	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>43</b>
4.1	Comportamento da planta sem ação de controle: resposta térmica da torre de resfriamento	43
4.2	Comportamento da planta com ação de controle: resposta térmica da torre de resfriamento	45
4.3	Análise da potência requerida para o resfriamento da torre com diferentes configurações de ventiladores	47
4.4	Comparação das potências consumidas com e sem controle <i>fuzzy</i>	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>52</b>

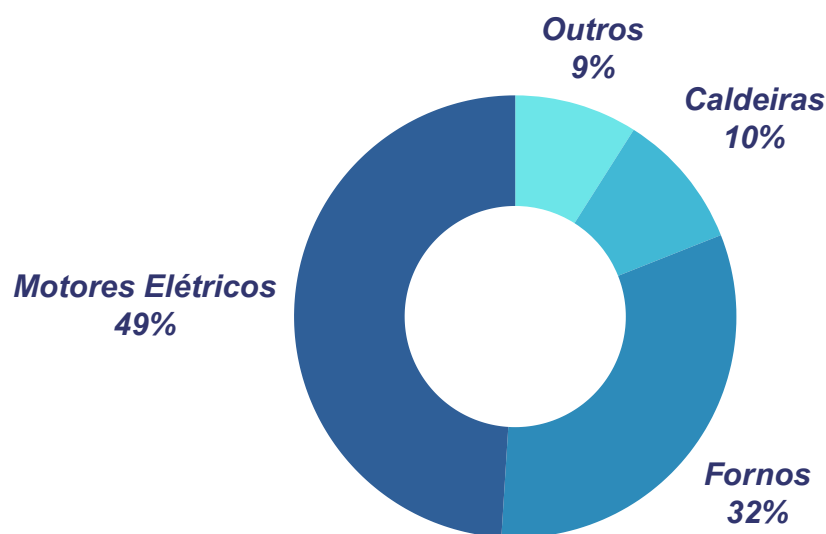
**REFERÊNCIAS . . . . . 53**

## 1 INTRODUÇÃO

A concepção de eficiência energética tem se mostrado cada vez mais relevante no cenário atual, devido à tendência mundial sobre uso consciente de energia elétrica, redução dos impactos ambientais e à incentivos governamentais. Eficiência Energética (EE) pode ser explicada como medidas e atividades que visam evitar o consumo desnecessário de energia elétrica, sem comprometer a qualidade do serviço fornecido (MOREIRA, 2021). As empresas têm buscado processos produtivos mais eficientes em termos energéticos e sustentáveis, adotando medidas como a modernização de equipamentos, o emprego de energias renováveis e implementação de sistemas de gerenciamento de energia.

Segundo Moreira, os motores elétricos são os equipamentos que mais consomem dentro da indústria brasileira, sendo 49% do consumo total como pode ser observado na Figura 1. A parte mais crítica dos motores elétricos é o instante da partida que precisam de uma alta corrente para sair do estado de inércia. Os principais métodos de partida de motores elétricos disponíveis são: partida direta, partida estrela-triângulo e partida compensadora. Além disso, existem as partidas eletrônicas, que são mais utilizadas no meio industrial, como soft-starter e inversor de frequência, que suavizam o pico de corrente na partida dos motores de indução e permitem um controle preciso de velocidade (FRANCHI, 2009).

Figura 1 – Perfil de consumo de energia elétrica da indústria brasileira

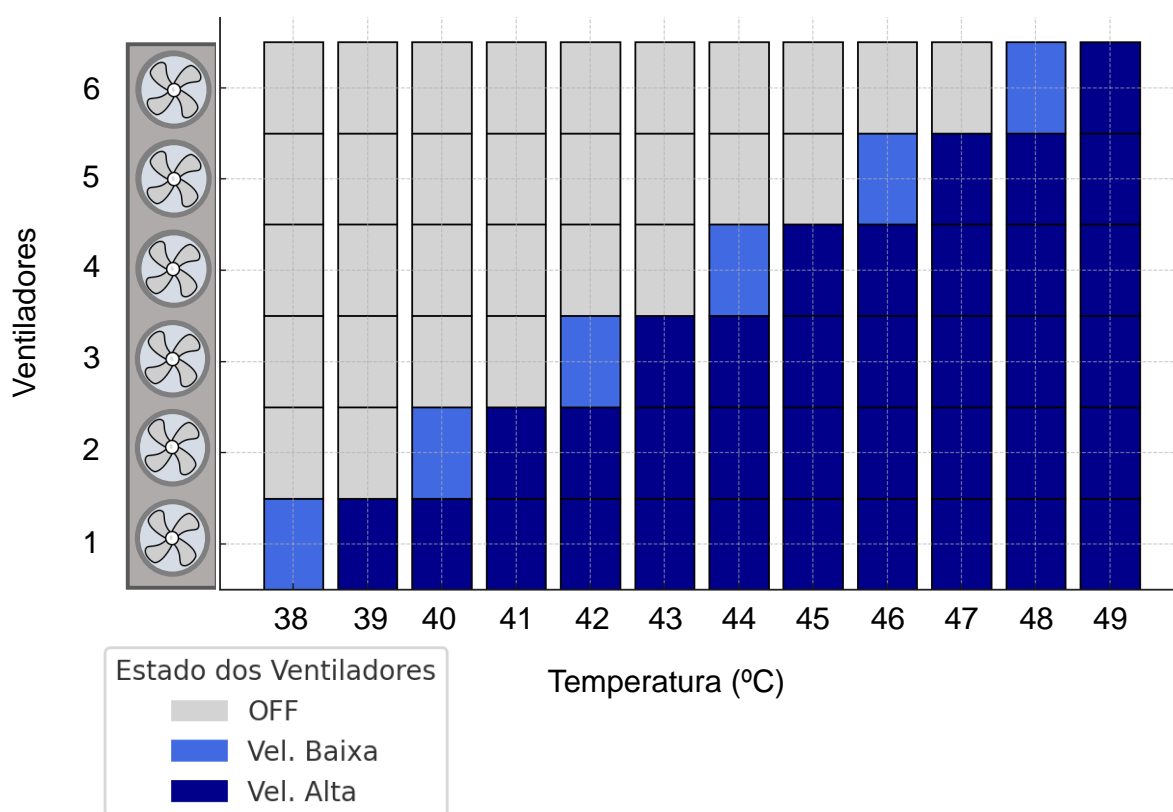


Fonte: Adaptado de Moreira (2021, p. 404)

Uma planta siderúrgica real em estudo para este trabalho contém um equipamento chamado de torre de resfriamento, que utiliza motores elétricos. Tem a função

de resfriar um processo industrial através da recirculação de água em um sistema fechado. A rotação dos motores acoplados aos ventiladores da torre desempenha um papel importante no resfriamento da água recirculada. Quanto maior a rotação dos ventiladores, maior capacidade de resfriamento. No caso desta planta, o controle do equipamento age para manter a temperatura de saída da água abaixo de 49°C. A Figura 2 mostra que cada um dos seis ventiladores opera com apenas duas velocidades: baixa e alta, e são acionados/desligados em sequência, de acordo com a temperatura de saída da água. A siderúrgica em questão enfrenta dificuldades relacionados ao alto consumo de energia elétrica, especialmente no processo de resfriamento, que representa uma parte significativa dos custos operacionais. Apesar de a torre já possuir inversores de frequência para ajustar a rotação de cada motor, o controle atual não aproveita plenamente o potencial de otimização energética que o equipamento pode obter.

Figura 2 – Ativação dos ventiladores em função da temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento de um controlador baseado em lógica *fuzzy* para ajustar a rotação dos ventiladores da torre de resfriamento, de acordo com a demanda real de resfriamento, visando um gerenciamento inteligente da

energia elétrica. O controlador considerará exclusivamente a temperatura de saída da água como variável de controle. Além disso, será incorporada a possibilidade de ajustes intermediários na rotação do motor, entre os valores de baixa e alta, para otimizar o desempenho. O controle projetado será simulado em um modelo matemático da torre, utilizando o *software* PSIM, com o objetivo de analisar e discutir o comportamento da planta por meio dos gráficos gerados. A comparação do consumo de energia entre o controle tradicional e o novo controle será realizada, e, ao final, será estimada a porcentagem de economia energética proporcionada pelo projeto.

### **1.1 Objetivo geral**

Controlar de forma eficiente a temperatura da água de saída de uma torre de resfriamento utilizando um sistema de lógica *fuzzy*, onde a saída do sistema atende como referência de velocidade para os inversores de frequência controlar os ventiladores.

### **1.2 Objetivos específicos**

Obter um modelo matemático para a torre de resfriamento que se aproxime do comportamento real observado; projetar um controlador para os ventiladores utilizando lógica *fuzzy*, com a temperatura de saída da água como variável de entrada e permitindo ajustes intermediários nas velocidades dos ventiladores; analisar o desempenho do controle por meio da simulação do modelo matemático; e, finalmente, avaliar a eficiência energética do controlador com base nos dados obtidos durante a simulação.

### **1.3 Justificativa**

Com o avanço tecnológico e busca de maiores lucros, as indústrias estão cada vez mais aumentando sua produtividade, buscando otimizar seus processos. Ao introduzir um sistema de controle eficiente dos ventiladores, é possível ajustar sua velocidade de acordo com a demanda real de resfriamento. Isso evita o funcionamento em capacidade máxima quando não é necessário, reduzindo o consumo de energia elétrica e aumentando a vida útil dos equipamentos.

## 1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 apresenta a introdução, abordando o contexto, o problema, os objetivos da pesquisa e a justificativa. No capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica sobre o funcionamento das torres de resfriamento, os ventiladores, motores elétricos e a teoria de controladores *fuzzy*. O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento do controlador *fuzzy*, incluindo a modelagem matemática da torre de resfriamento e as simulações no software PSIM. O capítulo 4 apresenta os resultados das simulações, comparando o desempenho da planta com e sem o controle *fuzzy*, além das melhorias na eficiência energética. Por fim, o capítulo 5 sintetiza as conclusões, destacando os benefícios do controle *fuzzy* e propondo sugestões para futuras pesquisas e implementações em outras plantas industriais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os fundamentos teóricos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Serão abordados os princípios de funcionamento das torres de resfriamento, detalhando o processo de transferência de calor e massa entre a água e o ar, além de explorar os conceitos e aplicações da lógica *fuzzy*.

### 2.1 Torre de resfriamento

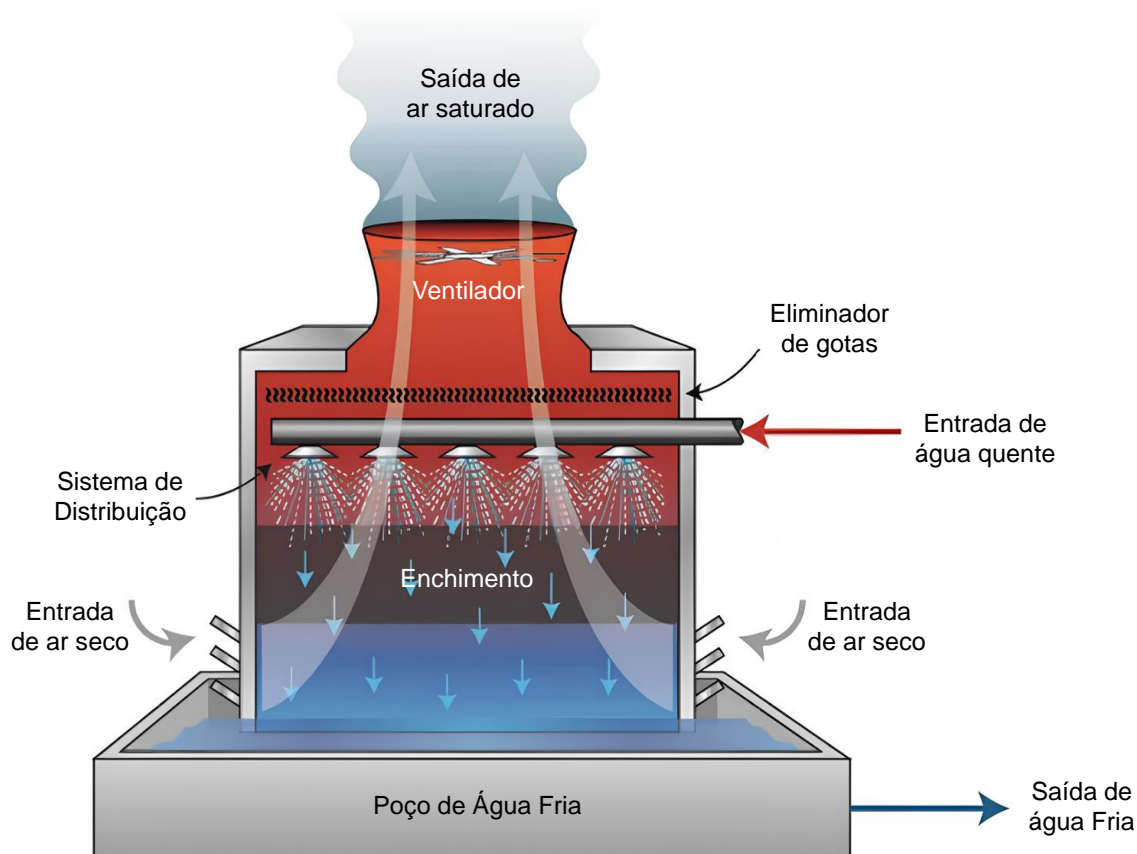
A torre de resfriamento é um equipamento amplamente utilizado para dissipar o calor excessivo em processos industriais. Seu papel principal é remover a carga térmica de um fluxo de água e dispersá-la através do ar atmosférico. Este processo envolve questões de troca de calor e massa entre os fluidos água e ar. Do ponto de vista ambiental, esse equipamento se sobressai por evitar o desperdício de água, visto que opera com um sistema fechado, permitindo a reutilização contínua de água, o que contribui para a sustentabilidade e preservação dos recursos hídricos (MELLO, 2008).

