

Cássio de Carvalho Araújo

**Desenvolvimento prototípico de uma estufa para
ensaio de carbonatação acelerada em corpos de prova
de concreto**

Uberlândia, MG

2025

Cássio de Carvalho Araújo

Desenvolvimento prototípico de uma estufa para ensaio de carbonatação acelerada em corpos de prova de concreto

Trabalho de Conclusão de Curso na
Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para obtenção
do título de bacharel em Engenharia
Elétrica

Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT

Orientadora Prof.^a Dra. Gabriela Vieira Lima

Uberlândia, MG
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: +55 (34) 3239-4708 - cocel@ufu.br



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	1449BI - Graduação em Engenharia Elétrica: Bacharelado - Integral				
Defesa de:	FEELT31917 - Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica				
Data:	11/08/2025	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	15:20
Matrícula do Discente:	11911EEL008				
Nome do Discente:	Cássio de Carvalho Araújo				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento prototípico de uma estufa para ensaio de carbonatação acelerada em corpos de prova de concreto				
A carga horária curricular foi cumprida integralmente?		(X) Sim () Não			

Reuniu-se em plataforma digital de comunicação, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: **Prof. Dr. Aniel Silva de Moraes (FEELT/UFU); Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima (FEELT/UFU); e Profa. Dra. Gabriela Vieira Lima (FEELT/UFU)**, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa, **Dra. Gabriela Vieira Lima**, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao discente a palavra, para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a) sem nota.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriela Vieira Lima, Professor(a) do Magistério Superior**, em 11/08/2025, às 15:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elaine e João Luis, que sempre estiveram presentes e dispostos a me auxiliar em todos os meus projetos e foram fonte de acolhimento, motivação e amparo. Ao meu irmão, Sávio, que é para mim uma referência e fonte de admiração e inspiração.

Aos amigos, Gabriel, Laís, Lucas e Maria Elisa pela companhia e amizade ao longo de anos.

À minha professora e orientadora, Gabriela Vieira Lima, por todo o suporte, atenção e dedicação. Sua atuação ao longo de minha formação será para sempre lembrada com grande apreço e admiração.

Aos amigos do UAI FAB Lab, Maria Eduarda, Pedro e Yugo, pelo apoio durante a idealização, produção e embasamento desse trabalho e por todos os bons momentos compartilhados.

Por fim, ao corpo docente e demais servidores da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia pelo importantíssimo trabalho prestado à sociedade.

"Tudo bem, até pode ser

Que os dragões sejam moinhos de vento."

Engenheiros do Hawaii

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um protótipo de estufa com controle automatizado de temperatura e umidade, projetada para ensaios de carbonatação acelerada em corpos de prova de concreto. A carbonatação é um dos principais mecanismos de deterioração de estruturas de concreto armado, caracterizada pela redução do pH dos compostos cimentícios, o que compromete a integridade das armaduras metálicas. Por ser um processo naturalmente lento, são necessários métodos acelerados para investigação eficaz em contexto laboratorial.

A estufa proposta utiliza um microcontrolador ESP32 para gerenciar os sensores e atuadores que regulam as variáveis ambientais, adotando controladores PID como forma de estabilização. A metodologia incluiu a modelagem matemática do sistema via resposta ao degrau, obtenção das funções de transferência das plantas envolvidas e sintonia dos controladores, considerando aspectos como estabilidade, tempo de acomodação e erro em regime permanente.

Os resultados experimentais validaram o protótipo, indicando boa estabilidade e desempenho adequado nas faixas operacionais desejadas. A arquitetura implementada mostrou-se eficiente, de baixo custo e potencialmente escalável. O sistema representa uma solução prática para o ensaio de carbonatação e pode ser aperfeiçoado em versões futuras com mecanismos adicionais de controle de CO₂ e desumidificação.

Palavras-chave: Carbonatação acelerada, concreto armado, sistema de controle, ESP32, controlador PID.

ABSTRACT

This study presents the development of a prototype chamber with automated temperature and humidity control, designed for accelerated carbonation tests on concrete specimens. Carbonation is one of the main mechanisms of deterioration in reinforced concrete structures, characterized by the reduction of the pH in cementitious compounds, which compromises the integrity of metal reinforcements. As a naturally slow process, accelerated methods are necessary to enable effective investigation in laboratory settings.

The proposed chamber uses an ESP32 microcontroller to manage sensors and actuators responsible for regulating environmental variables, adopting PID controllers to achieve stabilization. The methodology included mathematical modeling of the system via step response, derivation of transfer functions for the plants involved, and controller tuning, considering factors such as stability, settling time, and steady-state error.

Experimental results validated the prototype, demonstrating strong stability and adequate performance within the desired operational ranges. The implemented architecture proved to be efficient, cost-effective, and potentially scalable. This system offers a practical solution for carbonation testing and can be further improved with additional mechanisms for CO₂ regulation and dehumidification.

Keywords: Accelerated carbonation, reinforced concrete, control system, ESP32, PID controller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Camada passivante e processo de despassivação	15
Figura 2 - Medição da camada carbonatada por aplicação de fenolftaleína	15
Figura 3 - Governador centrífugo de Watt e Boulton	16
Figura 4 - Diagrama de blocos de um controlador PID	17
Figura 5 - Resposta de um controlador P com $K_p = 3$ a um erro em degrau unitário	18
Figura 6 - Resposta de um controlador PI a um erro em degrau unitário	19
Figura 7 - Comparativo entre a resposta ao degrau de um compensador P e PD	20
Figura 8 - Estrutura interna e externa da estufa	21
Figura 9 - Sensor DHT11	22
Figura 10 - Módulo umidificador ultrassônico	24
Figura 11 - Resistor de Aquecimento	25
Figura 12 - Diagrama de componentes e ligações elétricas do sistema	26
Figura 13 - Resposta ao degrau da planta de temperatura	27
Figura 14 - Comparativo entre resposta real e simulada para a planta de temperatura	28
Figura 15 - Respostas ao degrau do umidificador	29
Figura 16 - Comparativo entre a resposta real e simulada para a planta de umidade	30
Figura 17 - Resposta ao degrau para interferência entre as variáveis	31
Figura 18 - Comparativo entre resposta real e simulada para a perturbação	32
Figura 19 - Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada	33
Figura 20 - Gráfico do lugar das raízes do sistema compensado para a planta de aquecimento	34
Figura 21 - Resposta em malha fechada do sistema de aquecimento com compensador	35
Figura 22 - Local das raízes e resposta ao degrau do sistema de umidificação	36
Figura 23 - Respostas do Sistema de Temperatura a referências variadas	38
Figura 24 - Resposta Simulada e Experimental para o Sistema de Temperatura em Malha Fechada	39
Figura 25 - Resposta do sistema de temperatura à objetivos dinâmicos	39
Figura 26 - Resposta do sistema de umidade à objetivos dinâmicos	40
Figura 27 - Respostas do Sistema de Umidade para níveis variados de Temperatura	41
Figura 28 - Limites de Operação do Umidificador para Diferentes Temperaturas	42
Figura 29 - Teste combinado com atraso no acionamento do umidificador	43
Figura 30 - Teste combinado com <i>setpoints</i> dinâmicos	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
Durae	Grupo de pesquisa em durabilidade e avaliação estrutural
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> [Organização Internacional de Normalização]
RILEM	<i>Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systemes de construction et ouvrages</i> [União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas de Construção e Estruturas]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Justificativa	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1 Objetivos Específicos	13
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Deterioração do concreto	14
2.1.1. Despassivação por carbonatação	14
2.2. Ensaio de Carbonatação	15
2.3. Controlador PID	16
2.3.1. Controlador Proporcional	17
2.3.2. Controlador Proporcional e Integral	18
2.3.3. Controlador Proporcional, Integral e Derivativo	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1. Estrutura e Ventilação	21
3.2. Sensor de Umidade e Temperatura	22
3.3. Atuador Umidificador	24
3.4. Atuador Aquecedor	24
3.5. Diagrama elétrico do sistema	25
3.6. Identificação da função de transferência	26
3.6.1. Função de Transferência da Temperatura	26
3.6.2. Função de Transferência da Umidade	28
3.6.3 – Função de Transferência da perturbação entre as variáveis	30
3.7. Sintonia dos Controladores	32
3.7.1. Sintonia do Controlador de Aquecimento	33
3.7.2. Sintonia do Controlador de Umidade	35
4. RESULTADOS	37
4.1. Resultados do controle de temperatura	37
4.2. Resultados de controle de umidade	40

4.3. Resultados combinados	42
5. CONCLUSÃO	45
5.1. Trabalhos Futuros	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

A corrosão induzida por carbonatação é um dos principais mecanismos de deterioração em estruturas de concreto armado, sendo sua intensidade diretamente influenciada por variáveis como temperatura, umidade e concentração de CO_2 (LIU; CHEN; YU, 2020). No entanto, esse é um fenômeno naturalmente lento, de modo que a depender da composição do concreto ensaiado, podem ser necessários anos ou até mesmo décadas para se perceber resultados visíveis (PAULETTI; POSSAN; MOLIN, 2007). Como alternativa, busca-se a realização de ensaios acelerados em ambientes controlados, nos quais variáveis importantes são mantidas em condições de interesse, possibilitando a redução do tempo necessário para a obtenção de dados confiáveis e a estimativa de comportamentos equivalentes a longos períodos de exposição em campo.

Dessa forma, a utilização de um ambiente estável e automatizado permite a execução de ensaios de forma consistente e com boa repetibilidade, características essenciais para a identificação de padrões de comportamento a serem considerados durante a extrapolação dos resultados. Microcontroladores, como o ESP32, apresentam-se como uma alternativa de baixo custo, eficiência razoável e são capazes de gerenciar as variáveis de interesse e realizar a coleta e transmissão das leituras. Desse modo, é possível assegurar uma maior consistência das condições estabelecidas para o ciclo de testes.

1.1. Justificativa

Os trabalhos que avaliam a influência da penetração de carbono no concreto, bem como a sua correlação para com as variáveis do ambiente como temperatura e umidade, exploram diversas combinações de parâmetros.

Para os ensaios de carbonatação realizados no Brasil, não há ainda uma normatização bem definida. Internacionalmente, as recomendações de concentração de CO_2 , temperatura e umidade não seguem um único consenso variando em seus requisitos (LUCENA, 2016).

Desta forma, faz-se necessário um equipamento que possa atingir cenários variados de forma prática e consistente, além de registrar adequadamente os valores das variáveis do ambiente de ensaio para consideração posterior.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma câmara com controle de temperatura e umidade para realização de ensaios de carbonatação acelerada em corpos de prova de concreto armado. Será documentado o processo de construção de um protótipo em escala reduzida para prova conceitual, de modo que ao fim seja possível definir um projeto ampliado com mais funcionalidades e maior capacidade.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Construção da estrutura física do protótipo. Conexão dos sensores, atuadores, fontes de alimentação e microcontrolador;
- Identificação do sistema através da resposta ao degrau;
- Projeto dos controladores, simulação, implementação na planta física e ajuste fino para melhor desempenho;
- Projeto da versão ampliada do sistema, considerando as principais dificuldades e oportunidades de melhoria observadas no protótipo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para assegurar a plena compreensão do trabalho aqui desenvolvido, o presente capítulo será dedicado a discorrer sobre alguns conceitos básicos, bem como realizar uma breve apresentação de alguns dos componentes e sistemas utilizados ao longo do projeto.

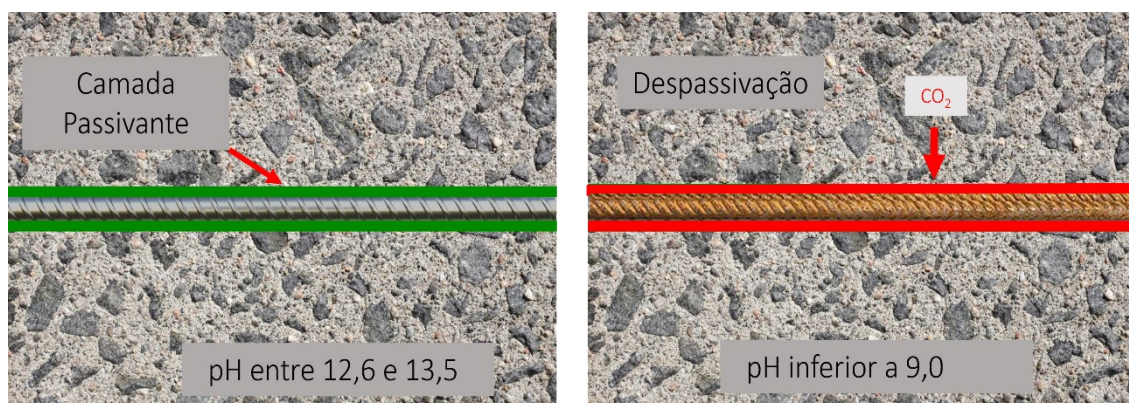
2.1. Deterioração do concreto

Entende-se a durabilidade de estruturas de concreto como sua capacidade de suportar as ações do ambiente previstas durante a etapa de elaboração do projeto. Desta forma, a vida útil de um projeto é tida como a duração em que a estrutura como um todo ou seus componentes de forma isolada retem suas características sem a necessidade de grandes intervenções além do plano de uso e manutenção estipulado. Para os agentes deteriorantes associados à armadura evidenciam-se os fenômenos de despassivação por ação de íons cloreto (de ação mais localizada) e a despassivação por carbonatação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014).

