

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Artur Martins Alves

**Criostato para Condicionamento Térmico de
Corpos de Prova para Ensaios Charpy
Miniaturizados**

Uberlândia, Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Artur Martins Alves

Criostato para Condicionamento Térmico de Corpos de Prova para Ensaios Charpy Miniaturizados

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da Univer-
sidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos exigidos para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Pedro Augusto de Queiroz Assis

Universidade Federal de Uberlândia – UFU

Faculdade de Engenharia Mecânica

Bacharelado em Engenharia Mecatrônica

Uberlândia, Brasil

2025

Artur Martins Alves

Criostato para Condicionamento Térmico de Corpos de Prova para Ensaios Charpy Miniaturizados

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Trabalho aprovado. Uberlândia, Brasil, 17 de setembro de 2025:

Pedro Augusto de Queiroz Assis
Orientador

Professor
Jose dos Reis Vieira de Moura Junior

Engenheiro
Dênis Soares de Freitas

Uberlândia, Brasil
2025

Agradecimentos

Agradeço de coração a minha família, em especial a minha mãe, que me apoiou com todos os recursos necessários para que eu conseguisse me dedicar inteiramente aos meus estudos e permitiu que finalizasse minha graduação com êxito.

Gostaria de expressar minha gratidão aos meus amigos (Similares) que forneceram o apoio, motivação e os momentos de descontração que foram fundamentais para me motivar a seguir em frente com a graduação.

Por fim, agradeço ao professor Pedro Augusto, que sempre apoiou o desenvolvimento e criação deste projeto desde sua concepção inicial, além de sua dedicação em me auxiliar com os conhecimentos necessários ao longo deste trabalho.

Resumo

Os ensaios Charpy miniaturizados tornam-se indispensáveis em situações nas quais a caracterização de materiais é limitada pela impossibilidade de se retirar corpos de prova em dimensões convencionais, devido a restrições físicas ou à quantidade reduzida de material disponível. Contudo, um dos principais desafios associados a esse tipo de ensaio é a ausência de equipamentos capazes de realizar o condicionamento térmico dos corpos de prova em toda a faixa de temperaturas requerida. Neste contexto, esse trabalho envolve o desenvolvimento de um criostato de fluxo contínuo para ensaios em uma amplitude de temperatura de $-190\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ a $150\text{ [}^{\circ}\text{C]}$. O equipamento desenvolvido consiste em uma cápsula de alumínio, na qual circula nitrogênio líquido, e controla-se a potência fornecida a aquecedores elétricos. Para a realização do condicionamento térmico, foi implementado um sistema de controle em malha fechada, voltado a levar a temperatura medida da cápsula ao entorno da temperatura de referência definida pelo operador. Devido as exigências impostas pelas normas ASTM E23 e ISO 148, durante o desenvolvimento do equipamento, foi necessária a utilização de técnicas como simulação por elementos finitos e a seleção cuidadosa de materiais como Celeron para suportar a ampla faixa de temperatura. O trabalho também envolveu todo o projeto elétrico e eletrônico para controle da potência fornecida aos aquecedores, medição da temperatura da cápsula, interface com o operador, além do projeto do sistema de controle propriamente dito. Ademais, também é mostrado o software embarcado que foi desenvolvido com capacidade de comunicação via MQTT para funcionamento remoto, além de atender requisitos de tempo real. O sistema todo é controlado por um ESP32 que aplica um controlador Proporcional Integrativo (PI) juntamente com outras técnicas de controle como escalonamento de ganho, *feed-forward* e *clamping*. No documento, são apresentadas todas as etapas de desenvolvimento, bem como verificações e análises do comportamento real do sistema. Resultados em simulação e experimentais mostram que a solução concebida é capaz de condicionar termicamente os CPs em torno da temperatura de referência. O maior erro médio após 5 min de ensaio em condições criogênicas foi de $0,19\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ e uma variância de apenas $[0,01\text{ }^{\circ}\text{C}]$. Esses resultados evidenciam a capacidade do equipamento em materializar quaisquer temperaturas dentro da faixa descrita.

Palavras-chave: Criostato de fluxo contínuo, Controle em malha fechada, Escalonamento de ganhos, MQTT, Ensaio Charpy.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Ilustração do princípio básico de funcionamento de um criostato, contendo os elementos principais como aquecedores elétricos, fluido criogênico, corpo de prova e meio de trocas térmicas (corpo do criostato).	13
Figura 2	– Ilustração mostrando como a abordagem radial de distribuição dos componentes térmicos afeta o gradiente de temperatura no criostato.	15
Figura 3	– Renderização de diferentes vistas do criostato demonstrando seu formato de capsula.	16
Figura 4	– Vista explodida de todos os componentes do criostato.	17
Figura 5	– Resultado da simulação em elementos finitos do comportamento térmico do criostato em regime estacionário: (a) Distribuição de temperatura em equilíbrio térmico na montagem do criostato; (b) Gradiente de temperatura no CP.	19
Figura 6	– Demonstração do efeito da variação do ângulo de disparo no formato de onda da corrente alternada da rede, com disparos em 0° , 30° , 90° e 120° . . .	21
Figura 7	– Diagrama do circuito de acionamento do TRIAC	22
Figura 8	– Circuito elétrico para detecção de passagem por zero da tensão da rede, composto por ponte retificadora, optoacoplador, resistores e um circuito integrado <i>Schmitt Trigger</i>	23
Figura 9	– Comportamento da resposta do circuito de detecção de passagem por zero. .	23
Figura 10	– Percentual de potência entregue aos aquecedores em função do ângulo de disparo do TRIAC.	24
Figura 11	– Erro relativo entre o percentual de potência esperado e o percentual real medido com uma carga resistiva.	25
Figura 12	– Modelo 3D da placa de distribuição de potência, projetada para interligar os oito aquecedores elétricos do tipo cartucho do criostato.	26
Figura 13	– Representação 3D da placa desenvolvida para efetuar o controle do criostato, contendo todos os outros circuitos supracitados.	27
Figura 14	– Diagrama simplificado da arquitetura de software embarcado no criostato. São mostradas as diferentes tarefas que executam no sistema. As tarefas são representadas por blocos azuis, o bloco verde representa uma rotina de interrupção e o grande bloco cinza o sistema operacional que faz o gerenciamento.	30
Figura 15	– Fotografia da caixa responsável por armazenar os dispositivos eletrônicos, evidenciando as interfaces de comunicação com o usuário.	31
Figura 16	– Captura de tela do <i>software</i> desenvolvido para controle remoto do criostato utilizando o protocolo MQTT.	32
Figura 17	– Diagrama de blocos do controlador PI.	33

Figura 18 – Resposta da temperatura do criostato a um degrau de potência de 5 %.	34
Figura 19 – Comparação entre resultados de simulação e experimental a um degrau de potência de 5%.	35
Figura 20 – Comparação das respostas real e simulada a um degrau de abertura da válvula de LN ₂ . A amplitude do degrau é assumida unitária.	36
Figura 21 – Comparação entre as respostas simulada e experimental do sistema devido à convecção ambiente.	37
Figura 22 – Malha de controle completa em diagrama de blocos no Simulink, com mecanismos de <i>feedforward</i> , <i>clamping</i> , escalonamento de ganho e <i>soft-reset</i> .	39
Figura 23 – Comparação das respostas a um degrau de referência de 150 °C para o controlador operando com ganhos fixos em $K_p = 0,05$ e $K_i = 4,9 \times 10^{-6}$ e adotando o escalonamento de ganhos.	41
Figura 24 – Resultados da simulação em malha fechada do controlador em condições criogênicas para referências em -180 [°C], -130 [°C], -80 [°C], -30 [°C] e -10 [°C].	42
Figura 25 – Resultados da simulação em malha fechada do controlador em condições aquecidas para referências em 40 [°C], 65 [°C], 90 [°C], 115 [°C] e 140 [°C].	43
Figura 26 – Montagem final do criostato com isolador térmico.	45
Figura 27 – Comparação entre as respostas em malha fechada simulada e experimental. São mostradas as evoluções temporais da temperatura e da potência comandada.	46
Figura 28 – Avaliação da repetibilidade dos resultados para a referência de 150 [°C].	47
Figura 29 – Resultados experimentais do controlador em condições aquecidas para referências em 40 [°C], 65 [°C], 90 [°C], 115 [°C] e 140 [°C].	48
Figura 30 – Criostato em ensaio criogênico sem isolador térmico, evidenciando a formação de gelo.	49
Figura 31 – Resultados experimentais do controle de temperatura criogênico para as temperaturas alvo de -180 [°C], -130 [°C], -80[°C], -30[°C] e -10 [°C] juntamente com potência comandada pelo controlador.	50

Lista de tabelas

Tabela 1	– Descrição dos módulos do criostato apontados na Figura 4.	17
Tabela 2	– Tópicos MQTT utilizados para o funcionamento do criostato.	32
Tabela 3	– Valores de RMSE obtidos para cada modelo matemático identificado.	38
Tabela 4	– Erro médio e desvio padrão para diferentes temperaturas de referência.	42
Tabela 5	– Erro médio e desvio padrão para diferentes temperaturas de referência e temperatura na simulação aquecida.	43
Tabela 6	– Indicadores de desempenho para o ensaio de repetibilidade a 150 [°C].	47
Tabela 7	– Resultados experimentais para diferentes patamares de temperatura de referência em condições aquecidas.	49
Tabela 8	– Resultados do controle de temperatura em condições criogênicas para o criostato e para o CP.	51

Lista de abreviaturas e siglas

CP	Corpo de Prova
LN ₂	Nitrogênio Líquido
EG	Escalonamento de Ganhos
PI	Controlador Proporcional-Integral
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
RTOS	Real-Time Operating System
FreeRTOS	Real-Time Operating System embarcado baseado em tarefas
PCI	Placa de Circuito Impresso

Sumário

	Agradecimentos	3
1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Estrutura do Trabalho	11
1.2	Revisão Bibliográfica	11
1.3	Requisitos de Projeto	13
2	DESENVOLVIMENTO DO CRIOSTATO	15
2.1	Projeto Mecânico	15
2.1.1	Simulações de Elementos Finitos	18
2.2	Projeto Eletrônico	19
2.2.1	Circuito de Potência	20
2.2.2	Circuito de Detecção de Passagem por Zero	22
2.2.3	Controle de Potência	23
2.2.4	Circuito distribuidor de potência	25
2.2.5	Circuito de processamento	26
2.3	Arquitetura de software	27
2.3.1	Monitoramento e controle remoto utilizando o protocolo MQTT	31
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	33
3.1	Identificação de modelos matemáticos	33
3.2	Projeto do controlador	38
3.3	Simulação do sistema	39
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	45
4.1	Controle aquecido	45
4.2	Controle de temperatura criogênico	49
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	52
	Referências	54
	ANEXOS	56
	ANEXO A – INTERFACE COM O USUÁRIO	57
	ANEXO B – DIAGRAMA DA PCI	58

1 Introdução

Os ensaios Charpy miniaturizados, também conhecidos como MCVN (*Miniaturized Charpy V-Notch*), consistem na adaptação do tradicional ensaio Charpy para Corpos de Prova (CPs) de dimensões reduzidas. Esses CPs têm todas as suas dimensões (comprimento, largura e profundidade do entalhe) menores do que nas amostras padrão, porém, mantendo o princípio básico de medição da energia absorvida (LUCON; MCCOWAN et al., 2015).

Os ensaios miniaturizados foram concebidos para viabilizar ensaios em materiais de difícil obtenção, como fragmentos de componentes em serviço, que não permitem a fabricação de corpos de prova de tamanho convencional. Por exemplo, os ensaios MCVN são realizados em arames dissecados de dutos de petróleo, nos quais, devido a dimensões reduzidas, não é possível a retirada de CPs na dimensão convencional de $10 \times 10 \times 55 \text{ mm}^3$. Um tipo de ensaio MCVN bastante utilizado é o tipo KLST (*Kleinstprobe Schlagversuch*, ensaio de impacto com amostra reduzida), com dimensões típicas de cerca de $3 \times 4 \times 27 \text{ mm}^3$ (LUCON, 2012).

O principal resultado do ensaio Charpy (convencional ou miniaturizado) é a curva de transição dútil-frágil, ou DBT (*Ductile-to-Brittle Transition Curve*), que relaciona a temperatura de ensaio com a energia absorvida durante a fratura, o que permite avaliar a fragilidade de materiais para diversas aplicações na engenharia (FRANÇOIS; PINEAU; ZAOUI, 2013). Obter essa curva com precisão exige que os CPs estejam em torno de uma temperatura de referência definida por um operador no momento do impacto. No caso de CPs miniaturizados, realizar esse condicionamento é bastante desafiador, pois, devido ao menor volume, os CPs acabam ganhando ou perdendo temperatura muito rapidamente (LUCON; LUCON et al., 2015).

As normas ASTM E23 (2024) e ISO148 (2016), que estabelecem os procedimentos para realização de ensaios Charpy, impõem que os CPs sejam condicionados em uma temperatura definida pelo operador durante pelo menos cinco minutos, com um erro aceitável de $\pm 1 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Equipamentos comerciais robustos, como o Time Group® DWY-80A, que se utiliza de um banho termostático para o condicionamento térmico, são projetados para CPs de tamanho padrão e também são incapazes de materializar temperaturas abaixo de $-80 \text{ [}^\circ\text{C]}$ e maiores que $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$ devido a limitações físicas do equipamento. Esse tipo de limitação também ocorre com outros equipamentos comerciais, como o Tecnal® TE-184, que tem faixa de trabalho de $-10 \text{ [}^\circ\text{C]}$ a $60 \text{ [}^\circ\text{C]}$.

Diante dessas dificuldades, o presente trabalho envolve o desenvolvimento e implementação de um criostato de fluxo contínuo. O termo criostato é derivado do grego antigo *cryo* (*kryos*), que significa “frio”, e *stat* (*statos*), que significa “estável” ou “constante” (PARMA, 2014). Sendo assim, um criostato é um dispositivo capaz de manter de forma controlada temperaturas muito baixas, geralmente em faixas criogênicas. No caso do criostato desenvolvido no

presente trabalho, tem-se a possibilidade de resfriar CPs nessa faixa criogênica utilizando um fluxo contínuo de Nitrogênio Líquido (LN₂) em seu interior. Especificamente, o criostato projetado é capaz de operar em uma faixa de temperaturas de -190 [°C] a 150 [°C], e de atender aos requisitos das normas ASTM E23 (2024) e ISO148 (2016) para ensaios Charpy miniaturizados. O projeto supera as limitações dos equipamentos disponíveis no mercado, oferecendo uma solução que garante estabilidade térmica, precisão e compatibilidade com CPs miniaturizados, por meio do desenvolvimento integrado de componentes mecânicos, eletrônicos e de controle, conforme detalhado ao longo deste documento. Em reconhecimento à inovação apresentada, foi solicitada uma patente de invenção do dispositivo, registrada sob o número BR 10 2024 025387-6 junto ao INPI (Instituto Nacional da Propriedade Intelectual).

1.1 Estrutura do Trabalho

O trabalho apresentado está organizado da seguinte forma: Na sequência, é feita uma revisão bibliográfica sobre diferentes abordagens para construção de equipamentos voltados ao resfriamento criogênico. Essa análise serve de base para definir as principais características desejadas do equipamento desenvolvido. O Capítulo 2 apresenta o projeto mecânico, a arquitetura do software embarcado e o projeto eletrônico do criostato desenvolvido. Na sequência, um Capítulo dedicado ao controle do sistema contendo todo o seu desenvolvimento, desde os ensaios para identificação do modelo matemático do criostato até o projeto do controlador propriamente dito. Com o sistema completamente descrito, o penúltimo capítulo apresenta os resultados experimentais, acompanhados das análises realizadas. Por fim, o Capítulo 5 traz a conclusão, reunindo os conceitos e resultados desenvolvidos ao longo do trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

1.2 Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento de sistemas para condicionamento térmico de CPs tem sido explorado há décadas, como ilustrado nos artigos a seguir, especialmente para atender a testes que exigem ampla faixa de temperaturas, ou seja, desde condições criogênicas até temperaturas superiores ao ponto de ebulição da água. Entretanto, a maioria dos trabalhos que atuam nessa faixa de temperatura concentra-se em equipamentos projetados para aplicações que estão fora do escopo da engenharia mecânica, como (KEITEL; FEULING; LUDEMAN, 1991) que desenvolveram um criostato para ensaios exóticos no ramo da física ¹. O sistema permitia operação automatizada e controle preciso em uma ampla faixa de temperaturas, destacando a importância de integrar hardware e software para obter estabilidade térmica.

¹ Neste contexto, adota-se o termo *ensaios exóticos* para se referir a experimentos científicos que não fazem parte das aplicações clássicas da engenharia mecânica, frequentemente voltados à pesquisa em física de partículas, óptica quântica ou materiais supercondutores.

Zeyen et al. (1984) desenvolveram um criostato de fluxo contínuo com geometria esférica, projetado para experimentos de espectrometria por nêutrons, capaz de operar entre -270 [°C] e 27 [°C]. O sistema se destaca por permitir rotações completas em 360° nos três ângulos de Euler, mantendo excelente estabilidade térmica e consumo reduzido de hélio líquido, graças ao uso de linhas de transferência de baixa perda com dutos magneticamente suspensos. A regulação de temperatura é feita por controle computadorizado, com tempo de resposta de poucos minutos, mesmo em temperaturas elevadas. Além disso, o criostato apresenta uma distribuição interna de fluxo de hélio que permite operação em qualquer orientação espacial.

Reed (1966) propôs um criostato, acompanhado de um dispositivo para transferência do corpo de prova, destinado a ensaios de tração na faixa de -190 [°C] a 200 [°C]. O sistema permitia tanto resfriamento quanto aquecimento controlado, com a possibilidade de realizar testes em um intervalo significativo de temperaturas sem necessidade de múltiplos equipamentos. Apesar de sua versatilidade, a solução também foi direcionada para ensaios de tração e para corpos de prova de dimensões padrão, não tratando de CPs miniaturizados.

Para estudar a termoluminescência de determinados materiais, McSweeney, Levy e Townsend (1965) desenvolveram um criostato capaz de operar em uma faixa de temperatura de -269 [°C] a 27 [°C]. O dispositivo não utilizava fluxo contínuo de fluido criogênico, mas sim um reservatório de hélio líquido associado a aletas de cobre para promover a transferência de calor até a amostra. Esse trabalho é relevante por apresentar uma solução de controle térmico preciso em temperaturas extremamente baixas, utilizando princípios construtivos que ainda hoje servem de referência para o desenvolvimento de criostatos aplicados em experimentos sensíveis à temperatura, como é o caso do presente estudo.

Em seu trabalho, Lizon e Accardo (2010) propuseram o desenvolvimento de um criostato compacto de fluxo contínuo com nitrogênio líquido, especificamente voltado para aplicações em sistemas ópticos e astronômicos que exigem alta estabilidade térmica. O sistema se destaca por não depender de mecanismos de resfriamento por banho criogênico, sendo alimentado por uma linha isolada a vácuo conectada a um tanque externo de LN₂. Um conjunto de trocadores de calor internos, distribuídos radialmente, permite a circulação eficiente do fluido criogênico e o controle preciso da temperatura através de válvulas eletromagnéticas e malhas PID.

Por fim, Manahan (2000) apresentou uma solução para aquecimento e resfriamento *in-situ* de CPs para ensaios Charpy. O trabalho, no entanto, deixa diversos detalhes de operação omitidos, além de ignorar problemas como formação de gelo e condensação.

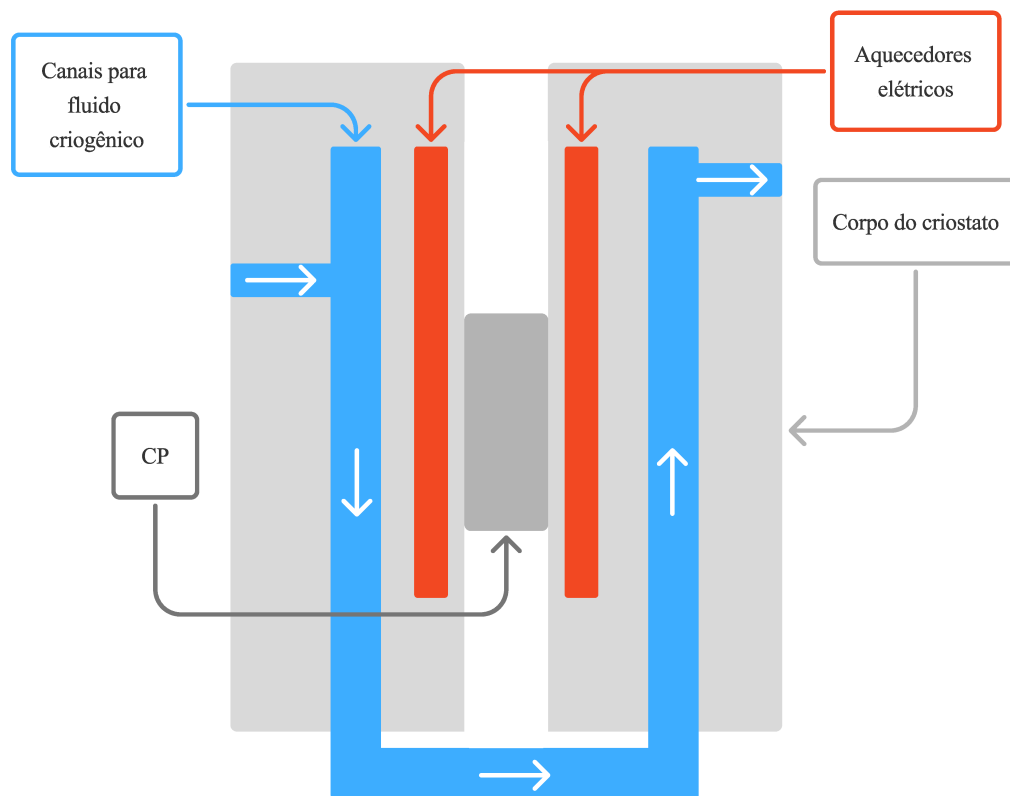
Essa investigação bibliográfica serviu de base para o desenvolvimento do criostato aqui proposto e evidenciou uma lacuna na literatura no que se diz respeito a soluções compatíveis com CPs miniaturizados, capazes de operar em uma ampla faixa de temperatura e atender aos requisitos das normas ASTM E23 e ISO 148. Consequentemente, o presente trabalho busca suprir essa lacuna ao propor um criostato de fluxo contínuo projetado especificamente para os

ensaios Mini-Charpy do tipo KLST.