#### 2.1.1 Princípio de funcionamento de uma torre de resfriamento

O resfriamento da água em uma torre de resfriamento ocorre por meio da evaporação e da transferência de calor entre a água e o ar. A água quente, proveniente de uma máquina ou de um processo industrial, entra no topo da torre através de um sistema de distribuição com bicos pulverizadores, sendo despejada uniformemente sobre o enchimento em forma de gotículas. O ventilador, localizado na parte superior, induz a entrada de ar ambiente pelas aberturas laterais inferiores. O ar entra em contato direto com a água que desce, promovendo a troca de calor por convecção, o que resulta na perda de calor da água para o ar. Uma pequena parte da água evapora, e o ar saturado (quente e úmido) é expelido para a atmosfera. Por fim, a água já resfriada desce para o poço de água fria, sendo então bombeada novamente para a fonte de calor, reiniciando o ciclo de resfriamento de forma contínua. Existem diversos modelos de torres de resfriamento industriais com configurações variadas, cada um possuindo vantagens, desvantagens e aplicações específicas conforme a demanda do projeto. As configurações mais comuns dessas torres de resfriamento para grandes processos são do tipo de fluxo de contracorrente e fluxo cruzado com enchimento e de tiragem mecânica. Elas se diferenciam pela forma de distribuição de água na torre, para conseguir o melhor contato com ar ascendente (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, s.d.). As torres de fluxo contracorrente, como pode ser vista na Figura 3, têm

como vantagens uma área ocupada reduzida, uma altura menor de entrada de água, menor risco de recirculação de ar (ALPINA, 1978).

Figura 3 – Representação de uma torre de resfriamento de contra fluxo induzido



Fonte: Adaptado de Chemtreat (s.d.).

### 2.1.2 Terminologia de torre de resfriamento

Há muitas terminologias utilizadas para torres de resfriamento, que são definidas nesta seção para melhor compreensão do trabalho. Segundo Cheremisinoff e Cheremisinoff (1981) e Hensley (1985), os principais termos são:

**Temperatura de Bulbo Seco** – A temperatura do ar ambiente medida por um termômetro comum, onde o bulbo não está envolvido de água (seco), expresso em graus Celsius (°C).

**Temperatura de Bulbo Úmido** – é a temperatura do ar ambiente medida por um termômetro com bulbo úmido mantido por um pavio, com circulação de ar, dado em graus Celsius (°C). É um importante dado para dimensionamento da torre, pois o valor indica o limite mínimo de temperatura de resfriamento da água de saída.

**Approach ou Aproximação ao Bulbo Úmido** – Medida da diferença de temperatura de saída de água da torre e a temperatura de bulbo úmido do ar ambiente.

Range – Diferença de temperatura da água quente que entra na torre e a temperatura de saída da água resfriada.

Blowdown (Purga) – descarte de uma pequena quantidade de água da bacia com o objetivo de diminuir a concentração de sólidos de processos na água devido à evaporação.

Arraste de gotículas (drift loss) – perda de gotículas de água da torre que são arrastadas por ventos.

Make-Up — reposição de água que foi perdida por evaporação, arraste de gotículas (drift loss), blowdown e outros vazamentos não conhecidos.

Célula – uma unidade independente com seu próprio sistema de distribuição de água, ventilador, motor e com paredes divisórias. Uma torre pode conter várias células.

Torres de tiragem mecânica – operam com ventiladores que direcionam o ar atmosférico para dentro da estrutura, permitindo um controle preciso do fluxo de entrada de ar.

### 2.1.3 Ventilador

As torres de resfriamento de tiragem mecânica, que são o foco deste trabalho, diferentemente das de tiragem natural, nas quais o ar flui naturalmente dentro da estrutura da torre, utilizam conjuntos de pás acopladas a motores elétricos localizados no topo da torre para induzir um fluxo contínuo de ar ambiente em quantidade adequada para a dissipação do calor (ZIEHL-ABEGG, s.d.). Há dois tipos de ventiladores mais comuns nos projetos de torre: axiais e centrífugos. Os ventiladores axiais (figura 4) são projetados para mover grandes vazões de ar com um leve aumento de pressão.

Figura 4 – Ventilador do tipo axial de uma torre de resfriamento



Fonte: Refrigeração e ar (s.d.).

Eles destacam-se por seu baixo custo, sendo adequados para torres de qualquer tamanho. Podem ser fabricados em metal ou até mesmo com pás de plástico, devido ao custo e boa resistência do material. Já os ventiladores centrífugos possuem uma carcaça e um rotor, normalmente empregados em dupla aspiração lateral. São ideais para pequenas vazões de ar e pressões mais altas. Destaca-se por sua robustez, composição metálica e dimensões compactas (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, s.d.).

### **2.1.3.1 Motor elétrico**

Como mencionado anteriormente, os motores elétricos são acoplados aos ventiladores para promover a circulação de ar dentro da torre, facilitando o processo de transferência de calor e massa da água para a atmosfera. É essencial que sejam utilizados motores com resistência à corrosão, à umidade e a altas temperaturas, visto que operam em condições de alta umidade. Os motores de indução trifásicos são os mais empregados devido à sua durabilidade em ambientes industriais e ao seu baixo custo.

A partida de motores elétricos é a etapa mais crítica do processo, pois durante a partida ocorre um pico de corrente significativamente mais alto que a corrente nominal, decorrente da transição do estado de inércia para o estado de movimento do motor. Esse fenômeno pode ocasionar sobrecargas na rede de alimentação e acionamento indevido de dispositivos de proteção. Para contornar esse problema, podem ser empregados dispositivos de partida eletrônica como soft-starters ou inversores de frequência. O soft-starter controla a partida e a parada do motor de forma gradual, limitando a corrente e o torque, mas não permite variar a velocidade do motor durante a operação nominal. Já o inversor de frequência oferece a vantagem de, além de suavizar a corrente de partida no momento do acionamento dos motores, também pode variar a rotação do motor, trazendo mais controle sobre o processo de troca térmica e a eficiência energética do sistema (FRANCHI, 2014). Sendo assim, o inversor de frequência pode se tornar um equipamento essencial para a otimização energética em torres de resfriamento, especialmente quando utilizado em conjunto com técnicas avançadas de controle, como a modelagem *fuzzy*.

Antes da chegada do inversor de frequência, apenas os motores elétricos de corrente contínua possuem um controle de velocidade preciso, porém o alto custo do equipamento e a exigência de alimentação através do retificador de tensão torna sua aplicação inviável. Com a evolução da eletrônica de potência e da automação indus-

trial, surgiu no mercado o inversor de frequência que possibilitou o controle de velocidade em motores de indução (FRANCHI, 2014). O funcionamento do equipamento ocorre por meio da variação da frequência da fonte de alimentação, o que permite controlar a velocidade de rotação do motor. A Figura 7 mostra o circuito de um inversor de frequência, que é alimentado por uma tensão trifásica. Essa tensão passa por um retificador de onda completa, que converte a tensão CA (corrente alternada) em CC (corrente contínua). O barramento CC filtra a saída do retificador, suavizando as ondulações da tensão irregular e aproximando-a de uma tensão CC estável. Após a filtragem, o inversor recebe essa tensão CC e gera uma forma de onda CA com frequências variáveis (PETRUZELLA, 2013).

A velocidade de rotação de um motor pode ser determinada pela equação (1), que estabelece a relação entre a frequência da rede e o número de polos (PETRUZELLA, 2013).

$$n = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.1)$$

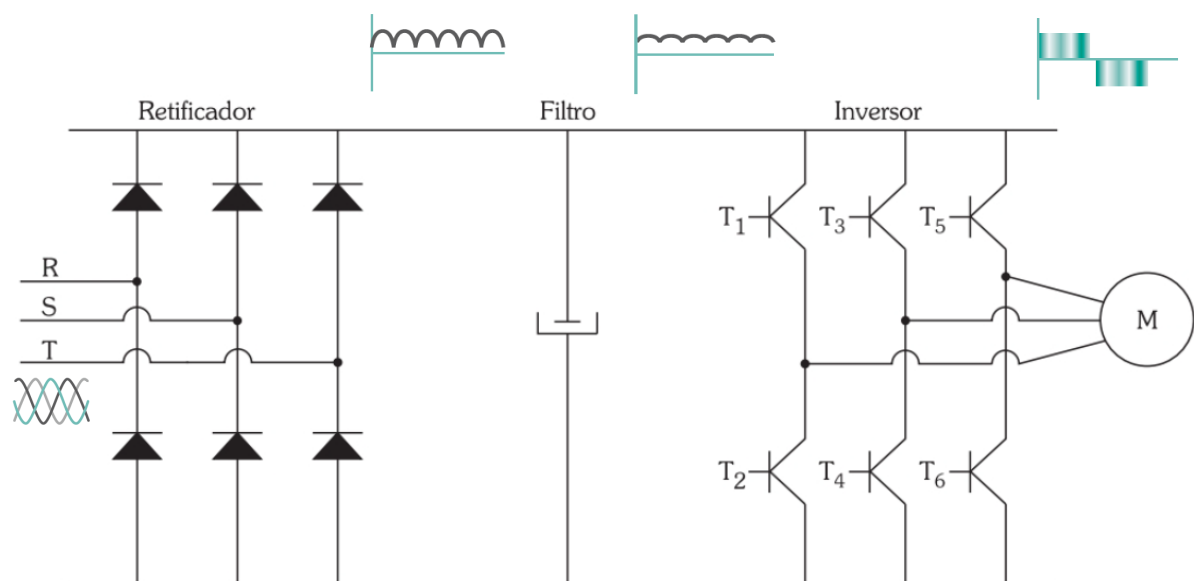
Onde:

$n$  = número de rotações por minuto (em RPM);

$f$  = frequência da rede de alimentação (em Hertz, Hz);

$P$  = número de polos do motor.

Figura 5 – Circuito de um inversor de frequência



Fonte: Adaptado de Franchi (2009).

A velocidade de rotação de um motor depende de suas características, como o número de polos, o qual é fixo. Assim, uma das formas de alterar a velocidade de rotação de um motor é variar a frequência, o que pode ser facilmente realizado com o uso de um inversor de frequência.

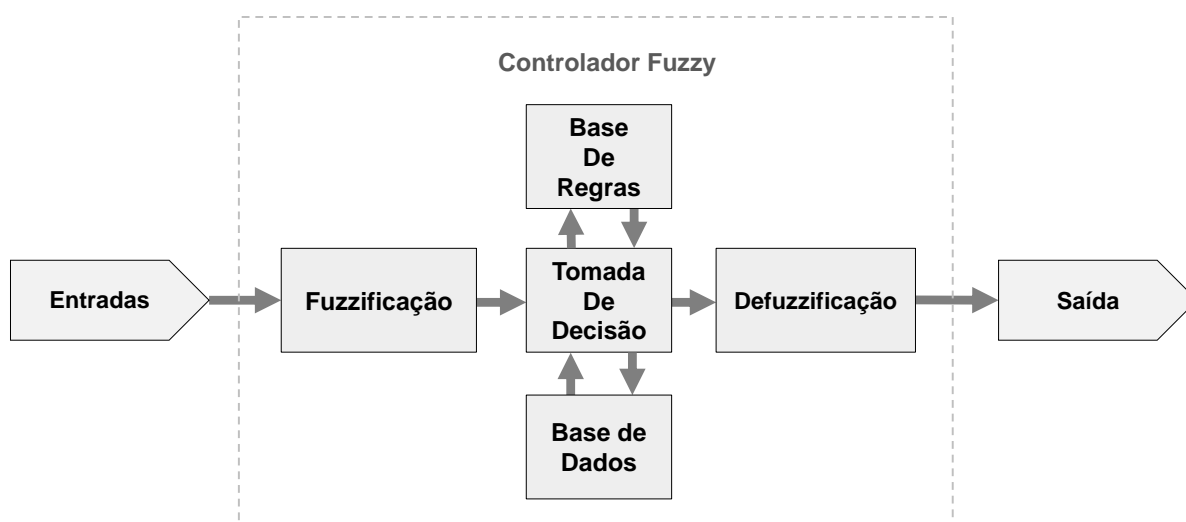
## 2.2 Lógica *fuzzy*

A lógica *fuzzy* pode ser considerada um sistema inteligente capaz de resolver problemas de maneira mais próxima ao raciocínio humano, incluindo o raciocínio impreciso característico dos humanos, o que justifica o nome “*fuzzy*”. O termo “*fuzzy*”, originado do inglês, traduz-se como incerto, impreciso, difuso ou nebuloso, refletindo a forma como lida com informações que não são exatamente claras ou definidas (SIMÕES; SHAW, 2004).

Controladores tradicionais, como o PID, operam com uma única entrada e uma única saída, enquanto controladores *fuzzy* são capazes de gerenciar multiobjetivos ao mesmo tempo, obtendo uma estratégia de controle mais adaptativa (SIMÕES; SHAW, 2004).

A Figura 6 mostra um sistema de controle *fuzzy*, que é uma estrutura baseada na lógica *fuzzy*. Esse sistema é separado em cinco partes: fuzzificação, tomada de decisão, base de regras, base de dados e defuzzificação.

Figura 6 – Sistema de controle *fuzzy*



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

As entradas, desse sistema, são classificadas como precisas, não-*fuzzy*, com os valores provindo de sensores que medem grandezas físicas ou de outros dispositivos. O processo de fuzzificação converte os dados de entrada em conjuntos *fuzzy*,

permitindo que as regras previamente definidas sejam ativadas. Já a tomada de decisão é responsável pela aplicação das regras e definir uma saída de conjunto *fuzzy*, com base nas regras estabelecidas pelo projetista (TANSCHHEIT, 2004). Com o conjunto *fuzzy* de saída obtido a partir do processo de tomada de decisão, ocorre a etapa final, chamada defuzzificação, é onde o valor *fuzzy* é convertido em um valor numérico discreto e preciso. Esse valor é essencial para que o controlador execute uma ação concreta sobre o sistema (SIMÕES; SHAW, 2004).

### 2.2.1 Conjuntos *fuzzy* e funções de pertinência

Em sistemas *fuzzy*, as operações de conjuntos são utilizadas para obter um mapeamento de entrada-saída, de maneira semelhante às funções de transferência em sistemas lineares. A pertinência ( $\in$ ) de um elemento  $x$  a um conjunto  $A$  pode ser representada como  $x \in A$ . A função de pertinência  $\mu_A(x)$  determina o grau de pertencimento do elemento  $x$  ao conjunto  $A$ , dentro do universo  $U$ , como descrito por (POZZEBON, 2013):

$$\mu_A(x) = A \rightarrow [0, 1]; x \in A \quad (2.2)$$

Onde  $\mu_A(x)$  assume valores no intervalo  $[0, 1]$ , podendo ser números fracionários dentro deste intervalo. Nesse contexto, a função de pertinência serve como uma representação gráfica e numérica, associando graus de pertencimento a valores discretos dentro do universo da variável em questão, conforme indicado por (SIMÕES; SHAW, 2004).