2.1.1. Despassivação por carbonatação

Normalmente, a armadura não é afetada pela corrosão devido à ação de uma película de ferrato de cálcio, tratada como camada passivante. O processo de despassivação, rompimento desse envoltório protetor, pode ocorrer quando há uma queda do pH alcalino da água nos poros do concreto devido ao processo de carbonatação (CUNHA, 2001). A Figura 1, ilustra a penetração do dióxido de carbono e consequente acidificação, promovendo a corrosão da estrutura metálica interna.

Figura 1 - Camada passivante e processo de despassivação



Fonte: Adaptado de DURAE (2024)

2.2. Ensaio de Carbonatação

Os ensaios de carbonatação acelerada baseiam-se na exposição dos corpos de prova, geralmente em formato cilíndrico ou prismático, há um ambiente controlado e com maior concentração de dióxido de carbono. Posteriormente, os exemplares são rompidos e é verificada a espessura da camada acidificada a partir de sua superfície utilizando algum indicador de pH como a fenolftaleína demonstrada na Figura 2.

Figura 2 - Medição da camada carbonatada por aplicação de fenolftaleína



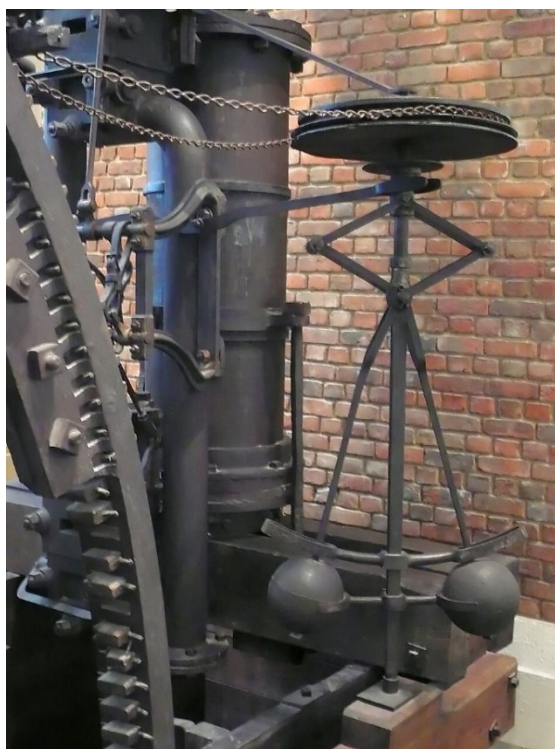
Fonte: DURAE (2024)

Contudo, não há um consenso universal quanto aos métodos de execução desses testes, de modo que as principais variações se referem ao tempo de exposição, concentração de CO₂, temperatura e umidade. Além disso, as condições de pré-condicionamento também podem variar entre estudos (ISO, 2015; RILEM, 1988; 1999).

2.3. Controlador PID

O princípio dos sistemas de controle tem sua história intimamente conectada ao final do século XVIII, quando James Watt e seu parceiro Matthew Boulton desenvolvem um governador centrífugo para o controle automático da velocidade de máquinas à vapor similar ao equipamento ilustrado na Figura 3. O equipamento desenvolvido pela dupla é um excelente exemplar de controlador proporcional e das limitações desse tipo de compensador, uma vez que seu funcionamento adequado só era possível para um alcance restrito de velocidades e o erro permanente não era eliminado consistentemente ao se afastar do ponto de operação (BENNETT, 1996).

Figura 3 - Governador centrífugo de Watt e Boulton



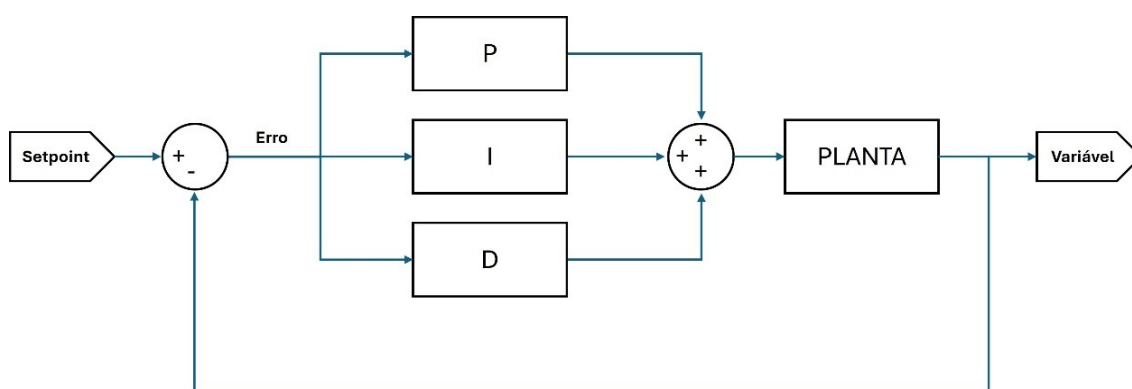
Fonte: JUNGE (2008)

Em 1922, é conceituado pela primeira vez o que hoje se entende por controlador proporcional integral derivativo (PID) também denominado por controlador de três modos. Nicholas Minorsky (1922) descreveu o controlador baseando-se no comportamento de um timoneiro que para manter a rota de uma embarcação considerava não apenas o erro atual, mas também os erros anteriores e a taxa de variação da posição atual.

Atualmente, os controles PID são amplamente utilizados para o controle de processos e seu princípio de funcionamento baseia-se na definição de um valor alvo para uma variável controlada. O erro é calculado através da diferença entre a referência e o valor atual da variável. Em seguida a divergência calculada é manipulada por três coeficientes: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D). Por fim, o resultado obtido constitui o sinal de controle a ser aplicado nos atuadores da planta (CAMPOS, 2010).

A Figura 4 indica a dinâmica desse tipo de sistema. O valor de referência é somado à realimentação negativa, em seguida o resultado identificado como erro é direcionado a cada um dos três coeficientes e o resultado das operações é mais uma vez agregado e aplicado à planta. Lê-se então o valor atual da variável de interesse e o realimenta negativamente, recomeçando o processo.

Figura 4 - Diagrama de blocos de um controlador PID



Fonte: Elaborado pelo Autor

2.3.1. Controlador Proporcional

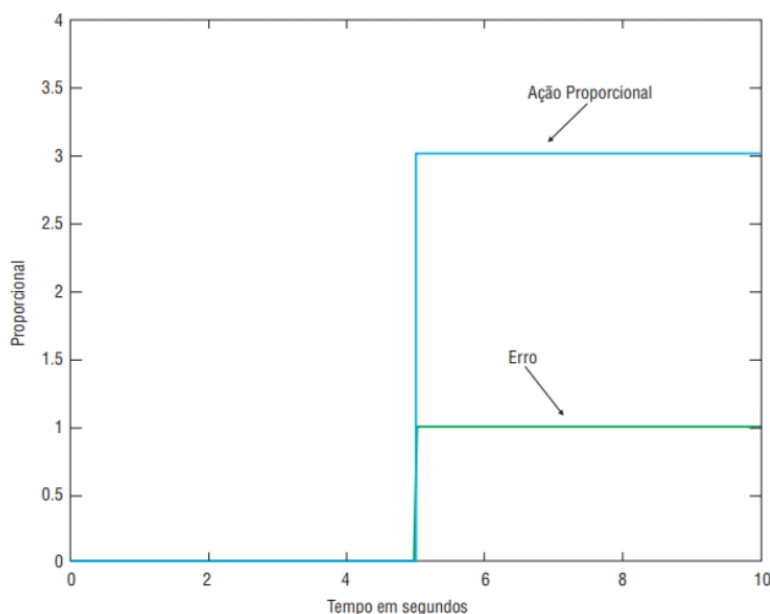
A componente proporcional do controlador baseia-se no erro atual, isto é, a diferença entre o valor desejado e o valor aferido. De modo que a saída do

controlador ($u(t)$), é atualizada em relação à saída anterior com um acréscimo dado pelo produto entre o ganho proporcional (K_p) e o erro ($e(t)$). Essa dinâmica é apresentada através da equação 2.1. Essa equação caracteriza uma abordagem ao controlador PID denominada de algoritmo de posição em que o valor absoluto da saída de controle é calculada à cada ciclo.

$$u(t) = u_0(t) + K_p \times e(t) \quad (2.1)$$

Uma vez que esse controlador depende exclusivamente do erro atual. Caso não haja variação no erro calculado, também não haverá alteração no sinal de saída, permitindo assim um estado de erro permanente caso o sistema encontre um ponto de equilíbrio diferente do *setpoint* (CAMPOS, 2010).

Figura 5 - Resposta de um controlador P com $K_p = 3$ a um erro em degrau unitário



Fonte: CAMPOS (2010)

2.3.2. Controlador Proporcional e Integral

O controlador PI (Proporcional e Integral) mantém a ação observada no controlador P, alterando instantaneamente a saída de forma proporcional ao valor do erro. Entretanto, a saída é ajustada baseada na integral da função de

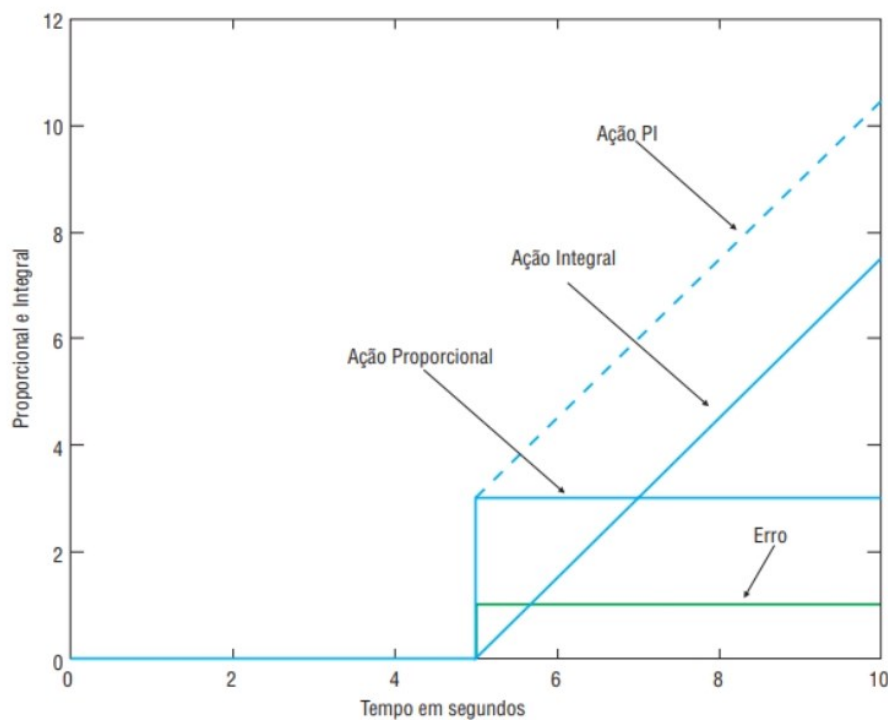
erro. Desta forma, o sinal de saída é constantemente incrementado ou reduzido enquanto o erro persistir possibilitando uma condição de erro nulo em estado permanente (CAMPOS, 2010).

$$u(t) = u_0(t) + K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t)dt \quad (2.2)$$

Na equação 2.2 a integral da função de erro é multiplicada pelo coeficiente K_i , denominado ganho integral e alternativamente compreendido como a razão entre o ganho proporcional (K_p) e a constante de tempo de integração (T_i).

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2.3)$$

Figura 6 - Resposta de um controlador PI a um erro em degrau unitário



Fonte: CAMPOS (2010)

2.3.3. Controlador Proporcional, Integral e Derivativo

A ação do termo derivativo antecipa a ação do controlador proporcional considerando a tendência de variação do erro. Desse modo, a adição da componente derivativa promove um amortecimento à resposta e suaviza os *overshoots*, isto é, suaviza a ultrapassagem percentual.