1.3 Requisitos de Projeto

O diagrama do funcionamento de um criostato pode ser visto na Figura 1. O equipamento é capaz de alcançar temperaturas entre a temperatura do fluido criogênico e a máxima atingida em regime permanente pelos aquecedores elétricos. Particularmente neste trabalho, o controle de temperatura é realizado manipulando-se a potência fornecida aos aquecedores elétricos (i.e. resistências elétricas). Ao utilizar como fluido criogênico o LN₂ e tendo aquecedores elétricos compatíveis, essa estratégia permite controlar a temperatura em uma faixa de aproximadamente -190 [°C] a 150 [°C].

Figura 1 – Ilustração do princípio básico de funcionamento de um criostato, contendo os elementos principais como aquecedores elétricos, fluido criogênico, corpo de prova e meio de trocas térmicas (corpo do criostato).



Fonte: Próprio autor.

Logo, todos os materiais empregados na construção do criostato devem ser capazes de suportar essa ampla faixa de temperaturas, em especial as condições criogênicas. O sistema também deve ser capaz de manter a temperatura do CP dentro de um intervalo de ± 1 [°C] do valor de referência fornecido por um operador por pelo menos cinco minutos, conforme estipulado na norma ISO148 (2016). Adicionalmente, deve-se garantir a uniformidade térmica ao longo de

todo o corpo de prova, assegurando que a variação de temperatura entre suas extremidades não ultrapasse ± 2 [°C], como determinado pela ASTM E23 (2024).

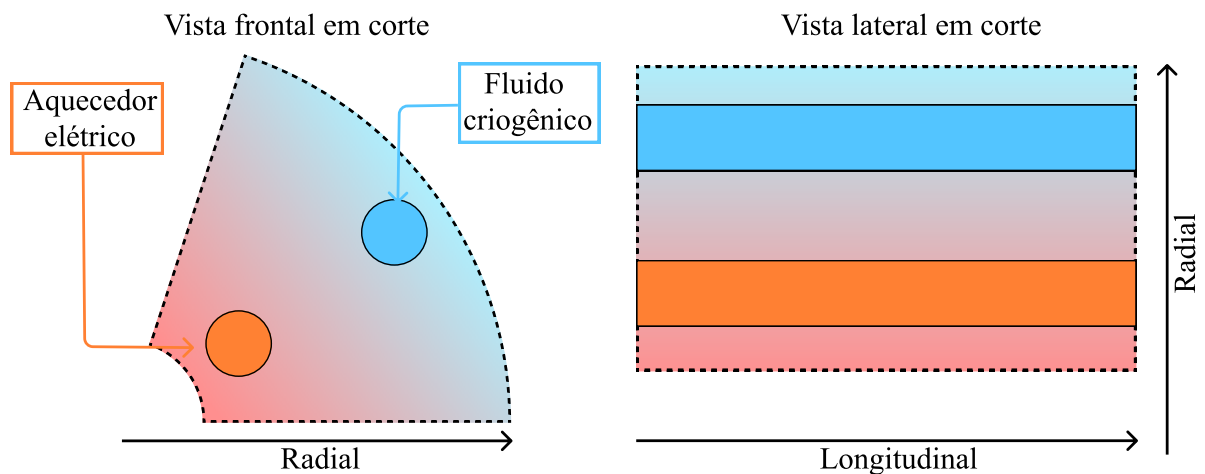
2 Desenvolvimento do Criostato

Para atender aos requisitos apresentados para ensaios MCVN do tipo KLST, foi necessário conceber uma solução integrada, combinando projetos mecânico, eletrônico e de controle, como também desenvolver um software embarcado específico para o criostato. Este capítulo apresenta parte desses desenvolvimentos. Inicialmente, é descrito o projeto mecânico do criostato, justificando escolhas construtivas e apresentando análises térmicas realizadas utilizando simulações baseadas em elementos finitos. Em seguida, são apresentados o projeto eletrônico, que integra sensores, atuadores e a Interface Homem-Máquina (IHM) e a arquitetura do software embarcado, desenvolvido para realizar o controle do equipamento e a comunicação com o usuário. Já o projeto do sistema de controle é apresentado no Capítulo 3.

2.1 Projeto Mecânico

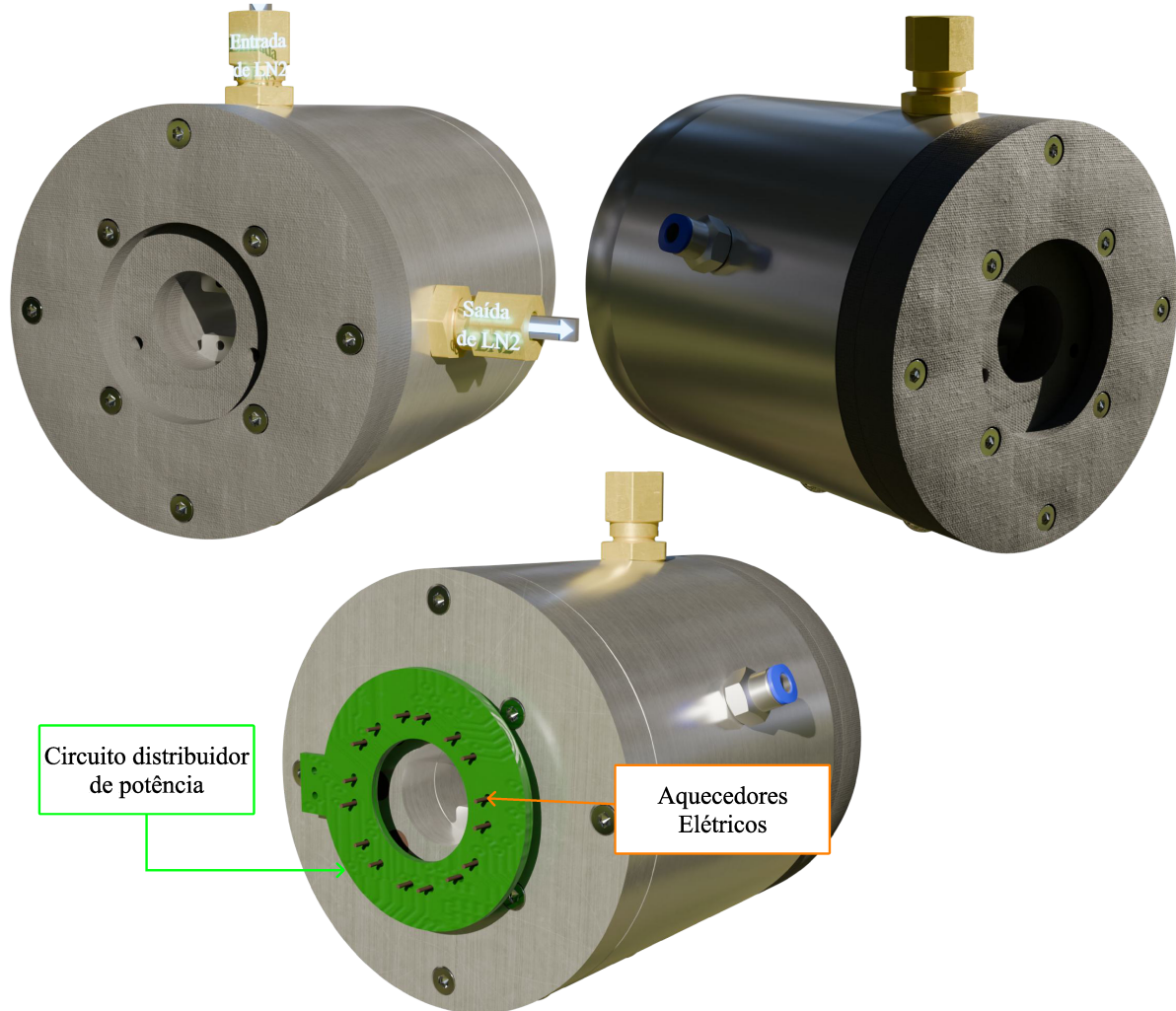
Um dos principais desafios no desenvolvimento do criostato consistiu em garantir a uniformidade de temperatura ao longo do corpo de prova, além de prover um meio eficiente de trocas térmicas que operasse em uma ampla faixa de temperaturas. A solução adotada foi um design em formato de cápsula com simetria radial, confeccionado em um material com alta condutividade térmica, no caso, o alumínio. Como ilustrado na Figura 2, a geometria radial favorece a manutenção de um gradiente de temperatura longitudinal aproximadamente constante ao longo do corpo de prova. A Figura 3 apresenta uma imagem do criostato completo, demonstrando a geometria adotada.

Figura 2 – Ilustração mostrando como a abordagem radial de distribuição dos componentes térmicos afeta o gradiente de temperatura no criostato.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3 – Renderização de diferentes vistas do criostato demonstrando seu formato de capsula.

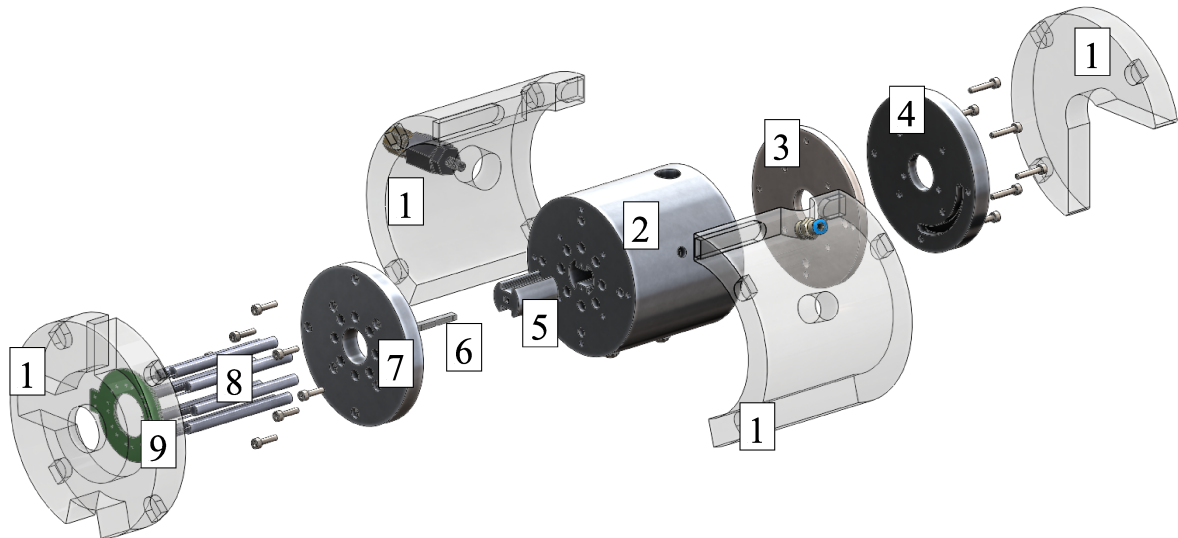


Fonte: Próprio autor.

Apesar de conceitualmente promissora, essa abordagem geométrica não garante, por si só, a uniformidade térmica requerida, uma vez que o projeto real demanda a inclusão de diversos componentes funcionais, como parafusos, conexões pneumáticas e passagens para a circulação do LN₂. O posicionamento adequado de elementos críticos, como os aquecedores elétricos e os canais de fluido criogênico, é fundamental na obtenção de um gradiente térmico adequado. Pequenas alterações na geometria ou na disposição dos componentes podem acarretar variações significativas na distribuição interna de temperatura.

Após testes e simulações, chegou-se na versão do criostato mostrada na Figura 4. Basicamente o criostato foi dividido em 9 módulos, que encontram-se descritos na Tabela 1.

Figura 4 – Vista explodida de todos os componentes do criostato.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 1 – Descrição dos módulos do criostato apontados na Figura 4.

Módulo	Descrição
1	Isolador térmico externo
2	Cápsula
3	Isolador térmico interno
4	Recirculador de LN ₂ simples
5	Acoplador térmico para CP
6	CP
7	Recirculador de LN ₂ duplo
8	Aquecedores elétricos
9	Distribuidor de potência

O isolador térmico externo 1 é fabricado por impressão 3D utilizando polímero com baixo preenchimento. Essa configuração foi escolhida para minimizar a condução térmica entre o ambiente externo e a cápsula, criando uma barreira contra a troca de calor por convecção ambiente. Como resultado, mitiga-se a formação de gelo na parte externa do criostato. O isolador térmico interno 3 e o recirculador de LN₂ simples 4 são confeccionados em Celeron, um material compósito que apresenta baixa condutividade térmica e estabilidade em baixas temperaturas. O isolador interno tem a função de impedir o contato direto do LN₂ com a cápsula na parte traseira do criostato, que é naturalmente mais fria, pois os aquecedores elétricos 8 não abrangem o comprimento total da cápsula 2. Isso melhora o gradiente de temperatura longitudinal, evitando zonas excessivamente frias que poderiam comprometer a uniformidade térmica do CP. Em contrapartida, o recirculador de LN₂ duplo 7, posicionado na parte frontal da cápsula — região naturalmente mais quente devido aos aquecedores e — é fabricado em alumínio. O

alumínio foi selecionado pois apresenta alta condutividade térmica, o que permite uma transferência eficiente de calor do fluido criogênico para a cápsula nessa região, contribuindo para a homogeneização da temperatura (INCROPERA; DEWITT, 2007). A cápsula 2 representa o principal meio de troca térmica do sistema. Também fabricada em alumínio, tal cápsula recebe diretamente o calor dos aquecedores e o resfriamento do LN₂ através de canais internos, promovendo a transferência térmica para o interior do criostato. Circunscrito no interior do criostato, está localizado o acoplador térmico 5. Esse componente foi projetado para abrigar o corpo de prova 6 com dimensões de 3 x 4 x 27 mm³. A função do acoplador é efetuar o contato térmico eficiente entre o interior da cápsula e o CP. Por essa razão, esse componente também foi fabricado em alumínio. Por fim, o distribuidor de potência 9 é uma Placa de Circuito Impresso (PCI) dedicada à distribuição das conexões elétricas para os aquecedores. O distribuidor foi projetado para simplificar a fiação e garantir conexões elétricas estáveis e organizadas e a composição dessa PCI é descrita na Seção 2.2.4.

2.1.1 Simulações de Elementos Finitos

Com o objetivo de validar as decisões de projeto referentes à geometria e à disposição dos elementos de troca térmica, foram realizadas simulações por Elementos Finitos (REDDY, 1993). Essa abordagem permite estimar o comportamento térmico do sistema e verificar se o formato de criostato proposto atende os requisitos de projeto estipulados.

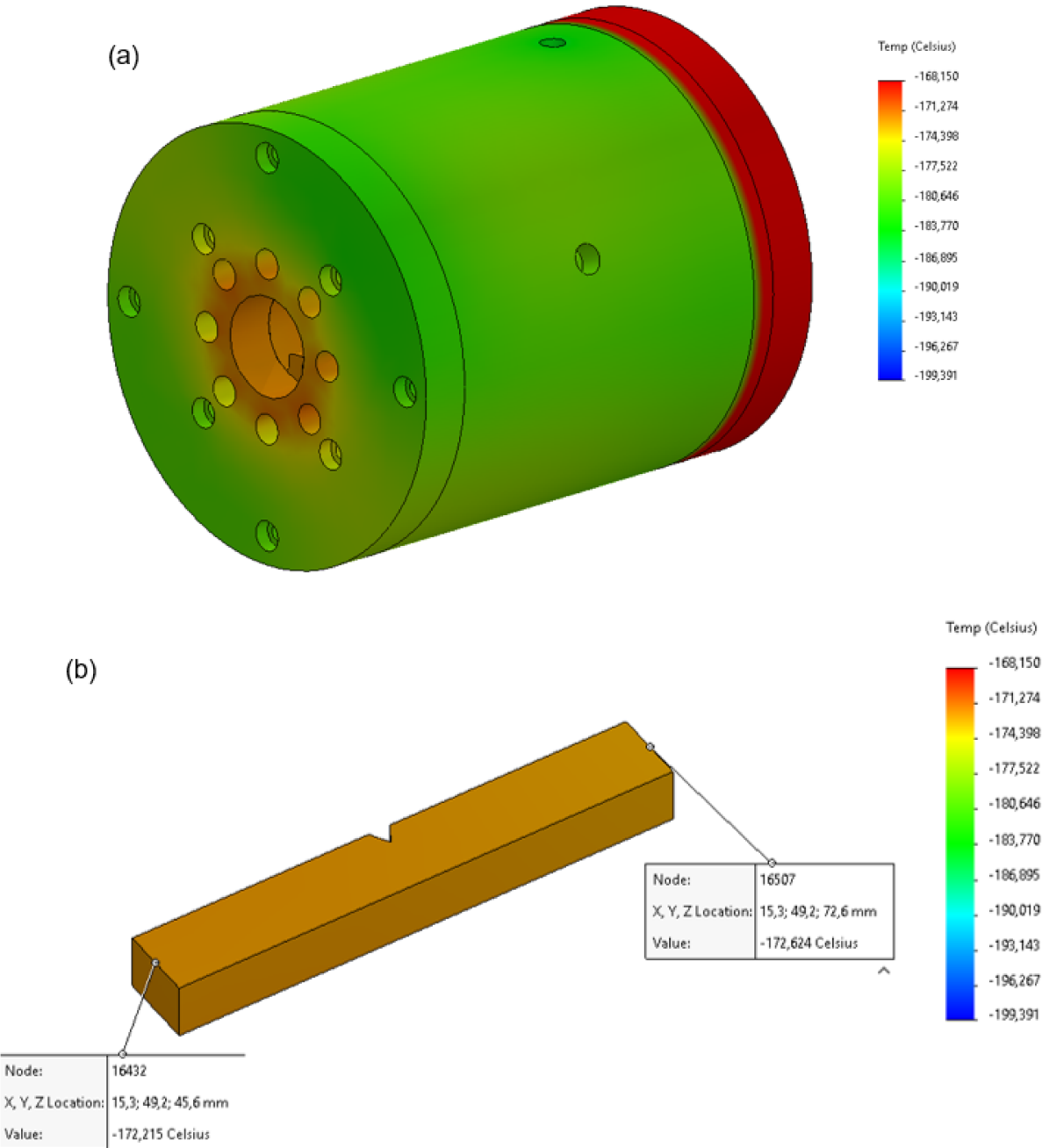
Em particular, simulações foram conduzidas no software Solidworks®, considerando a geometria final do criostato com todos os componentes que influenciam a condução e a distribuição de calor, como canais de LN₂, resistências de aquecimento e convecção ambiente. Além disso, as seguintes condições de contorno foram adotadas durante a realização das simulações em regime estacionário:

- Convecção com o ar ambiente: 25 W/m²K a 27 [°C];
- Resistência térmica de contato entre os componentes: 1×10^{-5} K m²/W;
- Convecção devido ao nitrogênio líquido: 10.000 W/m²K a -196 [°C]. Vale ressaltar que, o coeficiente de convecção do LN₂ adotado é o valor que possui maior variabilidade, pois na faixa de temperatura trabalhada, o fluido está sempre em ebulição e, por conseguinte, possui duas fases (BAEK; RADEBAUGH; BRADLEY, 2025). Sendo assim, foi adotado um valor intermediário do que foi encontrado na literatura para as simulações;
- Potência total dos aquecedores térmicos: 800 W.

Uma distribuição de temperatura em todo o criostato é ilustrada na Figura 5a. Constata-se que a temperatura de convergência final não é muito importante, já que, na prática, o sistema de controle atuará ativamente para manter a temperatura em torno do valor de referência. É evidenciado pela Figura 5b que o gradiente de temperatura no CP é de 0,409 [°C]. Resultado bastante

satisfatório, levando em consideração que a norma ISO148 (2016) especifica uma tolerância de ± 2 [°C] em relação à temperatura nominal do ensaio.

Figura 5 – Resultado da simulação em elementos finitos do comportamento térmico do criostato em regime estacionário: (a) Distribuição de temperatura em equilíbrio térmico na montagem do criostato; (b) Gradiente de temperatura no CP.



Fonte: Próprio autor.