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos para o desenvolvimento e implementação do controlador *fuzzy* para ajuste da rotação dos ventiladores da torre de resfriamento. A metodológica inclui a definição do controlador e a modelagem matemática da torre, a simulação do sistema no software PSIM.

#### 3.1 Especificações da torre de resfriamento Alpina

A torre de resfriamento atualmente em operação, fabricada pela empresa Alpina, foi projetada há aproximadamente 30 anos. Desde então, opera de forma contínua, 24 horas por dia, sendo interrompida apenas uma vez ao ano para manutenção programada. Trata-se de um modelo do tipo contracorrente, composto por seis células e com um *range* térmico de 15°C. As principais características de projeto estão detalhadas na Tabela 1. Ressalta-se que, diante da ausência de alguns dados, foi necessário estimar determinados parâmetros.

Tabela 1 – Principais dados da torre de resfriamento

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Vazão de água	$\dot{m}_{H_2O}$	1250	kg/s
Vazão de ar	$\dot{m}_{ar}$	3600*	kg/s
Temperatura de entrada da água	$T_{H_2O\_E}$	60	°C
Temperatura de saída da água	$T_{H_2O\_S}$	45	°C
Temperatura de entrada do ar	$T_{ar\_E}$	24*	°C
Temperatura de saída do ar	$T_{ar\_S}$	40*	°C
Temperatura de bulbo úmido	$T_{BU}$	26,7	°C
Perda de água por evaporação	$P_e$	2	%
Altura do enchimento	$H_{enc}$	1	m
Altura da torre	$H_{tor}$	6	m
Área da base do enchimento	$A_{b.enc}$	108*	m <sup>2</sup>
Capacidade nominal	$Q$	78487,5	KJ/s
Massa da água	$m_{H_2O}$	12000*	kg
Massa do ar	$m_{ar}$	240*	kg

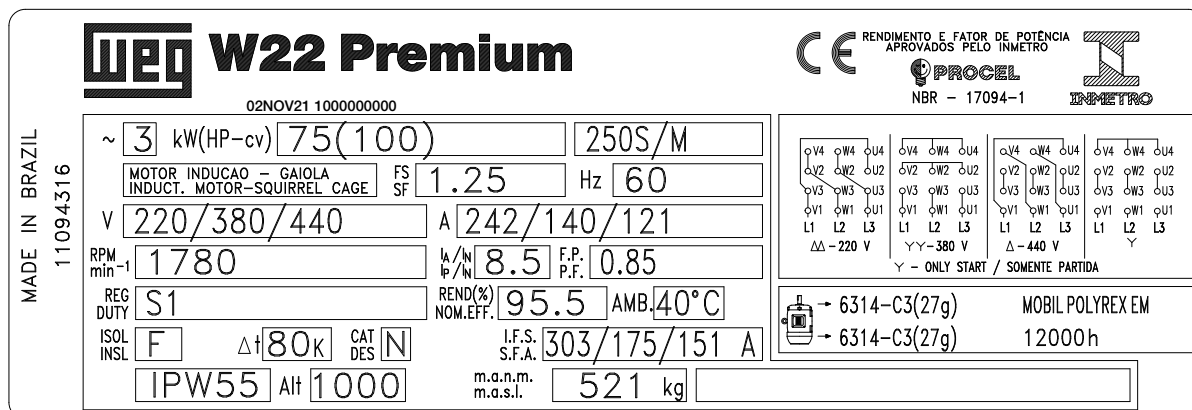
\* Valores estimados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Cada um dos seis motores responsáveis pelo acionamento dos ventiladores da torre de resfriamento possui potência nominal de 75 kW (100 CV). A Figura 7 apre-

senta a placa de identificação de um dos motores, na qual estão especificadas, de forma detalhada, suas principais características técnicas.

Figura 7 – Placa do motor utilizado na torre de resfriamento



Fonte: WEG (2022).

### 3.1.1 Cálculo da vazão de ar estimada

A vazão de ar é um parâmetro essencial para a simulação da operação da torre de resfriamento. No entanto, devido à indisponibilidade dos dados originais do projeto, foi necessário estimá-la com base em parâmetros conhecidos. A alternativa adotada consistiu em utilizar a potência nominal do motor que aciona o ventilador, igual a 75 kW, como referência para o cálculo.

Segundo Çengel e Boles (2011), a análise energética de volumes de controle em regime permanente permite estimar a potência útil fornecida a um escoamento de fluido pela expressão da Equação 3.1:

$$P_u = \dot{V} \cdot \Delta P \quad (3.1)$$

onde  $P_u$  é a potência útil (W),  $\dot{V}$  é a vazão volumétrica de ar (m<sup>3</sup>/s), e  $\Delta P$  é a pressão estática imposta pelo ventilador (Pa). Essa forma simplificada é válida para escoamentos incompressíveis com variações desprezíveis de altura e velocidade, o que se aplica ao caso de torres de resfriamento de contato direto, nas quais a água entra em contato direto com o ar ambiente, promovendo o resfriamento principalmente por evaporação.

Isolando a vazão volumétrica e considerando uma eficiência global do sistema motor-ventilador ( $\eta$ ) de 70%, tem-se a Equação 3.2:

$$\dot{V} = \frac{P \cdot \eta}{\Delta P} = \frac{75\,000 \cdot 0,7}{100} = 525 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.2)$$

Em seguida, a vazão mássica é calculada pela multiplicação da vazão volumétrica pela densidade do ar ( $\rho$ ), assumida como  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , valor típico para condições atmosféricas padrão, conforme a Equação 3.3:

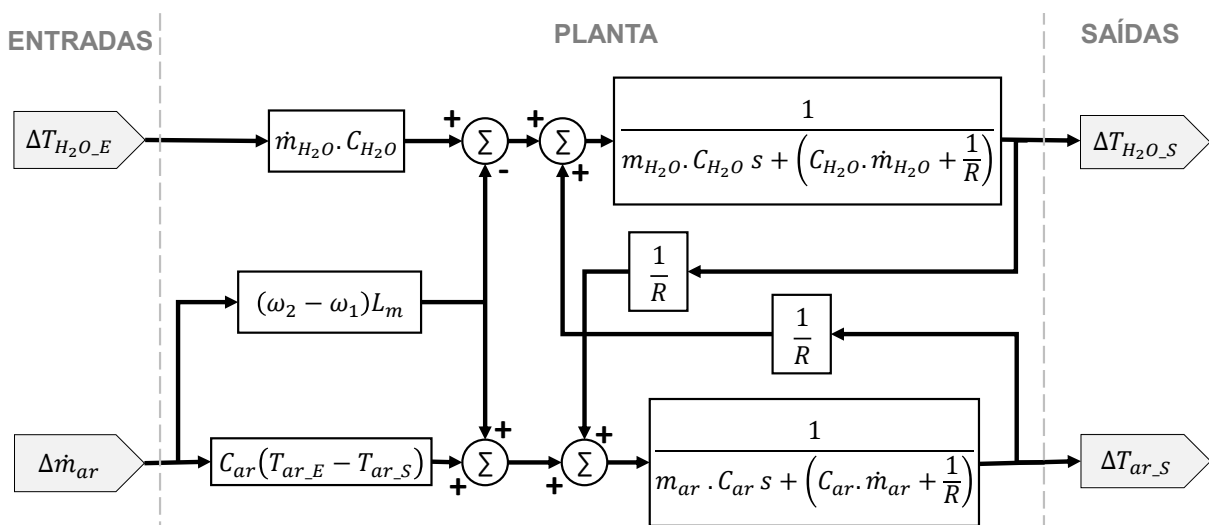
$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} = 1,2 \cdot 525 = 630 \text{ kg/s} \quad (3.3)$$

Dessa forma, estimou-se uma vazão mássica de ar de aproximadamente  $600 \text{ kg/s}$  por ventilador, totalizando  $3\,600 \text{ kg/s}$  para os seis ventiladores da torre. Esse valor foi adotado como base para as simulações realizadas neste trabalho.

### 3.2 Modelo matemático de torre de resfriamento

O modelo matemático adotado para representar, de forma aproximada, o comportamento de uma torre de resfriamento real foi desenvolvido por Carvalho (2014). Trata-se de um modelo dinâmico que simula o funcionamento de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente. A Figura 15 apresenta o diagrama de blocos da planta da torre, adaptado de seu Trabalho de Conclusão de Curso.

Figura 8 – Modelo matemático da torre de resfriamento



Fonte: Adaptado de Carvalho (2014).

O modelo possui como variáveis de entrada a temperatura da água na entrada da torre ( $T_{H_2O_E}$ ) e a vazão de ar de entrada ( $\dot{m}_{ar}$ ). As variáveis de saída são a

temperatura da água na saída da torre ( $T_{H_2O\_S}$ ) e a temperatura do ar saturado na saída ( $T_{ar\_S}$ ).

Esse modelo genérico de torre de resfriamento descreve um trocador de calor evaporativo de contracorrente, dividido entre os mecanismos de convecção entre a água e o ar. A troca térmica é determinada com base em equações de balanço de energia, considerando tanto o calor sensível quanto o calor latente envolvidos no processo. A eficiência dessa troca térmica depende de diversos fatores, como as propriedades térmicas do fluido e da superfície, as dimensões da torre de resfriamento, a velocidade do escoamento do fluido e a diferença de temperatura entre o fluido (CARVALHO, 2014).

No desenvolvimento desse modelo de torre de resfriamento, Carvalho adotou as seguintes considerações:

- Apenas a vazão de ar ( $\dot{m}_{ar}$ ) será controlada, mantendo a vazão de água ( $\dot{m}_{H_2O}$ ) constante.
- O calor específico do ar úmido é considerado igual ao do ar seco e constante na faixa de temperatura de atuação da torre, uma vez que a diferença entre eles é muito pequena. Ar seco com temperatura 25°C apresenta calor específico igual a 1,007 J/g·°C. Já o ar úmido, na mesma temperatura, possui calor específico de 1,035 J/g·°C (YAWS, 1977).
- O calor específico da água saturada pode ser considerado praticamente constante na faixa operacional, apresentando variações mínimas — por exemplo, entre 25°C (4180 J/Kg·°C) e 40°C (4179 J/Kg·°C). No caso deste estudo, a faixa de operação varia entre 24°C (4181 J/Kg·°C) e 60°C (4185 J/Kg·°C) (ÇENGEL; GHAJAR, 2009), o que também representa uma variação desprezível.
- O calor latente da água é assumido constante, variando entre 2442 kJ/kg a 25 °C e 2407 kJ/kg a 40 °C. No caso deste estudo, a faixa de operação varia entre 24°C (2442 J/Kg) e 60°C (2359 J/Kg) (ÇENGEL; GHAJAR, 2009).
- As perdas por evaporação e arraste são desprezíveis, já que representam apenas 2% da vazão total de resfriamento.
- A torre é modelada como um sistema adiabático, sem trocas de calor com o ambiente.
- A temperatura de entrada do ar é constante.

- A diferença entre as umidades específicas do ar na entrada e na saída ( $\omega_2 - \omega_1$ ) é de 0,001.
- Para o cálculo das massas de ar e água, considerou-se que a transferência de calor ocorre apenas no volume correspondente ao enchimento, que representa 10% do volume total. Esse volume é composto por 10% de água e 80% de ar. As densidades da água e do ar foram assumidas constantes, devido à pequena variação nas condições da faixa de temperatura de operação.

A planta ilustrada na Figura 15 requer os valores dos calores específicos da água e do ar, bem como o calor latente da água. Os valores médios correspondentes à faixa de temperatura de operação da torre estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Calores específicos

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Calor específico da água	$C_{H_2O}$	4,183	kJ/kg°C
Calor específico do ar	$C_{ar}$	1,0048	kJ/kg°C
Calor latente da água	$L_m$	2400	kJ/kg

Fonte: Çengel; Ghajar (2009).

Para a completa definição dos parâmetros do modelo matemático da torre, é necessário determinar a resistência térmica, a qual quantifica a dificuldade encontrada na transferência de calor entre a água e o ar. Segundo Carvalho (2014), essa resistência é um elemento fundamental para representar adequadamente o fenômeno de convecção térmica no sistema, sendo análoga à resistência elétrica, conforme descrito na Equação 3.4:

$$R = \frac{1}{h_c \cdot A} \quad (3.4)$$

Onde:

$R$  — resistência térmica (°C/W);

$h_c$  — coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m<sup>2</sup> · °C);

$A$  — área de contato entre os fluidos (m<sup>2</sup>).

A determinação da resistência térmica foi realizada com base no número de unidades de transferência (NUT), utilizando a relação da Equação 3.5:

$$h_c \cdot A = \frac{Le_f \cdot NUT \cdot c_{ar} \cdot \dot{m}_{ar}}{V_T} \quad (3.5)$$

Onde:

$Le_f$  — número de Lewis referente ao enchimento ou fator de Lewis (adimensional);

$NUT$  — Número de Unidades de Transferência (adimensional);

$c_{ar}$  — calor específico do ar (KJ/kg·°C);

$\dot{m}_{ar}$  — vazão mássica de ar (kg/s);

$V_T$  — volume total ou volume da torre (m<sup>3</sup>).

A relação de Lewis ( $Le_f$ ) é assumida como 0,92 na ausência de informações específicas sobre as características do enchimento da torre.

O número de unidades de transferência (NUT, do inglês *Number of Transfer Units*) é um parâmetro adimensional utilizado para avaliar a eficiência da troca térmica entre dois fluidos em um trocador de calor. O seu cálculo é realizado a partir das etapas descritas a seguir.