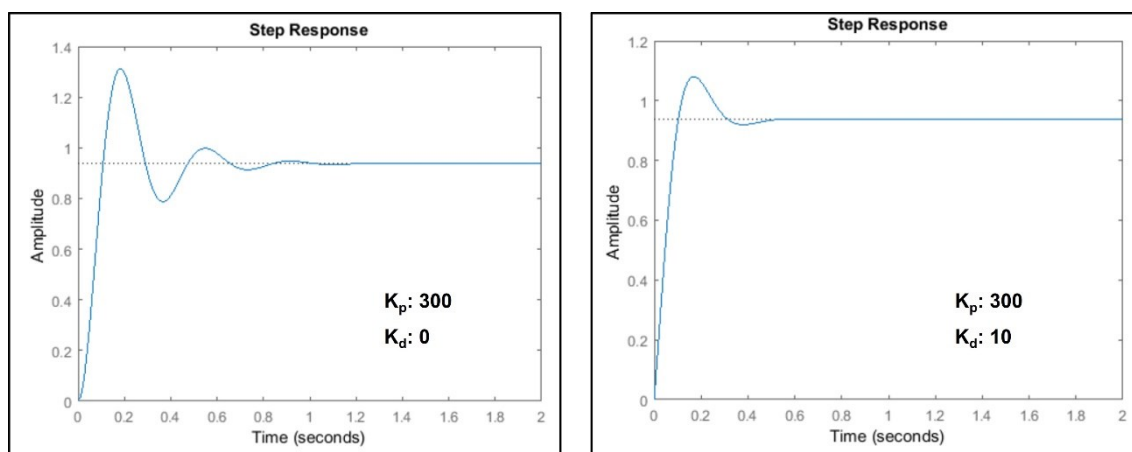
A equação 2.4 indica o comportamento de um compensador PID. Neste caso, o coeficiente K_d indica o ganho derivativo e é constituído pelo produto entre o ganho proporcional e a constante de tempo derivativo (T_d), como indicado na equação 2.5.

$$u(t) = u_0(t) + K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t)dt + K_d \times \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

$$K_d = K_p \times T_d \quad (2.5)$$

A figura 7 demonstra a suavização da resposta do sistema ao se adicionar uma componente derivativa. É possível também verificar a antecipação da resposta e maior agilidade para atingir o regime permanente.

Figura 7 - Comparativo entre a resposta ao degrau de um compensador P e PD



Fonte: Adaptado de UNIVERSITY OF MICHIGAN ([s.d.])

3. MATERIAIS E MÉTODOS

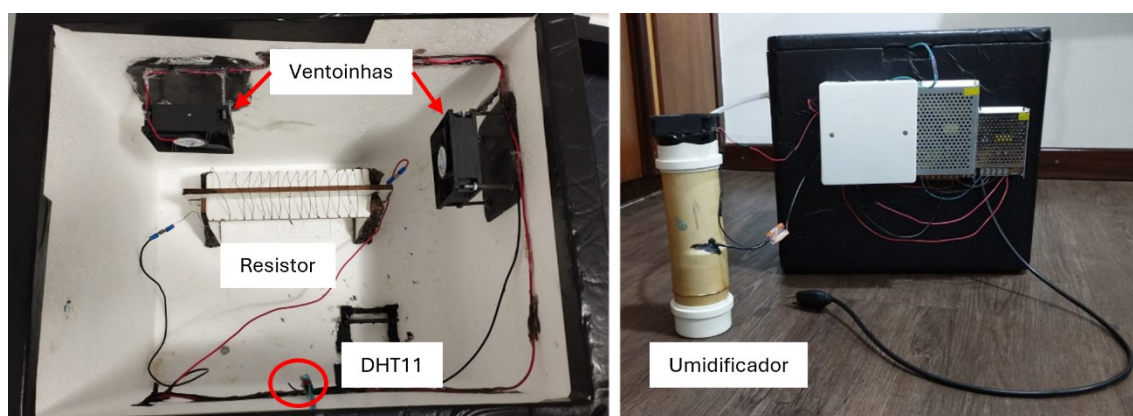
A construção de um sistema de controle com realimentação demanda a integração entre sensores, atuadores, controladores, lógica de controle, bem como componentes físicos e estruturais. O presente capítulo se dedica a introduzir de forma sucinta cada um dos principais elementos utilizados, sua funcionalidade e motivo para sua escolha. Em seguida, serão apresentadas as etapas desenvolvidas ao longo do projeto para modelagem do sistema e definição do controlador.

3.1. Estrutura e Ventilação

A estrutura do protótipo da estufa é feita a partir de uma caixa de isopor com capacidade para 40 litros e paredes com espessura de aproximadamente 30 mm. O material foi escolhido por ser uma alternativa de baixo custo e bom desempenho para isolamento térmico, o baixo peso contribui ainda para uma maior facilidade de transporte do sistema.

Para promover uma melhor circulação de ar no interior da estufa e promover uma distribuição homogênea de umidade e temperatura foram adicionadas 2 ventoinhas em suas laterais, conforme pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura interna e externa da estufa

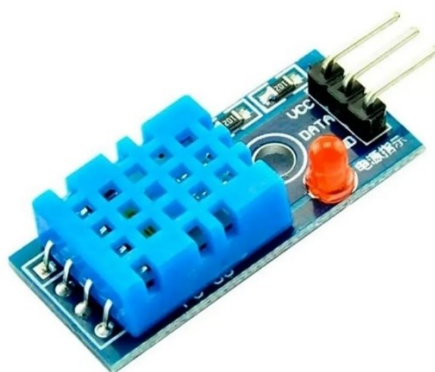


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2. Sensor de Umidade e Temperatura

Para a leitura dos valores de temperatura e umidade foi utilizado um módulo DHT11, ilustrado na Figura 9. Esse sensor possui um componente de medição de umidade resistivo, bem como um termistor de coeficiente de temperatura negativo, isto é, sua resistência diminui à medida que há uma elevação de temperatura. As leituras são então realizadas pelo sensor e enviadas ao microcontrolador através do protocolo de comunicação *1-wire*.

Figura 9 - Sensor DHT11



Fonte: Adaptado de MERCADO LIVRE (2025)

Esse sensor foi escolhido pela sua capacidade de realizar as medições das duas variáveis de interesse de forma simultânea, bem como pela sua facilidade de utilização, ampla disponibilidade de bibliotecas para programação e baixo custo possibilitando que seja substituído com facilidade se necessário. Ainda que dentro da mesma família existam opções mais robustas como o DHT22, o sensor em questão foi utilizado devido a uma maior disponibilidade durante a confecção do projeto. A Tabela 1 apresenta uma síntese de algumas informações de desempenho obtidas a partir do manual do fabricante.

Tabela 1 - Condições de operação DHT11

Parâmetros	Condição	Mínimo	Típico	Máximo
Umidade				
Precisão	25 °C		±4% RH	
	0 - 50 °C			±5% RH
Faixa de Medição	0 °C	30% RH		90% RH
	25 °C	20% RH		90% RH
	50 °C	20% RH		80% RH
Temperatura				
Precisão		± 1 °C		± 2 °C
Faixa de Medição		0 °C		50 °C

Fonte: Adaptado de AOSONG ([s.d.])

3.3. Atuador Umidificador

Para o sistema de umidificação foi utilizado um módulo ultrassônico com tensão de alimentação nominal de 24V. Esse equipamento consiste em um disco piezoelétrico de material cerâmico que oscila em elevadas frequências, de modo a atomizar a água e produzir uma fina névoa sem a necessidade de aquecimento e com um baixo consumo de energia.

O módulo ultrassônico foi posicionado em um reservatório plástico externo à estrutura principal da estufa. De forma complementar foi adicionado uma ventoinha para forçar o deslocamento da névoa produzida em direção ao interior da caixa.

Figura 10 - Módulo umidificador ultrassônico



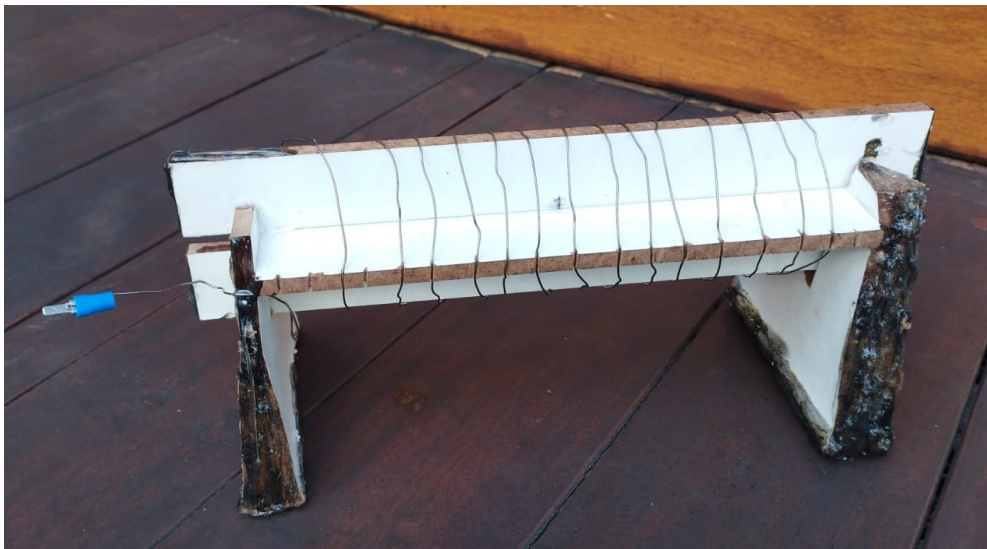
Fonte: Adaptado de USINAINFO (2025)

3.4. Atuador Aquecedor

O sistema de aquecimento da estufa consiste em um resistor de aproximadamente 10Ω feito manualmente a partir de um fio nu de Nicromo (uma liga metálica à base de Níquel, Cromo e Ferro frequentemente utilizada para resistores de chuveiros, fornos elétricos e secadoras), uma vez que a tensão de alimentação para o sistema de aquecimento foi projetada para 24 V, espera-se uma potência nominal do equipamento de 57,6 W. O filamento foi enrolado ao

redor de um suporte feito em MDF, material selecionado pelo baixo custo, caráter dielétrico e fácil manuseabilidade.

Figura 11 - Resistor de Aquecimento



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5. Diagrama elétrico do sistema

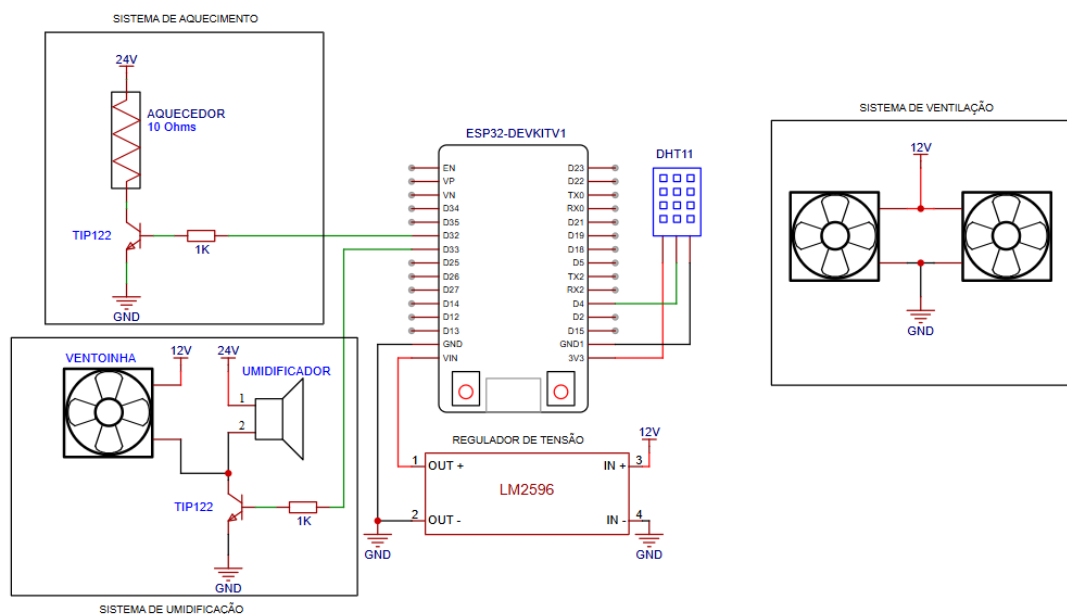
A figura 12 indica um diagrama das conexões realizadas entre os diversos sistemas da planta, bem como os componentes que os compõem. O sistema de aquecimento é conectado diretamente à alimentação em 24 volts e sua conexão ao terra é controlada pelo chaveamento de transistores TIP122 através do sinal PWM fornecido pelo microcontrolador, dessa forma têm-se um controle da tensão RMS aplicada e consequentemente da potência dissipada.

Para o sistema de umidificação, em adição ao atuador ultrassônico também é controlada a velocidade de uma ventoinha responsável pelo fluxo de ar transportador das partículas suspensas de água ao compartimento principal da caixa.

Por sua vez, o sistema de ventilação é responsável por garantir uma distribuição mais homogênea da umidade e temperatura dentro da câmara, portanto, seus ventiladores se mantêm ativos durante toda a operação do sistema e são sempre alimentados com tensão nominal.