2.2 Projeto Eletrônico

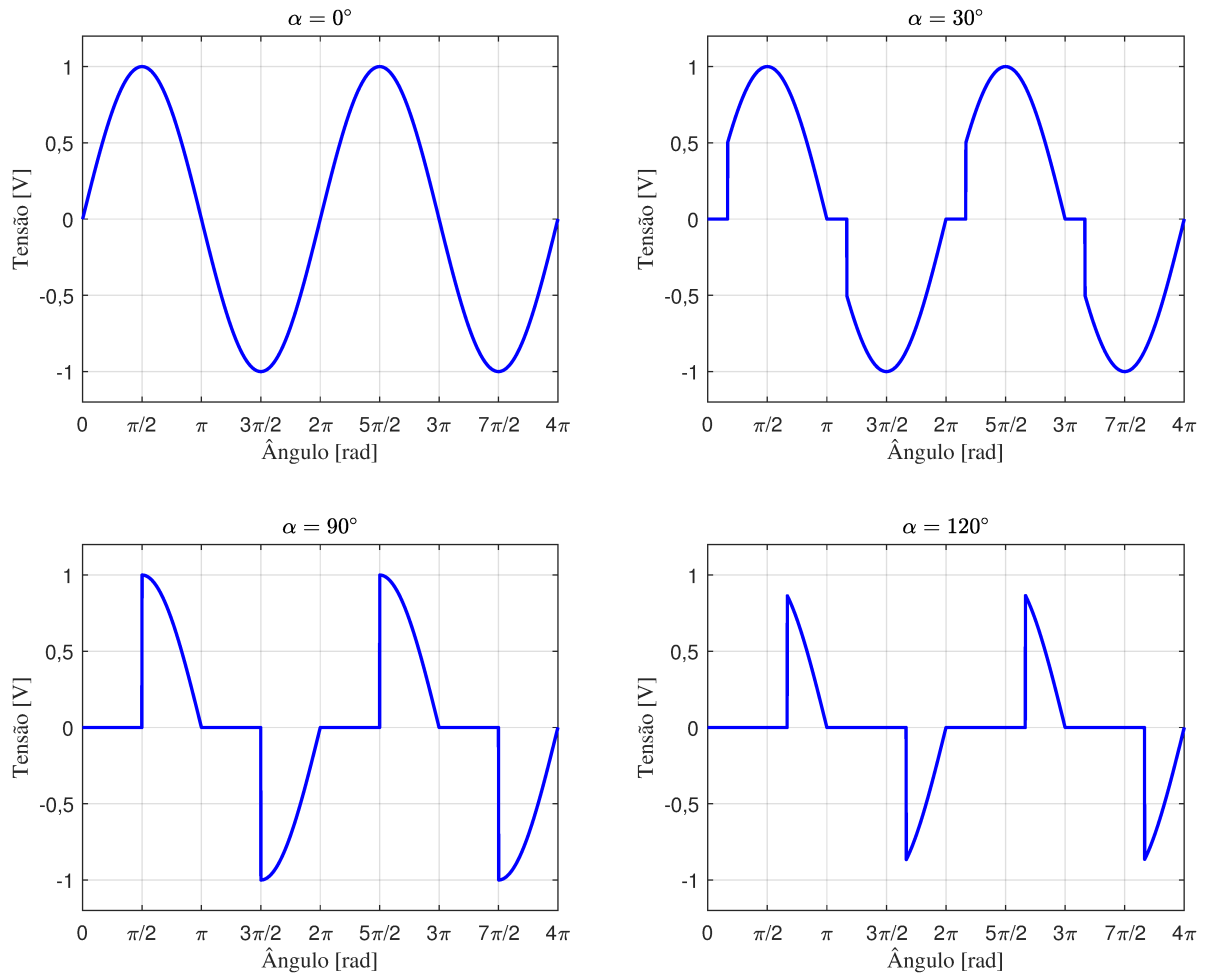
A operação do criostato exige um sistema eletrônico capaz de controlar a potência fornecida às resistências elétricas, realizar medições de sensores e também interfacear a comunicação

com o usuário. O projeto eletrônico foi dividido em duas partes principais: Eletrônica de potência e circuito de processamento, que encontram-se descritos a seguir. Na subseção dedicada à eletrônica de potência, são apresentados os circuitos responsáveis pelo acionamento dos aquecedores elétricos, com controle de potência realizado via ângulo de disparo de um TRIAC. Com esse propósito, um circuito de sincronização desse ângulo de disparo com o sinal de alimentação da rede elétrica precisou ser desenvolvido. Especificamente, esse circuito é denominado detector de passagem por zero, e é apresentado na Subseção 2.2.3. Por fim, a subseção referente ao circuito de processamento aborda o desenvolvimento do centro de processamento do criostato, o qual é baseado no microcontrolador ESP32.

2.2.1 Circuito de Potência

Definiu-se que o controle da potência elétrica fornecida às resistências seria realizado em corrente alternada utilizando um tiristor do tipo TRIAC (AHMED, 2008). Sendo assim, manipula-se efetivamente o ângulo de disparo α de um TRIAC, modificando a forma de onda fornecida às resistências. Esse ângulo corresponde ao instante dentro de um ciclo da senoide de tensão alternada, no qual o tiristor é acionado, permitindo a condução da corrente. O valor do ângulo de disparo pode variar de 0 a π , controlando diretamente a tensão eficaz experienciada pela carga. O efeito desse ângulo na forma de onda da corrente alternada pode ser visualizado na Figura 6. Nota-se que, quanto menor o valor de α maior a potência elétrica gerada pelas resistências.

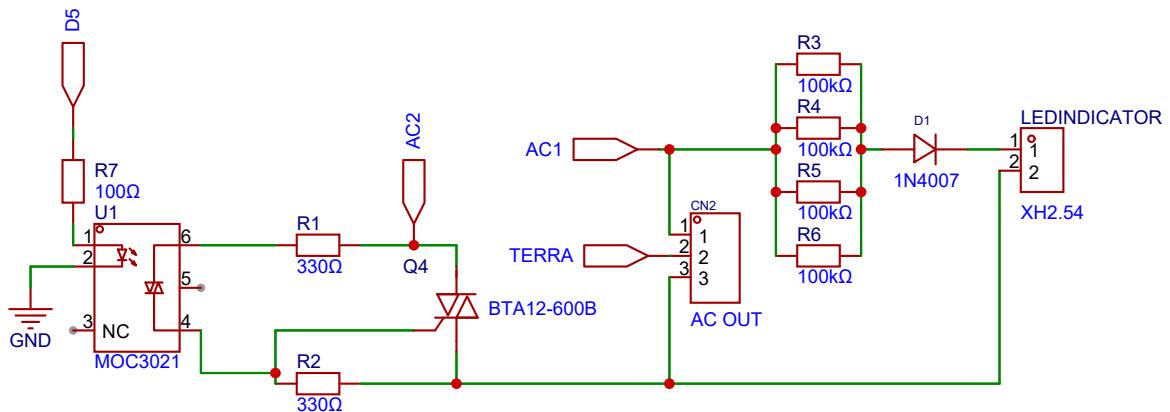
Figura 6 – Demonstração do efeito da variação do ângulo de disparo no formato de onda da corrente alternada da rede, com disparos em 0° , 30° , 90° e 120° .



Fonte: Próprio autor.

O circuito de acionamento do TRIAC é responsável por realizar a comutação da carga dos aquecedores elétricos. O esquemático deste circuito é mostrado na Figura 7. O sinal de controle do microcontrolador é aplicado ao MOC3021 por meio do pino D5. Então, por meio de isolamento óptico, ativa o foto TRIAC interno. Isso permite que a corrente proveniente da fonte das tensões senoidais AC1 e AC2 circulem pelo GATE do TRIAC BTA12-600B, disparando-o. O MOC3021 foi escolhido por sua capacidade de operar em conjunto com o TRIAC e por oferecer isolamento entre os circuitos de controle e potência, aumentando a segurança e a confiabilidade do sistema. O LED indicador de potência está conectado em paralelo com a carga por meio de resistores limitadores de corrente e um diodo 1N4007, permitindo uma visualização do estado de acionamento da carga.

Figura 7 – Diagrama do circuito de acionamento do TRIAC



Fonte: Próprio autor.

Para realizar o disparo do TRIAC adequadamente, é necessário implementar um sistema de sincronização com a tensão alternada da rede elétrica de alimentação. Especificamente, faz-se necessário detectar quando a senoide de alimentação cruza o 0 V, possibilitando a sincronização do disparo do TRIAC (WALL, 2003). Com esse propósito, foi desenvolvido um circuito dedicado à detecção da passagem por zero da senoide, cuja descrição detalhada será apresentada na próxima subseção.

2.2.2 Circuito de Detecção de Passagem por Zero

O circuito de detecção de passagem por zero tem como função gerar um pulso de nível lógico alto sempre que a tensão de alimentação cruzar o 0 V. O diagrama esquemático do circuito implementado é apresentado na Figura 8.

O princípio de funcionamento do circuito é relativamente simples. Inicialmente, a tensão de alimentação senoidal é conectada aos terminais AC1 e AC2. Então, é convertida em uma tensão pulsante unidirecional por meio de um retificador de onda completa KBP206. Essa tensão é então aplicada ao optoacoplador 4N25, com sua saída em uma configuração *pull-down*, de modo que, quando há corrente circulando, a saída permanece em nível lógico alto (5 V), e durante a transição pelo zero, o sinal é temporariamente nulo. Posteriormente, esse sinal é condicionado por um circuito *Schmitt Trigger* CD4093BE, que atua como um modelador de pulso, convertendo o sinal em uma forma de onda quadrada com bordas bem definidas e realizando a inversão lógica; portanto, um pulso positivo é emitido ao microcontrolador precisamente no instante da passagem por zero. Um gráfico mostrando a resposta simulada do circuito de detecção de passagem por zero pode ser observado na Figura 9.

Figura 8 – Circuito elétrico para detecção de passagem por zero da tensão da rede, composto por ponte retificadora, optoacoplador, resistores e um circuito integrado *Schmitt Trigger*.

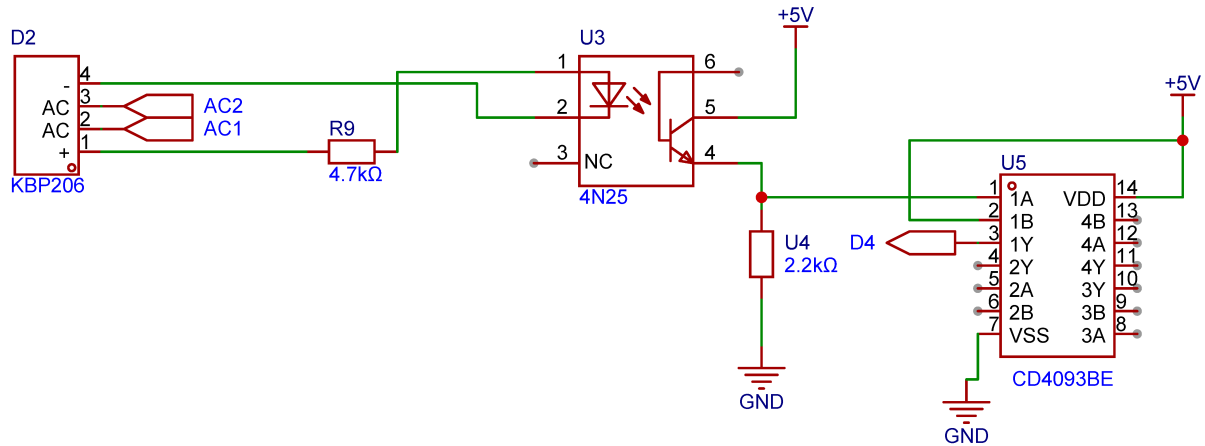
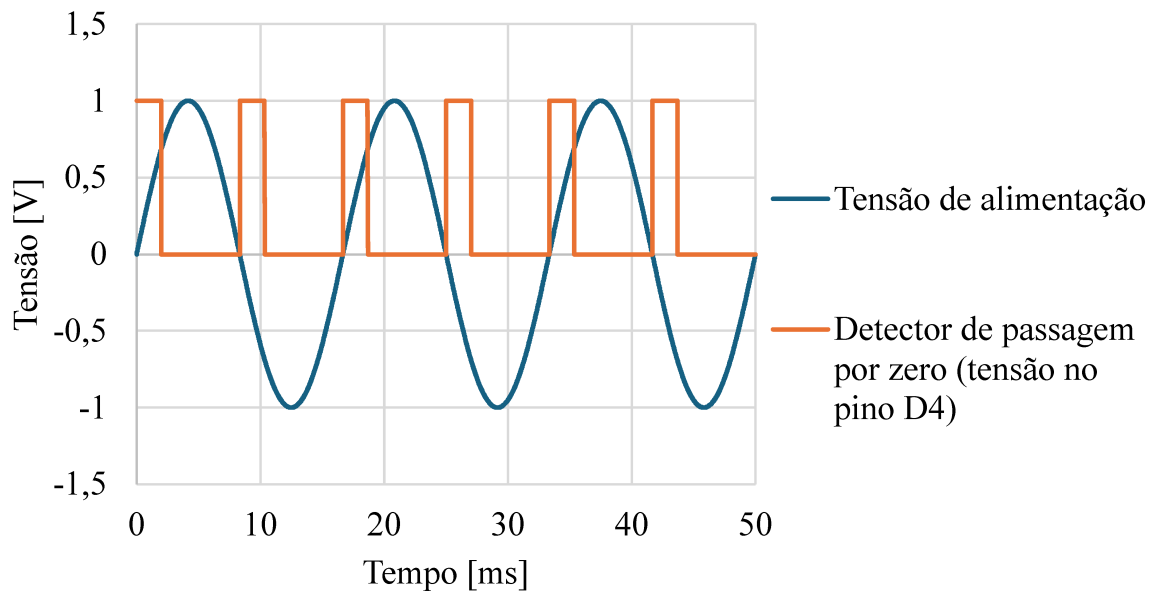


Figura 9 – Comportamento da resposta do circuito de detecção de passagem por zero.



Fonte: Próprio autor.

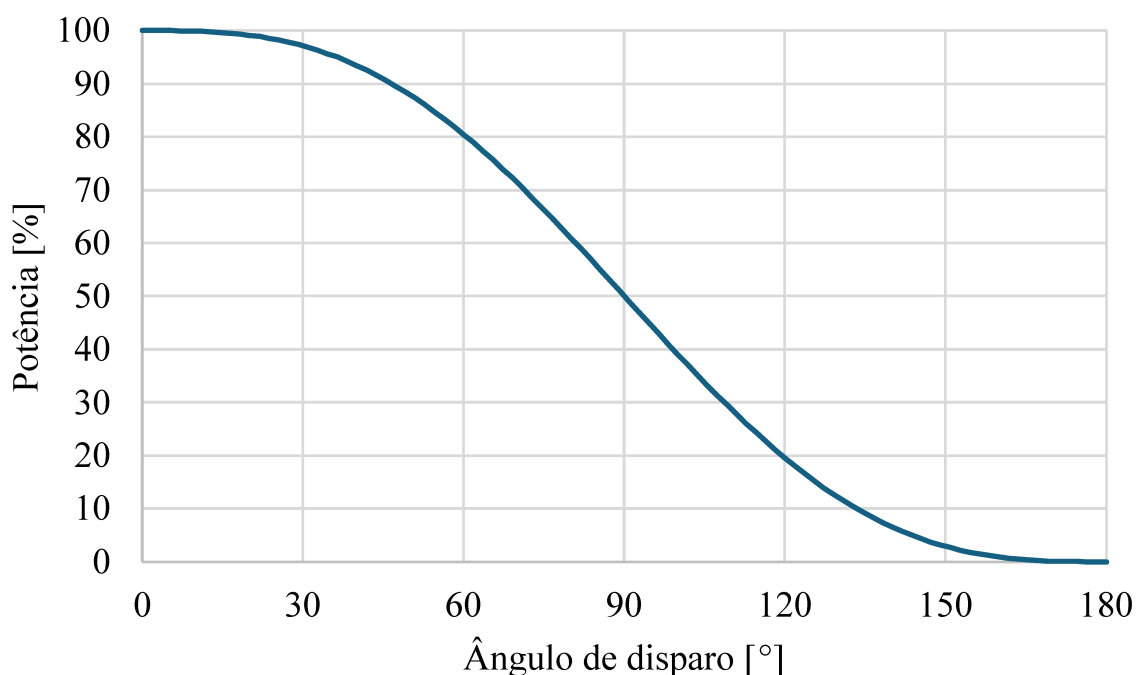
2.2.3 Controle de Potência

Para um efetivo controle da potência, é necessário entender como o ângulo de disparo afeta o percentual de potência resultante na carga resistiva. Considerando uma carga puramente resistiva, é possível demonstrar que a relação entre α e potência é dada por (AHMED, 2008):

$$P_{\%}(\alpha) = \frac{\pi - \alpha - 0,5 \sin[2(\pi - \alpha)]}{\pi} \quad (2.1)$$

em que $P_{\%}$ denota a porcentagem de potência fornecida para uma carga resistiva em relação ao máximo de tensão fornecida pela rede. Essa relação não linear é também mostrada na Figura 10.

Figura 10 – Percentual de potência entregue aos aquecedores em função do ângulo de disparo do TRIAC.



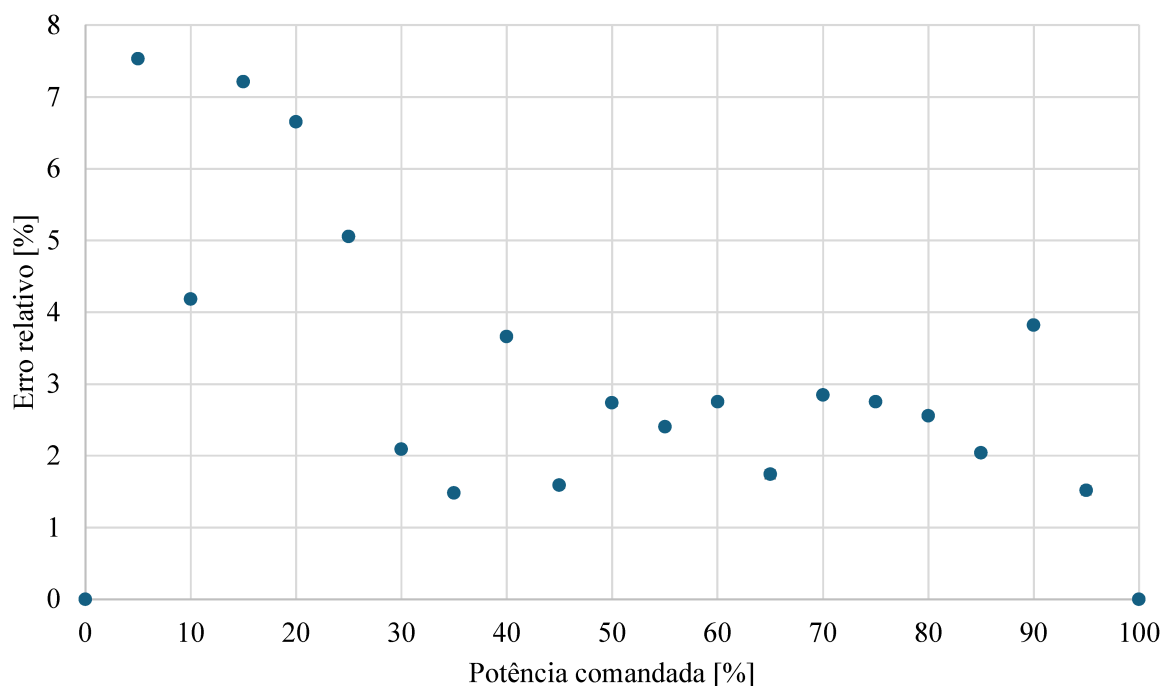
Fonte: Próprio autor.

De posse da porcentagem de potência a ser imposta às resistências, pode-se calcular o ângulo de disparo α invertendo-se a (2.1). Nesse trabalho, essa inversão foi feita numericamente utilizando o método de Newton (BURDEN; FAIRES, 2015). Desta maneira, ao inserir o percentual de potência desejado, internamente se calcula iterativamente o ângulo de disparo do TRIAC. Como é utilizado um método numérico, existe erro associado à precisão do cálculo numérico e à perda de sincronização entre a tensão da rede e o momento do disparo devido ao tempo necessário para conclusão do procedimento numérico. Para quantificar esse erro, foram realizados testes entre a potência comandada e a potência real de uma carga resistiva. O ensaio foi efetivado utilizando uma lâmpada incandescente como carga puramente resistiva. A potência real dissipada na carga pode ser determinada a partir da tensão eficaz aplicada e da impedância correspondente. No ensaio, além da medição direta da tensão eficaz através de um osciloscópio, registrou-se também o ângulo de disparo real, já que a potência pode também ser estimada a partir desse parâmetro. Dessa forma, para cada patamar foram obtidas duas estimativas independentes de potência, cuja média foi considerada como valor de referência. Para assegurar a confiabilidade dos resultados, realizaram-se três rodadas de ensaio para cada patamar avaliado, em conformidade com práticas metrológicas para avaliação da variabilidade das amostras, média e o desvio padrão. Por fim, a média aritmética dos três conjuntos de medições foi adotada como o valor final da potência correspondente a cada condição ensaiada.

Os resultados podem ser observados a partir da Figura 11. Nota-se que o maior erro

relativo foi de 7,5 % com a potência comandada de 5 %. Esses resultados indicam que o erro presente é maior para ângulos de disparo menores, cuja potência comandada é menor que 50 %. Os desvios padrão obtidos foram muito baixos e ficaram encobertos pelos próprios marcadores no gráfico, porém o maior desvio observado foi de 0,06 %.