Inicialmente, determinam-se as capacidades térmicas dos dois fluidos, obtidas pelo produto entre a vazão mássica e o calor específico. A capacidade térmica do fluido quente (água) é determinada pela Equação 3.6, enquanto a do fluido frio (ar) é obtida pela Equação 3.7:

$$C_{\text{Quente}} = \dot{m}_{H_2O} \cdot C_{H_2O} \quad (3.6)$$

$$C_{\text{Frio}} = \dot{m}_{ar} \cdot C_{ar} \quad (3.7)$$

Com os valores das Equações 3.6 e 3.7, identificam-se a menor e a maior capacidade térmica, representadas por  $C_{\min}$  e  $C_{\max}$ , conforme as Equações 3.8 e 3.9:

$$C_{\min} = \min(C_{\text{Quente}}, C_{\text{Frio}}) \quad (3.8)$$

$$C_{\max} = \max(C_{\text{Quente}}, C_{\text{Frio}}) \quad (3.9)$$

A razão entre as capacidades térmicas é expressa por  $C^*$ , conforme a Equação 3.10:

$$C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (3.10)$$

Em seguida, calcula-se a transferência máxima de calor possível, utilizando a Equação 3.11, que considera a diferença de temperatura entre os fluidos na entrada:

$$Q_{\max} = C_{\min} \cdot (T_{H_2O\_E} - T_{ar\_E}) \quad (3.11)$$

A efetividade ( $\varepsilon$ ) do trocador de calor, definida como a razão entre o calor efetivamente transferido ( $Q$ ) e o calor máximo ( $Q_{\max}$ ), é calculada por meio da Equação 3.12:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (3.12)$$

Por fim, com base na efetividade e na razão de capacidades térmicas, o valor do  $NUT$  é obtido pela Equação 3.13, válida para trocadores de calor em regime de fluxo contracorrente:

$$NUT = \frac{1}{C^* - 1} \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon \cdot C^* - 1} \right) \quad (3.13)$$

Valores mais elevados de  $NUT$  indicam uma maior eficiência térmica do trocador de calor.

Com base nos dados da Tabela 1, foi determinada os valores de  $NUT = 1,24$  e  $V_T = 648,01 \text{ m}^3$ . A partir desses dados, foi possível calcular a condutância térmica global do sistema, representada por  $\frac{1}{R}$ , conforme a Equação 3.14:

$$\frac{1}{R} = h_c \cdot A = 17,12 \text{ W}/^\circ\text{C} \quad (3.14)$$

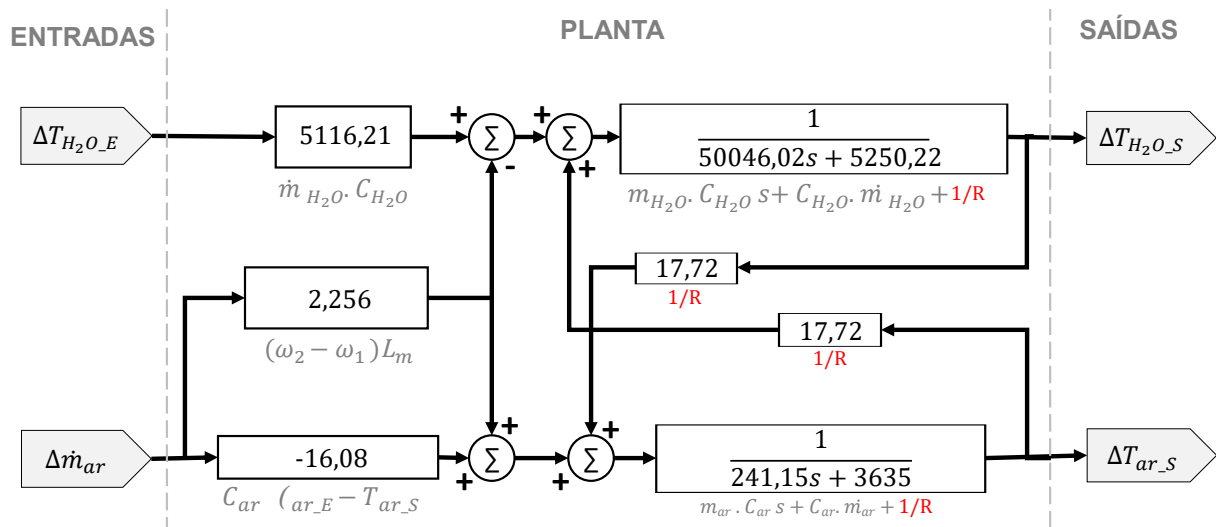
Esse resultado fornece a capacidade global de troca térmica do sistema, sendo um parâmetro fundamental para avaliar a eficiência da torre de resfriamento e validar o modelo matemático proposto.

Com todos os dados obtidos, juntamente com as informações das Tabelas 1 e 2, foi elaborada a planta que representa a torre de resfriamento em estudo, com os valores já prontos para serem simulados no *software* PSIM, conforme ilustrado na Figura 9.

De acordo com os dados preliminares da simulação, foi necessário realizar um ajuste para que a simulação se aproximasse do comportamento real da torre de resfriamento, especialmente no que se refere ao tempo de resposta de resfriamento e às

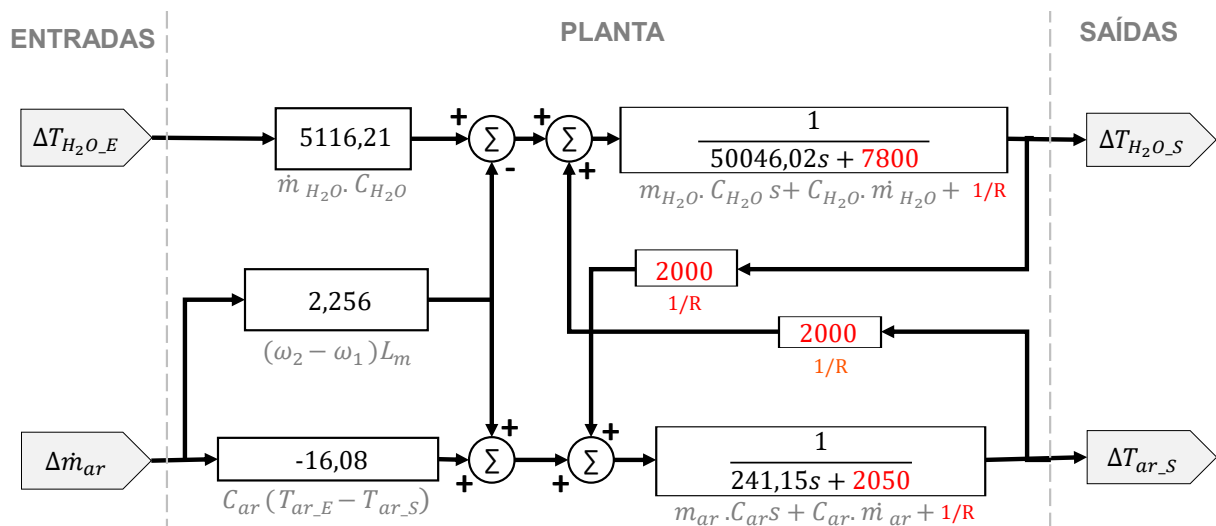
temperaturas de saída da água, alinhando-se mais com os valores projetados. Esse ajuste foi particularmente necessário nos valores referentes à resistência térmica, uma vez que esse parâmetro depende de várias variáveis, algumas das quais foram estimadas devido a dados incompletos fornecidos pelo fabricante. O ajuste realizado pode ser observado na Figura 10, com destaque em vermelho para os dados que foram modificados.

Figura 9 – Modelo matemático da torre de resfriamento para simulação



Fonte: Adaptado de Carvalho (2014).

Figura 10 – Modelo matemático da torre de resfriamento para simulação (ajustado)

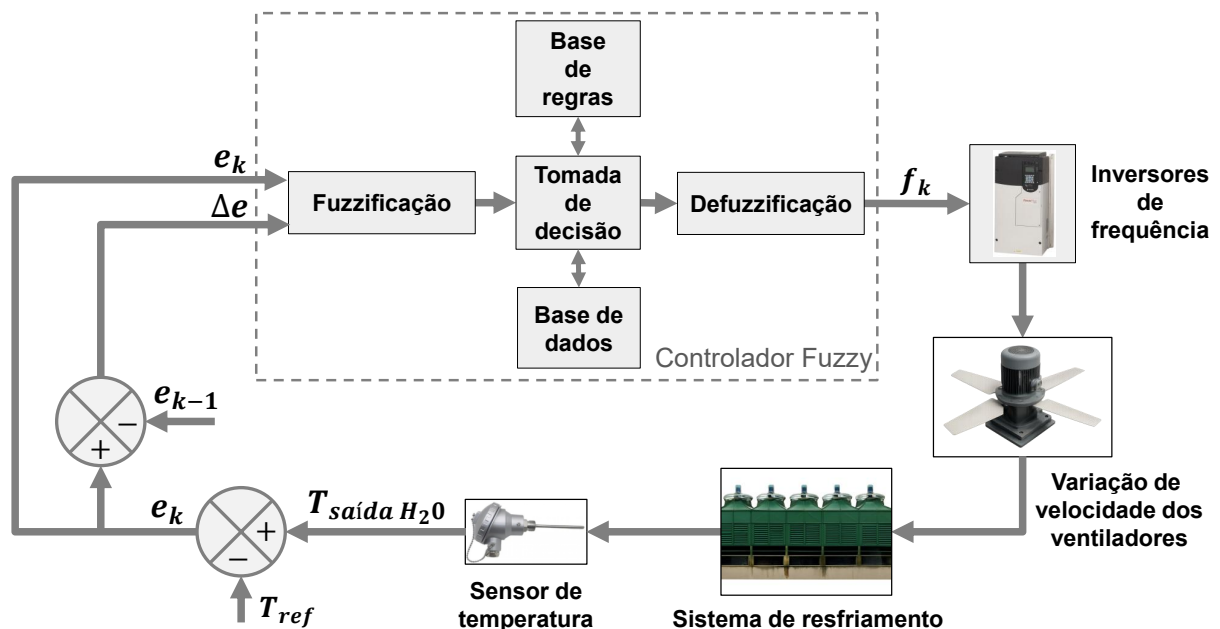


Fonte: Adaptado de Carvalho (2014).

### 3.3 Projeto final do controlador

A Figura 11 apresenta o diagrama do projeto do sistema de controle *fuzzy* aplicado a uma torre de resfriamento. A variável controlada é a temperatura de saída, ajustada pela variação da vazão de ar. Como o requisito da planta é entregar a água ao cliente com temperatura inferior a 49°C, adotou-se uma temperatura de referência de 45°C para controle, proporcionando uma margem de segurança. Dessa forma, em caso de falhas no sistema, a operação terá tempo para realizar as manobras de emergência.

Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema de controle *fuzzy* proposto



Fonte: Adaptado de Pozzebon (2013).

As variáveis de entrada são obtidas a partir da medição da temperatura de saída da água ( $T_{H_2O_S}$ ), realizada por um sensor de temperatura instalado na planta. A entrada definida para o controlador *fuzzy* deste trabalho é composta pelo cálculo do erro de temperatura ( $e_k$ ) e pela variação do erro ( $\Delta e$ ), conforme determinado pelas Equações 3.15 e 3.16, respectivamente:

$$e_k = T_{ref} - T_{H_2O_S} \quad (3.15)$$

$$\Delta e = e_k - e_{k-1} \quad (3.16)$$

Onde:  $T_{ref}$  é a temperatura de referência da saída da torre,  $T_{H_2O_S}$  é a temperatura de

saída da água da torre,  $e_k$  é o erro atual e  $e_{k-1}$  é o erro anterior.

- Se o erro for positivo, significa que a temperatura de saída da água é menor que a temperatura desejada (*setpoint*), portanto, a velocidade do ventilador precisa aumentar.
- Se o erro for negativo, significa que a temperatura de saída da água é maior que a temperatura desejada (*setpoint*), portanto, a velocidade do ventilador precisa diminuir.

Já a variação do erro indica a taxa de mudança do erro. Ela ajuda o controlador a entender se o erro está aumentando ou diminuindo, ajustando a saída de acordo com essa mudança. Se o erro aumenta rapidamente, o controlador pode agir mais rapidamente; se diminui, o controlador pode suavizar a ação

A saída de frequência de ajuste ( $f_k$ ) do controlador *fuzzy* é determinada pela Equação 3.17:

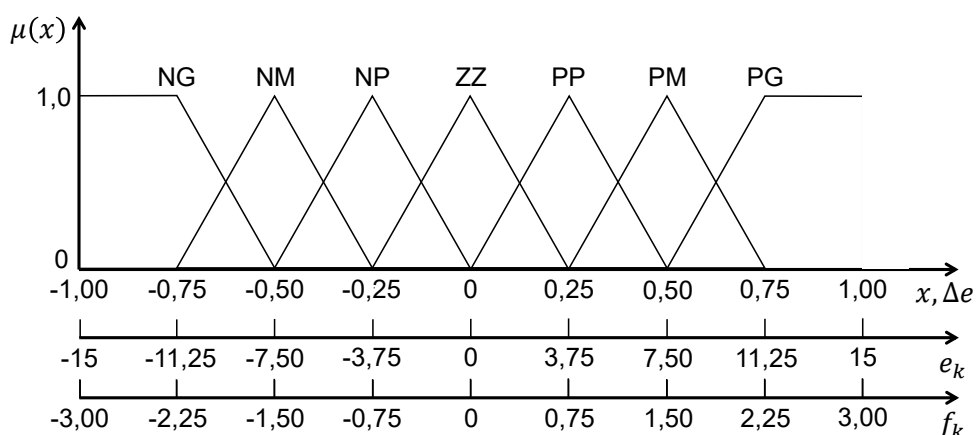
$$f_k = f_{k-1} + \eta \cdot \delta f_k \quad (3.17)$$

Onde:  $f_{k-1}$  a frequência de referência anterior,  $\eta$  o fator de ganho limite ou o máximo de mudança de frequência inferida e  $\delta f_k$  é o valor de ajuste dado pelo controlador.

Como mencionado no Capítulo 2, o universo deste trabalho considera o erro de temperatura e sua variação, ambos normalizados para o intervalo  $[-1, 1]$ . Essa normalização permite o mapeamento das variáveis de entrada em um conjunto comum de funções. A Figura 12 apresenta a mesma função de pertinência para as entradas e saída, mostrando a correlação com essa normalização. O erro foi definido no intervalo  $[-15, 15]$ , respeitando a capacidade máxima de resfriamento da torre de resfriamento, que é de  $15^\circ\text{C}$ . A variação do erro foi mantida no mesmo intervalo de normalização, por se tratar de unidades de temperatura. A saída foi definida no intervalo  $[-3, 3]$ , visando suavizar a saída de frequência.