Por fim, a tensão de 12V é regulada para 3,3V permitindo a alimentação do microcontrolador, o qual é responsável por fornecer energia ao sensor de umidade e temperatura DHT11.

Figura 12 - Diagrama de componentes e ligações elétricas do sistema



primeira ordem. Isto é, o sistema apresenta uma curva de resposta em formato exponencial e se estabiliza em um dado valor sem a presença de ultrapassagem percentual.

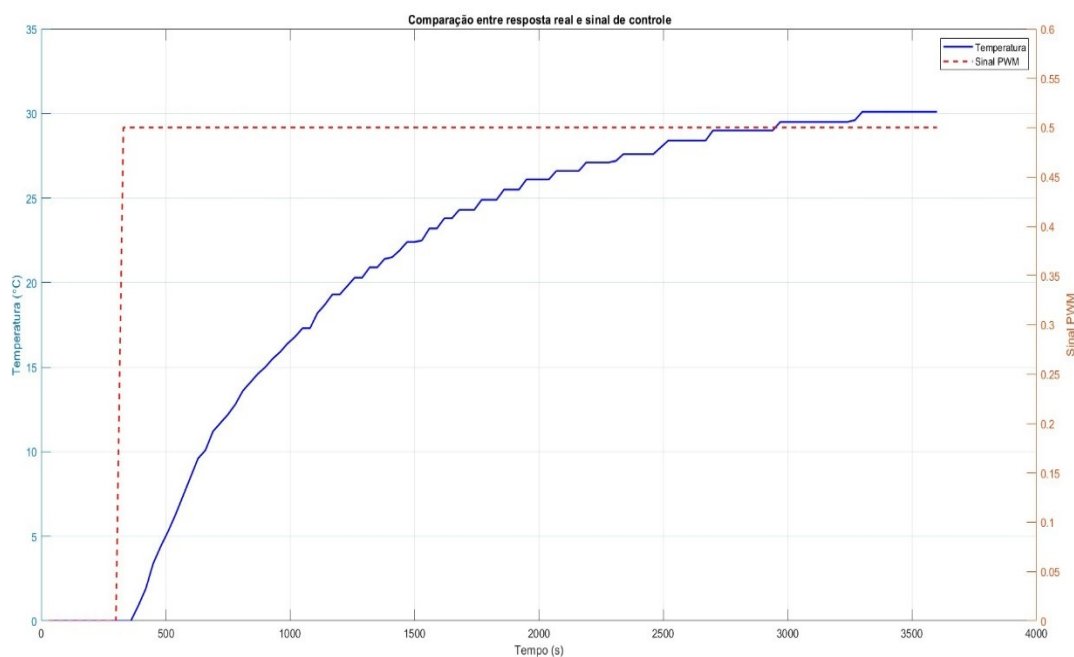
Uma representação típica de um sistema de primeira ordem se dá através da equação 2.6:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (2.6)$$

Em que, K (ganho estático) se relaciona proporcionalmente à responsividade do sistema ao valor da entrada e o termo τ (constante de tempo) indica a velocidade de resposta do sistema (FERNANDES JÚNIOR, 2009).

Considerando essas informações foi realizado um ensaio aplicando um sinal PWM com *duty cycle* de 50% após o sistema se estabilizar em temperatura ambiente, conforme ilustrado pela figura 13.

Figura 13 - Resposta ao degrau da planta de temperatura



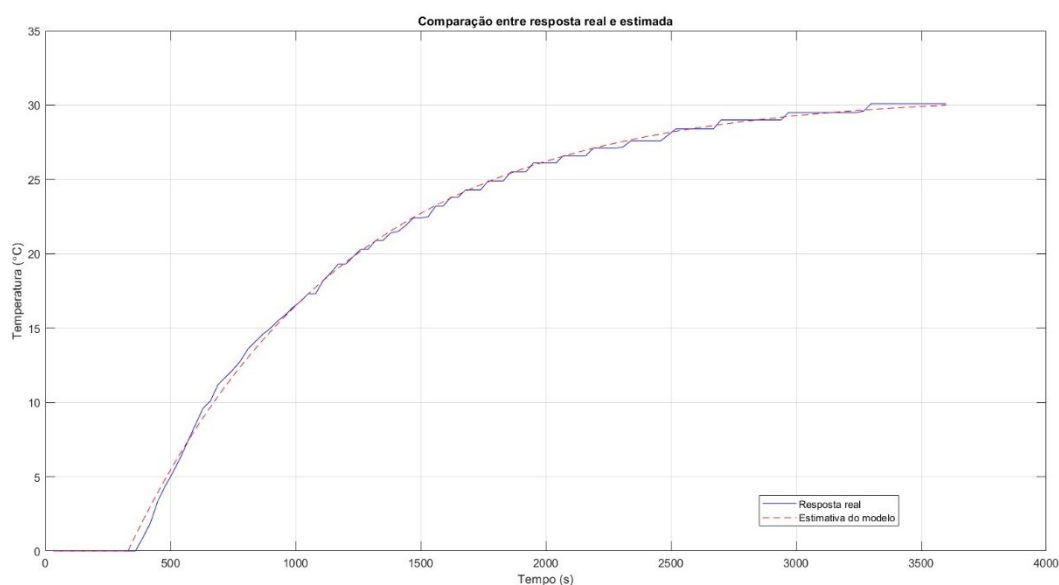
Fonte: Elaborado pelo Autor

E através da função *tfest* do *software* MATLAB, obteve-se a seguinte equação:

$$G_{Temp} = \frac{0,07065}{s + 0,00115} \quad (2.7)$$

Computacionalmente, a equação obtida foi então submetida ao mesmo degrau de entrada para que sua saída fosse comparada aos registros obtidos experimentalmente de modo a verificar sua acuracidade, como observa-se na Figura 14.

Figura 14 - Comparativo entre resposta real e simulada para a planta de temperatura



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.6.2. Função de Transferência da Umidade

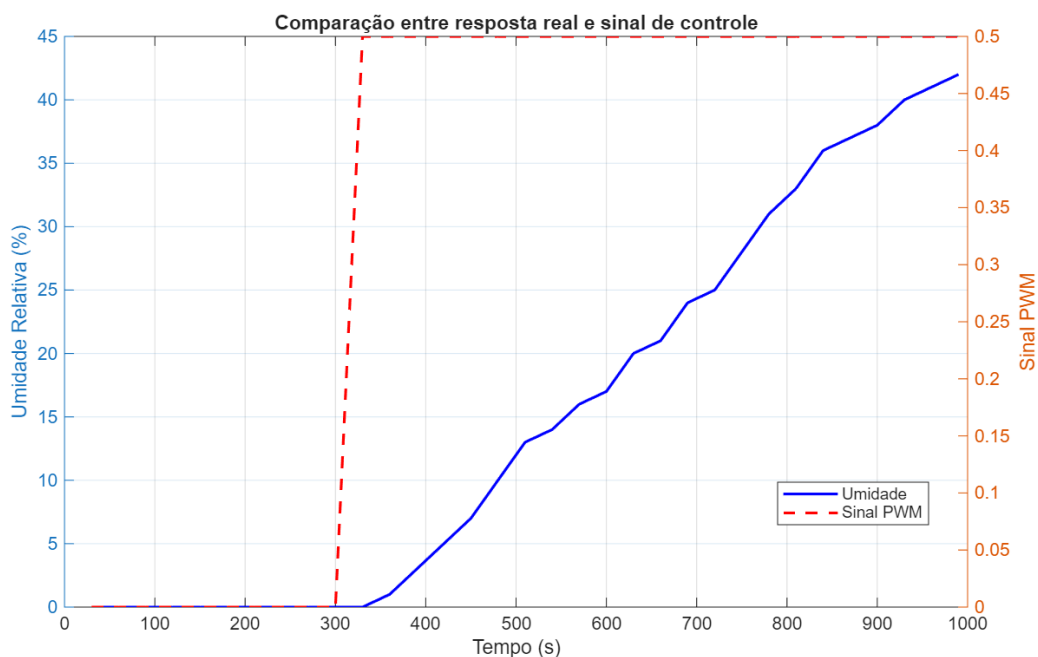
O controle de umidade, por sua vez, mostra-se ligeiramente diferente em relação ao controle de temperatura. O conceito de umidade relativa se refere à razão entre a quantidade de água presente na atmosfera e a capacidade máxima de absorção do meio para aquelas condições, de forma que para ambientes mais quentes o ar possui maior capacidade de absorção das moléculas de água

fazendo necessário que a quantidade total de vapor seja maior para um mesmo nível percentual.

Contudo, ao considerarmos uma temperatura estável e avaliarmos a resposta do sistema a um sinal de entrada aplicado no sistema umidificador, podemos notar um comportamento de caráter integrador, de modo que a resposta do sistema tende a aumentar desde que haja a aplicação de um sinal de entrada. Não há, portanto, um nível de estabilização intermediário e o sistema deve atingir a saturação em 100% e alcançar o ponto de orvalho, condição em que o vapor de água condensa e se deposita em forma líquida.

Para modelagem do sistema, foi realizado um ensaio aplicando um sinal PWM com *duty cycle* de 50% ao umidificador após a umidade relativa no interior da câmara se estabilizar.

Figura 15 - Respostas ao degrau do umidificador



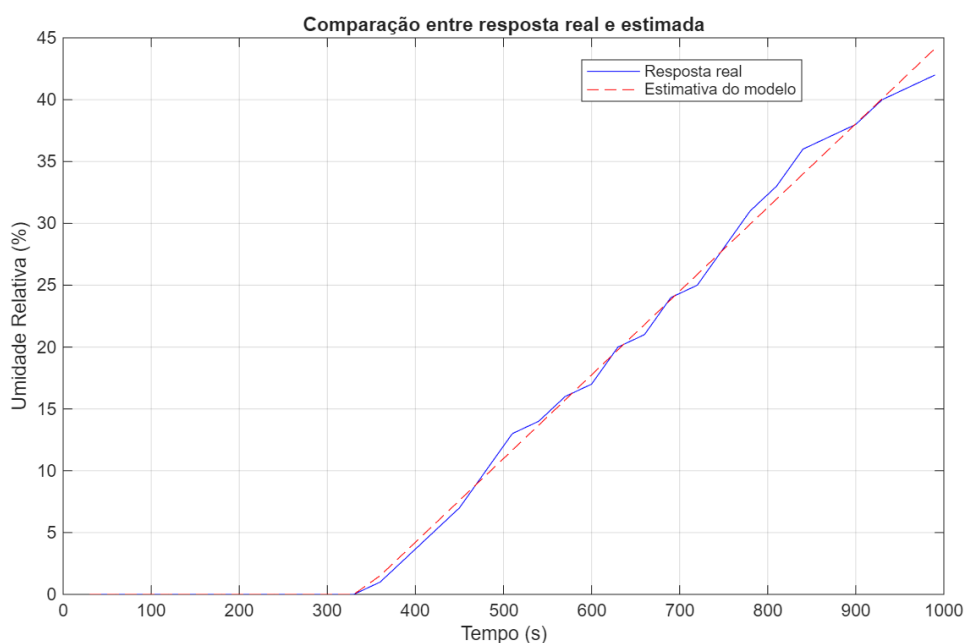
Fonte: Elaborado pelo Autor

Assim como realizado para a temperatura, foi empregada a função *tfest* para estimativa da função de transferência. Contudo, foi adicionado intencionalmente um polo na origem para que a função obtida mantivesse as características de um sistema integrador. Obteve-se, então, a seguinte equação:

$$G_{Umid} = \frac{0,01764}{s(s + 0,1304)} \quad (2.8)$$

Tal como realizado anteriormente, a função obtida recebeu o mesmo degrau de entrada utilizado durante o experimento e as duas respostas foram comparadas graficamente conforme verifica-se na figura 16.

Figura 16 - Comparativo entre a resposta real e simulada para a planta de umidade



Fonte: Elaborado pelo Autor

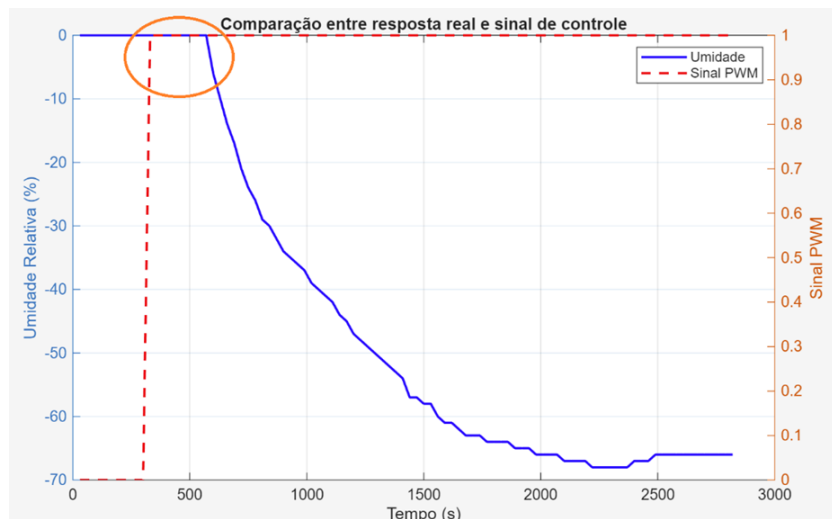
3.6.3 – Função de Transferência da perturbação entre as variáveis

Para temperaturas mais elevadas, o ar é capaz de comportar um maior volume de água, de modo que se pode encontrar uma função de transferência relativa à interferência causada na umidade relativa do sistema devido ao acionamento do aquecedor.