Figura 11 – Erro relativo entre o percentual de potência esperado e o percentual real medido com uma carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

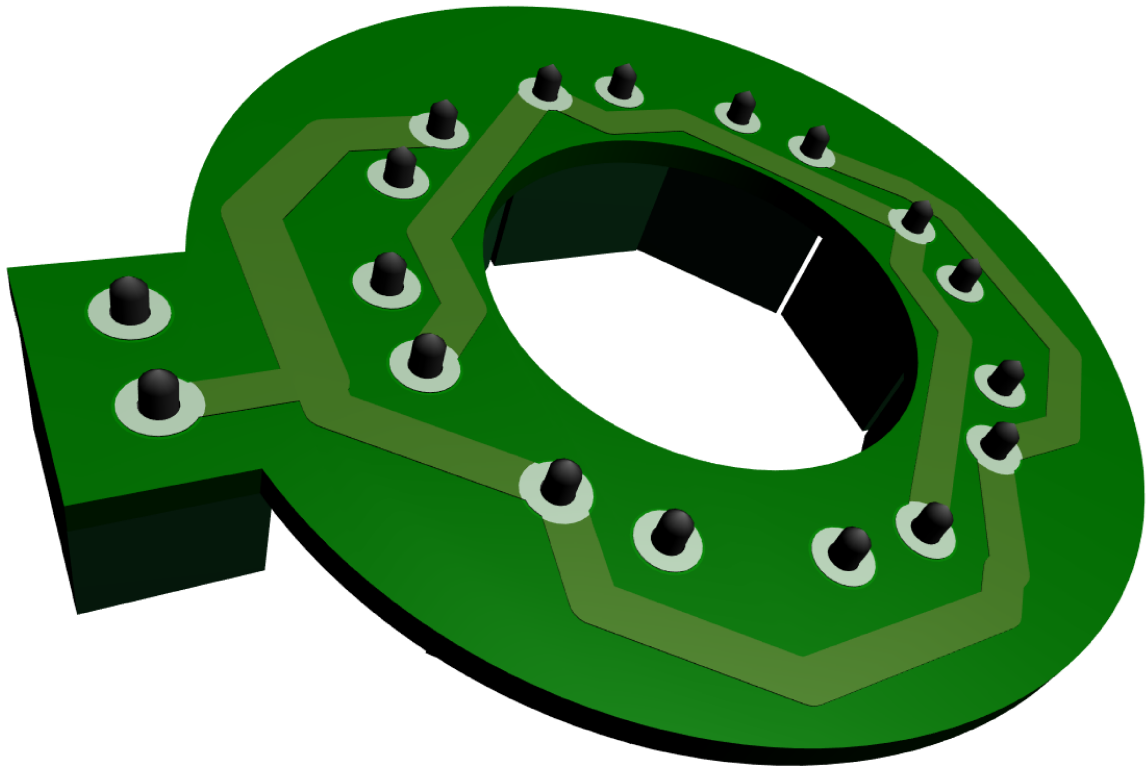
2.2.4 Circuito distribuidor de potência

O criostato é equipado com oito aquecedores elétricos do tipo cartucho, totalizando uma potência instalada de 800 W. Durante as primeiras etapas de desenvolvimento, identificou-se o desafio de realizar a conexão dos dezesseis fios provenientes dos aquecedores de forma organizada e segura. A solução adotada consistiu no projeto e fabricação de uma placa dedicada exclusivamente à interligação dos aquecedores, permitindo que apenas três condutores principais saíssem do dispositivo. Essa abordagem simplificou a montagem, reduziu a quantidade de cabos externos e facilitou a manutenção. A placa foi projetada com geometria radial, dispondo de múltiplos pontos de conexão para soldagem direta dos aquecedores.

O parâmetro mais importante a se considerar no projeto do distribuidor de potência foi o dimensionamento das trilhas de cobre, já que nesse patamar de potência espera-se até 3,63 [A] de corrente elétrica. O dimensionamento foi feito de acordo com a norma GENERIC... (2003) considerando os seguintes parâmetros: camadas externas da PCI, corrente nominal de 7 [A], espessura padrão de 33 μm e um aumento de temperatura aceitável de 40 [°C]. Como con-

sequência, foi definida uma largura de trilha de 2 mm para alimentar as resistências. Figura 12 ilustra a representação da placa desenvolvida.

Figura 12 – Modelo 3D da placa de distribuição de potência, projetada para interligar os oito aquecedores elétricos do tipo cartucho do criostato.



Fonte: Próprio autor.

2.2.5 Circuito de processamento

Os circuitos de potência e de detecção de cruzamento com o zero descritos anteriormente foram combinados em uma única PCI, juntamente com os componentes para controle do criostato e interface com o usuário. O principal componente dessa placa é o microcontrolador ESP32, selecionado por apresentar versatilidade, capacidade de multitarefa, interfaces digitais e analógicas, conectividade Wi-Fi integrada e baixo custo (ESP32..., 2025).

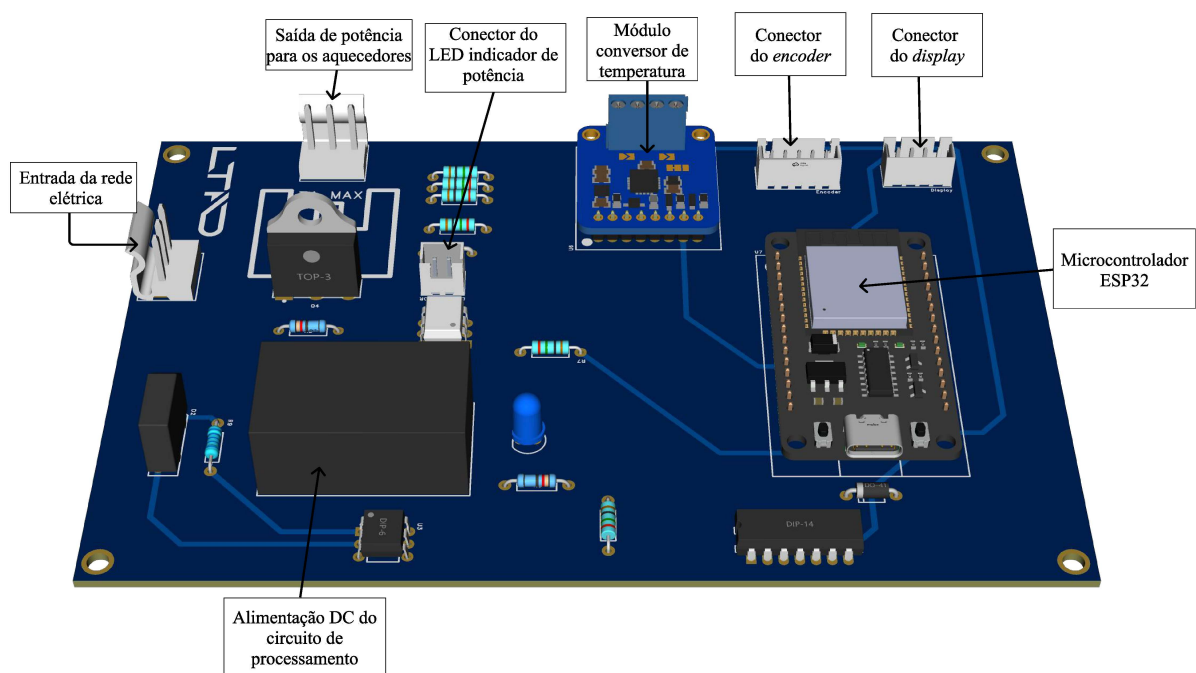
A mesma PCI comporta o circuito responsável por ler a temperatura através do conversor MAX31865, que realiza a conversão e o condicionamento do sinal de um sensor de temperatura do tipo PT100 classe A fabricado pela Novus[®]. O módulo emprega um resistor de referência de 0,1% de tolerância, garantindo precisão na ordem de 0,1[°C], conforme especificado pelo fabricante (ADAFRUIT..., 2025).

Além disso, estão presentes os conectores para os dispositivos de interface com o usuário, como o *encoder* rotativo, utilizado para navegação no menu e ajuste de parâmetros, e o *display* LCD, responsável por exibir informações como temperatura, referência e modo de ope-

ração. Uma imagem ilustrativa da placa desenvolvida pode ser observada na Figura 13. O funcionamento da interface com o usuário desenvolvida encontra-se descrito no Apêndice A.

O projeto da placa foi elaborado para maximizar a separação dielétrica entre os circuitos de corrente alternada, corrente contínua, sinais digitais e circuitos de potência, com o objetivo de reduzir interferências eletromagnéticas e garantir a estabilidade do sistema. Além disso, foram adotadas boas práticas no roteamento das trilhas no barramento SPI responsável pela comunicação com o módulo de temperatura, incluindo o pareamento de comprimento das trilhas, para evitar assimetrias que comprometam a integridade do sinal (ARCHAMBEAULT; DREWNIAK, 2013). Ademais, as trilhas que envolvem potência foram devidamente dimensionadas para suportar até 7 [A] de forma segura, ou seja, trabalhando em 220 [V] RMS a placa suporta aproximadamente 1500 [W] (quase o dobro do necessário para alimentar todas as resistências elétricas). O Apêndice B mostra o diagrama elétrico completo da PCI desenvolvida e fabricada durante esse trabalho.

Figura 13 – Representação 3D da placa desenvolvida para efetuar o controle do criostato, contendo todos os outros circuitos supracitados.



Fonte: Próprio autor.

2.3 Arquitetura de software

O software embarcado desenvolvido para o controle do criostato foi implementado sobre o sistema operacional em tempo real FREERTOS... (2025). A aplicação foi modularizada em *tasks* (tarefas), cada uma responsável por uma funcionalidade específica do sistema. Essa divisão visa garantir paralelismo, responsividade e isolamento funcional entre os diferentes sub-

sistemas que compõem o equipamento. A Figura 14 ilustra de forma simplificada o funcionamento do software embarcado, sendo que cada tarefa é executada em paralelo com temporização configurada individualmente. Tanto o paralelismo quanto a temporização são gerenciados diretamente pelo FreeRTOS. Um detalhamento de cada uma dessas tarefas, bem como a respectiva temporização de execução, é apresentada a seguir.

A tarefa responsável pelo controle do sistema (tarefa denominada “Malha de Controle”) é dedicada exclusivamente ao cálculo da ação de controle, considerando a temperatura medida utilizando um sensor do tipo PT100 e o valor de referência, ambos fornecidos por outras tarefas do sistema (respectivamente tarefas “Leitura de Temperatura” e “Leitura da referência”). Ao final de cada ciclo de controle, essa tarefa disponibiliza a potência que deve ser aplicada à planta a cada 250 [ms]. Quando o sistema se encontra desabilitado, a tarefa simplesmente libera o processador, permitindo que outras tarefas executem sem bloqueio.

A leitura da temperatura é realizada por uma tarefa específica a cada 250 [ms]. Para garantir a integridade da comunicação via barramento SPI síncrono, são utilizados semáforos, prevenindo a corrupção de dados em caso de acessos simultâneos. As leituras obtidas são processadas por um filtro digital passa-baixa do tipo *Butterworth* de segunda ordem com frequência de corte em 0,4 [Hz], que suaviza as variações e disponibiliza os dados tratados às demais tarefas do sistema.

Com o objetivo de fornecer informações periódicas ao usuário, a tarefa “Display” é responsável por atualizar o *display* LCD em uma taxa de 5 Hz, exibindo variáveis relevantes como temperatura atual, valor de referência, modo de operação e estado do botão. Além disso, essa tarefa também transmite os dados formatados por meio da interface Serial, permitindo a aquisição de dados por sistemas externos.

Para a interação do usuário com o sistema, utiliza-se um *encoder* rotativo com botão integrado, permitindo a seleção de diferentes modos de operação, ativação do sistema e ajuste da referência de controle. A tarefa associada a esse botão (“Leitura do Botão”) realiza a leitura incremental via *polling*, com tratamento de *bouncing* e detecção do sentido de rotação. Particularmente, tal tarefa é executada a cada 2 ms, com tempo de execução de apenas alguns microssegundos, de forma a não interferir com as demais tarefas e garantir fluidez na interação. A leitura do botão embutido no *encoder* também é tratada com temporização para *debounce*, alternando o estado do sistema entre habilitado e desabilitado conforme a atuação do usuário e executa em intervalos de 10 ms.

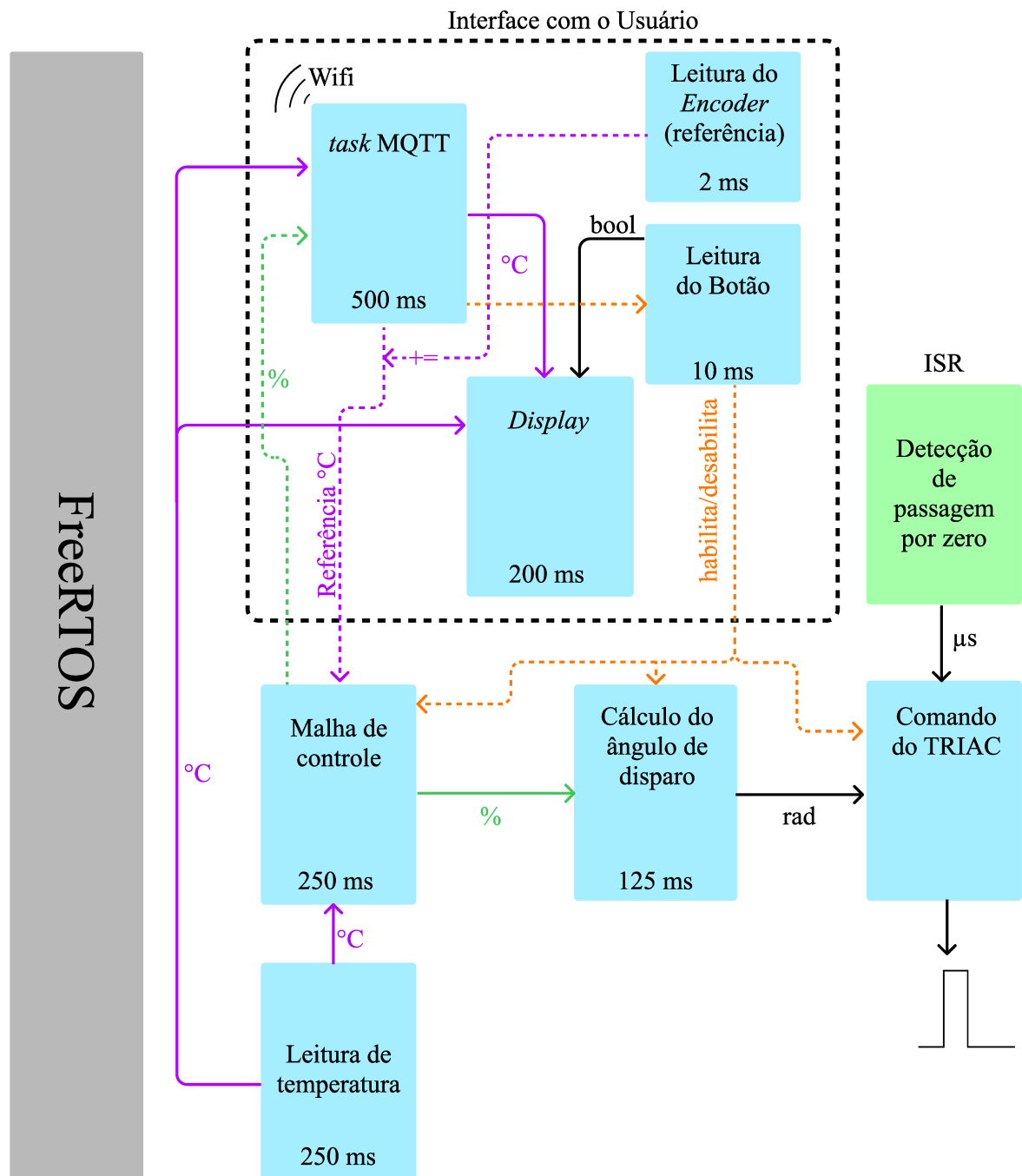
Uma tarefa dedicada à comunicação “MQTT” é inicializada no sistema embarcado quando o modo Remoto é selecionado. Essa tarefa é responsável por manter a conexão ativa, processar as mensagens recebidas dos tópicos e publicar dados de monitoramento em tempo real a cada 500 ms. Caso ocorra uma perda de conexão, essa mesma tarefa tenta automaticamente restabelecer a comunicação, garantindo robustez ao sistema.

Como já mencionado, o controle de potência do sistema é realizado por meio da variação do ângulo de disparo de um TRIAC. Garantir a sincronização precisa entre múltiplas tarefas e o acionamento do TRIAC representou um desafio. Então, a tarefa responsável pelo disparo (“Comando do TRIAC”) foi otimizada: uma interrupção por hardware (ISR – *Interrupt Service Routine*) é gerada a partir do detector de passagem por zero da rede, armazenando o instante da detecção. O acionamento do TRIAC ocorre após um tempo predefinido, correspondente ao ângulo de disparo desejado, por meio de um pulso de $25\ \mu s$. Caso o sistema esteja desabilitado, essa tarefa é suspensa, liberando o processador para outras funções. Por fim, o cálculo do ângulo de disparo também é executado de forma paralela em intervalos de 125 ms, convertendo a potência calculada pela malha de controle no ângulo de disparo adequado em um tempo médio de $318\ \mu s$. A tarefa desenvolvida para esse cálculo é denominada “Cálculo do ângulo de disparo”.

A arquitetura de software permite que o sistema opere de forma robusta e eficiente, com tarefas determinísticas e baixa latência em eventos sensíveis, como o controle de potência e a leitura do sensor de temperatura. Além disso, a separação clara de responsabilidades entre as tarefas facilita a manutenção e a futura expansão do software embarcado.

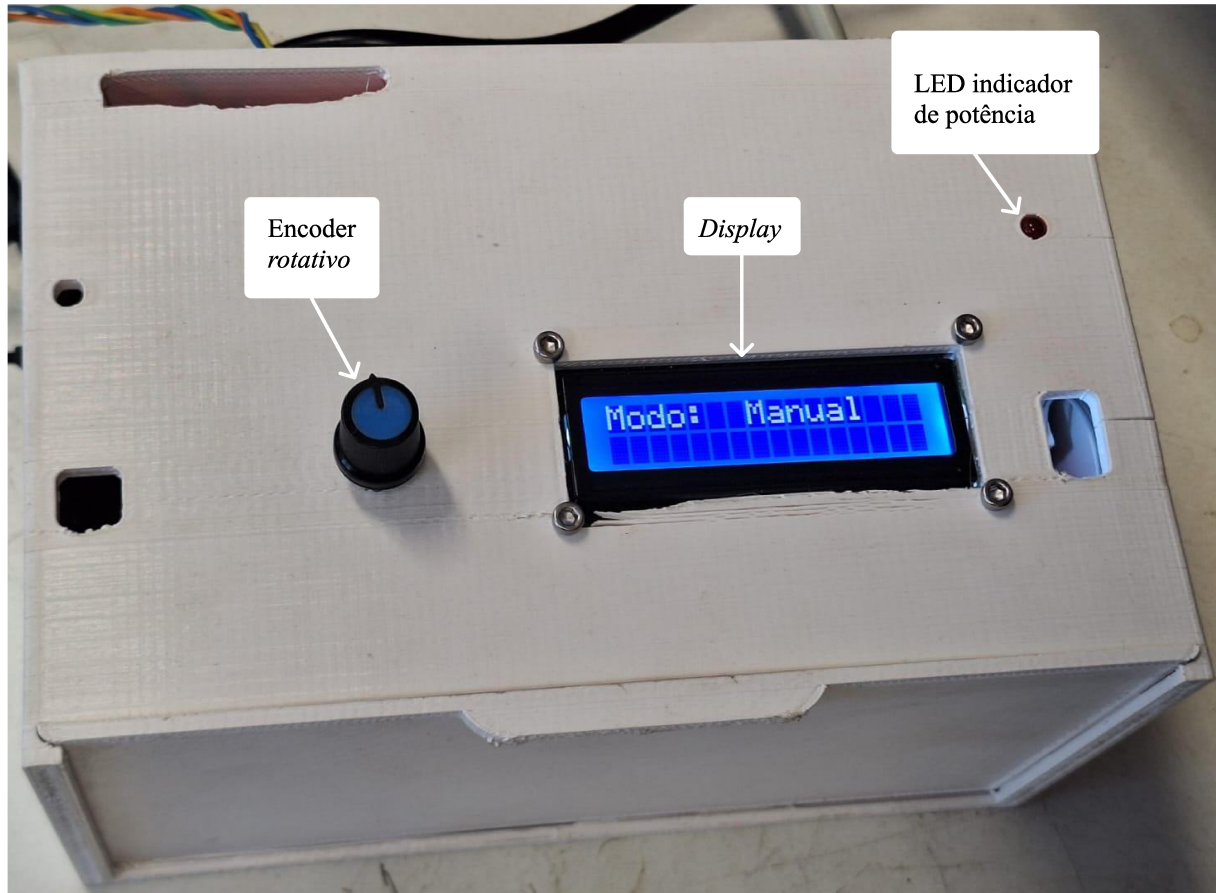
O sistema embarcado possui três modos de operação distintos, os quais podem ser selecionados pelo usuário por meio do *encoder* rotativo. No modo Automático, o sistema opera em malha fechada para rastrear a referência de temperatura fornecida localmente pelo operador utilizando a IHM mostrada na Figura 15. No modo Manual, o ajuste da porcentagem de potência elétrica fornecida às resistências é feito pelo operador (ou seja, se trabalha em malha aberta). Já o modo Remoto permite a integração com redes externas, possibilitando o controle e monitoramento do sistema por meio de comunicação sem fio. A implementação completa desse modo, baseada no protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), será detalhada na subseção dedicada à interface em rede.

