

Projeto: Sistema de Controle Fuzzy MISO para Refrigeração em Centros de Dados

Guia do Projeto - Controle Inteligente
Implementação Completa com Interface Web e MQTT

13 de novembro de 2025

Sumário

1	Introdução	3
1.1	Sistemas de Refrigeração em Centros de Dados	3
1.1.1	Problemática do Controle Térmico	3
1.1.2	Sistemas CRAC (Computer Room Air Conditioning)	3
2	Fundamentos Teóricos	3
2.1	Lógica Fuzzy	3
2.1.1	Conceitos Básicos	3
2.1.2	Conjuntos Fuzzy	3
2.2	Funções de Pertinência	4
2.2.1	Tipos de Funções de Pertinência	4
2.3	Controle Fuzzy PD	4
2.3.1	Estrutura do Controlador	4
2.3.2	Vantagens da Abordagem PD Fuzzy	4
2.4	Sistema MISO (Multiple Input, Single Output)	4
2.4.1	Características do Sistema MISO	4
2.5	Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)	5
2.5.1	Características do MQTT	5
2.5.2	Arquitetura MQTT	5
2.5.3	Aplicação no Projeto	5
2.6	Broker MQTT	5
2.6.1	Características do Broker	5
2.7	Motor de Inferência Mamdani	5
2.7.1	Processo de Inferência	5
2.7.2	Fuzzificação	6
2.8	Sistemas de Alertas Inteligentes	6
2.8.1	Tipos de Alertas Implementados	6
2.8.2	Estrutura de Mensagens de Alerta	6
2.9	Interface Web Responsiva	6
2.9.1	Tecnologias de Frontend	6
2.10	Simulação Temporal de Sistemas	7

2.10.1	Modelagem de Perfis Diários	7
2.10.2	Parâmetros de Simulação	7
2.10.3	Métricas de Avaliação	7
2.11	Validação e Testes de Sistemas	7
2.11.1	Testes Unitários	7
2.11.2	Testes de Integração	7
3	Variáveis do Sistema	8
3.1	Variáveis de Entrada	8
3.1.1	Erro de Temperatura (e)	8
3.1.2	Variação do Erro (Δe)	8
3.1.3	Temperatura Externa (T_{ext})	8
3.1.4	Carga Térmica (Q_{est})	9
3.2	Variável de Saída	9
3.2.1	Potência do Sistema CRAC (P_{CRAC})	9
4	Modelo Físico do Sistema	10
4.1	Função de Transferência	10
4.1.1	Definição das Variáveis	10
4.2	Interpretação dos Coeficientes	10
4.3	Condições de Operação	10
4.4	Justificativa do Offset Base (3,5)	11
4.4.1	Necessidade Física	11
4.4.2	Validação Matemática	11
5	Especificações do Projeto	11
5.1	Objetivo Geral	11
5.2	Objetivos Específicos	11
5.3	Requisitos Funcionais	12
5.3.1	RF1: Sistema de Inferência Fuzzy	12
5.3.2	RF2: Funções de Pertinência	12
5.3.3	RF3: Base de Regras de Controle	12
5.3.4	RF4: Sistema MQTT para Monitoramento	12
5.3.5	RF5: Simulação de 24 Horas	13
5.3.6	RF6: Integração com Modelo Físico	13
5.3.7	RF7: Interface Gráfica do Usuário	13
5.4	Entregáveis do Projeto	14
5.4.1	Documentação Técnica	14
5.4.2	Implementação de Software	15
5.4.3	Apresentação Final	15
6	Metodologia de Desenvolvimento	15
6.1	Critérios de Avaliação	15
7	Recursos e Referências	15
7.1	Bibliografia Recomendada	15
8	Conclusões	16

1 Introdução

1.1 Sistemas de Refrigeração em Centros de Dados

00000000000000000000000000000000

1.1.1 Problemática do Controle Térmico

O controle de temperatura em um centro de dados apresenta os seguintes desafios:

- **Cargas térmicas variáveis:** A demanda computacional varia dinamicamente
- **Condições ambientais mutáveis:** Temperatura externa flutuante
- **Eficiência energética:** Os sistemas CRAC consomem até 40% da energia total
- **Resposta não linear:** A dinâmica térmica apresenta comportamentos complexos
- **Múltiplas variáveis:** Interação simultânea de vários fatores