Para essa análise, a umidade do sistema foi levada à saturação com um degrau unitário e em seguida, foi também acionado o sistema de aquecimento com um sinal PWM de *duty cycle* de 100%.

Avaliando o gráfico da figura 17, nota-se um comportamento similar a um sistema de primeira ordem, no entanto há a presença de um atraso entre a aplicação do degrau e reação do sistema.

Figura 17 - Resposta ao degrau para interferência entre as variáveis



Fonte: Elaborado pelo autor

Deste modo, a equação típica para esse tipo de sistema segue o formato:

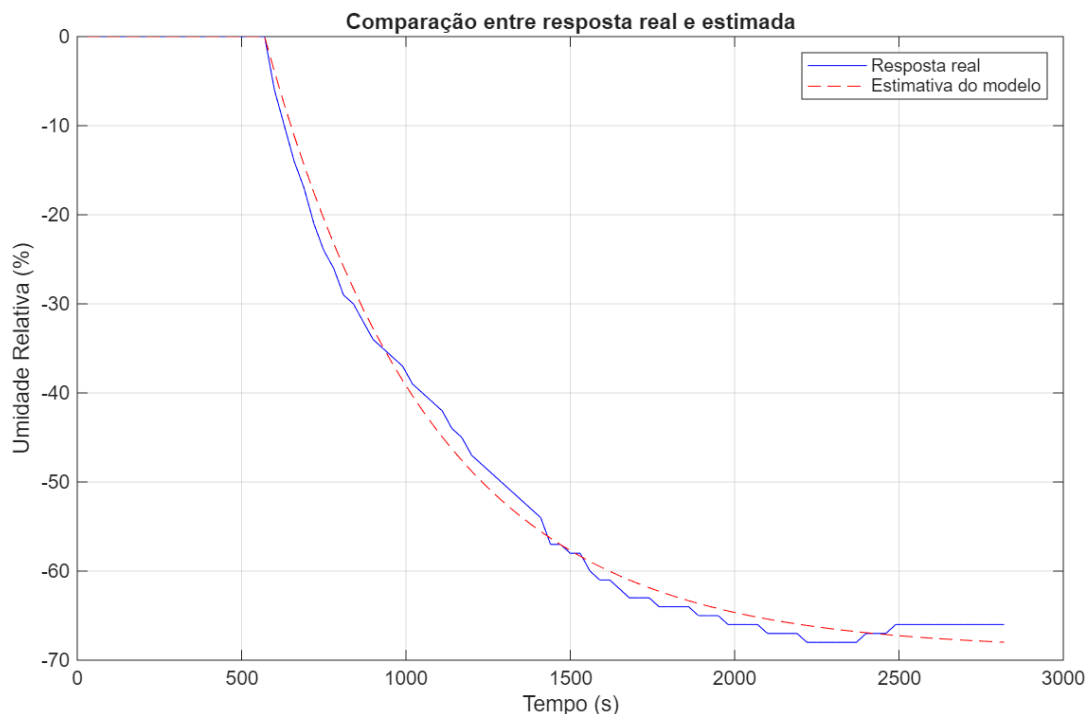
$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2.9)$$

Sua estrutura se mantém a mesma da equação 2.6, contudo têm-se o termo θ relativo ao tempo necessário para que se observe uma alteração da variável de interesse a partir do instante de aplicação do sinal de entrada (FERNANDES JÚNIOR, 2009).

Considerando essas informações, o modelo obtido é apresentado na equação 2.10 para o comportamento do sistema. Para validação do modelo obtido na Figura 18 é possível observar o comparativo entre os dados experimentais e a resposta calculada do modelo foi realizado como visto na figura 18.

$$G_{Perturb} = \frac{-0,1348}{s + 0,001959} e^{-240s} \quad (2.10)$$

Figura 18 - Comparativo entre resposta real e simulada para a perturbação



Fonte: Elaborado pelo Autor

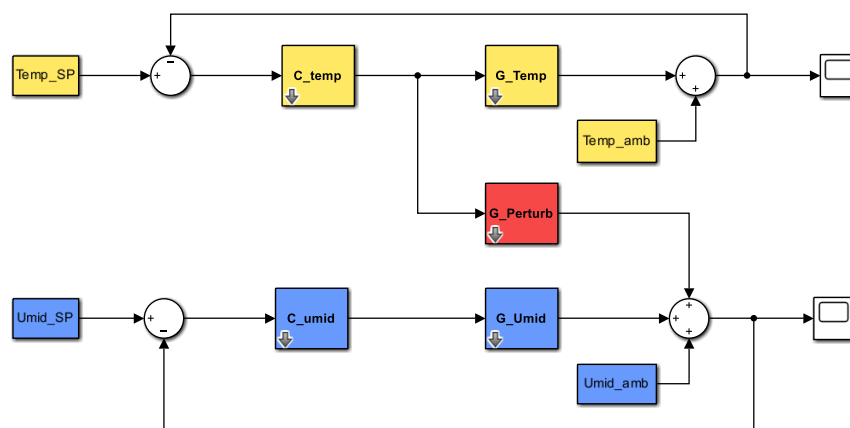
3.7. Sintonia dos Controladores

A etapa de sintonia dos controladores tem como objetivo ajustar os coeficientes de cada compensador para garantir que os setpoints definidos sejam atingidos conforme os critérios de desempenho estabelecidos como: tempo de acomodação, erro em regime permanente e limites de sobressinal aceitáveis. Além disso, o sistema deve ser robusto o suficiente para lidar com perturbações internas e externas.

Inicialmente, as funções de controle foram desenvolvidas no domínio contínuo, com base no comportamento experimental observado nas plantas de temperatura e umidade. Posteriormente, essas funções foram convertidas para o domínio discreto, adequando-se à implementação no microcontrolador, que opera com uma frequência de amostragem de 30 segundos.

A Figura 19 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle, destacando o laço de realimentação negativa: o erro entre o valor de referência e a saída do sistema alimenta os controladores, que calculam a ação de controle aplicada a cada planta. A resposta final também é influenciada pelas condições iniciais, como a temperatura e umidade presentes no início do processo. Cabe destacar que os dois sistemas estão interligados, o aquecimento influencia diretamente a taxa de umidificação, funcionando como uma perturbação negativa dentro do sistema.

Figura 19 - Diagrama de blocos do sistema de controle em malha fechada



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.7.1. Sintonia do Controlador de Aquecimento

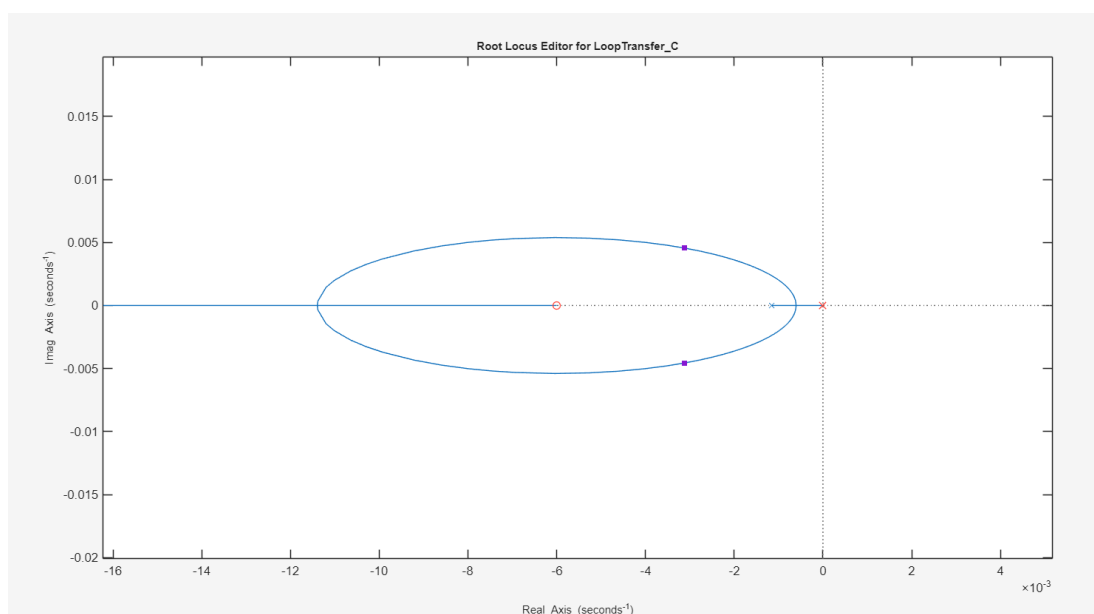
Para o controle de temperatura, optou-se pela utilização de um controlador proporcional-integral (PI), com o objetivo principal de eliminar o erro em regime permanente. A estratégia de sintonia priorizou uma resposta suficientemente rápida. Admite-se a ocorrência de um leve *overshoot*, desde que este não comprometa a estabilidade do sistema ou resulte em ultrapassagens excessivas da referência, respeitando os limites térmicos seguros para os componentes e materiais utilizados.

Deste modo, para a temperatura a equação do controlador pode ser dada pela seguinte função:

$$C_{Temp} = 0,072 \frac{(s + 0.006)}{s} \quad (2.11)$$

O denominador s nos indica a ação integradora do controlador, responsável por eliminar o erro em regime permanente. O ganho de 0,072 está diretamente relacionado à velocidade de resposta do sistema, de modo que um ganho muito elevado significaria um sistema muito reativo ao mesmo tempo que caso muito reduzido o sistema poderia se mostrar incapaz de alcançar os valores necessários.

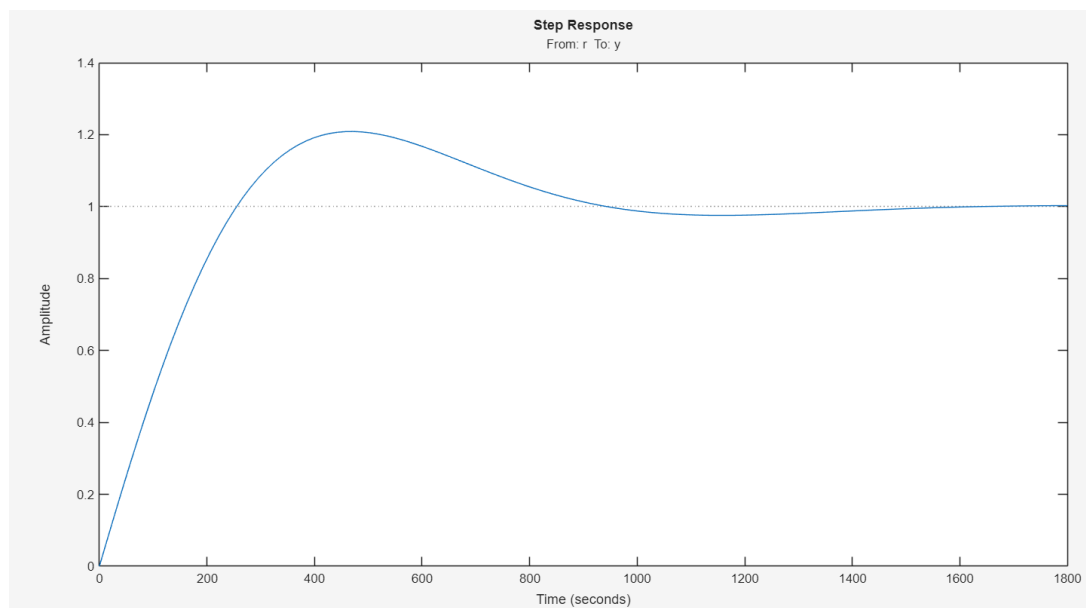
Figura 20 - Gráfico do lugar das raízes do sistema compensado para a planta de aquecimento



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao avaliar o gráfico do lugar das raízes em malha fechada, figura 20, podemos inferir que devido à posição dos polos e zeros no semiplano negativo temos um sistema estável, ainda que a proximidade do eixo imaginário indique um sistema consideravelmente lento. Características já esperadas para um sistema de controle de temperatura e que podem ser confirmadas ao avaliar o gráfico da resposta ao degrau do sistema na figura 21.