Na simulação, utiliza-se um sensor de temperatura para medir a saída de água, que é acompanhado de um conversor A/D de 12 bits. O sinal de entrada do conversor varia entre 0 e 3 volts, enquanto o sinal de saída é convertido para um valor digital no intervalo de 0 a 4095, correspondente à resolução de 12 bits. Esse valor digital é então processado pelo controlador, permitindo o monitoramento e controle preciso da temperatura da água.

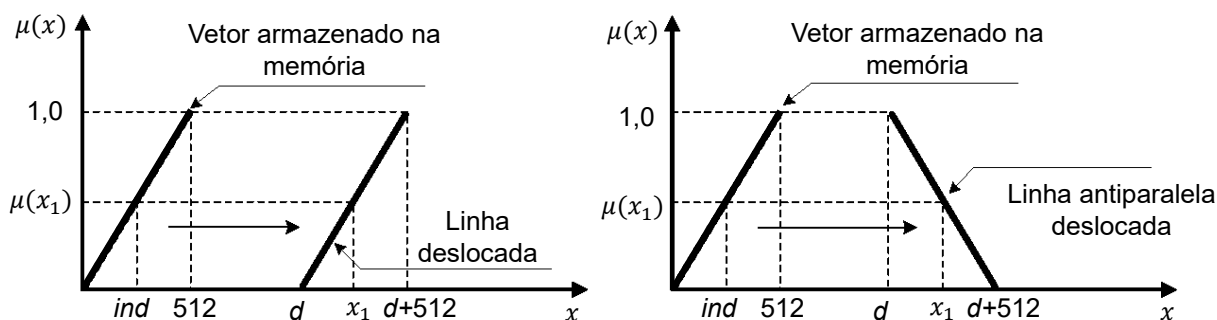
Figura 12 – Função de pertinência normalizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A definição de funções de pertinência simétricas e triangulares para todas as variáveis linguísticas (erro e variação do erro) pode ser obtida por meio de uma única função linear discreta em formato de rampa. Essa função é representada por um vetor de 512 elementos, com valores que variam entre 0 e 1. A partir dessa função linear, é possível gerar outras linhas paralelas ou antiparalelas, conforme ilustrado na Figura 13 (SUETAKE; SILVA; GOEDEL, 2010).

Figura 13 – Cálculo do valor de pertinência para as retas paralela e antiparalela no vetor discreto



Fonte: Adaptado de Suetake (2010).

O cálculo do valor de pertinência para funções de pertinência linear, paralela e antiparalela, usando um vetor discreto armazenado na memória, pode ser realizado conforme descrito por (SUETAKE; SILVA; GOEDEL, 2010).

- **Função linear paralela:** Para um valor  $x_1$  no intervalo  $[d, d + 512]$ , o índice do vetor é calculado subtraindo  $d$  de  $x_1$ , como mostrado na equação (3.18):

$$ind = x_1 - d \quad (3.18)$$

- **Função linear antiparalela:** Para o mesmo valor  $x_1$ , o índice é calculado subtraindo  $x_1$  de  $(d + 512)$ , conforme mostrado na equação (3.19):

$$ind = (d + 512) - x_1 \quad (3.19)$$

Esses cálculos permitem determinar o grau de pertinência de qualquer variável linguística de maneira simples, através de indexação no vetor.

A Tabela 3 apresenta os valores da saída ( $C_i$ ) do controlador *fuzzy* com base nas combinações entre erro (linhas) e variação do erro (colunas).

Tabela 3 – Regras do controlador *fuzzy*

		Variação do erro ( $\Delta e$ )						
		NG	NM	NP	ZZ	PP	PM	PG
Erro ( $e_k$ )	NG	1,00	1,00	1,00	0,65	0,65	0,35	0,00
	NM	1,00	0,65	0,65	0,35	0,35	0,00	-0,35
	NP	0,65	0,65	0,35	0,35	0,00	-0,35	-0,35
	ZZ	0,65	0,35	0,35	0,00	-0,35	-0,35	-0,65
	PP	0,35	0,35	0,00	-0,35	-0,35	-0,65	-0,65
	PM	0,35	0,00	-0,35	-0,35	-0,65	-0,65	-1,00
	PG	0,00	-0,35	-0,65	-0,65	-1,00	-1,00	-1,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Se o erro for grande e negativo (NG) e a variação do erro também for grande e negativa (NG), a saída do controlador é máxima (1,00), indicando que a ação corretiva precisa ser forte.

Se o erro for grande e positivo (PG) e a variação do erro também for grande e positiva (PG), a saída do controlador é mínima (-1,00), ou seja, a correção será mais forte no sentido oposto.

As regras do controle *fuzzy*, apresentadas na Tabela 3, são derivadas de maneira heurística. Quando a temperatura de saída da água está distante do valor de referência, a frequência deve ser ajustada de forma significativa para reduzir rapidamente a temperatura. Se a temperatura de saída da água se aproxima do valor de referência de maneira controlada, a frequência deve ser mantida constante para evitar picos. Quando a temperatura atinge o valor de referência, a frequência permanece inalterada. Caso a temperatura ultrapasse o valor de referência, a frequência deve ser reduzida para estabilizar a saída (POZZEBON, 2013).

Essas regras são baseadas em uma combinação das variáveis de erro (representadas por  $e_k$ ) e variação do erro ( $\Delta e$ ), com valores ajustados conforme a tabela, que definem a magnitude da alteração na frequência para cada situação.

O controle *fuzzy* é utilizado para ajustar a frequência, onde a mudança de frequência é determinada pelas regras do controlador com base nas variáveis de erro ( $e_0$ ) e variação do erro ( $\Delta e_0$ ), conforme descrito em (POZZEBON, 2013). O método utilizado para determinar a mudança na frequência é o método do centro de gravidade (COG).

1. Cálculo do fator de peso ( $\omega_i$ ):

A equação 3.20 calcula o fator de peso  $\omega_i$ , que é o mínimo entre a pertinência do erro ( $\mu_e(e_0)$ ) e a pertinência da variação do erro ( $\mu_{\Delta e}(\Delta e_0)$ ):

$$\omega_i = \min \{ \mu_e(e_0), \mu_{\Delta e}(\Delta e_0) \} \quad (3.20)$$

Esse fator de peso determina a influência de cada regra no ajuste da frequência.

2. Cálculo da alteração da frequência ( $z_i$ ):

A equação 3.21 determina a alteração da frequência ( $z_i$ ) associada a cada regra, multiplicando o fator de peso  $\omega_i$  pela constante  $C_i$  correspondente à regra:

$$z_i = \min \{ \mu_e(e_0), \mu_{\Delta e}(\Delta e_0) \} \cdot C_i = \omega_i \cdot C_i \quad (3.21)$$

Aqui,  $C_i$  é o valor de mudança de frequência para a regra  $i$ .

3. Cálculo total da mudança na frequência ( $z$ ):

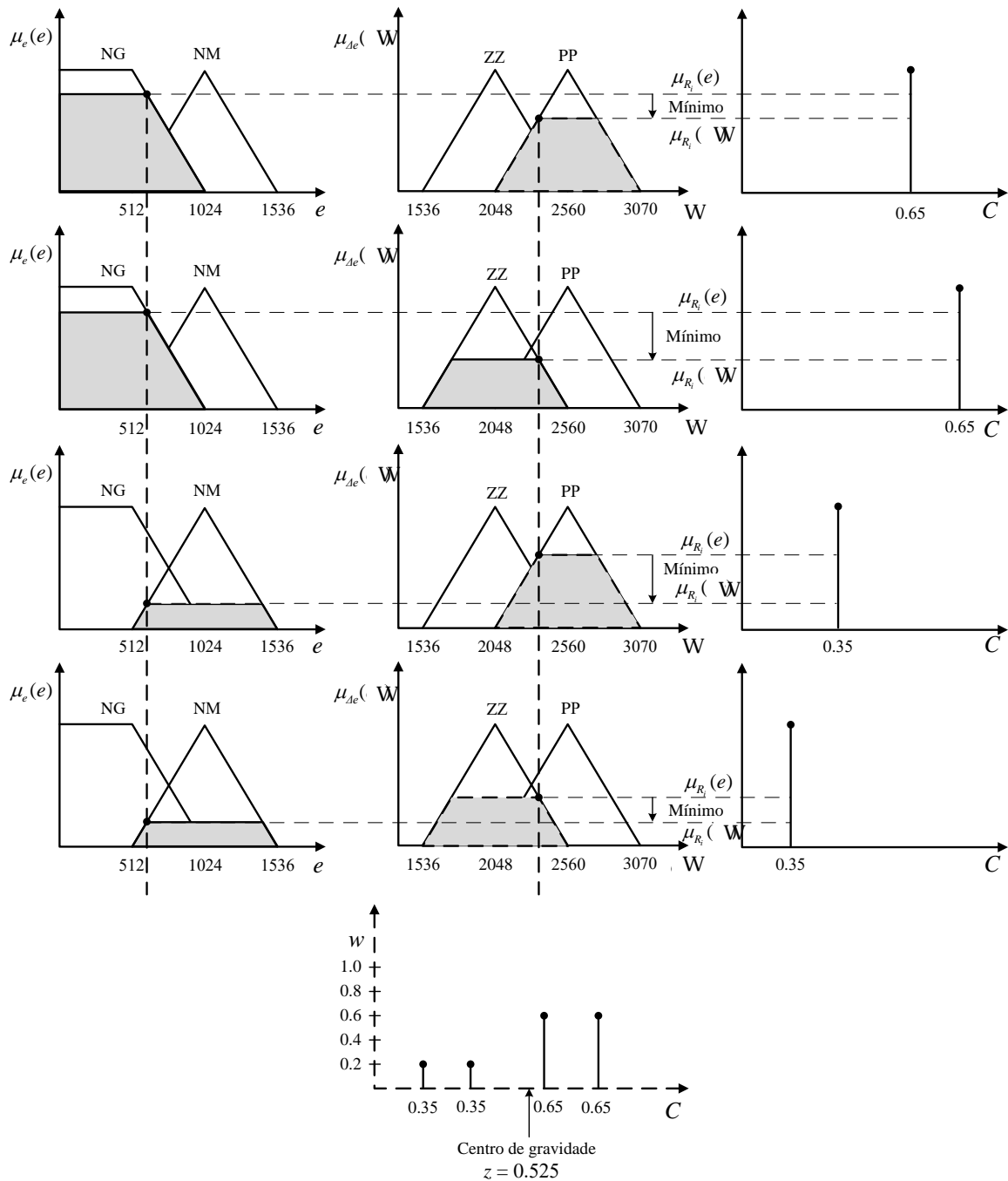
A equação 3.22 soma as alterações de frequência de todas as regras ativadas, ponderadas pelos seus respectivos fatores de peso ( $\omega_i$ ):

$$z = \delta f_k = \frac{\sum_{i=1}^N z_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i C_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i} \quad (3.22)$$

Este valor final  $z$  representa a variação total na frequência, calculada pelo método do centro de gravidade, o qual determina a posição central com base nas funções de pertinência.  $N$  indica o número de regras ativadas (neste caso, 4). Essas equações possibilitam o ajuste da frequência levando em consideração os valores de erro e a variação do erro, utilizando a técnica de inferência *fuzzy*.

O exemplo adaptado de (POZZEBON, 2013) para o controlador, mostrado na Figura 14, demonstra como o controlador age para fornecer o valor de ajuste  $\delta f_k$  requerido pela Equação 3.17 de  $f_k$ .

Figura 14 – Exemplo do processo de inferência para as 4 regras ativadas e a defuzzificação utilizando o cálculo do centro de gravidade



Fonte: Adaptado de Pozzebon (2013).

### 3.4 Simulação

Para a etapa de simulação do projeto, foi utilizado o *software* PSIM (*Power Simulation*), uma ferramenta especializada na simulação rápida e eficiente de circuitos elétricos. O PSIM oferece suporte completo para a modelagem de sistemas de controle *fuzzy*, permitindo a implementação do modelo matemático da torre de resfri-

amento, juntamente com o bloco do controlador *fuzzy*. As simulações foram conduzidas com o objetivo de analisar o comportamento térmico da torre de resfriamento, tanto sem a aplicação do controle *fuzzy* quanto com sua implementação. A seguir, descrevem-se os procedimentos realizados na simulação.

**Comportamento sem controle:** Nesta simulação, foi aplicada uma variação na vazão mássica de ar dos ventiladores para observar o comportamento da temperatura de saída da água da torre de resfriamento, sem a intervenção do controlador. O foco foi analisar a resposta térmica da planta e o tempo necessário para que a temperatura de saída se estabilizasse.