1.1.2 Sistemas CRAC (Computer Room Air Conditioning)

Os sistemas CRAC são unidades especializadas de ar condicionado projetadas especificamente para centros de dados, caracterizadas por:

- Controle preciso de temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$)
- Controle de umidade relativa (45-55%)
- Filtragem avançada do ar
- Operação contínua 24/7
- Redundância para alta disponibilidade

2 Fundamentos Teóricos

2.1 Lógica Fuzzy

2.1.1 Conceitos Básicos

A lógica fuzzy, desenvolvida por Lotfi Zadeh em 1965, estende a lógica clássica booleana para tratar conceitos de pertinência parcial. Diferentemente da lógica tradicional onde um elemento pertence completamente (1) ou não pertence (0) a um conjunto, a lógica fuzzy permite graus de pertinência entre 0 e 1.

2.1.2 Conjuntos Fuzzy

Um conjunto fuzzy A em um universo de discurso X se define mediante uma função de pertinência:

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1]$$

onde $\mu_A(x)$ representa o grau de pertinência do elemento x ao conjunto fuzzy A .

2.2 Funções de Pertinência

2.2.1 Tipos de Funções de Pertinência

Função Triangular:

$$\mu_{tri}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases}$$

Função Trapezoidal:

$$\mu_{trap}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases}$$

2.3 Controle Fuzzy PD

2.3.1 Estrutura do Controlador

Um controlador fuzzy PD utiliza duas entradas principais:

- **Erro (e):** $e(t) = y(t) - r(t)$
 - **Variação do Erro (Δe):** $\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1)$
- onde $r(t)$ é a referência desejada e $y(t)$ é a saída do sistema.

2.3.2 Vantagens da Abordagem PD Fuzzy

- **Resposta rápida:** A ação derivativa antecipa mudanças
- **Estabilidade melhorada:** Reduz oscilações
- **Robustez:** Tratamento efetivo de perturbações
- **Simplicidade:** Implementação direta sem integrador

2.4 Sistema MISO (Multiple Input, Single Output)

2.4.1 Características do Sistema MISO

O sistema implementado utiliza arquitetura MISO com:

- **2 Entradas:** Erro, Δ Erro,
- **2 Constantes:** Temperatura Externa, Carga Térmica.
- **1 Saída:** Potência do Sistema CRAC.
- **Interações complexas:** Entre todas as variáveis de entrada.

2.5 Protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport)

2.5.1 Características do MQTT

MQTT é um protocolo de comunicação machine-to-machine (M2M) projetado para:

- **Baixo overhead:** Protocolo leve ideal para IoT
- **Publish/Subscribe:** Arquitetura desacoplada
- **Qualidade de Serviço (QoS):** Garantia de entrega de mensagens
- **Retenção de mensagens:** Para novos subscribers

2.5.2 Arquitetura MQTT

- **Broker MQTT:** Servidor central que gerencia mensagens
- **Publishers:** Clientes que enviam dados
- **Subscribers:** Clientes que recebem dados
- **Tópicos:** Canais hierárquicos de comunicação

2.5.3 Aplicação no Projeto

No contexto do sistema de controle fuzzy:

- **Monitoramento em tempo real:** Dados de temperatura e controle
- **Sistema de alertas:** Notificações de condições críticas
- **Dashboard remoto:** Interface separada para visualização

2.6 Broker MQTT

2.6.1 Características do Broker

- **WebSocket Support:** Conexões diretas do navegador
- **Alta disponibilidade:** Cluster distribuído
- **Escalabilidade:** Milhões de conexões simultâneas
- **Broker público:** broker :8000/mqtt

2.7 Motor de Inferência Mamdani

2.7.1 Processo de Inferência

O método Mamdani consiste em quatro etapas principais:

1. **Fuzzificação:** Conversão de entradas crisp em graus de pertinência
2. **Avaliação de Regras:** Cálculo da ativação de cada regra
3. **Agregação:** Combinação das saídas de todas as regras ativas
4. **Defuzzificação:** Conversão da saída fuzzy em valor crisp

2.7.2 Fuzzificação

Para cada entrada x_i , calcula-se o grau de pertinência em cada conjunto fuzzy:

$$\mu_{A_j}(x_i) \text{ para todo } j \in \{1, 2, \dots, n_i\}$$

onde n_i é o número de conjuntos fuzzy para a entrada i .