Figura 14 – Diagrama simplificado da arquitetura de software embarcado no criostato. São mostradas as diferentes tarefas que executam no sistema. As tarefas são representadas por blocos azuis, o bloco verde representa uma rotina de interrupção e o grande bloco cinza o sistema operacional que faz o gerenciamento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 15 – Fotografia da caixa responsável por armazenar os dispositivos eletrônicos, evidenciando as interfaces de comunicação com o usuário.



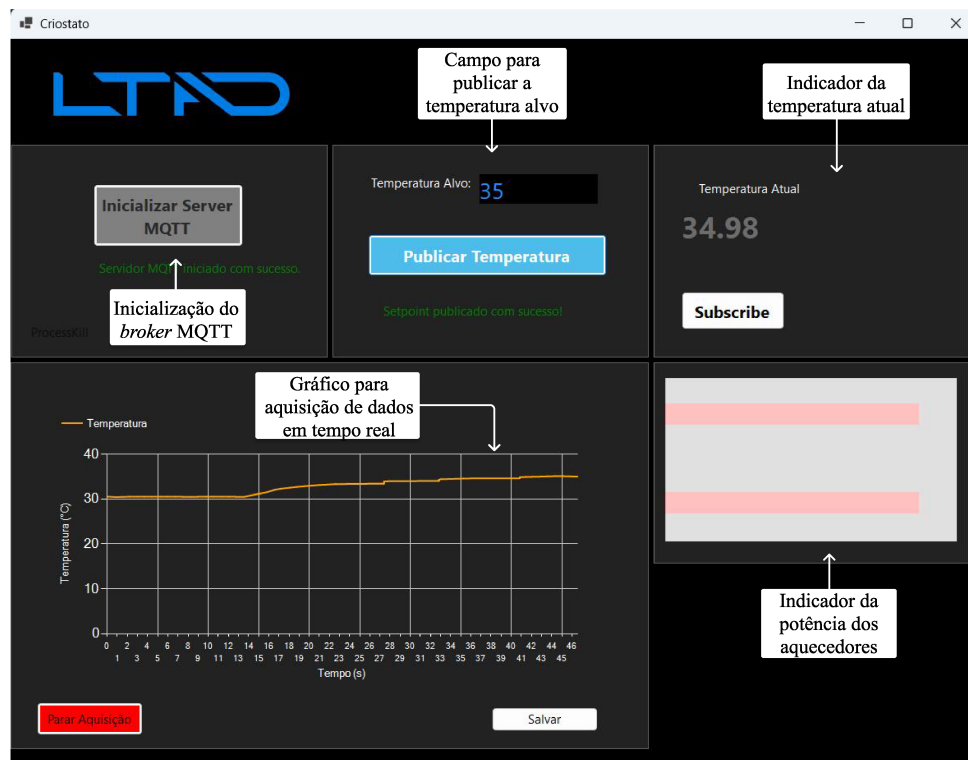
Fonte: Próprio autor.

2.3.1 Monitoramento e controle remoto utilizando o protocolo MQTT

Para permitir o controle remoto do criostato e a integração com sistemas de aquisição externos, foi implementado suporte ao protocolo MQTT, amplamente utilizado em aplicações de Internet das Coisas (IoT) por ser de fácil implementação e leve (MQTT.ORG, 2025).

A interface MQTT foi projetada para ser compatível com o software de controle em computador mostrado na Figura 16. Esse programa atua como cliente e *broker* MQTT e é responsável por comandar o criostato a partir de uma interface gráfica, permitindo o ajuste da temperatura de referência, a ativação ou a desativação do sistema, bem como o monitoramento em tempo real de variáveis como temperatura e potência aplicada. Para simplificar a comunicação, a ativação e a desativação do sistema são realizadas publicando-se um valor de temperatura fora dos limites de operação, evitando assim a necessidade de criação de um tópico MQTT adicional. Essa comunicação em tempo real permite que operadores possam controlar e monitorar o criostato à distância.

Figura 16 – Captura de tela do *software* desenvolvido para controle remoto do criostato utilizando o protocolo MQTT.



Fonte: Próprio autor.

Quando o modo Remoto é selecionado, o sistema embarcado ativa a interface Wi-Fi e conecta-se a uma rede sem fio previamente configurada no próprio código embarcado. A partir dessa conexão, o dispositivo estabelece comunicação com um *broker* MQTT — um servidor que atua como intermediário entre os clientes publicadores e assinantes de mensagens. Esse *broker*, que deve estar acessível na mesma rede local, é responsável por viabilizar o envio (publicação) e recebimento (subscrição) de dados entre o sistema embarcado e o software de controle no PC.

A comunicação entre os dispositivos é organizada por meio de tópicos. Cada tópico representa uma categoria de informação o que permite que cada parte do sistema interaja de forma assíncrona e independente. A Tabela 2 mostra os tópicos envolvidos nas trocas de informação dos sistemas.

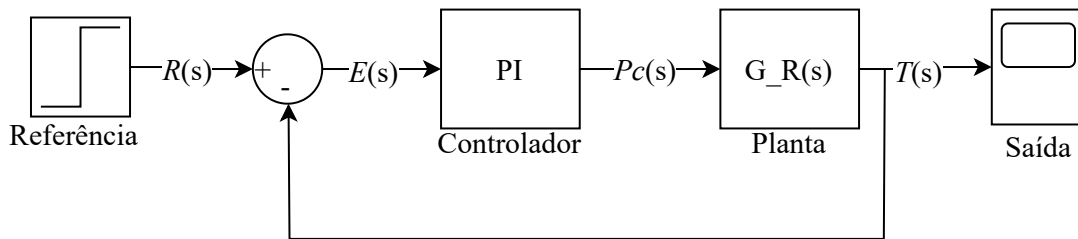
Tabela 2 – Tópicos MQTT utilizados para o funcionamento do criostato.

Tópico	Descrição
criostato/temperatura	Publica periodicamente os valores de temperatura medidos pelo sistema.
comando/temperatura	Recebe comandos de controle para alterar a referência de temperatura do criostato.
criostato/power	Publica a potência instantânea aplicada aos aquecedores elétricos.

3 Descrição do sistema de controle

Um elemento crucial para o funcionamento adequado do criostato é a malha de controle responsável por regular a temperatura medida do criostato em torno do valor de referência em uma ampla faixa térmica. Especificamente, adotou-se o controle em malha fechada para garantir precisão e resposta rápida diante de perturbações. Sem esse controle ativo, o sistema ficaria suscetível à variação de condições externas, como a flutuação da pressão do LN₂ ou a troca de calor com o ambiente, o que comprometeria a uniformidade e a repetibilidade dos ensaios. A Figura 17 mostra um diagrama de blocos da operação do sistema em malha fechada. Nessa figura, R representa a referência, P_c é a potência comandada às resistências elétricas, expressa em percentual em relação à potência máxima disponível (P_{\max}), T é a temperatura medida no criostato, e E é o erro de rastreamento entre o valor de referência e a temperatura medida. PI representa o controlador proporcional-integral, adotado no presente trabalho.

Figura 17 – Diagrama de blocos do controlador PI.



Fonte: Próprio autor.

Com o objetivo de desenvolver a malha de controle, inicialmente foram realizados testes experimentais para identificar modelos matemáticos que descrevem a relação entre a vazão de LN₂, a potência comandada às resistências elétricas e a temperatura interna do criostato. Em seguida, o comportamento dinâmico do criostato foi simulado numericamente, e essa simulação foi utilizada para ajustar os ganhos de um controlador Proporcional-Integral (PI). Na sequência, cada uma dessas etapas — identificação, simulação e ajuste do controlador — é detalhada.

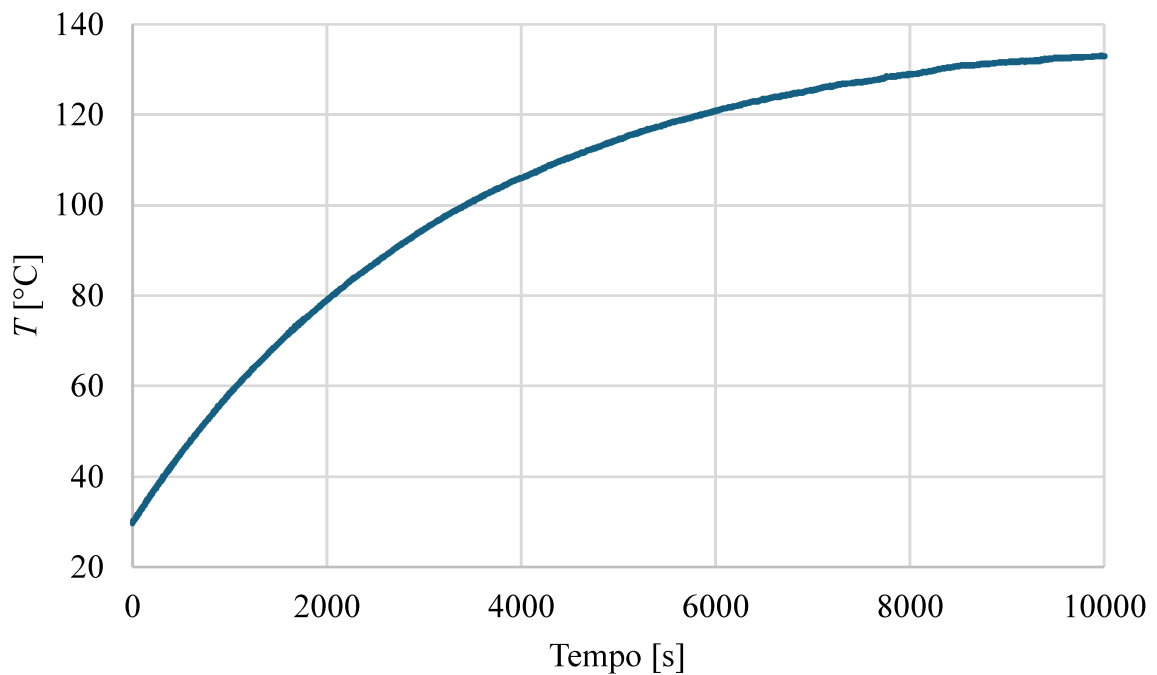
3.1 Identificação de modelos matemáticos

O primeiro modelo matemático dinâmico obtido foi entre a potência comandada aos aquecedores elétricos P_c e a temperatura do criostato T . Conforme previsto para sistemas térmicos, o criostato apresenta comportamento característico de um sistema de primeira ordem. Nesse caso, a relação $P_c \times T$ pode ser explicada por meio da seguinte função de transferência (OGATA, 2010):

$$G_R(s) = \frac{T(s)}{P_c(s)} = \frac{K_R}{\delta_R s + 1} \quad (3.1)$$

em que δ_R representa a constante de tempo do sistema térmico, enquanto K_R está associado ao valor de regime alcançado após a aplicação do degrau. Para identificar valores para K_R e δ_R , foi aplicado um degrau de 5 % e registrada a resposta da temperatura ao longo do tempo. A resposta obtida (mostrada na Figura 18) foi então utilizada para ajustar os parâmetros do modelo de primeira ordem, levando em consideração a escala aplicada.

Figura 18 – Resposta da temperatura do criostato a um degrau de potência de 5 %.



Fonte: Próprio autor.

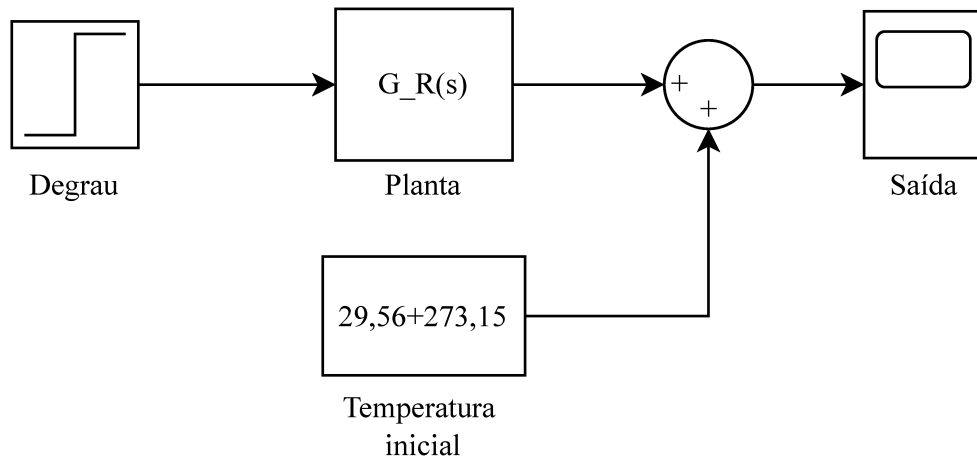
Desta maneira, utilizando-se (3.1), e a partir do conhecimento da resposta de sistemas de primeira ordem ao degrau, identificou-se a seguinte função de transferência (OGATA, 2010):

$$G_R(s) = \frac{8104}{3351,2s + 1}. \quad (3.2)$$

Para mostrar que a identificação foi realizada adequadamente, desenvolveu-se uma simulação em Simulink® e compararam-se os resultados simulados e experimentais. A simulação no Simulink® e a comparação entre as respostas simulada e experimental podem ser vistos na Figura 19. Verifica-se que a modelagem foi trabalhada considerando as temperaturas em Kelvin, porém, para maior clareza, os resultados são sempre mostrados em graus Celsius.

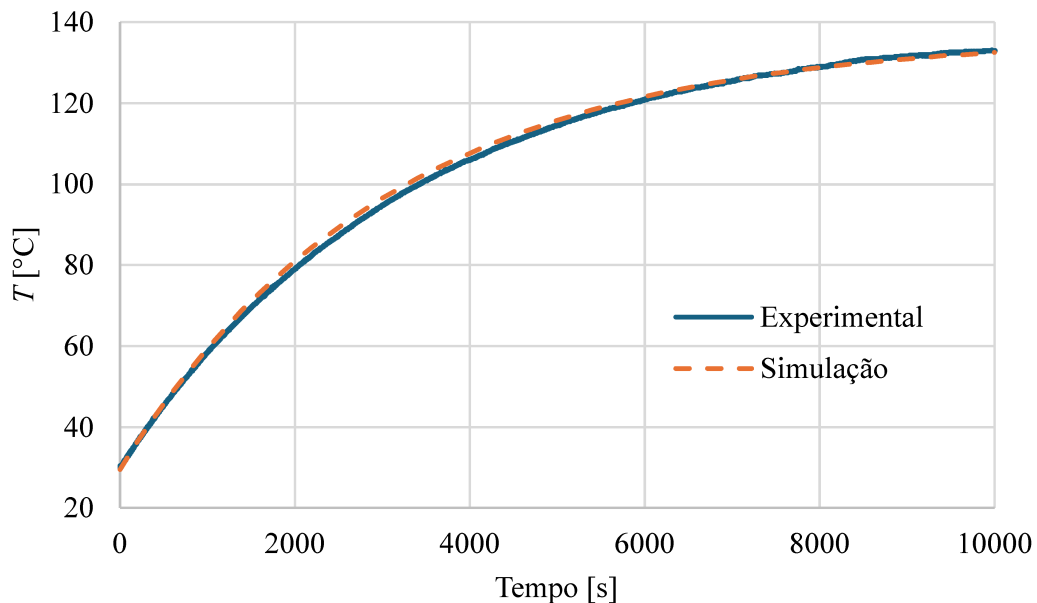
Figura 19 – Comparação entre resultados de simulação e experimental a um degrau de potência de 5%.

(a) Simulação do sistema em malha aberta no Simulink®.



Fonte: Próprio autor.

(b) Comparação entre as respostas simulada e experimental à um degrau de 5% de potência, a partir da temperatura inicial de 29,56 [°C] convertida em kelvin.



Fonte: Próprio autor.

Além do modelo anterior, também é necessário modelar a resposta de temperatura do sistema ao LN₂. Dessa forma, será possível incluir na simulação o efeito da ação refrigerante do LN₂. Como teste inicial, foi verificada a evolução temporal da temperatura após a abertura da válvula de nitrogênio. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 20. O percentual de abertura da válvula de LN₂ A_c é definido pelo operador durante a operação do criostato. O

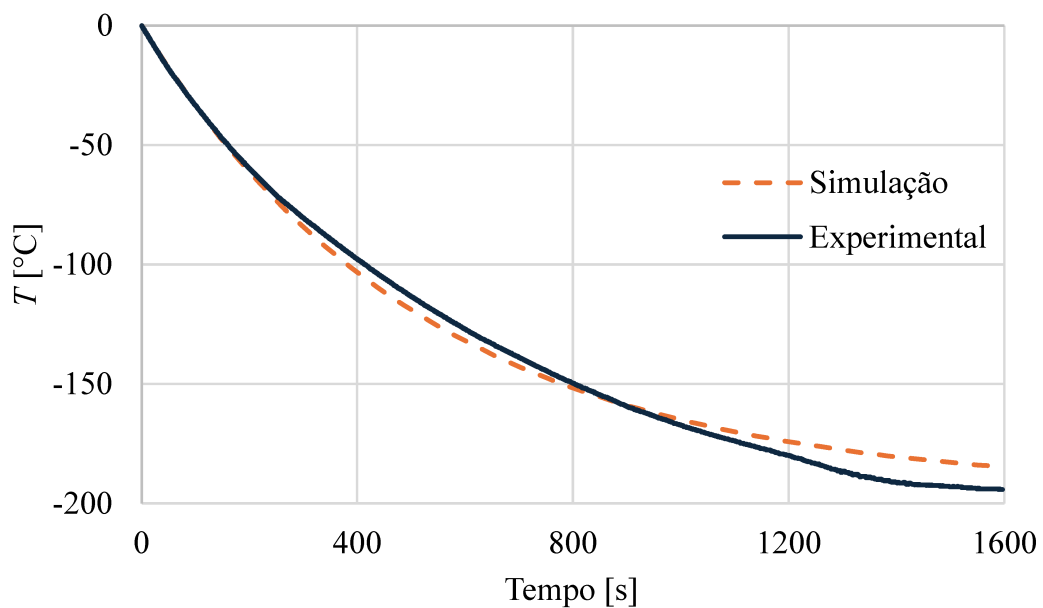
tanque que armazena sob pressão e transfere o LN₂ para o sistema possui em sua saída uma válvula de esfera. A abertura da válvula é inteiramente dependente da pressão atual do tanque e de como o operador atua sobre ela. Caso o operador abra muito a válvula e a pressão do tanque encontra-se no limite superior, por exemplo, será observada uma fuga do fluido criogênico pelas junções do sistema e um alto nível de ruído. Procura-se, durante a operação, manter um nível de ruído relativamente constante no sistema. Para fins de modelagem e simulação, a ação do fluido criogênico é representada como um degrau unitário, uma vez que a vazão efetiva não é diretamente mensurada durante a operação.

Com a resposta do sistema ao resfriamento, utilizando a mesma forma de identificação anterior, obteve-se o seguinte modelo matemático entre porcentagem de abertura da válvula e a temperatura do criostato:

$$G_N(s) = \frac{T(s)}{A_c(s)} = \frac{-194}{526,3s + 1}. \quad (3.3)$$

A Figura 20 apresenta também uma comparação entre a resposta simulada e a real do sistema. É possível observar uma distinção entre os comportamentos. As diferenças observadas podem ser atribuídas ao fato de que o sistema real não se comporta exatamente como um modelo de primeira ordem. Esse comportamento é, em grande parte, causado pelo acionamento da válvula do tanque de nitrogênio líquido, e também por variações na vazão de LN₂, mesmo com a abertura da válvula inalterada. A despeito disso, o modelo obtido representa adequadamente o comportamento real do processo.

Figura 20 – Comparação das respostas real e simulada a um degrau de abertura da válvula de LN₂. A amplitude do degrau é assumida unitária.



Fonte: Próprio autor.