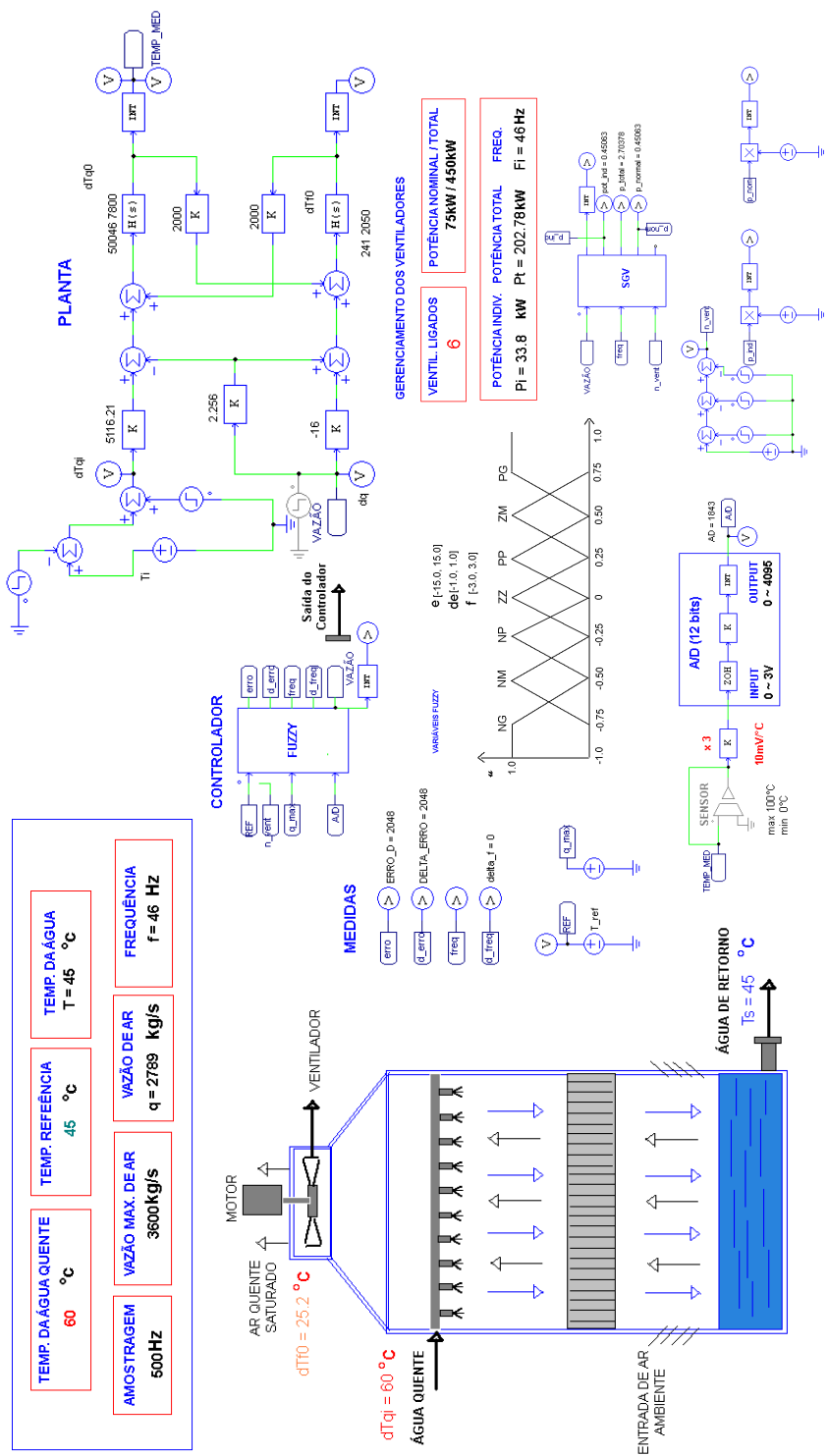
**Comportamento com controle *fuzzy*:** A segunda simulação envolveu a aplicação do controlador *fuzzy*, com o objetivo de ajustar automaticamente a vazão de ar dos ventiladores para manter a temperatura de saída da água dentro de um valor de referência preestabelecido. Foi avaliado o comportamento do sistema frente a variações na temperatura de entrada da água, com o controlador ajustando a operação dos ventiladores para estabilizar a temperatura de saída.

**Varição na operação dos ventiladores:** A terceira simulação analisou diferentes configurações de ventiladores (de 3 a 6 ventiladores), a fim de observar o impacto dessas variações na potência consumida e na vazão de ar necessária para manter a temperatura de saída dentro dos limites desejados. Essa simulação considerou diversos cenários operacionais, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema sob distintas condições de ventilação.

Em algumas situações, a frequência dos ventiladores atinge o valor mínimo de operação, que é de 20% da capacidade total, eliminando a necessidade de acionar todos os ventiladores. Nesses casos, unidades de ventiladores serão desligadas para balancear a frequência e mantê-la sempre acima do mínimo, estratégia que será aplicada quando implementada na torre física. A eficiência do motor é significativamente reduzida abaixo da frequência mínima, conforme indicado no manual do fabricante (WEG).

A Figura 15 apresenta a visão geral da simulação do projeto realizada no PSIM, sendo os resultados detalhados no capítulo de resultados.

Figura 15 – Simulação do projeto no PSIM



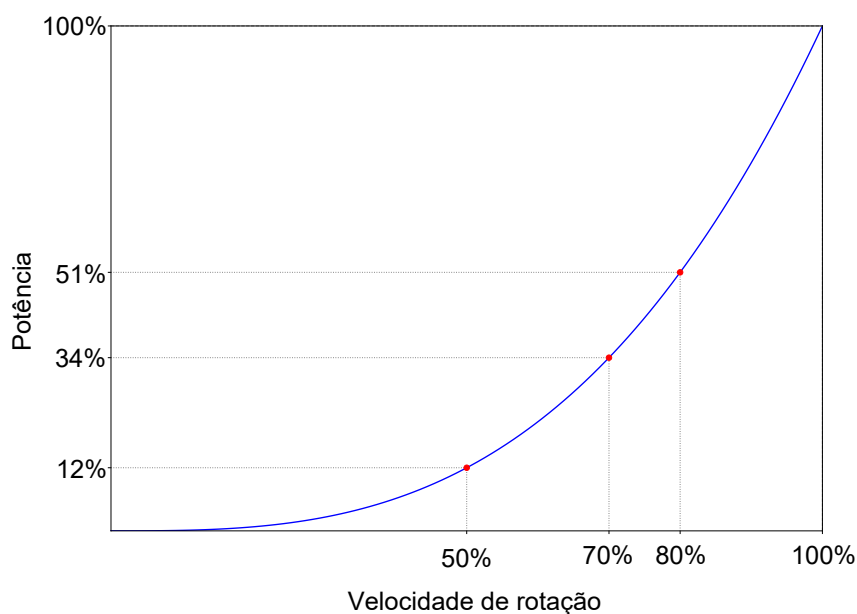
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 3.5 Consumo de cargas quadráticas

Segundo WEG (2024), as cargas quadráticas, como bombas centrífugas e ventiladores, possuem um conjugado variável  $C$ , que é proporcional à velocidade ao qua-

drado ( $n^2$ ), e a potência  $P$ , que é proporcional à velocidade ao cubo ( $n^3$ ). Esse comportamento permite uma grande economia de energia, devido à relação cúbica entre a potência e a rotação. Isso significa que pequenas reduções na velocidade resultam em quedas significativas no consumo de energia. A Figura 16 apresenta a curva característica de um motor trifásico de indução assíncrono operando com cargas como ventiladores ou bombas centrífugas.

Figura 16 – Relação entre potência e velocidade de rotação para cargas quadráticas



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Como pode ser observado no gráfico da Figura 16, ao reduzir a rotação para 70% da nominal, a potência consumida cai para 34%. Como muitos processos podem operar com menor rotação em determinados momentos, essa estratégia resulta em uma grande economia de energia.

A potência consumida por cargas quadráticas, como ventiladores e bombas centrífugas, pode ser calculada através da Equação 3.23 (FRIO PLUS, s.d.).

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (3.23)$$

Onde:

- $P_1$  é a potência nominal do motor (em kW);
- $P_2$  é a potência consumida na rotação reduzida (em kW);
- $N_1$  é a rotação nominal do motor (em RPM);
- $N_2$  é a rotação reduzida do motor (em RPM).

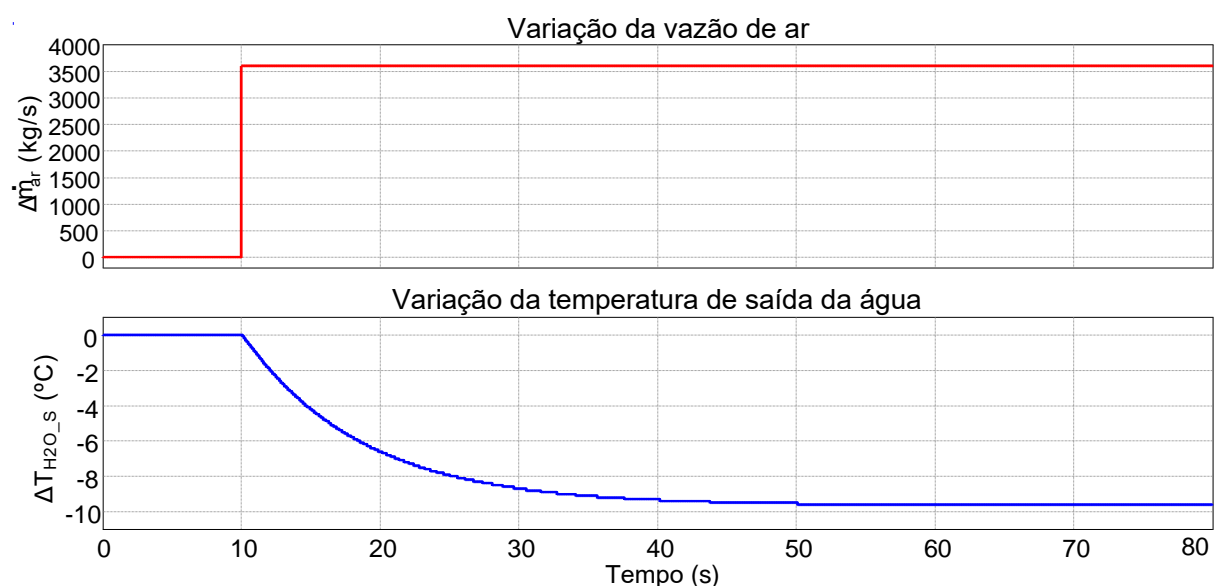
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das simulações realizadas para analisar o desempenho da planta de resfriamento com e sem o controle *fuzzy*. Inicialmente, é apresentado o comportamento da planta sem a ação de controle, observando-se a resposta térmica da torre de resfriamento com a variação da vazão de ar. Em seguida, os resultados com o controlador *fuzzy* são discutidos, evidenciando a eficiência na manutenção da temperatura de saída dentro do valor de referência e a redução significativa no consumo de energia. Além disso, são comparados os resultados de potência e eficiência energética entre o controle tradicional e o controle *fuzzy*, destacando a economia de energia alcançada.

### 4.1 Comportamento da planta sem ação de controle: resposta térmica da torre de resfriamento

Antes de aplicar o controlador *fuzzy* no modelo matemático apresentado na Figura 10 no PSIM, foi realizada uma simulação em que a vazão mássica de ar dos ventiladores foi submetida a um degrau, atingindo seu valor máximo. Durante essa simulação, foi observada a variação da temperatura de saída da água da torre de resfriamento e o tempo de resposta da planta em relação à sua capacidade de resfriamento.

Figura 17 – Resposta dinâmica da temperatura de saída da água em função da variação da vazão de ar



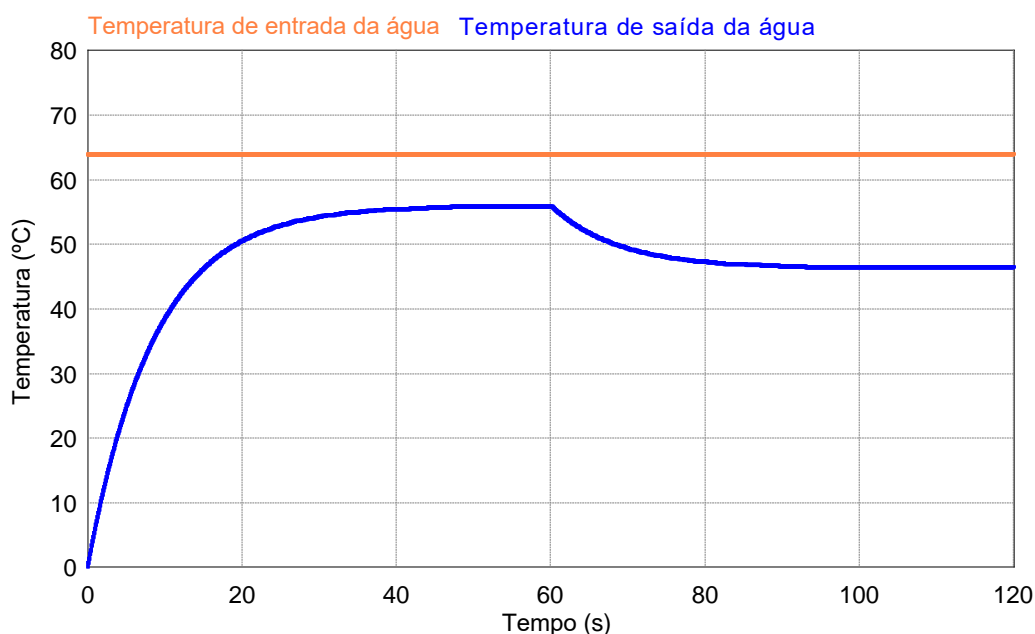
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 17, ao aplicar o degrau com valor de 3600 kg/s, a temperatura de saída da água variou cerca de 9°C, com um tempo de assentamento de aproximadamente 40 segundos. Esse comportamento indica que o modelo apresentou um resfriamento próximo ao esperado, mas com uma resposta mais lenta, o que é consistente com o desempenho observado na operação da torre real do estudo.

Observa-se que, ao ajustar a vazão de ar para seu valor máximo, a temperatura de saída não atingiu a capacidade total de resfriamento da torre, que é de 15°C. Esse resultado ocorreu devido à ausência de um valor especificado para a temperatura de entrada da água. Assim, a simulação considerou apenas a contribuição do resfriamento gerado pelos ventiladores, sem levar em conta o efeito do resfriamento natural da estrutura da torre. Quando os ventiladores não estão em operação, a torre consegue resfriar a água em até 6°C.

O gráfico da Figura 18 apresenta o comportamento das temperaturas de entrada (representada pela linha laranja) e de saída (representada pela linha azul) da água em uma torre de resfriamento de contra-corrente. Foi aplicado um valor de temperatura de entrada de 64°C, o valor máximo registrado para o processo industrial. Esse gráfico simula o início do funcionamento da planta, com a temperatura estabilizando até alcançar a condição de resfriamento da torre, sem ventiladores acionados. Após 60 segundos, os ventiladores são ativados em sua capacidade máxima de ventilação.