2.8 Sistemas de Alertas Inteligentes

2.8.1 Tipos de Alertas Implementados

O sistema deve detectar e reportar:

- **Alertas Críticos:** Temperatura fora dos limites seguros.
- **Alertas de Eficiência:** CRAC operando em máxima potência por tempo prolongado
- **Alertas de Estabilidade:** Oscilações excessivas ou instabilidade
- **Alertas de Comunicação:** Falhas na conexão MQTT

2.8.2 Estrutura de Mensagens de Alerta

As mensagens de alerta devem conter:

- **Timestamp:** Marca temporal da ocorrência
- **Tipo:** Categoria do alerta (crítico, eficiência, estabilidade)
- **Mensagem:** Descrição human-readable
- **Dados:** Valores relevantes do sistema
- **Severidade:** Nível de importância (baixa, média, alta, crítica)

2.9 Interface Web Responsiva

2.9.1 Tecnologias de Frontend

- **HTML5:** Estrutura semântica e moderna
- **CSS3:** Estilos avançados e responsivos
- **JavaScript ES6+:** Lógica de aplicação
- **WebSockets:** Comunicação em tempo real
- **node-red;**
- **Blynk.**

2.10 Simulação Temporal de Sistemas

2.10.1 Modelagem de Perfis Diários

A simulação modelagem de:

- **Temperatura Externa:** Padrão senoidal com variações estocásticas

$$T_{ext}(t) = T_{base} + A \cdot \sin\left(\frac{2\pi t}{T_s} + \phi\right) + \epsilon(t)$$

- **Carga Térmica:** Perfil de uso típico de data center
- **Perturbações Aleatórias:** Ruído gaussiano para realismo

2.10.2 Parâmetros de Simulação

- **Duração total:** $T_s(\text{minutos})$
- **Passo temporal:** $\Delta t = 1 \text{ minuto}$
- **Condições iniciais:** $T(0) = 22C$, $P_{CRAC}(0) = 50\%$
- **Objetivos de controle:** Manter $20C \leq T \leq 24C$

2.10.3 Métricas de Avaliação

- **Erro RMS:** $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{setpoint})^2}$
- **Tempo em faixa:** Percentual do tempo dentro dos limites
- **Consumo energético:** $E = \sum_{i=1}^N P_{CRAC}(i) \cdot \Delta t$
- **Número de violações:** Contagem de excursões críticas

2.11 Validação e Testes de Sistemas

2.11.1 Testes Unitários

- **Funções de pertinência:** Verificação de cobertura e normalização
- **Motor de inferência:** Validação de cálculos matemáticos
- **Regras fuzzy:** Consistência e completude da base
- **Interface:** Responsividade e usabilidade

2.11.2 Testes de Integração

- **Sistema completo:** Funcionamento end-to-end
- **Comunicação MQTT:** Conectividade e troca de mensagens
- **Simulação longa:** Estabilidade durante 24 horas
- **Casos extremos:** Comportamento em condições limite

3 Variáveis do Sistema

3.1 Variáveis de Entrada

3.1.1 Erro de Temperatura (e)

Definição:

$$e(t) = T_{atual}(t) - T_{setpoint}$$

Interpretação Física:

- $e > 0$: Temperatura abaixo do setpoint (necessita menos refrigeração)
- $e = 0$: Temperatura no setpoint desejado
- $e < 0$: Temperatura acima do setpoint (necessita mais refrigeração)

Considerações de Design: O erro de temperatura é a variável mais crítica do sistema. Seus conjuntos fuzzy devem:

- Proporcionar alta resolução próximo de zero (zona crítica)
- Tratar excursões grandes durante transitórios
- Refletir a tolerância térmica do equipamento

3.1.2 Variação do Erro (Δe)

Definição:

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - 1)$$

Interpretação Física:

- $\Delta e > 0$: O erro está crescendo (temperatura se afastando do setpoint para baixo)
- $\Delta e = 0$: O erro é estável (temperatura em regime estacionário)
- $\Delta e < 0$: O erro está decrescendo (temperatura se aproximando do setpoint de baixo)

Importância do Δe :

- **Ação preditiva:** Antecipa tendências térmicas
- **Estabilização:** Evita sobreimpulsos (overshoot)
- **Amortecimento:** Reduz oscilações do sistema
- **Velocidade de resposta:** Melhora tempo de estabelecimento

3.1.3 Temperatura Externa (T_{ext})

Definição: Temperatura do ambiente exterior ao centro de dados que afeta a carga térmica total do sistema.

Faixa de Operação:

- **Universo de discurso:** $[10, 35]$ °C
- **Variação típica:** 10-25 °C diários

Impacto no Sistema:

- Temperaturas altas incrementam a carga de refrigeração
- Afeta a eficiência dos trocadores de calor
- Modifica a demanda energética do sistema CRAC

3.1.4 Carga Térmica (Q_{est})

Definição: Potência térmica estimada gerada pelos equipamentos de computação e sistemas auxiliares.

Faixa de Operação:

- **Universo de discurso:** $[0, 100]$ % de carga máxima
- **Variação típica:** Dependente da demanda computacional.

Fatores de Influência:

- Número de servidores ativos
- Intensidade de processamento (CPU/GPU)
- Sistemas de armazenamento em operação
- Equipamentos de rede e comunicações

3.2 Variável de Saída**3.2.1 Potência do Sistema CRAC (P_{CRAC})**

Definição: Porcentagem de potência de refrigeração aplicada pelo sistema CRAC para manter a temperatura desejada.

Faixa de Operação:

- **Universo de discurso:** $[0, 100]$ % de potência máxima
- **Resolução de controle:** 1% de potência.

4 Modelo Físico do Sistema

4.1 Função de Transferência

O comportamento térmico do centro de dados é modelado mediante a seguinte equação de diferenças:

$$T[n + 1] = 0,9 \times T[n] - 0,08 \times P_{CRAC} + 0,05 \times Q_{est} + 0,02 \times T_{ext} + 3,5$$

4.1.1 Definição das Variáveis

- $T[n + 1]$: Temperatura no próximo instante de tempo ($^{\circ}\text{C}$)
- $T[n]$: Temperatura atual do centro de dados ($^{\circ}\text{C}$)
- P_{CRAC} : Potência do sistema CRAC (% de 0 a 100)
- Q_{est} : Carga térmica dos servidores (% de 0 a 100)
- T_{ext} : Temperatura externa ($^{\circ}\text{C}$)

4.2 Interpretação dos Coeficientes

- **0,9**: Fator de inércia térmica (constante de tempo do sistema)
 - Indica que 90% da temperatura atual se mantém no próximo minuto
 - Reflete a capacidade térmica e isolamento do data center
- **-0,08**: Ganho do sistema CRAC (efeito de refrigeração)
 - Sinal negativo indica efeito de resfriamento
 - Para cada 1% de potência CRAC, reduz $0,08^{\circ}\text{C}$ por minuto
- **0,05**: Impacto da carga térmica interna
 - Para cada 1% de carga dos servidores, aumenta $0,05^{\circ}\text{C}$ por minuto
 - Representa o calor gerado pelos equipamentos
- **0,02**: Influência da temperatura externa
 - Para cada 1°C de temperatura externa, afeta $0,02^{\circ}\text{C}$ por minuto
 - Representa transferência de calor com o ambiente externo
- **3,5**: Offset de temperatura base do sistema

4.3 Condições de Operação

- **Temperatura de setpoint**: 22°C
- **Período de amostragem**: 1 minuto
- **Faixa de operação estável**: $20\text{-}24^{\circ}\text{C}$
- **Limites críticos**: $18\text{-}26^{\circ}\text{C}$

4.4 Justificativa do Offset Base (3,5)

O offset base de 3,5°C é fundamental para o funcionamento correto do modelo:

4.4.1 Necessidade Física

- **Ponto de equilíbrio natural:** Sem este offset, o sistema tenderia a 0°C
- **Ganhos intrínsecos:** Representa calor residual de iluminação, UPS, equipamentos auxiliares
- **Perdas térmicas:** Compensa perdas de calor pelas paredes, teto e piso
- **Massa térmica:** Reflete a energia armazenada na estrutura do data center

4.4.2 Validação Matemática

Para um data center em equilíbrio com:

- $P_{CRAC} = 50\%$ (operação normal)
- $Q_{est} = 40\%$ (carga típica)
- $T_{ext} = 25C$ (temperatura ambiente)
- Temperatura desejada = 22°C

O cálculo de equilíbrio é:

$$22 = 0,9 \times 22 - 0,08 \times 50 + 0,05 \times 40 + 0,02 \times 25 + 3,5$$

$$22 = 19,8 - 4,0 + 2,0 + 0,5 + 3,5 = 21,9C$$

Este resultado próximo a 22°C confirma que o modelo é fisicamente consistente.

5 Especificações do Projeto

5.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema de controle fuzzy MISO (Multiple Input, Single Output) para o controle de temperatura em um centro de dados, utilizando um controlador tipo PD fuzzy com entradas adicionais de temperatura externa e carga térmica.

5.2 Objetivos Específicos

1. Projetar funções de pertinência apropriadas para todas as variáveis
2. Implementar um motor de inferência fuzzy tipo Mamdani
3. Desenvolver uma base de regras de controle efetiva
4. Criar uma interface gráfica para monitoramento e controle
5. Validar o sistema mediante simulação

5.3 Requisitos Funcionais

5.3.1 RF1: Sistema de Inferência Fuzzy

Descrição: O sistema deve implementar um motor de inferência fuzzy tipo Mamdani com as seguintes características:

- **Entradas:** 4 variáveis (Erro, Δ Erro, T_{ext} , Q_{est})
- **Saída:** 1 variável (P_{CRAC})

5.3.2 RF2: Funções de Pertinência

Variável	Universo	Unidade
Setpoint	[16; 22; 25; 32]	°C
Δ temperatura	[16, 32]	°C
Temperatura Externa (T_{ext})	25	°C
Carga Térmica (Q_{est})	40	%
Potência CRAC (P_{CRAC})	[0, 100]	%

Tabela 1: Universos de Discurso Obrigatórios

Liberdade de Design: Os estudantes têm TOTAL LIBERDADE para:

- Definir a forma exata das funções (triangular, trapezoidal, gaussiana)
- Estabelecer os parâmetros específicos de cada função
- Determinar o grau de sobreposição entre conjuntos
- Escolher o número exato de termos linguísticos (dentro de faixas razoáveis)

5.3.3 RF3: Base de Regras de Controle

Estrutura das Regras:

1. **Completude:** Deve cobrir todas as combinações críticas
2. **Consistência:** Regras similares devem gerar saídas similares
3. **Continuidade:** Evitar mudanças abruptas entre regras vizinhas
4. **Conhecimento Especializado:** Incorporar lógica de controle térmico

5.3.4 RF4: Sistema MQTT para Monitoramento

Descrição: O sistema deve implementar comunicação MQTT para alertas e monitoramento em tempo real com as seguintes características:

- **Broker MQTT:** Conexão com broker.com:8000/mqtt
- **Tópicos obrigatórios:**

- `datacenter/fuzzy/alert` - Alertas críticos
 - `datacenter/fuzzy/control` - Dados de controle
 - `datacenter/fuzzy/temp` - Temperatura atual
- **Alertas automáticos:** Sistema deve detectar e enviar alertas para:
 - Temperatura crítica ($< 18^{\circ}\text{C}$ ou $> 26^{\circ}\text{C}$)
 - Potência CRAC máxima por tempo prolongado
 - Oscilações excessivas no sistema
 - **Dashboard separado:** Interface MQTT independente para monitoramento

Critérios de Aceitação:

- Conexão automática ao inicializar sistema
- Envio de dados a cada operação de controle
- Dashboard funcional acessível via botão na interface principal
- Tratamento de falhas de conexão (modo simulação)

5.3.5 RF5: Simulação de 24 Horas

Descrição: O sistema deve implementar simulação completa de 24 horas de operação do data center:

- **Duração:** 1440 passos (1 minuto por passo)
- **Parâmetros dinâmicos:**
 - Variação de temperatura externa seguindo padrão diário
 - Variação de carga térmica conforme perfil de uso
 - Perturbações aleatórias realistas

5.3.6 RF6: Integração com Modelo Físico

Descrição: O sistema deve implementar e utilizar a função de transferência do modelo físico para simular o comportamento térmico real do data center:

5.3.7 RF7: Interface Gráfica do Usuário

Componentes Obrigatórios:

1. Painel de Entradas:

- Campos para introduzir Erro e ΔErro
- Campos para Temperatura Externa e Carga Térmica
- Validação de faixas de entrada

2. Painel de Saída:

- Visualização da Potência CRAC calculada
- Indicação numérica e gráfica do resultado

3. Visualização de Funções de Pertinência:

- Gráficos de todas as funções de entrada
- Gráfico da função de saída
- Indicação do ponto de operação atual

4. Processo de Inferência:

- Mostrar ativação de regras
- Visualizar agregação de saídas
- Indicar o processo de defuzzificação

5. Painel de Controle:

- Botão para executar o cálculo fuzzy
- Opção para limpar/resetar valores
- Configuração de parâmetros do sistema

Tecnologias Sugeridas:

- **Web:** HTML5, CSS3, JavaScript (Chart.js, D3.js)
- **Desktop:** Python (Tkinter, PyQt), MATLAB GUI, Java Swing
- **Móvel:** Flutter, React Native, Xamarin

5.4 Entregáveis do Projeto

5.4.1 Documentação Técnica

1. Relatório de Design:

- Justificativa do design de funções de pertinência
- Explicação da base de regras desenvolvida
- Análise da estratégia de controle implementada
- Diagramas de fluxo do algoritmo

2. Análise de Resultados:

- Testes de validação do sistema
- Análise de resposta ante diferentes cenários
- Comparação com controladores tradicionais
- Avaliação de robustez e estabilidade

5.4.2 Implementação de Software

1. Funcionalidades Obrigatórias:

- regras fuzzy implementadas e funcionais
- Interface web responsiva com gráficos interativos
- Conexão MQTT com broker.Mqtt.com
- Simulação completa de 24 horas
- Sistema de alertas automáticos
- Visualização de funções de pertinência
- Processo de inferência detalhado

5.4.3 Apresentação Final

- Demonstração ao vivo do sistema funcionando
- Defesa técnica do design implementado
- Análise crítica de fortalezas e limitações
- Propostas de melhorias futuras

6 Metodologia de Desenvolvimento

6.1 Critérios de Avaliação

Componente	Porcentagem
Design de Funções de Pertinência	20%
Base de Regras e Motor de Inferência	25%
Interface Gráfica do Usuário	15%
Sistema MQTT e Monitoramento	15%
Simulação 24 Horas	10%
Documentação Técnica	10%
Apresentação e Defesa	5%

Tabela 2: Distribuição da Avaliação

7 Recursos e Referências

7.1 Bibliografia Recomendada

1. Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy sets". *Information and Control*, 8(3), 338-353.
2. Mamdani, E.H. & Assilian, S. (1975). "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller". *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1), 1-13.
3. Passino, K.M. & Yurkovich, S. (1998). "Fuzzy Control". Addison Wesley Longman.

4. Ross, T.J. (2010). "Fuzzy Logic with Engineering Applications". John Wiley & Sons.
5. Jantzen, J. (2013). "Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach". John Wiley & Sons.

8 Conclusões

Este projeto constitui uma oportunidade excepcional para aplicar os conceitos teóricos de lógica fuzzy em um problema real de engenharia. O controle de temperatura em centros de dados representa um desafio técnico significativo que requer o tratamento de múltiplas variáveis, incerteza e conhecimento especializado.

Os estudantes desenvolverão competências chave em:

- Modelagem de sistemas complexos
- Design de controladores inteligentes
- Desenvolvimento de software de engenharia
- Análise e validação de sistemas
- Comunicação técnica efetiva

O sucesso do projeto dependerá da capacidade dos estudantes para integrar conhecimentos teóricos com habilidades práticas de implementação, mantendo sempre um enfoque crítico e analítico em todas as decisões de design.