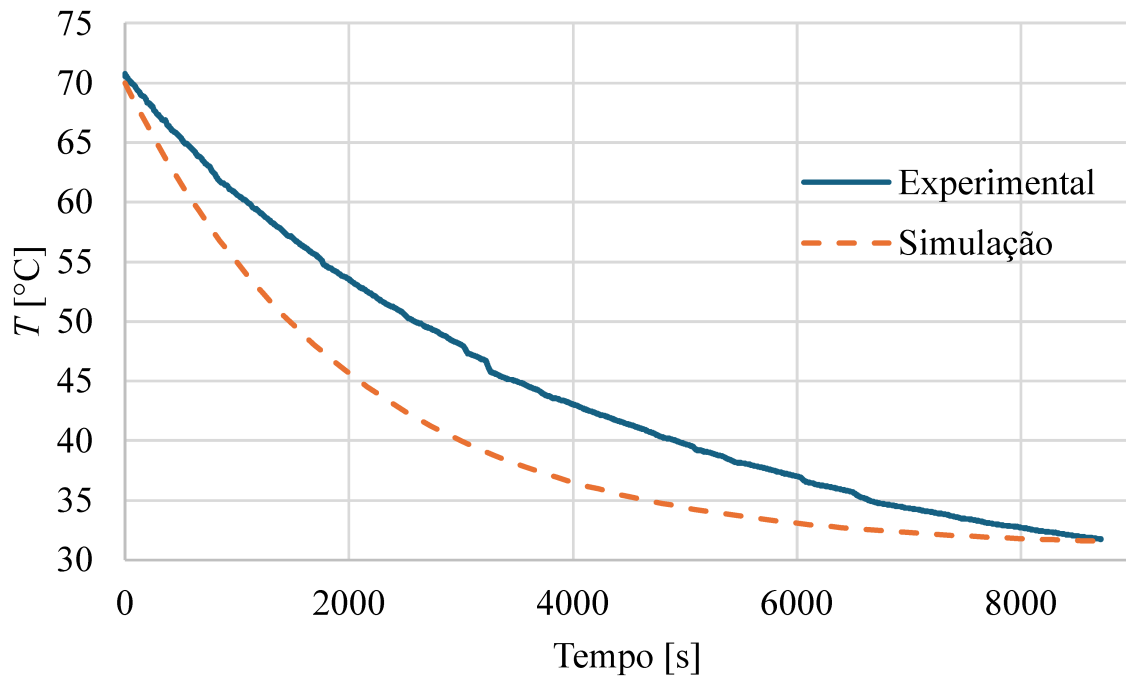
Além das identificações anteriores, também se fez necessária a determinação do com-

portamento térmico do criostato quando submetido apenas à convecção natural com o ambiente C_n . Essa dinâmica passiva de perda de calor é particularmente relevante para prever o retorno da temperatura T à condição ambiente em situações de aquecimento, já que o atuador apresenta natureza unidirecional. O procedimento experimental consistiu em aquecer o criostato até aproximadamente 70 [°C] e, em seguida, desligar todos os elementos de aquecimento, registrando a evolução temporal da temperatura até que se aproximasse do valor ambiente, como ilustrado na Figura 21. A partir dos dados obtidos, foi identificado o seguinte modelo de primeira ordem:

$$G_C(s) = \frac{T(s)}{C_n(s)} = \frac{-38,97}{2040,8s + 1}. \quad (3.4)$$

Com a equação (3.4) obtida, é possível comparar as respostas reais e simulada do sistema a essa entrada. Essa comparação é mostrada na Figura 21.

Figura 21 – Comparação entre as respostas simulada e experimental do sistema devido à convecção ambiente.



Fonte: Próprio autor.

Para quantificar a qualidade dos modelos matemáticos obtidos para o criostato, foi calculado o Erro Quadrático Médio (*Root Mean Square Error* – RMSE) entre os dados experimentais e as respostas simuladas de cada função de transferência identificada. Esse indicador permite avaliar a proximidade entre os modelos e o comportamento real do sistema, sendo que valores menores de RMSE correspondem a representações mais precisas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3. Esses erros mostram que os modelos de primeira ordem identificados representam com razoável precisão a resposta do criostato às entradas: potência

comandada às resistências, abertura da válvula de nitrogênio e convecção com ambiente. Logo, foi desenvolvida uma simulação combinando-se essas três entradas, o que é detalhado a seguir.

Tabela 3 – Valores de RMSE obtidos para cada modelo matemático identificado.

Modelo	RMSE [°C]
$G_R(s)$	1,14
$G_N(s)$	5,69
$G_C(s)$	5,31

3.2 Projeto do controlador

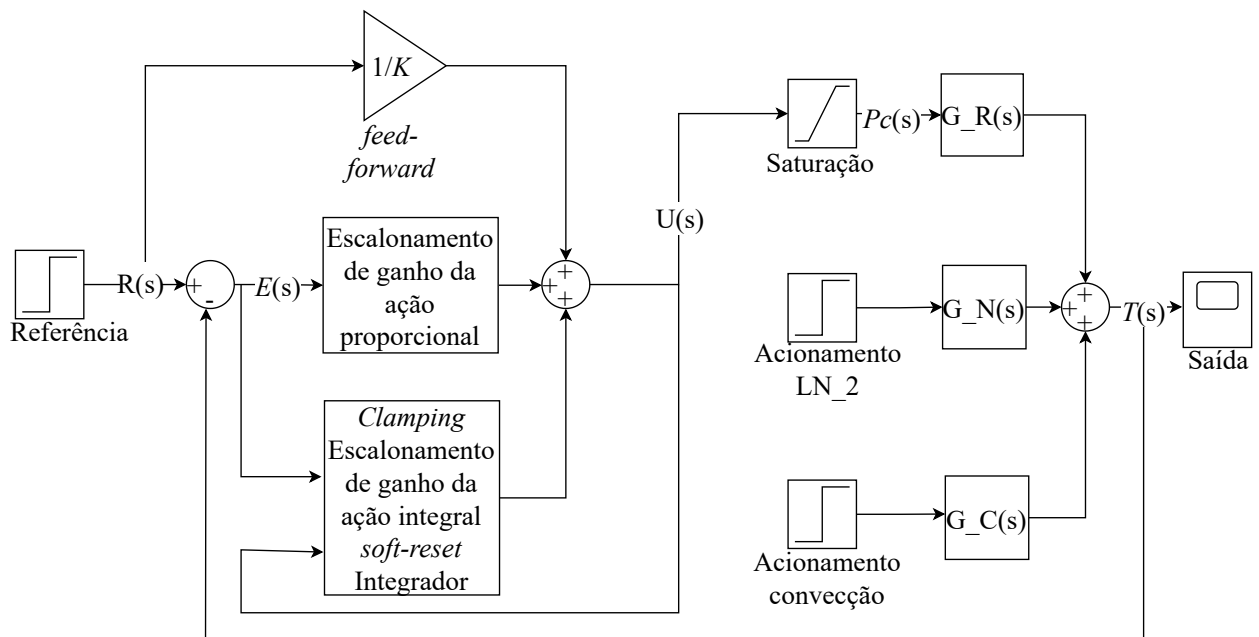
Dada a natureza lenta do sistema, optou-se pela implementação de um controlador contínuo do tipo Proporcional-Integral (PI). Com o objetivo de reduzir o tempo de resposta do sistema frente a variações na referência, foi adicionado um termo de ação antecipativa do tipo *feed-forward*. Esse termo atua diretamente sobre o sinal de controle, fornecendo um valor inicial estimado de potência proporcional à referência desejada. O ganho do ramo *feed-forward* foi definido como $1/K$, sendo K_R o ganho estático do modelo identificado na Equação (3.2). Para mitigar os efeitos do fenômeno conhecido como *windup*, foram incorporadas estratégias adicionais de controle. Especificamente, adotaram-se as técnicas de *clamping* e *reset* do integrador. A técnica de *clamping*, também chamada de integrador condicional, consiste em permitir a acumulação do termo integral apenas quando o atuador não se encontra saturado, ou quando a direção da ação de controle não saturada U difere daquela limitada pela saturação P_c . Em outras palavras, o integrador permanece ativo somente se sua contribuição puder efetivamente auxiliar na redução do erro, evitando que a saída continue a se acumular de forma contraproducente (ÅSTRÖM; HÄGGLUND, 2006). Complementarmente, um mecanismo de *soft-reset* foi incluído para reduzir progressivamente o valor do integrador quando o sistema ultrapassa a referência e o erro torna-se negativo. Essa abordagem foi especialmente necessária devido à natureza unidirecional do atuador do sistema, que possui apenas a capacidade de aquecimento, sendo incapaz de retirar energia térmica de forma ativa.

Com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema e garantir uma convergência mais rápida em regime estacionário, foi implementada a técnica de Escalonamento de Ganho (EG). Nessa abordagem, os ganhos K_p e K_i variam em função da magnitude do erro: valores mais agressivos são aplicados para erros pequenos, enquanto ganhos menores são utilizados para erros maiores, de forma a garantir uma convergência mais rápida do sistema para a temperatura de referência. Essa variação é realizada por meio de uma interpolação linear em uma faixa pré-definida de erro. O método é amplamente conhecido na literatura como *gain scheduling*, em que os parâmetros do controlador são ajustados dinamicamente de acordo com as condições de operação (BETT, 2005). Os detalhes da implementação adotada neste trabalho serão apresentados na Seção 3.3.

3.3 Simulação do sistema

Foi desenvolvido um modelo computacional no ambiente Simulink® utilizando como base as funções transferência obtidas experimentalmente. A simulação foi conduzida sob a hipótese de linearidade, de modo que os modelos identificados representam adequadamente a dinâmica térmica do criostato dentro da faixa de operação considerada. Para os cenários em que a temperatura de referência é superior à do ambiente, o modelo de resfriamento pelo nitrogênio líquido (3.3) foi desconsiderado, visto que não há ação refrigerante envolvida. De forma análoga, em condições criogênicas, o modelo de convecção natural do ambiente (3.4) foi omitido. Outro aspecto importante a ser considerado na implementação do controlador é a saturação do atuador. Nos ensaios em condições aquecidas, a ação do aquecedor foi limitada a 80 % da potência máxima, de modo a evitar riscos de sobreaquecimento e garantir a segurança do sistema. Essa mesma limitação foi adotada nas simulações correspondentes para que os resultados refletissem adequadamente as condições experimentais. Por outro lado, em situações criogênicas, essa restrição não foi aplicada. A estrutura completa da malha de controle implementada no Simulink® é apresentada na Figura 22. Nela estão representados os principais mecanismos utilizados para melhorar a dinâmica do sistema, incluindo a ação de *feedforward*, o escalonamento de ganhos, além das técnicas de mitigação do *windup*, como o *clamping*, o *reset* e o *soft-reset* que serão detalhadas na seção 3.3.

Figura 22 – Malha de controle completa em diagrama de blocos no Simulink, com mecanismos de *feedforward*, *clamping*, escalonamento de ganho e *soft-reset*.



Fonte: Próprio autor.

De posse da simulação, os ganhos do controlador PI (nominalmente ganhos proporci-

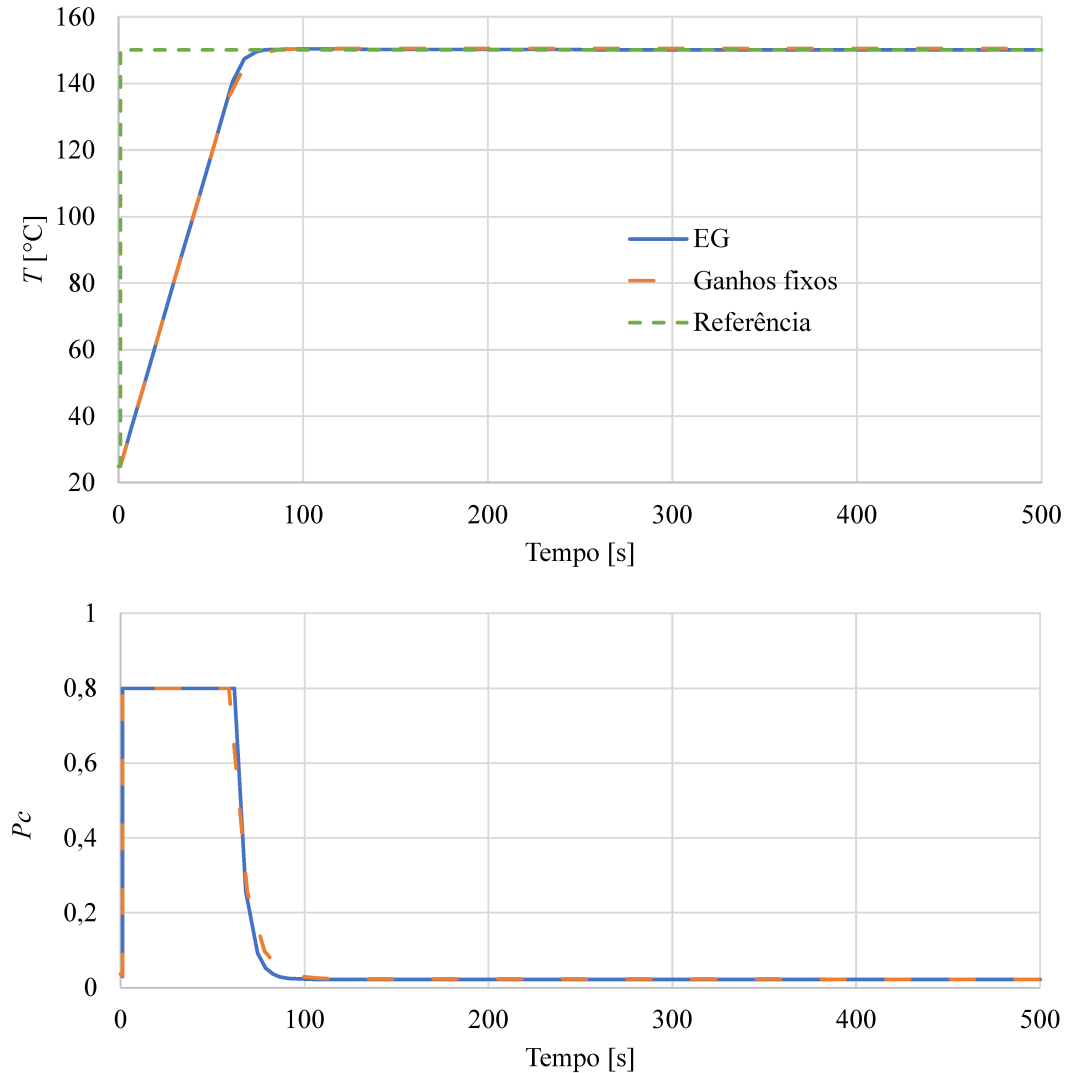
onal K_p e integral K_i) foram definidos empiricamente por sucessivas simulações, de modo a proporcionar uma rápida resposta e bem amortecida para erros altos. Porém, para erros menores, o desempenho se mostrou insatisfatório devido ao alto tempo de convergência. Para mitigar esse problema, ajustaram-se valores maiores de K_p e K_i para uma faixa de erro de menor valor. Mais precisamente, quando o erro de rastreamento encontra-se em torno de 150 [°C], adotou-se $K_p = 0,05$ e $K_i = 4,9 \times 10^{-6}$. Já quando esse erro está em torno de 0,1 [°C], definiu-se $K_p = 0,08$ e $K_i = 4,9 \times 10^{-4}$. Esses valores são interpolados linearmente à medida que o erro varia, caracterizando a aplicação da estratégia de EG.

A diferença nas respostas em malha fechada do sistema com os ganhos fixos e com EG é ilustrada na Figura 23. Pode-se notar que há diferença de desempenho entre as abordagens. Em uma situação de ultrapassagem da referência, o controlador com EG apresentou uma convergência mais rápida em comparação ao controlador convencional de ganhos fixos. O erro médio em regime permanente da abordagem convencional foi de 0,54 [°C], enquanto no sistema com EG esse valor reduziu para 0,13 [°C], representando uma melhoria de aproximadamente quatro vezes no mesmo intervalo de simulação. Embora ambos os controladores tenham atendido ao requisito de precisão de ± 1 [°C], o sistema com EG atingiu a referência cerca de 12 segundos antes do controlador convencional, evidenciando sua maior eficácia.

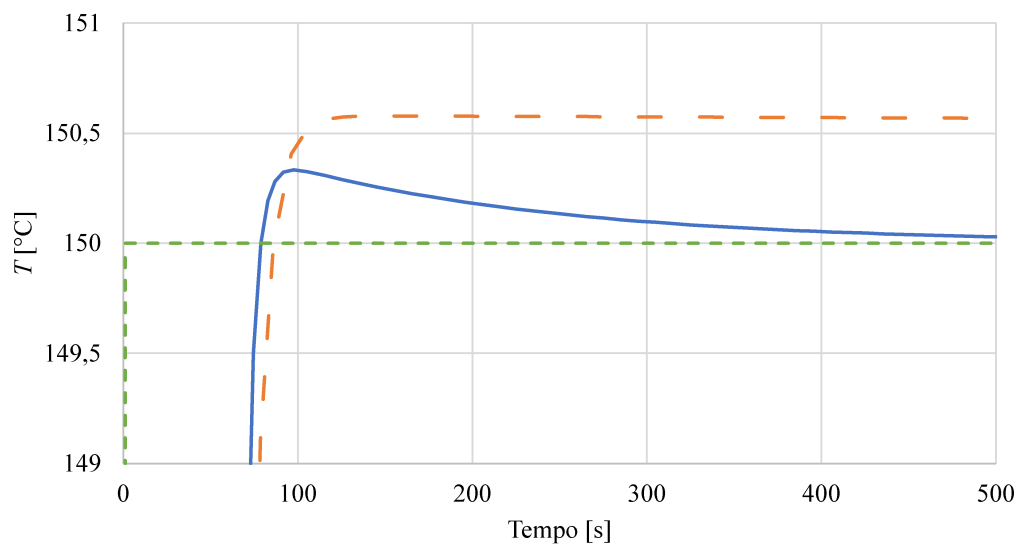
É ilustrado na Figura 24 a simulação do sistema para condições criogênicas junto com a ação do controlador. Em sequência, são apresentadas as análises metrológicas na Tabela 4. Em condições aquecidas, o desempenho avaliado do controlador em um ambiente de simulação é mostrado na Figura 25 e os resultados quantitativos na Tabela 5. Observa-se que, tanto nas condições criogênicas quanto aquecidas, o erro médio em regime permanente permaneceu muito baixo, enquanto o desvio padrão manteve-se em valores reduzidos. Esses resultados indicam que o controlador projetado foi capaz de rastrear adequadamente as referências de temperatura.

Figura 23 – Comparação das respostas a um degrau de referência de 150 °C para o controlador operando com ganhos fixos em $K_p = 0,05$ e $K_i = 4,9 \times 10^{-6}$ e adotando o escalonamento de ganhos.

(a) Resposta em temperatura para um degrau de referência de 150 °C.

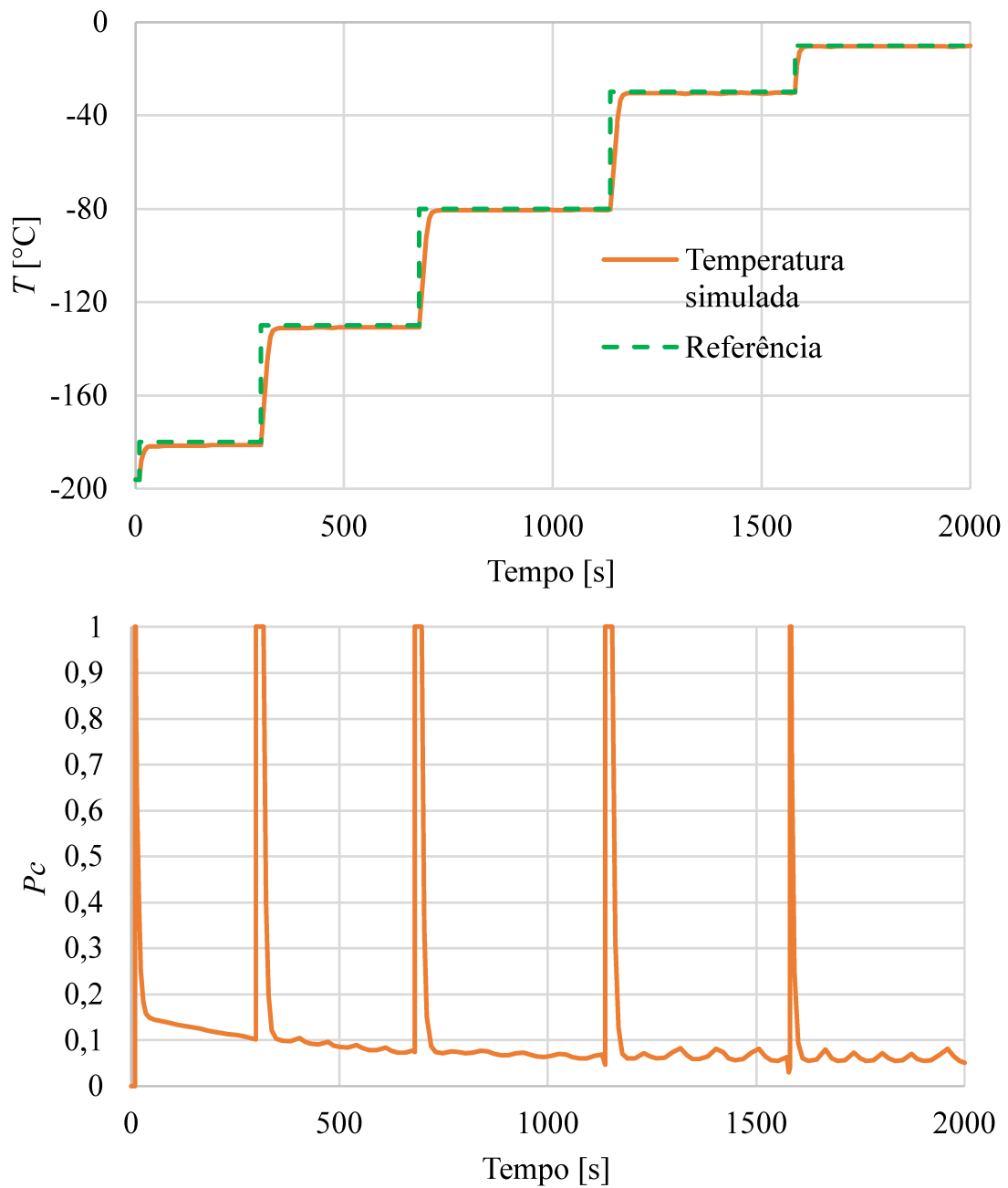


(b) Ampliação da região da Figura (a), destacando as diferenças entre controlador com ganhos fixos e com escalonamento de ganhos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 24 – Resultados da simulação em malha fechada do controlador em condições criogênicas para referências em -180 [°C], -130 [°C], -80 [°C], -30 [°C] e -10 [°C].