Figura 21 - Resposta em malha fechada do sistema de aquecimento com compensador



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para o sistema controlado, estima-se um *overshoot* máximo razoável de 20% e um tempo de estabilização estimado em 1800 segundos. Ao compararmos com a resposta estimada para o sistema em malha aberta (3000 segundos para um PWM operando com *duty cycle* de 50%) entende-se esses valores como plenamente satisfatórios.

3.7.2. Sintonia do Controlador de Umidade

No caso do controle de umidade, verificou-se experimentalmente que a planta apresenta comportamento semelhante ao de um sistema integrador. Diante disso, adotou-se uma estratégia de controle proporcional simples (P), demonstrado pela equação 2.12, com o objetivo de evitar uma ultrapassagem percentual excessiva que poderiam conduzir à saturação da umidade relativa, especialmente considerando-se que o sistema não dispõe de um mecanismo ativo de desumidificação.

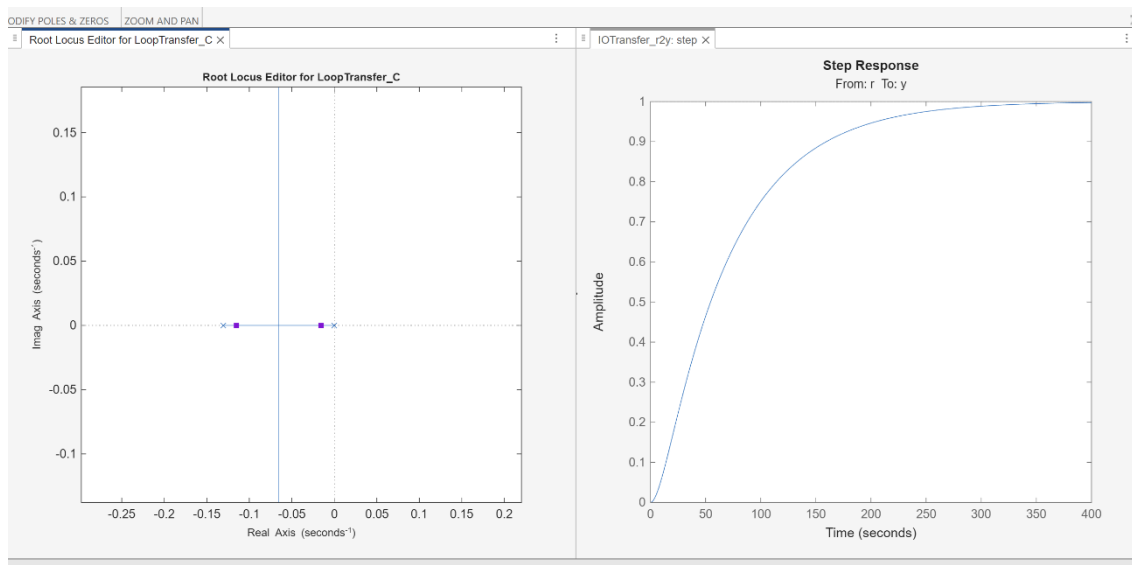
$$C_{Umid} = 0,1 \quad (2.12)$$

Essa abordagem busca garantir uma resposta controlada, evitando elevações indesejadas e de difícil reversão nos níveis de umidade.

Em um cenário ideal, espera-se que o controlador proporcional seja capaz de eliminar o erro em regime permanente devido à própria característica integradora da planta e a interferência do sistema aquecedor impactar a malha de umidificação após a ação do controlador e resposta da planta. No entanto, na prática, a presença de perdas para o meio externo pode impedir a estabilização exata no valor de referência, resultando em pequenas oscilações em torno do valor desejado, mas ainda dentro de uma faixa considerada tolerável.

Devido a existência prévia de uma componente integradora para o sistema de umidade, optou-se por um controlador puramente proporcional, a fim de se obter um sistema robusto e sem a presença de ultrapassagem percentual.

Figura 22 - Local das raízes e resposta ao degrau do sistema de umidificação



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados do sistema em malha aberta indicaram uma taxa de umidificação de aproximadamente 40% alcançada em um período de aproximadamente 600 segundos. Para o sistema com a adição do compensador observa-se um tempo de acomodação similar, atingindo a estabilidade em aproximadamente 400 segundos, uma resposta razoavelmente ágil para a proposta do projeto.

4. RESULTADOS

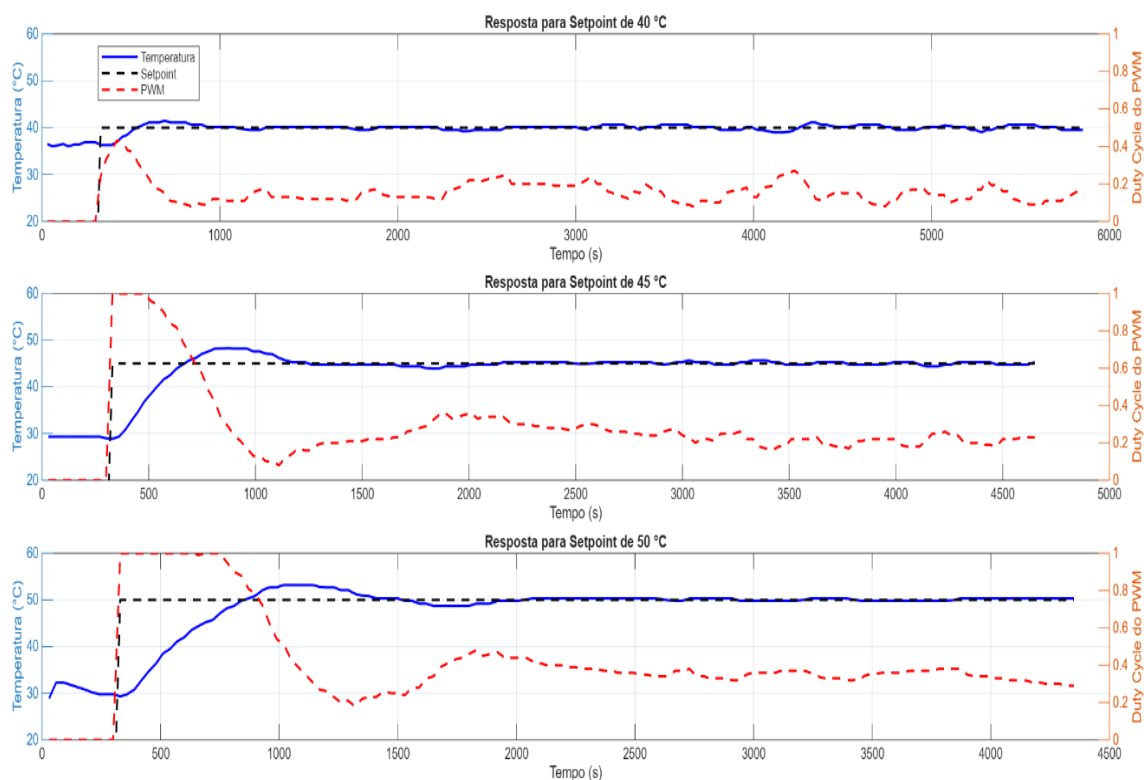
De forma geral, os resultados obtidos com a implementação dos sistemas de controle foram considerados satisfatórios dentro das tolerâncias e faixas operacionais previamente estabelecidas. O sistema de controle de temperatura demonstrou uma resposta rápida, com pequena ultrapassagem percentual e estabilidade consistente, sendo capaz de manter os valores de temperatura dentro da faixa operacional recomendada para o sensor DHT11.

No caso do controle de umidade, o controlador proporcional implementado apresentou desempenho dependente das condições térmicas do ambiente. Em temperaturas mais baixas (até 35 °C), o sistema se mostrou bastante eficiente, atingindo rapidamente os valores de referência desejados com boa estabilidade. Para temperaturas mais elevadas (até 45 °C), o desempenho, embora satisfatório, foi inferior, com tempo de resposta mais lento e maior dificuldade de estabilização. Comportamento já esperado, considerando a interdependência entre os sistemas de temperatura e umidade e a ausência de um mecanismo ativo de desumidificação, bem como a origem da componente integradora do sistema de controle oriunda da própria característica da planta inicial.

4.1. Resultados do controle de temperatura

Para validação do sistema de controle da temperatura, foram definidos diversos valores de referência para verificar a capacidade do sistema, velocidade de resposta e estabilidade. Os resultados obtidos podem ser vistos na figura 23.

Figura 23 - Respostas do Sistema de Temperatura a referências variadas

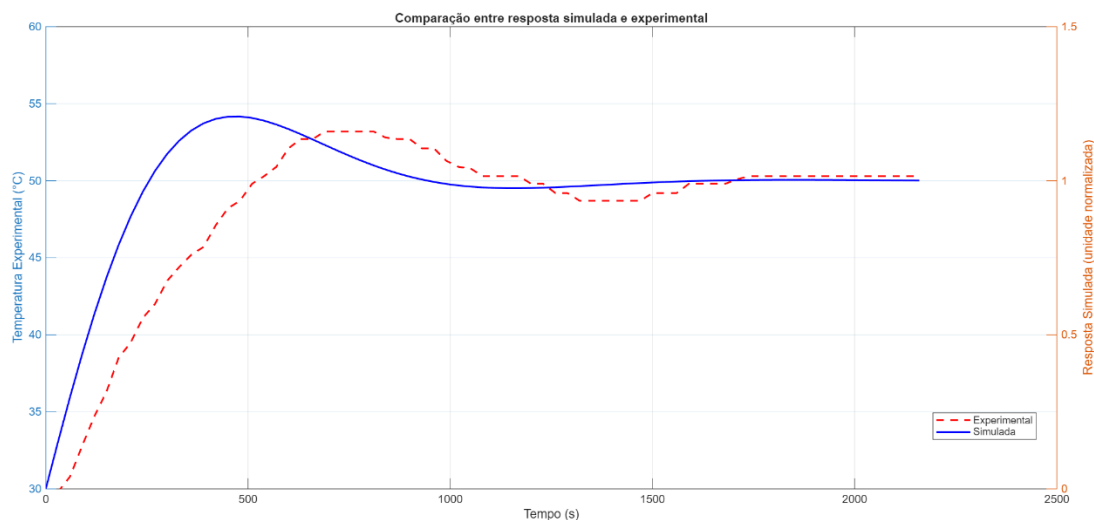


Fonte: Elaborado pelo Autor

O sistema conseguiu eliminar o erro em regime permanente e se manter estabilizado para todos os cenários propostos. Contudo, o tempo para atingir o regime permanente se tornou cada vez maior à medida que os valores de referência adotados eram também maiores.

Para o cenário mais exigente, contudo, o tempo para atingir o regime permanente foi de aproximadamente 1700 segundos, valor muito próximo ao estipulado através da simulação realizada durante a etapa de sintonia.

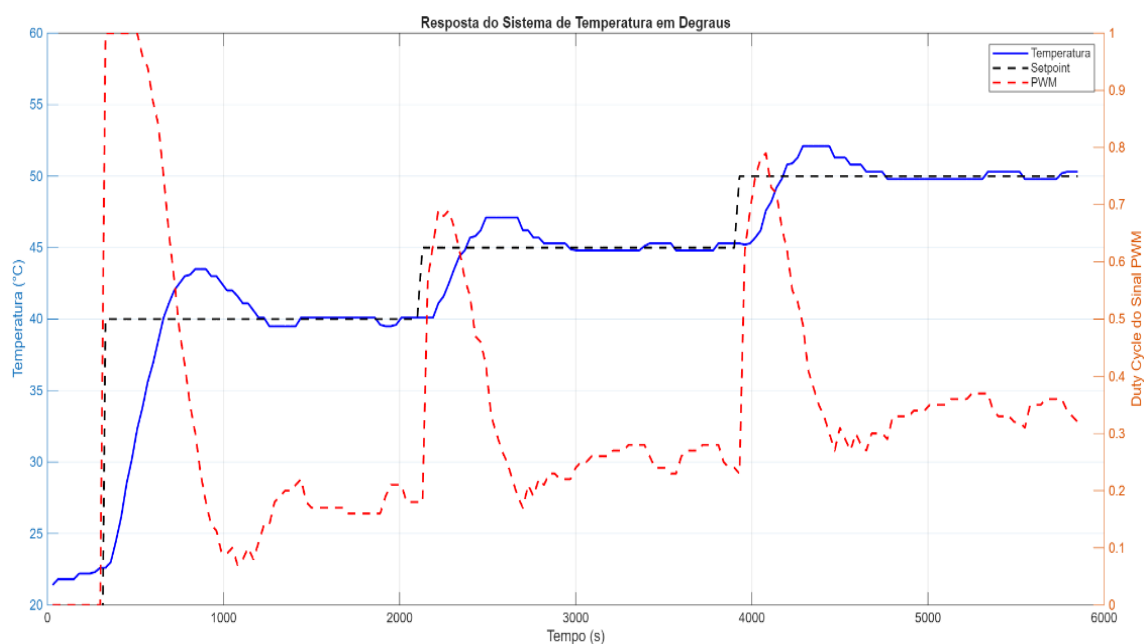
Figura 24 - Resposta Simulada e Experimental para o Sistema de Temperatura em Malha Fechada



Fonte: Elaborado pelo Autor

Também foram realizados ensaios com alterações sucessivas do valor de referência de temperatura a fim de verificar o comportamento do sistema em um cenário com demandas dinâmicas. Portanto, foram estabelecidos 3 níveis de temperatura a serem alcançados e mantidos com um limite de tempo de 30 minutos para cada estágio, conforme ilustrado pelo gráfico da figura 25.