Figura 18 – Resposta térmica da planta com ventilação máxima



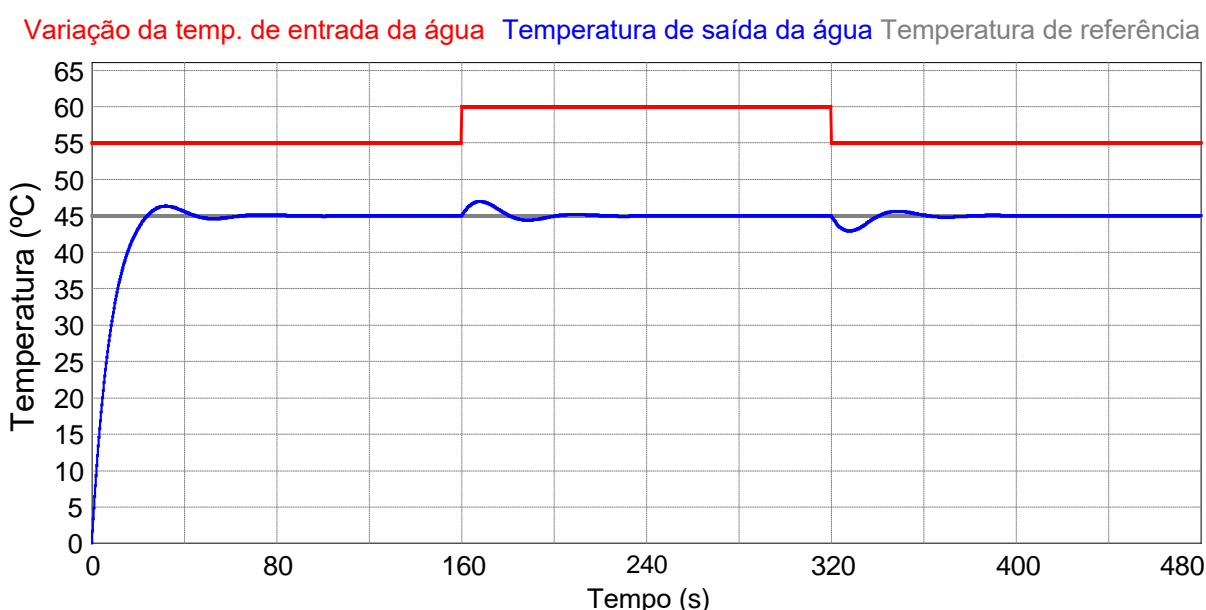
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A resposta observada no gráfico reflete a reação esperada da planta, com um resfriamento gradual e dentro do intervalo de temperatura esperado, conforme os dados fornecidos pelo fabricante. A temperatura de entrada começa com 64°C e, após o processo de resfriamento, a temperatura de saída atinge valores abaixo de 49°C, uma redução de 15°C.

#### 4.2 Comportamento da planta com ação de controle: resposta térmica da torre de resfriamento

Com a planta devidamente testada, realiza-se a simulação utilizando o controle *fuzzy*. No primeiro cenário, a temperatura de entrada da água é variada para analisar o comportamento da temperatura de saída sob essa condição, juntamente com a alteração da vazão de ar dos ventiladores, controlada pelo sistema, com o objetivo de estabilizar a temperatura de saída no valor de referência de 45°C. A Figura 19 apresenta um gráfico de Temperatura (°C) em função do Tempo (segundos), com a temperatura de entrada da água representada em vermelho, a temperatura de saída em azul e a temperatura de referência em cinza. Inicialmente, a temperatura de entrada é de 55°C e, aos 160 segundos, é ajustada para 60°C, representando o valor máximo previsto para o pior cenário. Aos 320 segundos, a temperatura de entrada retorna ao valor inicial de 55°C.

Figura 19 – Variação da temperatura de entrada e saída da água em relação à temperatura de referência

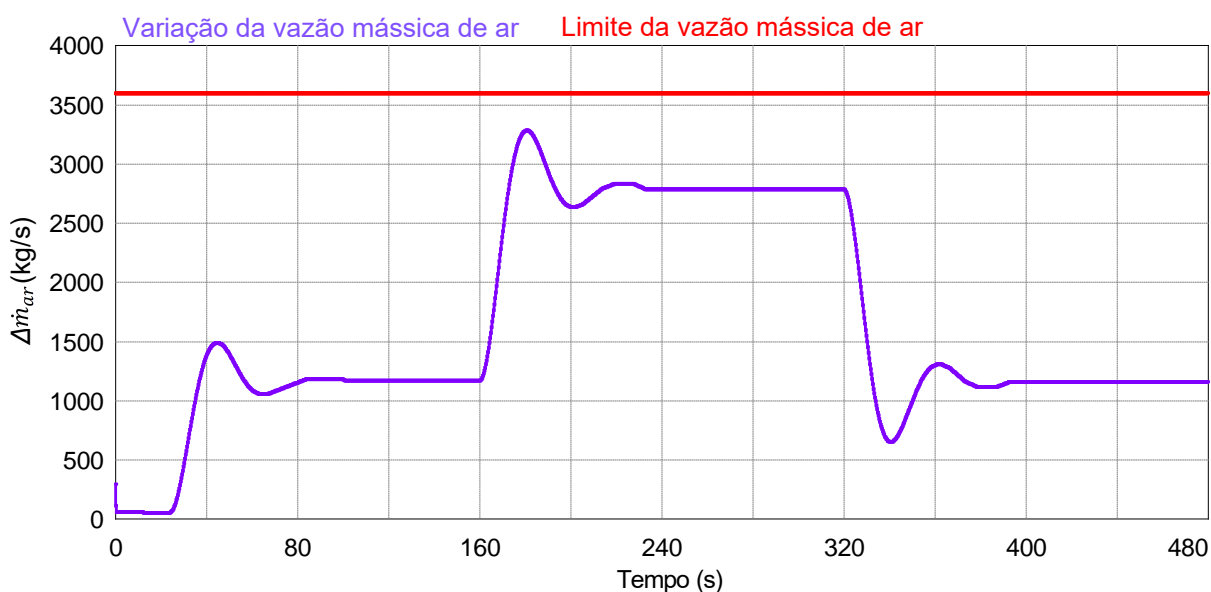


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Observa-se que, durante as variações na temperatura de entrada, o controle *fuzzy*

ajusta automaticamente a vazão de ar dos ventiladores para manter a temperatura de saída próxima ao valor de referência. A Figura 20 ilustra esse ajuste, mostrando que, ao ocorrer o aumento da temperatura de entrada, o sistema aumenta a vazão de ar para compensar a variação. O gráfico também destaca em vermelho o limite máximo de vazão mássica de ar que o controlador pode acionar.

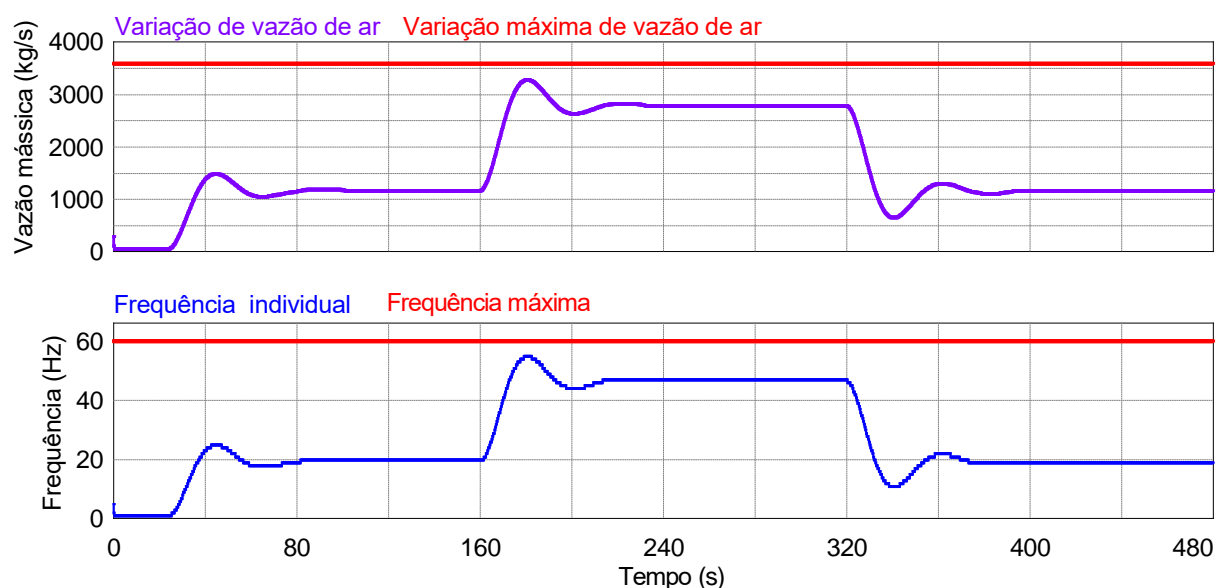
Figura 20 – Comportamento da vazão de ar com variação da temperatura de entrada da água



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A Figura 21 apresenta o mesmo gráfico mostrado na Figura 20, porém com a adição do gráfico da frequência individual de cada ventilador acionado, representada em azul, e da frequência máxima, indicada em vermelho para referência visual. Nesse caso, todos os 6 ventiladores estão em operação simultânea. Vale ressaltar que a técnica adotada no controle assegura que todos os ventiladores operem com a mesma frequência. No gráfico, o comportamento da frequência individual dos ventiladores é semelhante ao da vazão de ar, pois ambos estão diretamente relacionados. À medida que a temperatura de entrada aumenta, a vazão de ar também aumenta, ajustando-se de 1200 kg/s para 2800 kg/s, conforme a necessidade de resfriamento. A frequência individual dos ventiladores, medida em Hertz, segue uma variação sincronizada, aumentando de forma proporcional ao ajuste da operação dos ventiladores para atender à demanda de resfriamento. Esses gráficos destacam a interação entre a variação da vazão de ar e a frequência dos ventiladores, evidenciando como o sistema de controle *fuzzy* ajusta ambos os parâmetros para otimizar o processo de resfriamento e manter a temperatura de saída dentro dos limites de referência.

Figura 21 – Ajuste da vazão de ar e indicação da frequência individual dos ventiladores



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 4.3 Análise da potência requerida para o resfriamento da torre com diferentes configurações de ventiladores

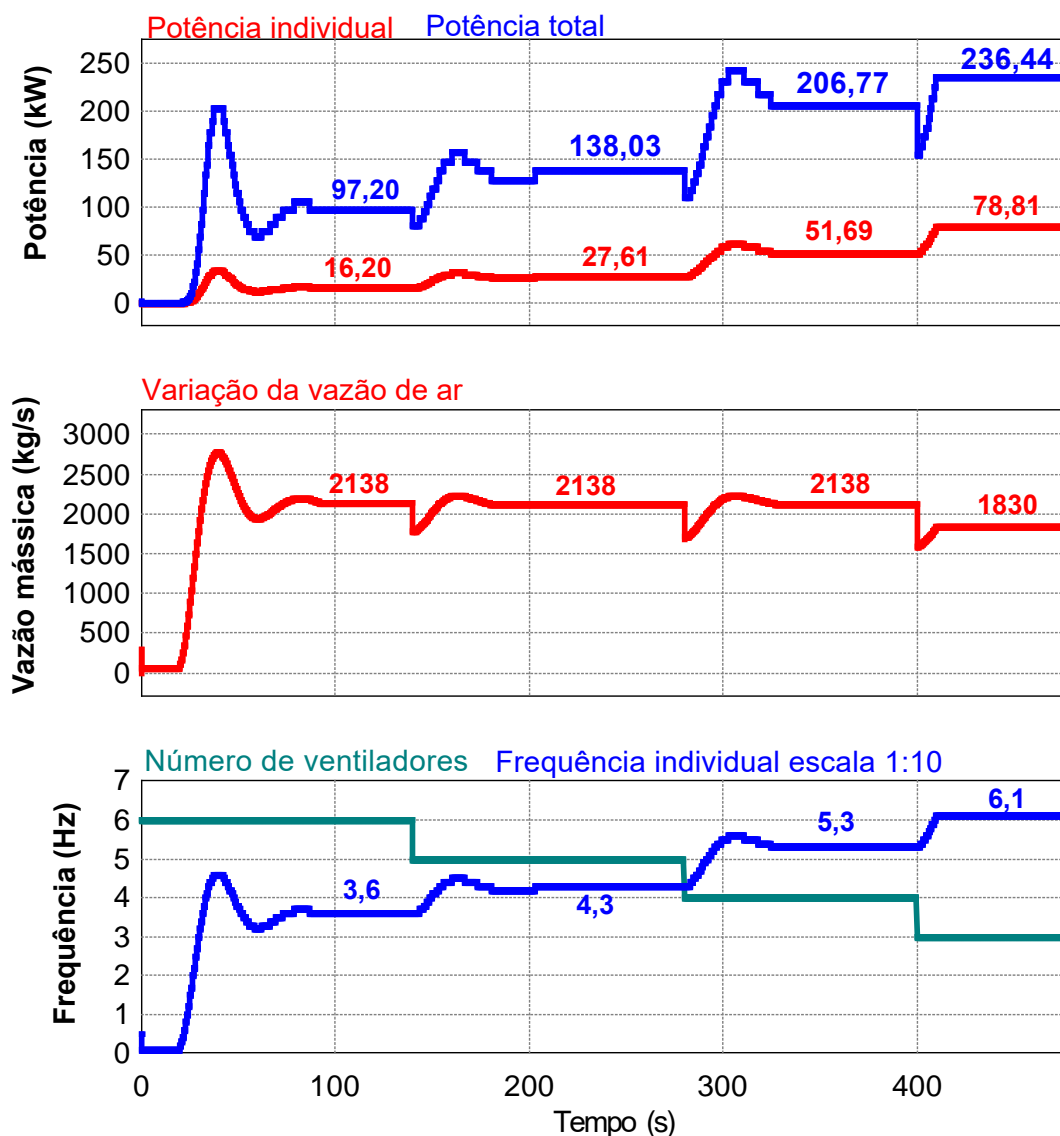
Sabe-se, empiricamente, através da experiência dos operadores da planta real, que em dias com temperaturas normais a torre consegue operar adequadamente com apenas 3 ventiladores, enquanto em dias de calor extremo são necessários 5 ventiladores. No entanto, devido a manutenções ou falhas nos motores, diferentes configurações de ventiladores são consideradas, com 6, 5, 4 e 3 ventiladores acionados.

Na simulação, a temperatura de entrada foi fixada em 58°C, e avaliou-se a resposta da planta e a potência requerida instantaneamente para esses cenários. A Figura 22 mostra a potência individual e total, a variação da vazão de ar, o número de ventiladores em operação e a frequência individual de cada ventilador. Inicialmente, até o tempo de 140 segundos, a configuração considera 6 ventiladores, seguida por 5, 4 e, por último, 3 ventiladores acionados.