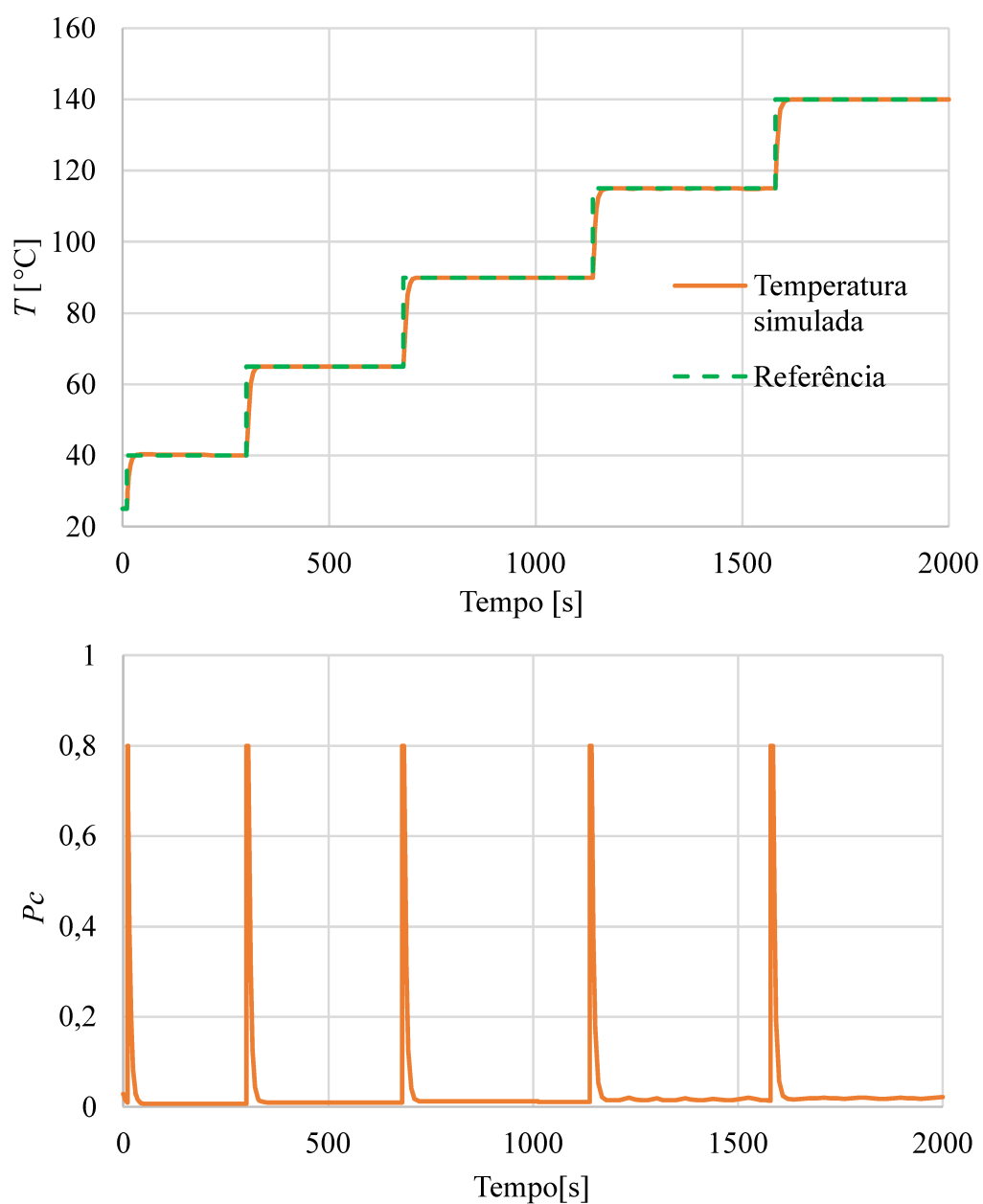


Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Erro médio e desvio padrão para diferentes temperaturas de referência.

Temperatura de referência [°C]	Erro médio [°C]	Desvio Padrão [°C]
-180	-1,48	0,27
-130	-0,95	0,32
-80	-0,60	0,22
-30	-0,41	0,23
-10	-0,36	0,11

Figura 25 – Resultados da simulação em malha fechada do controlador em condições aquecidas para referências em 40 [°C], 65 [°C], 90 [°C], 115 [°C] e 140 [°C].



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Erro médio e desvio padrão para diferentes temperaturas de referência e temperatura na simulação aquecida.

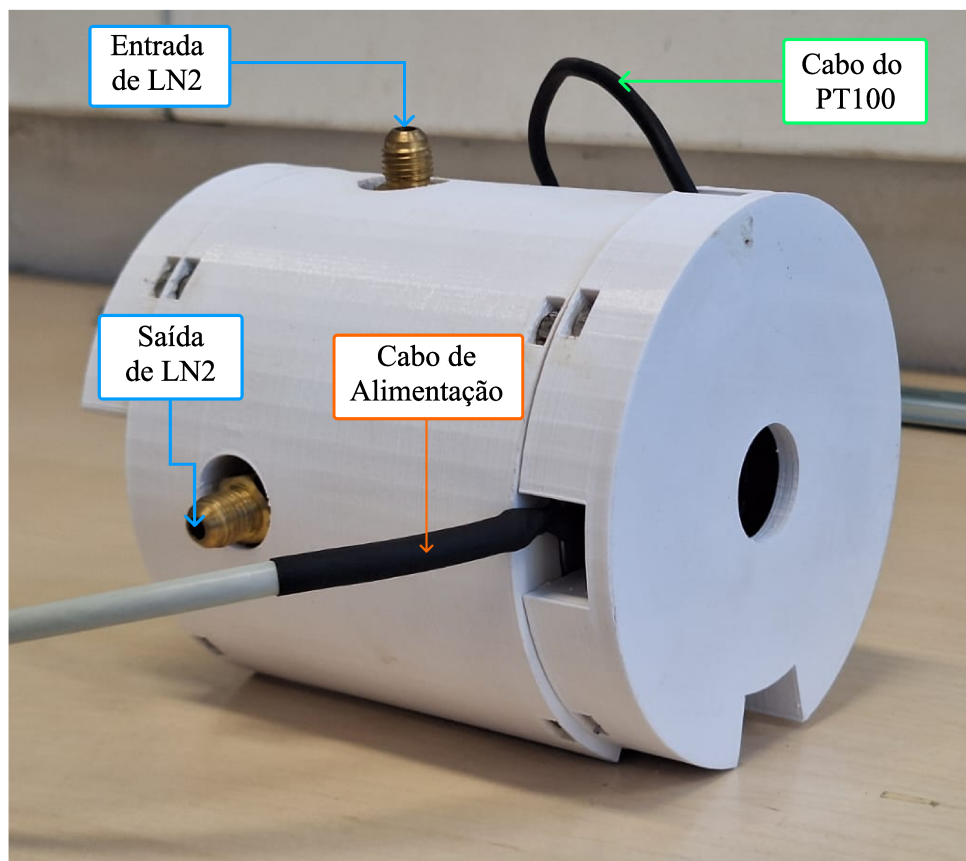
Temperatura de referência [°C]	Erro médio [°C]	Desvio Padrão [°C]
40	0,003	0,143
65	-0,231	0,099
90	-0,005	0,049
115	-0,057	0,025
140	-0,169	0,023

Com a malha de controle projetada e testada em simulações para diferentes faixas de temperatura, o próximo passo foi implementar o controlador no equipamento real. Os resultados assim obtidos encontram-se descritos no Capítulo a seguir.

4 Resultados experimentais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos a partir da implementação do controlador projetado. Inicialmente, são avaliados os ensaios de controle em condições aquecidas, comparando os resultados com a simulação. Em seguida, serão apresentados os testes em condições criogênicas. Além disso, são incluídos experimentos adicionais de repetibilidade e métricas quantitativas que permitem avaliar o desempenho alcançado. Por fim, é mostrado, na Figura 26, o criostato em sua montagem final, evidenciando conexões para o fluido criogênico e elétricas.

Figura 26 – Montagem final do criostato com isolador térmico.



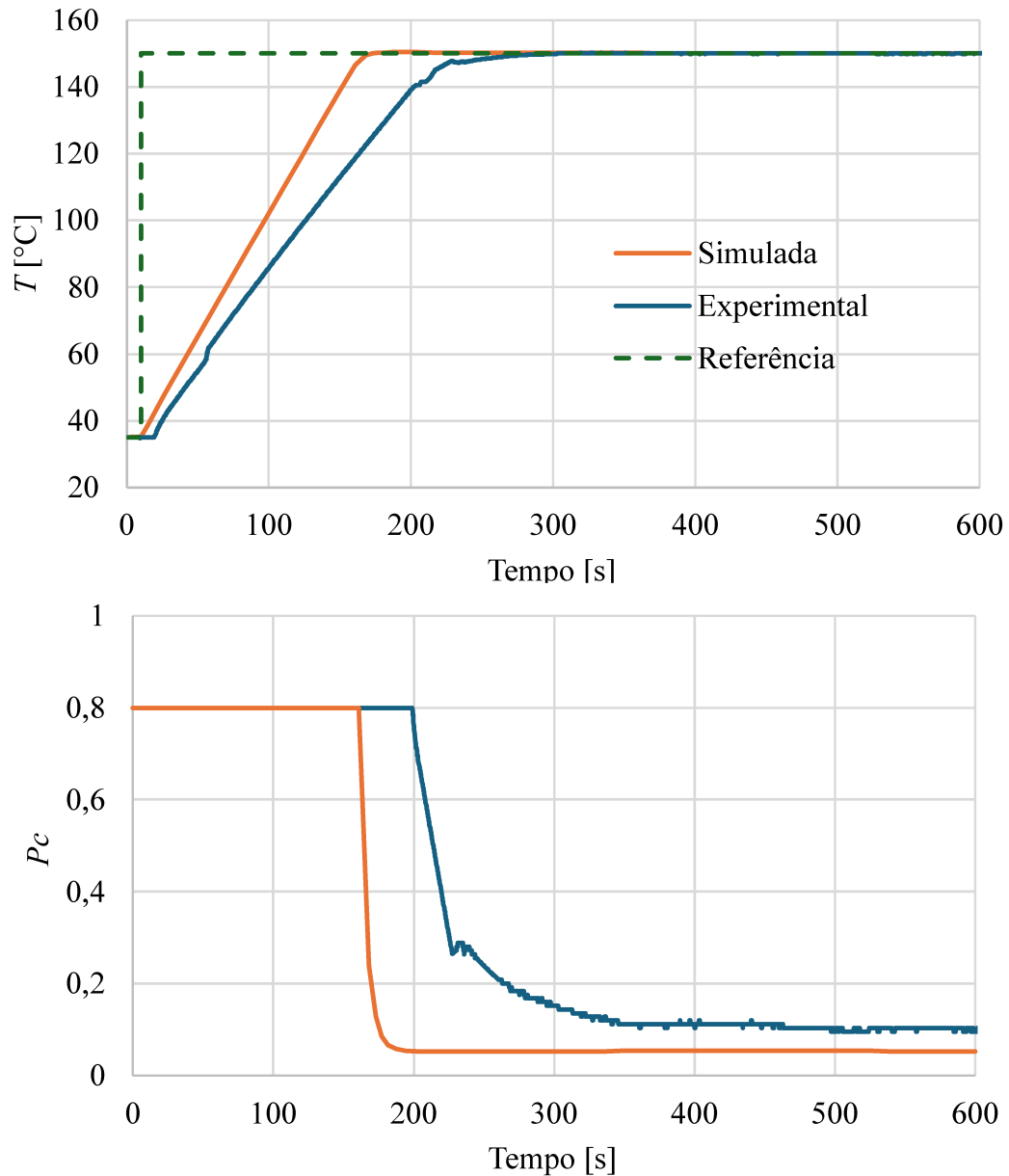
Fonte: Próprio autor.

4.1 Controle aquecido

O primeiro teste realizado foi o controle aquecido para a temperatura de referência de 150 [°C]. Uma comparação entre os resultados experimentais e de simulação em malha fechada é apresentada na Figura 27. Observa-se que a temperatura medida, apesar de discrepâncias de regime transitório com relação à simulação, apresenta um bom acompanhamento da referência.

O erro médio obtido foi de apenas $-0,02$ $^{\circ}\text{C}$, inferior ao valor de $0,15$ $^{\circ}\text{C}$ encontrado na simulação. O desvio padrão no experimento foi ligeiramente maior ($0,05$ $^{\circ}\text{C}$) quando comparado ao modelo ($0,01$ $^{\circ}\text{C}$), o que era esperado devido a ruídos e intempéries externas ao sistema.

Figura 27 – Comparação entre as respostas em malha fechada simulada e experimental. São mostradas as evoluções temporais da temperatura e da potência comandada.

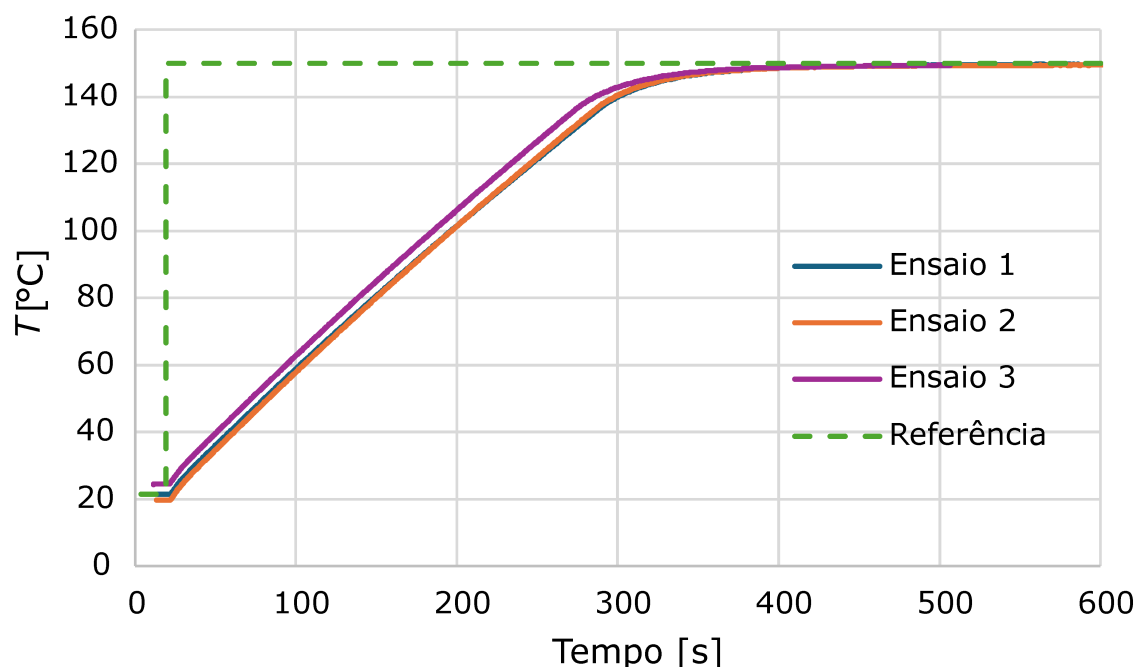


Fonte: Próprio autor.

Com o objetivo de avaliar a repetibilidade do controlador em condições de aquecimento, foram realizados três ensaios utilizando como referência a temperatura de 150 $^{\circ}\text{C}$. A Figura 28 apresenta as respostas obtidas nos três ensaios, enquanto a Tabela 6 reúne os principais indicadores de desempenho, como erro médio e desvio padrão. Pode-se notar que os três testes

apresentaram resultados muito semelhantes, com variações pequenas, boa repetibilidade e pequena amplitude entre as amostras dos três ensaios.

Figura 28 – Avaliação da repetibilidade dos resultados para a referência de 150 [°C].



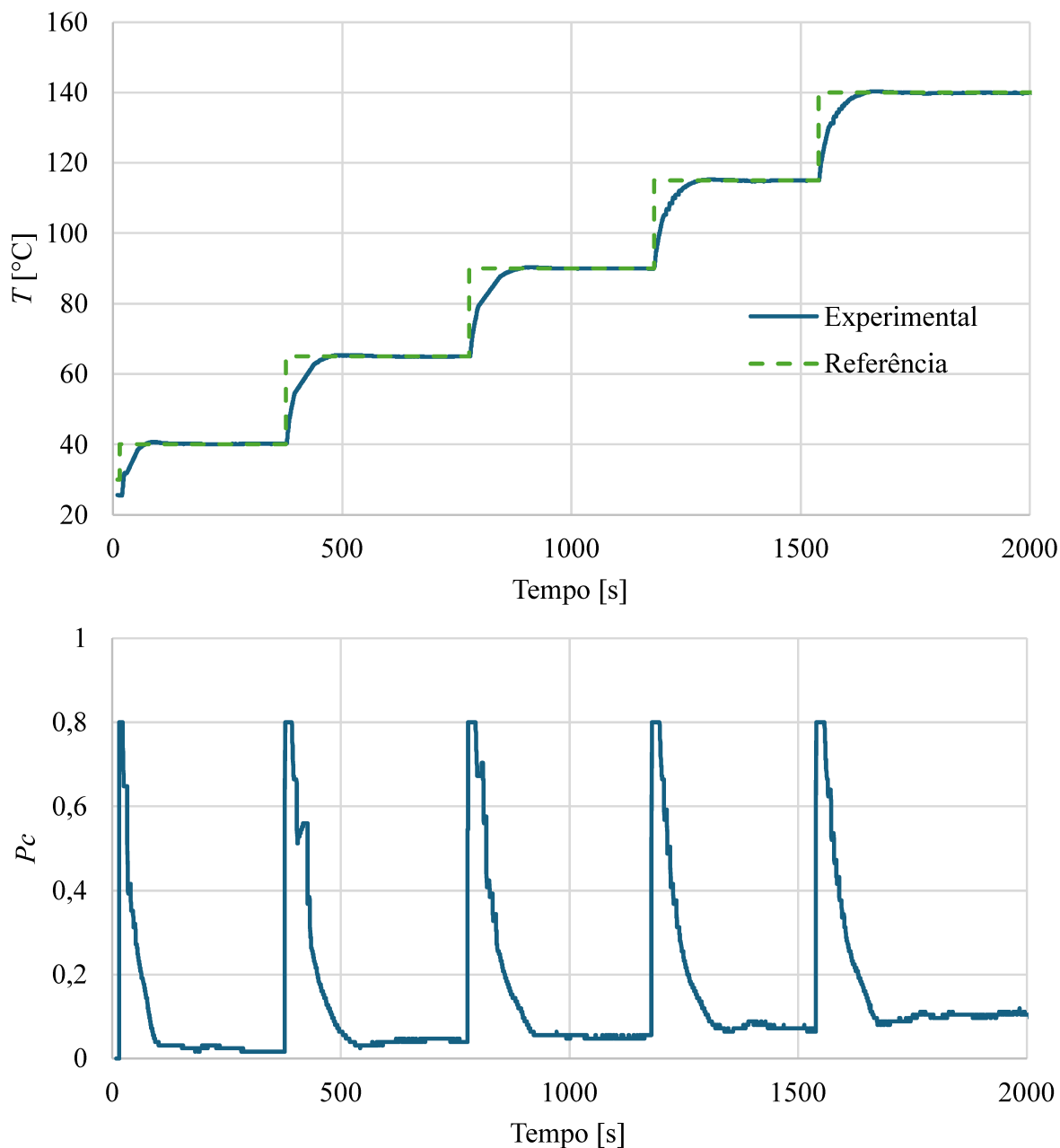
Fonte: Próprio autor.

Tabela 6 – Indicadores de desempenho para o ensaio de repetibilidade a 150 [°C].

Parâmetro	Valor
Média do erro em regime permanente [°C]	0,5
Erro máximo em regime permanente [°C]	0,8
Repetibilidade [°C]	$\pm 0,3$
Amplitude das amostras [°C]	0,6

Para complementar a avaliação do desempenho do controlador em condições aquecidas, foram realizados ensaios com diferentes temperaturas de referência, mantendo-se por aproximadamente cinco minutos em cada patamar diferente, a fim de avaliar a estabilidade do sistema e simular condições reais de testes. A Figura 29 apresenta as respostas experimentais do sistema, evidenciando a capacidade do controlador em rastrear múltiplas referências. Observa-se que a temperatura real acompanhou de forma satisfatória as referências.

Figura 29 – Resultados experimentais do controlador em condições aquecidas para referências em 40 [°C], 65 [°C], 90 [°C], 115 [°C] e 140 [°C].



Fonte: Próprio autor.

Os principais indicadores metrológicos, incluindo erros médios e desvios padrão em cada patamar, são apresentados na Tabela 7, demonstrando que o erro médio em todos os casos foi inferior aos ± 1 [°C] exigidos pela norma ISO148 (2016). O controle aquecido apresenta boa performance em rastrear as referências impostas.