Figura 25 - Resposta do sistema de temperatura à objetivos dinâmicos



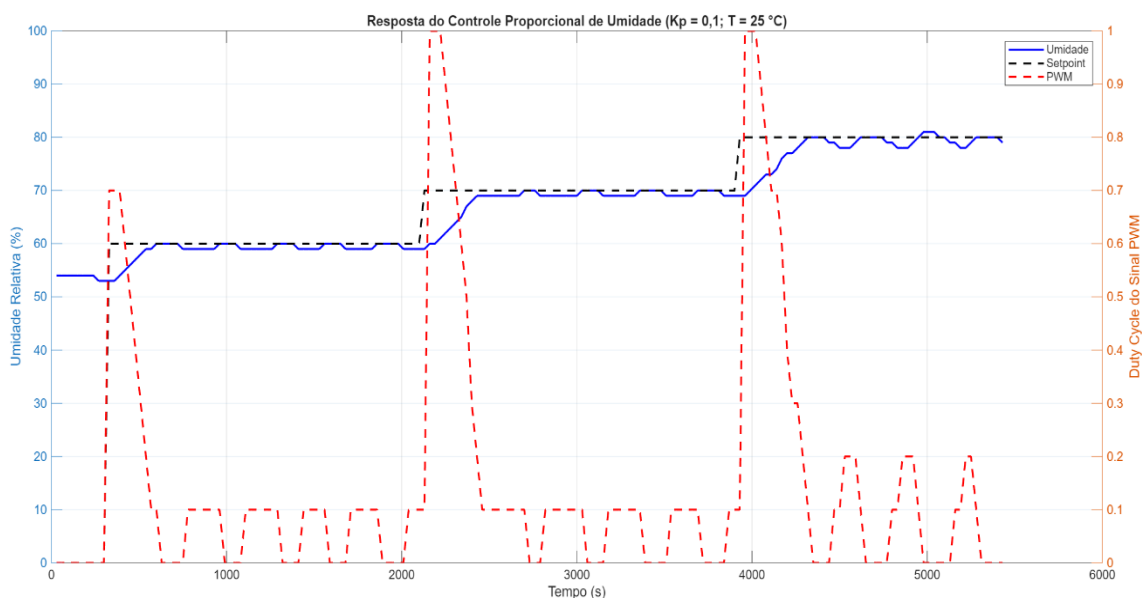
Fonte: Elaborado pelo Autor

Em todas os cenários pré-definidos, a temperatura desejada foi alcançada de forma satisfatoriamente ágil de modo que o tempo estabelecido foi suficiente para o sistema se estabilizar antes de ter sua demanda atualizada e iniciar uma nova rampa de subida.

4.2. Resultados de controle de umidade

Para verificação do desempenho do sistema de controle de umidade, também foram realizados testes em diversos cenários distintos. Com o compensador proporcional implementado e em temperatura ambiente de 25 °C foram estabelecidos objetivos de umidade em 60, 70 e 80% com um tempo previsto para cada estágio de 30 minutos. Notou-se que o sistema foi capaz de alcançar as metas definidas de forma consideravelmente rápida (aproximadamente 300 segundos para o primeiro e mais rápido estágio e 450 para a última e mais lenta etapa), conforme ilustrado pelo gráfico da figura 26.

Figura 26 - Resposta do sistema de umidade à objetivos dinâmicos



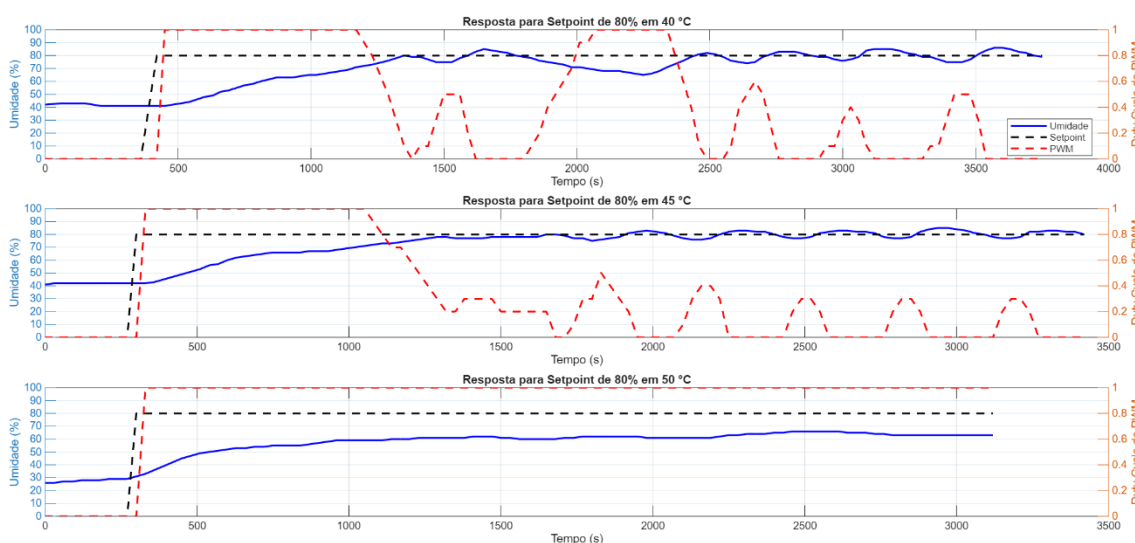
Fonte: Elaborado pelo Autor

Também foram avaliados cenários com um objetivo de umidificação fixo em 80% para temperaturas variadas e elevadas de forma gradual, apresentados em forma de gráficos na figura 27. Conforme esperado, observou-se uma

redução de eficiência à medida em que a temperatura no interior da câmara era levada a patamares mais expressivos.

Para as situações de temperaturas em 40 °C e 45 °C, foram obtidos tempos de acomodação de aproximadamente 1500 e 1600 segundos, respectivamente. Por sua vez, ao incrementar a temperatura de operação para 50 °C, o sistema de umidificação atingiu o limite de sua capacidade e se estabilizou com um erro permanente próximo à 20%.

Figura 27 - Respostas do Sistema de Umidade para níveis variados de Temperatura

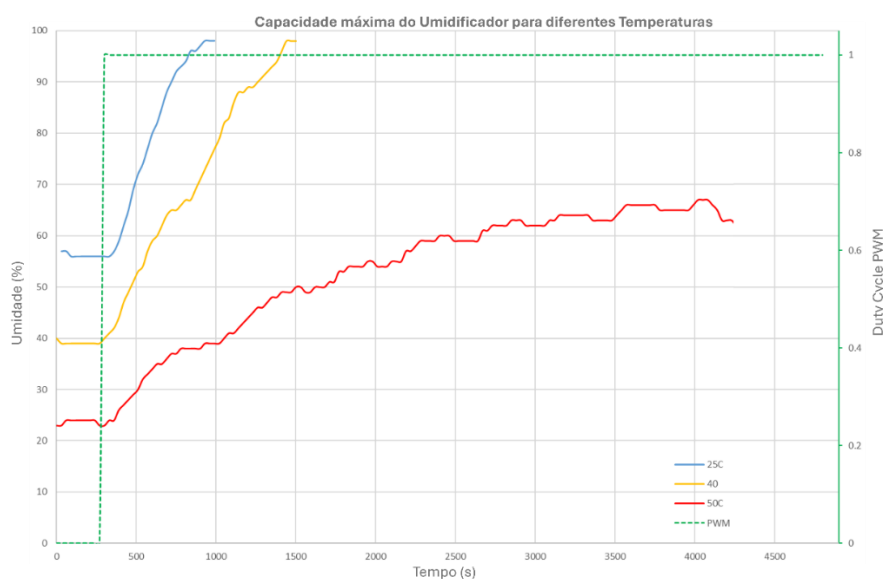


Fonte: Elaborado pelo Autor

Após os resultados mencionados acima, foi verificada a capacidade de resposta do sistema de umidificação para diferentes temperaturas para identificar os limites máximos de atuação do sistema umidificador mantendo o *duty cycle* em 100%.

A avaliação dos resultados expostos na figura 28 apontam que, apesar da característica integradora observada para a planta de umidade observada anteriormente, a influência da Temperatura condiciona o sistema de tal modo que seria necessária um sistema com maior poder de transferência de umidade para se trabalhar em temperaturas próximas do limite do sensor e demais componentes utilizados, sendo possivelmente necessário também reforçar a estanqueidade da câmara para atuação adequada em tais condições afim de se reduzir a perda de umidade para o ambiente externo.

Figura 28 - Limites de Operação do Umidificador para Diferentes Temperaturas

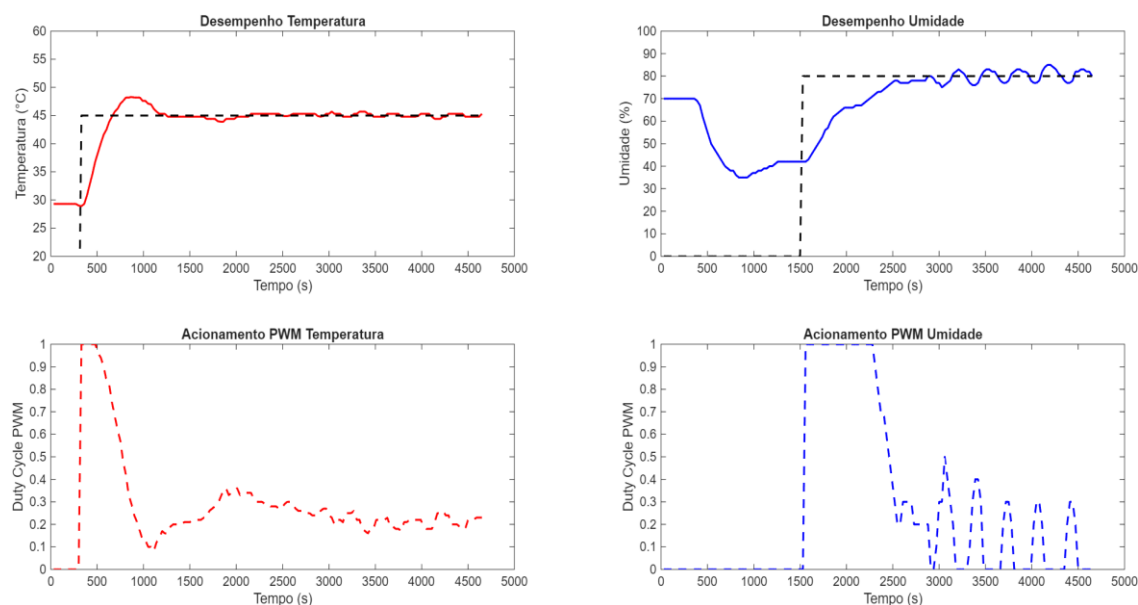


Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3. Resultados combinados

A atuação simultânea de ambos os sistemas foi validada através de duas abordagens. Para o primeiro cenário foram definidos objetivos de temperatura e umidade, porém em um primeiro momento somente o sistema de aquecimento foi acionado de tal modo que a temperatura e umidade se estabilizassem antes da atuação do sistema umidificador. Os resultados para esse ensaio podem ser visualizados nos gráficos da figura 29.