Potência e Vazão de Ar Observa-se no gráfico de potência (Figura 22) que, conforme o número de ventiladores diminui, o consumo de potência aumenta. Para a configuração de 6 ventiladores, a potência total é de aproximadamente 97,20 kW, enquanto, com 3 ventiladores, a potência sobe para 236,44 kW, representando um aumento de cerca de 59%. Esse comportamento é refletido na variação da vazão de ar, onde a vazão necessária para manter a temperatura de saída no valor de referência de 45°C é de 2138 kg/s nas configurações com 6, 5 e 4 ventiladores. Com 3 venti-

ladores, a vazão cai para 1830 kg/s, valor inferior ao necessário para o resfriamento adequado.

Figura 22 – Relação entre potência, vazão de ar e frequência dos ventiladores para configurações de 3 a 6 ventiladores



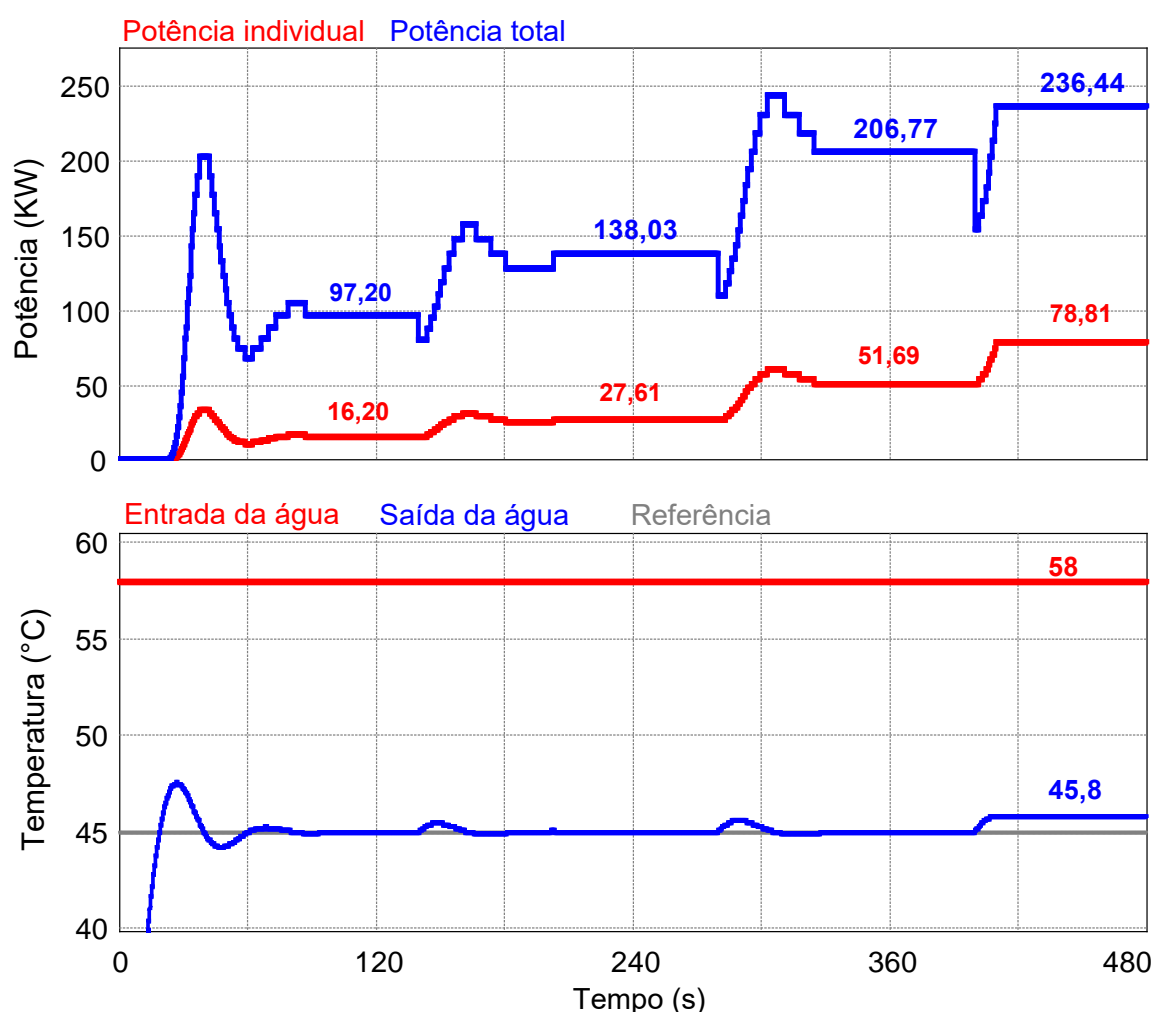
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A frequência individual dos ventiladores, representada no gráfico da Figura 22, segue o comportamento da vazão de ar, pois está diretamente relacionada ao ajuste da operação dos ventiladores. Inicialmente, com 6 ventiladores, a frequência é de 36 Hz por ventilador, aumentando à medida que o número de ventiladores é reduzido. Com 5 ventiladores, a frequência individual sobe para 43 Hz, e com 3 ventiladores, atinge 61 Hz, o que indica que os ventiladores estão operando a uma frequência mais alta para compensar a menor quantidade de ventiladores.

Agora, observando o gráfico da Figura 23, que mostra a potência em relação à temperatura de entrada, nota-se que, para a configuração com temperatura de entrada

a 58°C, as configurações com 6 a 4 ventiladores atingem a vazão necessária e, conseqüentemente, mantêm a temperatura desejada de 45°C. Já na configuração com 3 ventiladores, não é possível atingir a vazão necessária, e a temperatura de saída fica em 45,8°C, ligeiramente acima da referência. No entanto, essa temperatura ainda está dentro dos limites exigidos para a entrega de água para a produção industrial (cliente), permanecendo abaixo de 49°C.

Figura 23 – Relação entre potência e temperatura da água para configurações de 3 a 6 ventiladores



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Fica claro que, para o sistema de resfriamento da torre operar de maneira eficiente do ponto de vista energético, é desejável manter o máximo de ventiladores ligados simultaneamente. Vale lembrar que a torre funciona 24 horas por dia, o que implica a necessidade de manutenções, além de possíveis problemas mecânicos e desgastes, fatores inevitáveis. Portanto, nem sempre será possível operar com todos os ventiladores. A recomendação é operar, no mínimo, com 5 ventiladores, a fim de

evitar um aumento significativo no consumo de energia elétrica. Além disso, o projeto do controle *fuzzy* foi desenvolvido para lidar com essas situações, ajustando automaticamente a vazão de ar conforme o número de ventiladores disponíveis no momento.

#### 4.4 Comparação das potências consumidas com e sem controle *fuzzy*

Com base nas informações do controle antigo e comparando com o mesmo caso com Figura 23, podemos comparar a potência média entre o controle antigo e o controle *fuzzy*. No controle antigo, quando a temperatura de saída é de 45°C e 3 ventiladores operam a 100% de sua capacidade, a potência total média de pode ser calculado como segue:

Para o controle antigo:

- Número de ventiladores = 3
- Potência de cada ventilador = 75 kW
- Potência média total = 225 kW

Portanto, a potência média total no controle antigo, com 3 ventiladores operando a 100%, é de 225 kW.

Por outro lado, no controle *fuzzy*, conforme o gráfico da Figura 22, a potência média foi de 97,20 kW para 6 ventiladores operando de forma otimizada para atingir a temperatura de referência de 45°C.

A economia média de consumo pode ser calculada pela Equação 4.1:

$$\text{Economia (\%)} = \left( \frac{\text{Potência normal} - \text{Potência } \textit{fuzzy}}{\text{Potência normal}} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Substituindo os valores na Equação 4.1:

$$\text{Economia (\%)} = \left( \frac{225 - 97,20}{225} \right) \times 100 \approx 56,69\%$$

Portanto, o controle *fuzzy* pode gerar uma economia de energia significativa de 56,69% quando comparado ao controle antigo, com 3 ventiladores operando a plena capacidade.

Esses resultados evidenciam a alta eficiência energética do controle *fuzzy*, que, ao ajustar dinamicamente a operação dos ventiladores, reduz substancialmente o

consumo de energia. Isso permite manter a temperatura dentro da faixa desejada, atendendo às exigências de resfriamento, enquanto minimiza o impacto no consumo energético.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um controlador *fuzzy* aplicado à eficiência energética, por meio de ajustes nos ventiladores de uma torre de resfriamento industrial. O projeto demonstrou que, ao incorporar rotações intermediárias no controle dos ventiladores, foi possível reduzir significativamente o consumo de energia elétrica. O modelo matemático escolhido para a simulação do controle mostrou-se adequado para analisar o comportamento da planta, apesar das limitações por se tratar de um modelo simplificado.

A implementação do controlador *fuzzy* resultou em uma considerável economia de energia. A simulação evidenciou que, ao ajustar dinamicamente a vazão de ar dos ventiladores, foi possível manter a temperatura de referência de 45°C de maneira mais eficiente, com uma redução de aproximadamente 56,69% no consumo de energia, em comparação com o controle tradicional, no qual 3 ventiladores operavam a plena capacidade.

No futuro, planeja-se implementar o controlador diretamente no CLP da planta, aproveitando os equipamentos já existentes, o que permitirá validar o sistema no ambiente real e medir o impacto prático na redução do consumo de energia. Conclui-se que o controle baseado em lógica *fuzzy* é uma alternativa promissora para a otimização energética, tanto em torres de resfriamento quanto em processos industriais que envolvem cargas quadráticas, proporcionando uma operação mais eficiente e sustentável, com ganhos substanciais na redução do consumo de energia.

Sugestões de trabalhos futuros:

- **Análise de condições ambientais variáveis:** considerar outras variáveis de entrada do controlador, como a umidade do ar ambiente, para otimizar ainda mais o uso dos ventiladores;
- **Aplicação em outras plantas:** implementação do controlador *fuzzy* em diferentes processos industriais para avaliar sua versatilidade;
- **Aprimoramento do modelo matemático;**
- **Testes em escala real:** validação do controlador *fuzzy* em uma planta industrial real, comparando eficiência e redução de custos;
- **Comparação com outros métodos de controle:** avaliação do desempenho do *fuzzy* em comparação com o controle PID.

## REFERÊNCIAS

- ALPINA. **Torres de resfriamento de água**. São Bernardo do Campo, SP: [s.n.], 1978. Acesso em: 2 set. 2024. Disponível em: <[http://masimoes.pro.br/fisica/transcal/Tema\\_7\\_trocadores/torres.pdf](http://masimoes.pro.br/fisica/transcal/Tema_7_trocadores/torres.pdf)>.
- CARVALHO, B. d. M. **Melhoria da eficiência energética de torres de resfriamento por meio do controle de vazão de ar de entrada**. Trabalho de Conclusão de Curso, Belo Horizonte, 2014.
- CHEMTREAT. **Water essentials handbook: cooling water system fundamentals**. s.d. Acesso em: 6 set. 2024. Disponível em: <<https://pt.chemtreat.com/water-essentials-handbook-cooling-water-system-fundamentals/>>.
- CHEREMISINOFF, N. P.; CHEREMISINOFF, P. N. **Cooling towers selection, design and practice**. Michigan: Ann Arbor Science Publishers, 1981.
- FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2009.
- FRANCHI, C. M. **Sistemas de acionamento elétrico**. São Paulo: Saraiva Educação SA, 2014.
- FRIO PLUS. **Economize energia utilizando conversores de frequência Danfoss**. Diadema, SP: [s.n.], s.d. Acesso em: 19 fev. 2025. Disponível em: <<https://frioplus.com.br/artigos.php>>.
- HENSLEY, J. C. **Cooling tower fundamentals**. 2. ed. Kansas City: Marley Cooling Tower Company, 1985.
- MELLO, L. C. **Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Acesso em: 20 set. 2024. Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-07112008-140442/publico/DISSERTACAO\\_INFLUENCIA\\_DAS\\_VARIAVEIS\\_DE\\_PROCESSO\\_NO\\_DESEMPENHO\\_DE\\_TORRE\\_DE\\_RESFRIAMENTO.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-07112008-140442/publico/DISSERTACAO_INFLUENCIA_DAS_VARIAVEIS_DE_PROCESSO_NO_DESEMPENHO_DE_TORRE_DE_RESFRIAMENTO.pdf)>.
- MOREIRA, J. R. S. **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- PETRUZELLA, F. D. **Motores elétricos e acionamentos**. 1. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- POZZEBON, G. G. **Controle e análise de conversores multiníveis conectados em redes de distribuição para aplicação em painéis fotovoltaicos e armazenadores de energia**. Tese (Doutorado em Sistemas Dinâmicos) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. Acesso em: 18 fev. 2025.
- REFRIGERAÇÃO E AR. **Manutenção de torres de resfriamento**. s.d. Acesso em: 27 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.refrigeracaoear.com.br/manutencao-de-torres-de-resfriamento>>.
- SIMÕES, G. M.; SHAW, S. I. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2004.

SUETAKE, M.; SILVA, I. N. d. S.; GOEDEL, A. **Sistema fuzzy compacto embarcado em DSP e sua aplicação para controle V/f de motores de indução**. Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automática, SciELO Brasil, v. 21, p. 245–259, 2010.

TANSCHKEIT, R. **Sistemas fuzzy**. 2004. Apostila (Departamento de Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.inf.ufsc.br/~mauro.roisenberg/ine5377/Cursos-ICA/LN-Sistemas%20Fuzzy.pdf>>.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Torres de resfriamento**. s.d. Acesso em: 20 jan. 2025. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5817712/LOQ4086/torres.de.resfriamento2.pdf>>.

WEG. **W22 - Motor Trifásico - Comercial (Mercado Brasil)**. Jaraguá do Sul, SC: WEG S.A, 2022. il.

WEG. **Guia de Especificação: Motores Elétricos WEG**. [S.l.], 2024. Versão 09/2024. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 19 maio 2025.

YAWS, C. L. **Physical Properties: A Guide to the Physical, Thermodynamic and Transport Property Data of Industrially Important Chemical Compounds**. Houston: Gulf Publishing Company, 1977.

ZIEHL-ABEGG. **Torre de arrefecimento**. s.d. Acesso em: 27 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.ziehl-abegg.com/pt/industrias/torre-de-arrefecimento>>.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2011.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.