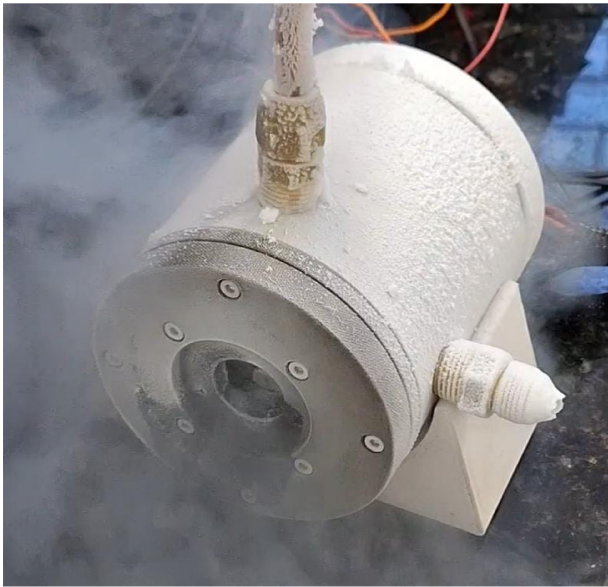
Tabela 7 – Resultados experimentais para diferentes patamares de temperatura de referência em condições aquecidas.

Temperatura no criostato			
Temperatura de referência [°C]	Erro médio [°C]	Desvio Padrão [°C]	Incerteza [°C]
40	0,16	0,02	0,001
65	-0,02	0,03	0,002
90	-0,03	0,04	0,002
115	0,01	0,03	0,002
140	-0,12	0,06	0,004

4.2 Controle de temperatura criogênico

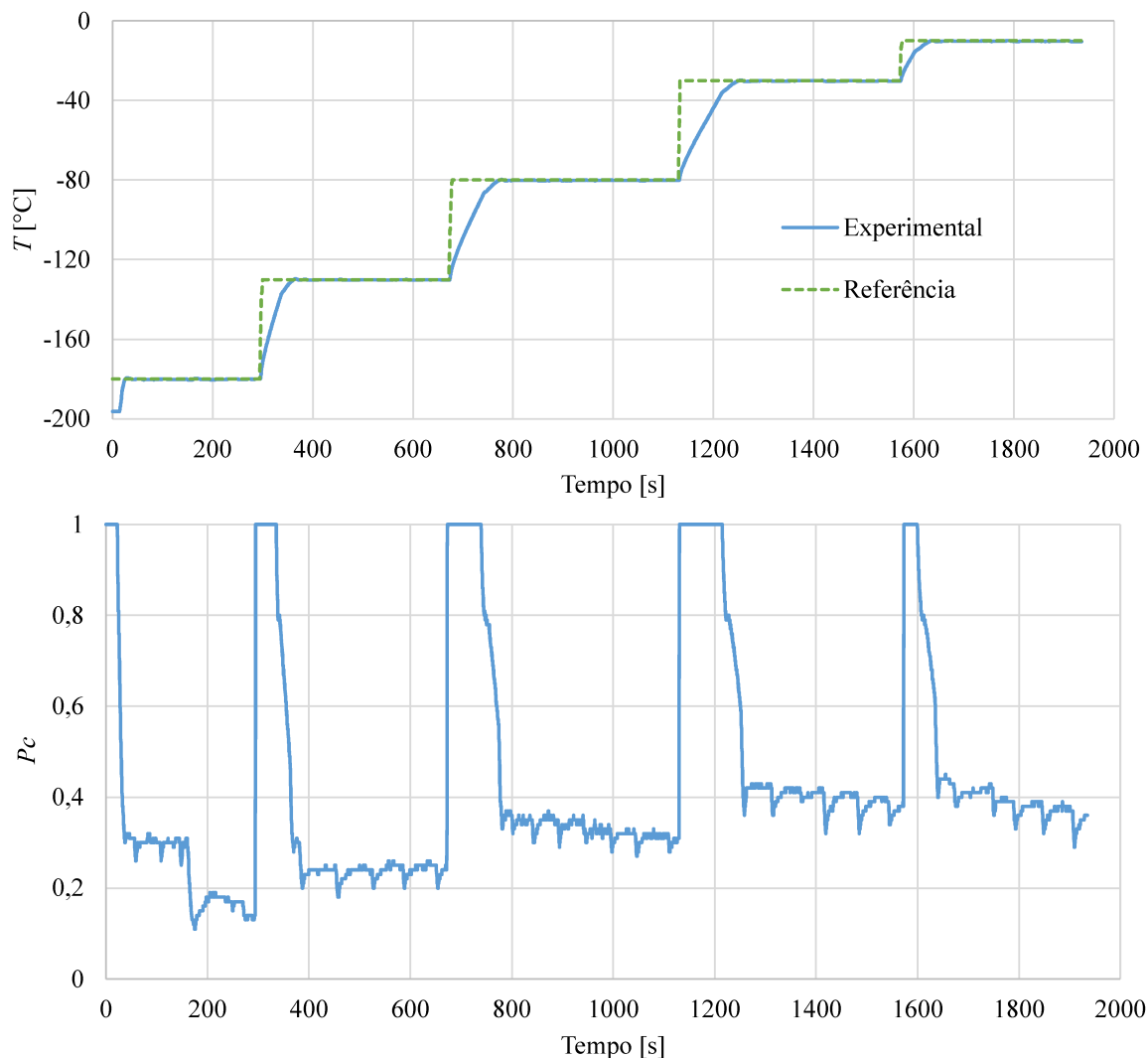
A fim de validar o controle de temperatura criogênico – que é o maior desafio para o equipamento – realizaram-se testes para temperaturas de referência menores que a ambiente. Para isso, inicialmente, resfriou-se o criostato utilizando o LN₂ até a temperatura estabilizar em aproximadamente -196 [°C]. Logo em seguida, a temperatura de referência foi aumentada paulatinamente, mantendo-se os valores constantes por aproximadamente 5 minutos, como exigido pela norma ASTM E23 (2024). A Figura 30 mostra uma foto do criostato durante um desses ensaios, em que é possível notar a formação de gelo na parte externa do equipamento devido à ausência do isolador térmico durante a aquisição dessa fotografia. Os resultados experimentais podem ser observados na Figura 31. Fica evidente pela figura que o criostato foi capaz de rastrear a referência de forma efetiva em condições criogênicas pelo tempo estipulado.

Figura 30 – Criostato em ensaio criogênico sem isolador térmico, evidenciando a formação de gelo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 31 – Resultados experimentais do controle de temperatura criogênico para as temperaturas alvo de $-180\text{ [}^{\circ}\text{C]}$, $-130\text{ [}^{\circ}\text{C]}$, $-80\text{ [}^{\circ}\text{C]}$, $-30\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ e $-10\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ juntamente com potência comandada pelo controlador.



Fonte: Próprio autor.

Com o objetivo de avaliar de forma quantitativa os resultados, também foram feitas as devidas análises metrológicas do comportamento do sistema, a fim de verificar se o criostato foi capaz de atender aos requisitos e avaliar a performance geral do sistema. Os resultados apresentados na Tabela 8 são referentes aos duzentos últimos valores de temperatura antes da próxima referência. Nota-se que, em todos os patamares de temperatura, o criostato foi capaz de materializar a temperatura de referência dentro do critério de erro determinado. Os desvios padrão e incertezas, com valores muito baixos, também demonstram que o dispositivo manteve uma ótima estabilidade em torno da temperatura de referência.

Tabela 8 – Resultados do controle de temperatura em condições criogênicas para o criostato e para o CP.

Temperatura no criostato			
Temperatura de referência [°C]	Erro médio [°C]	Desvio Padrão [°C]	Incerteza [°C]
-180	-0,05	0,05	0,003
-130	-0,14	0,10	0,007
-80	-0,09	0,05	0,004
-30	-0,16	0,08	0,005
-10	-0,19	0,14	0,010

5 Conclusões e sugestões de trabalhos futuros

O desenvolvimento deste trabalho foi motivado pela necessidade de viabilizar o condicionamento térmico de corpos de prova miniaturizados utilizados em ensaios Charpy, atendendo às exigências de precisão de temperatura, conforme estabelecidos pelas normas ASTM E23 (2024) e ISO148 (2016). O projeto deveria operar em faixas que variam desde condições criogênicas até aquecidas. Até então, os sistemas comerciais disponíveis apresentam limitações significativas, em termos de faixa de operação que inviabilizavam ensaios em temperaturas muito baixas. Dadas estas condições, buscou-se projetar e implementar uma solução baseada em um criostato de fluxo contínuo. Sendo assim, o objetivo central do presente trabalho consistiu em desenvolver um criostato funcional, capaz de operar entre $-190\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ e $150\text{ [}^{\circ}\text{C]}$. Para isso, desenvolveu-se um sistema de controle em malha fechada visando proporcionar estabilidade, rastreabilidade de referência e precisão. Para isso, foram projetados e integrados os sistemas mecânicos, eletrônicos e de software necessários para o funcionamento do equipamento.

No caso do projeto mecânico, realizaram-se análises por elementos finitos para garantir uma distribuição adequada do calor ao longo do CP. Adicionalmente, selecionaram-se os devidos materiais para a ampla faixa de operação do equipamento. O desenvolvimento dos circuitos elétrico/eletrônico visou garantir a aquisição correta do sensor de temperatura, possibilitar a implementação do microcontrolador ESP32, bem como o fornecimento correto e dimensionado da potência aos aquecedores elétricos. Por fim, o software embarcado, baseado no sistema operacional FreeRTOS, foi programado para realizar a interface com o usuário, permitindo a comunicação sem fio via MQTT.

Os resultados obtidos, tanto em simulação quanto em ensaios experimentais, mostraram que o sistema foi capaz de rastrear com precisão diferentes patamares de temperatura, tanto em condições aquecidas quanto criogênicas. O erro médio em regime permanente manteve-se dentro da faixa de $\pm 1\text{ [}^{\circ}\text{C]}$ estipulada pela ASTM E23 (2024), atendendo plenamente aos requisitos normativos. A comparação entre simulações e resultados reais também evidenciou uma boa representatividade dos modelos matemáticos identificados. Assim, pode-se concluir que o criostato desenvolvido cumpriu com os objetivos propostos, constituindo uma solução robusta e eficaz para a realização de ensaios Charpy miniaturizados em uma ampla faixa de temperaturas.

Como perspectivas de trabalhos futuros, destacam-se o desenvolvimento de um sistema de controle multivariável, que permita manipular simultaneamente a potência dos aquecedores e a abertura da válvula de LN_2 . Além disso, pode-se substituir o controlador PI adotado por uma técnica de controle mais avançada, como o controle preditivo baseado em modelo. Por fim, também deve-se projetar um sistema de movimentação capaz de transferir o CP do criostato

para o batente de ensaio.

Em síntese, este trabalho demonstrou a viabilidade do uso de um criostato de fluxo contínuo para condicionamento térmico de CPs para ensaios Charpy miniaturizados, dando abertura para novos trabalhos futuros que possam explorar melhor a aplicação desta tecnologia, inclusive para ensaios de tamanho padrão.

Referências

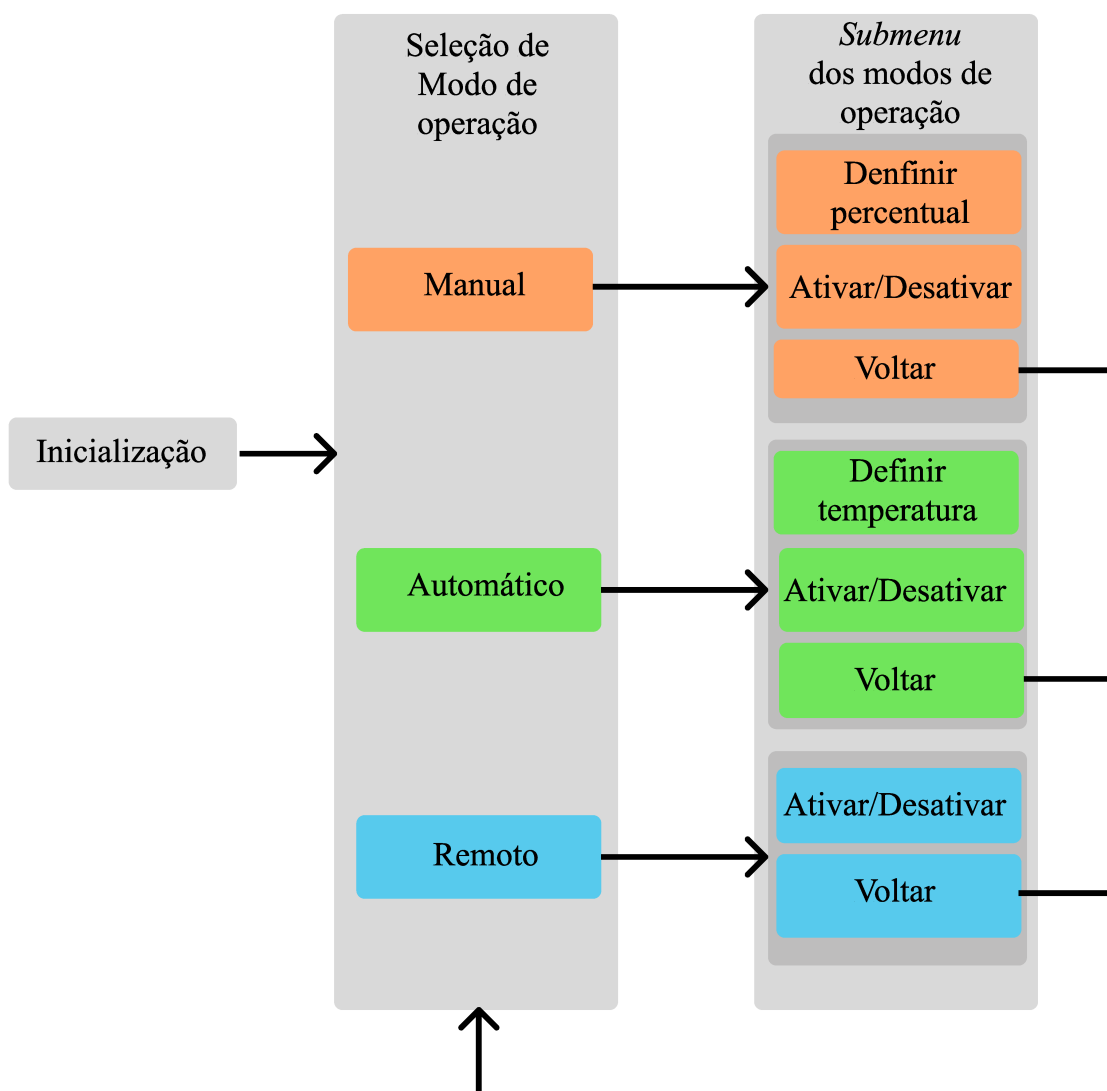
- ADAFRUIT INDUSTRIES. **Adafruit MAX31865 RTD PT100 or PT1000 Amplifier**. [S.l.], 2025. Acesso em: 07 agosto 2025. Disponível em: <<https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-max31865-rtd-pt100-amplifier.pdf>>.
- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência**. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2008. P. 403–409.
- ARCHAMBEAULT, Bruce R; DREWNIAK, James. **PCB design for real-world EMI control**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. v. 696.
- ASTM E23. **E23 24, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. [S.l.: s.n.], 2024. ASTM International. DOI: [10.1520/E0023-24](https://doi.org/10.1520/E0023-24).
- ÅSTRÖM, Karl Johan; HÄGGLUND, Tore. **Advanced PID control**. [S.l.]: ISA-The Instrumentation, Systems e Automation Society, 2006.
- BAEK, Seungwhan; RADEBAUGH, Ray; BRADLEY, Peter E. Investigation of two-phase heat transfer coefficients of cryogenic nitrogen in 160- μm and 65- μm microchannels. **Cryogenics**, Elsevier, v. 147, p. 104026, 2025. DOI: [10.1016/j.cryogenics.2025.104026](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2025.104026).
- BETT, Christopher J. Gain-scheduled controllers. **The Electrical Engineering Handbook**, Academic Press Burlington, p. 1107–1114, 2005.
- BURDEN, Richard; FAIRES, Douglas. **Analise Numérica**. [S.l.]: Cengage Learning, 2015. P. 71–81.
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Wi-Fi & Bluetooth SoC**. [S.l.], 2025. Acesso em: 07 agosto 2025. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>>.
- FRANÇOIS, Dominique; PINEAU, André; ZAOUI, André. Ductile-Brittle Transition. In: **MECHANICAL Behaviour of Materials: Volume II: Fracture Mechanics and Damage**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. P. 265–305. DOI: [10.1007/978-94-007-4930-6_5](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4930-6_5).
- FREERTOS. **FreeRTOS – Real-time operating system for microcontrollers and small microprocessors**. [S.l.], 2025. Acesso em: 07 agosto 2025. Disponível em: <<https://www.freertos.org/>>.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, David P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 6. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- IPC. **Generic Standard on Printed Board Design (IPC-2221A)**. Northbrook, IL, USA, 2003. P. 40. Acesso em: 10 de agosto de 2025. Disponível em: <[https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf)>.
- ISO148. **ISO 148-2:2016, Metallic materials — Charpy pendulum impact test — Part 2: Verification of testing machines**. [S.l.: s.n.], 2016. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/63802.html>>.
- KEITEL, Todd A; FEULING, Lindsay J; LUDEMAN, Evan M. A temperature control system for a variable temperature cryostat using an 80386 personal computer. In: **ADVANCES in Cryogenic Engineering**. [S.l.]: Springer, 1991. P. 1433–1439. DOI: [10.1007/978-1-4615-3368-9_78](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3368-9_78).

- LIZON, JL; ACCARDO, M. LN2 continuous flow cryostats: a compact vibration free cooling system for single to multiple detector systems. In: SPIE. MODERN Technologies in Space-and Ground-based Telescopes and Instrumentation. [S.l.: s.n.], 2010. v. 7739, p. 1226–1232. DOI: [10.1117/12.856013](https://doi.org/10.1117/12.856013).
- LUCON, Enrico. Miniaturized Charpy Specimens for the Indirect Verification of Small-Scale Charpy Machines: Initial Qualification Phase. **NIST Technical Note**, v. 1562, p. 1, 2012. DOI: [10.6028/NIST.TN.1562-1](https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1562-1).
- LUCON, Enrico; LUCON, Enrico et al. **Impact characterization of 4340 and T200 steels by means of standard, sub-size and miniaturized Charpy specimens**. [S.l.]: US Department of Commerce, National Institute of Standards e Technology, 2015. DOI: [10.6028/NIST.TN.1858](https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1858).
- LUCON, Enrico; MCCOWAN, C et al. Certified KLST Miniaturized Charpy Specimens for the Indirect Verification of Small-Scale Impact Machines. In: ASTM INTERNATIONAL. SIXTH International Symposium on Small Specimen Test Techniques. [S.l.: s.n.], 2015. P. 189–208. DOI: [10.1520/STP157620140003](https://doi.org/10.1520/STP157620140003).
- MANAHAN, MP. In-situ Heating and Cooling of Charpy Test Specimens. **ASTM SPECIAL TECHNICAL PUBLICATION**, AMERICAN TECHNICAL PUBLISHERS LTD, v. 1380, p. 286–297, 2000. DOI: [10.1520/STP14401S](https://doi.org/10.1520/STP14401S).
- MCSWEENEY, D; LEVY, PW; TOWNSEND, PD. Programmed Temperature Controller and Cryostat. **Review of Scientific Instruments**, American Institute of Physics, v. 36, n. 9, p. 1324–1326, 1965. DOI: [10.1063/1.1719888](https://doi.org/10.1063/1.1719888).
- MQTT.ORG. **MQTT – The standard for IoT messaging**. [S.l.: s.n.], 2025. Acesso em: 07 ago 2025. Disponível em: [<https://mqtt.org/>](https://mqtt.org/).
- OGATA, Katsuhiko. **Modern control engineering**. [S.l.]: Prentice hall, 2010.
- PARMA, V. **Cryostat Design**. en. [S.l.]: CERN, 2014. DOI: [10.5170/CERN-2014-005.353](https://doi.org/10.5170/CERN-2014-005.353). Disponível em: <http://cds.cern.ch/record/1974062>.
- REDDY, Junuthula Narasimha. **An introduction to the finite element method**. [S.l.]: Department of Mechanical Engineering, Texas University, 1993. v. 27.
- REED, PE. A combined cryostat/oven and specimen transfer device for tensile testing in the range 83 to 473° K. **Journal of Materials Science**, Springer, v. 1, n. 1, p. 91–95, 1966. DOI: [10.1007/BF00549723](https://doi.org/10.1007/BF00549723).
- WALL, RW. Simple methods for detecting zero crossing. In: IEEE. IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No. 03CH37468). [S.l.: s.n.], 2003. v. 3, p. 2477–2481. DOI: [10.1109/IECON.2003.1280634](https://doi.org/10.1109/IECON.2003.1280634).
- ZEYEN, CME et al. A helium-flow cryostat (3 to 300 K) for neutron four-circle spectrometry. **Revue de Physique Appliquée**, Société Française de Physique, v. 19, n. 9, p. 789–791, 1984. DOI: [10.1051/rphysap:01984001909078900](https://doi.org/10.1051/rphysap:01984001909078900).

Anexos

ANEXO A – Interface com o Usuário

Fluxograma de operação da interface com o usuário



ANEXO B – Diagrama da PCI