Figura 29 - Teste combinado com atraso no acionamento do umidificador

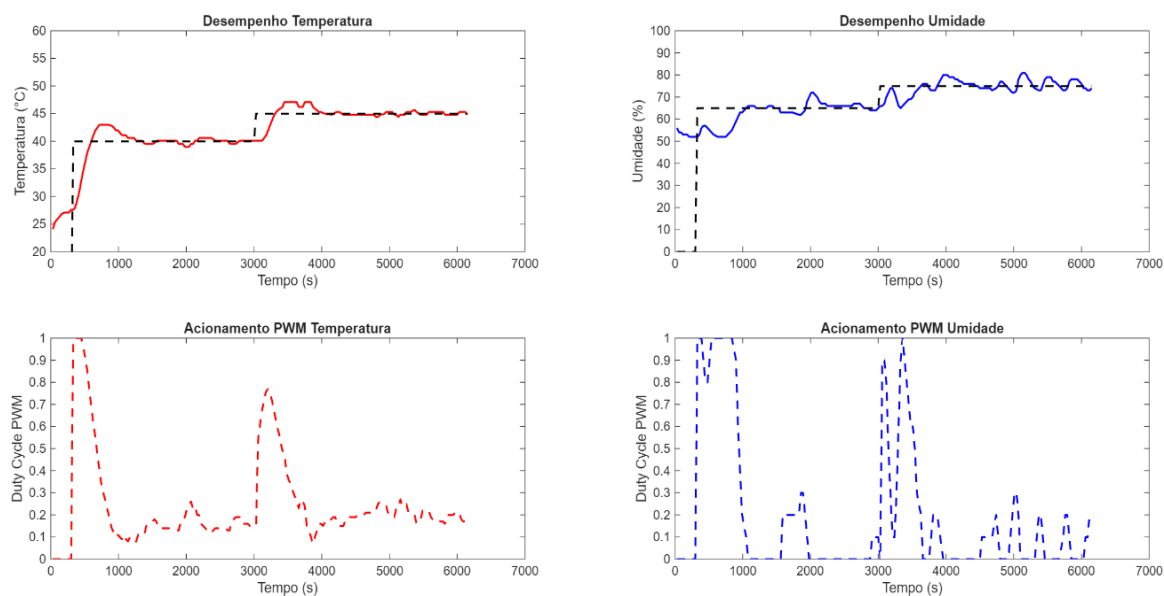


Fonte: Elaborado pelo Autor

A análise dos gráficos de desempenho, nos permite perceber uma queda significativa no nível de umidade no primeiro momento em que o aquecedor atua de forma mais agressiva para alcançar a temperatura alvo. Entretanto, após a temperatura atingir o regime permanente e seu controlador adotar um comportamento mais ameno o sistema umidificador consegue alcançar o valor pré-determinado e se mantém em um comportamento oscilatório ao redor do valor de referência.

A segunda metodologia de verificação se deu, por sua vez, com a atuação simultânea de ambos os controladores. Foi ainda implementada a alteração dos *setpoints* ao longo do ensaio para verificar a resposta dinâmica de todo o conjunto para demandas variáveis, conforme ilustrado pelos gráficos da figura 30.

Figura 30 - Teste combinado com *setpoints* dinâmicos



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para os resultados do segundo cenário de ensaio percebe-se o acoplamento entre os sistemas de aquecimento e umidificador de modo que durante a rampa de subida da temperatura têm-se uma queda associada às leituras de umidade. Contudo, assim como na condição de validação anterior, após a estabilidade da temperatura ser alcançada o sistema de umidade consegue operar sem grandes problemas ainda que eventualmente ocorram interferências na forma de leves afundamentos ou elevações de suas leituras. Mantêm-se ainda o comportamento oscilatório na região ao redor do *setpoint* sem atingir, no entanto, valores não toleráveis por grandes intervalos.

5. CONCLUSÃO

A realização deste projeto possibilitou o desenvolvimento e a validação de uma estufa prototípica para ensaios de carbonatação acelerada em corpos de prova de concreto a partir de componentes artesanais e de baixo custo. Utilizando princípios clássicos de controle e ferramentas acessíveis, como o microcontrolador ESP32, foi possível integrar sensores e atuadores em um sistema funcional, que mantém as variáveis de interesse dentro dos intervalos operacionais desejados.

Os resultados experimentais demonstram que, mesmo diante de limitações estruturais como estanqueidade limitada, ausência de mecanismos ativos de desumidificação e perda de eficiência para temperaturas mais elevadas, o protótipo apresentou um desempenho robusto e consistente sob as condições testadas. A resposta dos sistemas de controle às variações de *setpoint* e sua capacidade de se manter dentro dos limites planejados evidenciam a viabilidade do conceito para aplicações mais elaboradas para atividades acadêmicas e laboratoriais.

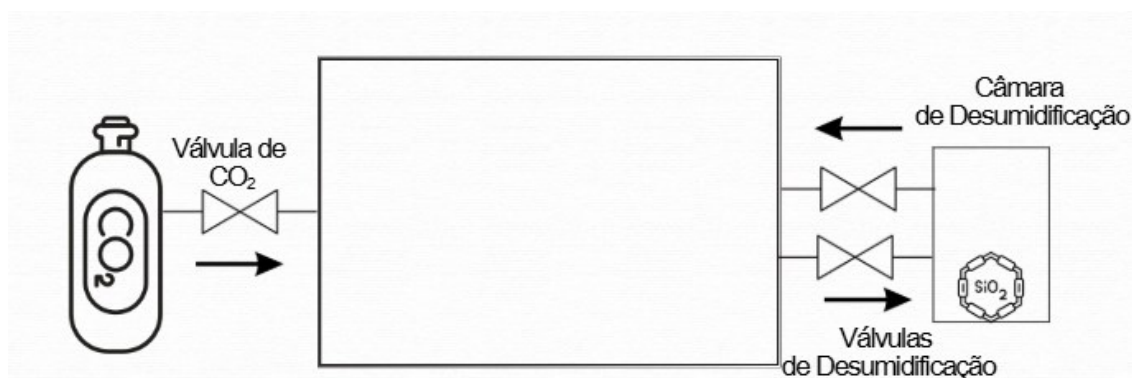
Ademais, a análise detalhada das funções de transferência e a sintonia dos controladores forneceram uma base sólida para futuras melhorias, como a ampliação da estrutura física, a utilização de sensores de maior precisão, a implementação de controle da concentração de CO₂ e a inclusão de sistemas complementares para desumidificação. Essas possíveis evoluções poderão tornar a estufa ainda mais versátil e robusta.

Por fim, este trabalho não representa apenas um avanço técnico na área de durabilidade do concreto, mas também um passo importante na busca por soluções práticas e acessíveis para pesquisas interdisciplinares em engenharia elétrica e civil, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento e da infraestrutura acadêmica, além de estabelecer um ponto de partida promissor para inovações futuras que aliem custo-benefício, eficiência e adaptabilidade.

5.1. Trabalhos Futuros

Apesar dos resultados alcançados serem satisfatórios para a validação conceitual do projeto, nota-se a existência de diversas oportunidades de melhoria. Os estudos desenvolvidos permitiram a identificação de limitações estruturais e físicas do sistema, que uma vez endereçados em iterações futuras podem contribuir amplamente para um melhor desempenho e aplicabilidade da câmara. A seguir, têm-se os principais pontos a serem endereçados em trabalhos futuros para um processo de melhoria contínua do sistema, bem como a figura 31 ilustrativa das propostas.

Figura 31 - Propostas para melhoria futura do projeto



Fonte: Elaborado pelo Autor

- Sistema de controle de CO₂

Devido a restrições orçamentárias, o escopo do presente trabalho foi incapaz de contemplar a adição de um sistema para controle dos níveis de gás carbônico dentro da câmara de ensaio. Portanto, propõe-se para trabalhos futuros a adição de um sistema de ingestão de CO₂ baseado no acionamento de uma válvula solenoide, uma vez que esse tipo de atuador pode ser facilmente associado ao microcontrolador ESP32 para controle.

Para o monitoramento, recomenda-se o sensor infravermelho para detecção de dióxido de carbono MH-Z19 devido a sua capacidade de operação em ambientes com temperaturas entre -20 °C e 50 °C e umidade relativa de até 95%, bem como sua fácil conexão ao ESP32. Entretanto, o tempo de amostragem indicado para esse sensor varia entre 90 e 120 segundos.

Devido a esse maior intervalo entre leituras e ao tempo necessário para que a distribuição do gás no interior da estufa se torne homogênea, indica-se uma abordagem de controle baseada na ingestão de CO₂ em pulsos curtos com um intervalo mínimo de 2 minutos entre cada aplicação para a estabilização adequada.

- Sistema de desumidificação

Apesar dos resultados positivos alcançados para o controle de umidade, faz-se interessante a adoção de um sistema com maior capacidade para que seja possível operar consistentemente em temperaturas mais elevadas. Contudo, um sistema mais agressivo pode vir a ocasionar um aumento além do esperado nos níveis de umidade do sistema. Além disso, o projeto atual não é capaz de responder eficientemente a uma redução do *setpoint* de umidade de forma dinâmica.

Considerando esses aspectos, recomenda-se a adoção de um sistema ativo de desumidificação. Uma proposta viável consiste na construção de uma antecâmara equipada com válvulas borboleta em seus pontos de entrada e saída. Nessa antecâmara, pode-se inserir um dessecante químico, como carbonato de cálcio ou dióxido de silício. Assim, quando for necessário reduzir a umidade interna, o ar da câmara principal pode ser direcionado para circular por essa antecâmara, onde terá sua umidade absorvida antes de retornar ao ambiente de ensaio.

- Ampliação estrutural e de componentes

Uma das principais melhorias propostas envolve a ampliação e reforço estrutural da câmara de ensaio. Um volume interno maior permitiria a análise simultânea de múltiplos corpos de prova, além de favorecer uma distribuição mais uniforme de temperatura e umidade.

Paralelamente, a substituição ou reforço dos materiais de vedação pode contribuir para maior estanqueidade e estabilidade térmica e o reforço estrutural através da adição de paredes em chapa metálica ou compósitos como fibra de vidro garante mais robustez ao sistema.

Recomenda-se também a atualização dos sensores utilizados, adotando dispositivos com maior precisão e confiabilidade. Para a medição de temperatura e umidade, sensores como o SHT31 ou o BME280 oferecem maior resolução e estabilidade em comparação ao DHT11, ao mesmo tempo em que mantém a

facilidade de conexão ao microcontrolador. Essas melhorias visam aumentar a robustez, a repetibilidade e a qualidade dos dados obtidos nos ensaios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOSONG. **DHT11 Humidity & Temperature Sensor**. [s.l.]: OSEPP, [s.d.].
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2014. Disponível em: <www.abnt.org.br>. ISSN: 6118:2014.
- BENNETT, S. **A Brief History of Automatic Control**. *IEEE Control Systems Magazine*, [s.l.], v. 16, n° 3, p. 17–25, 1996. DOI: 10.1109/37.506394.
- CAMPOS, M. C. M. De. **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010.
- CUNHA, A. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. 2001.
- FERNANDES JÚNIOR, R. F. **Identificação remota de plantas industriais utilizando tecnologias OPC e CyberOPC**. - Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18153/tde-16062009-103207/>>.
- GRUPO DE PESQUISA EM DURABILIDADE E AVALIAÇÃO ESTRUTURAL. **Avaliação da Deterioração de Dormentes: Diagnóstico, prognóstico e estimativa de vida útil**. [s.l.]: [s.n.], 2024.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1920-12:2015 – Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete: Accelerated carbonation method**. Genebra: [s.n.], 2015. Acesso em: 06/jun./25.
- JUNGE, M. **Watt-type centrifugal governor (1788) on a Boulton and Watt steam engine at the Science Museum**. Londres: [s.n.], 2008. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boulton_and_Watt_centrifugal_governor-MJ.jpg>. Acesso em: 11/jun./25.
- LIU, P.; CHEN, Y.; YU, Z. **Effects of temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration on concrete carbonation**. *Magazine of Concrete Research*, [s.l.], v. 72, n° 18, p. 936–947, 2020. ISSN: 1751763X, DOI: 10.1680/jmacr.18.00496.
- LUCENA, C. **Avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada projetada e montada em laboratório**. 2016.

MERCADO LIVRE. **Módulo Sensor De Umidade E Temperatura Dht11**. 2025. Disponível em: <https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1737741297-modulo-sensor-de-umidade-e-temperatura-dht11-_JM#polycard_client=search-nordic&position=17&search_layout=grid&type=item&tracking_id=8ce134dc-f226-4deeb16d-0c88386a468d&wid=MLB1737741297&sid=search>. Acesso em: 24/jun./25.

MINORSKY, N. **DIRECTIONAL STABILITY OF AUTOMATICALLY STEERED BODIES**. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, [s.l.], v. 34, nº 2, p. 280–309, 1922. ISSN: 0099-7056, DOI: 10.1111/j.1559-3584.1922.tb04958.x.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; MOLIN, D. **Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil**. *Ambiente Construído*, [s.l.], v. 7, p. 7–20, 2007. ISSN: 1678-8621.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. **CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth**. *Materials and Structures*, [s.l.], v. 21, p. 453–455, 1988.

_____. **TC 116-PCD: Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability**. *Materials and Structures*, [s.l.], v. 32, p. 174–179, 1999.

UNIVERSITY OF MICHIGAN. **Control Tutorials for MATLAB and Simulink**. *Introduction: PID Controller Design*. [s.d.]. Disponível em: <<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>>. Acesso em: 14/jun./25.

USINAINFO. **Umidificador**. 2025. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/bombinha-de-agua-e-ar/umidificador-de-ar-ultrassonico-24v-nevoa-400-mlh-6000.html>>. Acesso em: 24/jun./25.