

INSTITUTO FEDERAL
Minas Gerais

INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* ITABIRITO

ENGENHARIA ELÉTRICA

Matheus Custódio Vidigal Lana

UaiGelô:

**Sistema embarcado para conversão de geladeiras convencionais em adegas ou
cervejeiras**

**Itabirito
Abril de 2026**

Matheus Custódio Vidigal Lana

**UaiGelô:
Sistema embarcado para conversão de geladeiras convencionais em adegas ou
cervejeiras**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Itabirito, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Projeto desenvolvido sob a orientação do(a) Prof. Dr. Arthur Caio Vargas e Pinto.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Caio Vargas e Pinto

**Itabirito
Abril de 2026**

Matheus Custódio Vidigal Lana

UaiGelô:

**Sistema embarcado para conversão de geladeiras convencionais em adegas ou
cervejeiras**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Itabirito, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista. Projeto desenvolvido sob a orientação do(a) Prof. Dr. Arthur Caio Vargas e Pinto.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Arthur Caio Vargas e Pinto (IFMG) – Orientador

Prof. Dr^a. Cláudia Rejane de Mesquita (IFMG)

Prof. Dr. Diego Augusto Gonzaga (IFMG)

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em Itabirito, 08 de abril de 2026.

FICHA CATALOGRÁFICA

L243u Lana, Matheus Custódio Vidigal
2026

UaiGelô: sistema embarcado para conversão de geladeiras convencionais em adegas ou cervejarias / Matheus Custódio Vidigal Lana. – 2026.

67 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Itabirito, 2026.

Orientador: Dr. Arthur Caio Vargas e Pinto.

1. Adeaga. 2. Alarme. 3. Automação. 4. Bluetooth. 5. Cervejaria. I. Lana, Matheus Custódio Vidigal. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Itabirito. III. Título.

CDD 621.3815322

Elaborada pela Biblioteca Jarbas Nazareth de Souza – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Itabirito

Bibliotecário Responsável: Veríssimo Amaral Matias – CRB-6/3266



INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS

Campus Itabirito - Código INEP: 31015018

Rua José Benedito, nº. 139, Bairro Santa Efigênia, CEP: 35450-000, Itabirito/MG

CNPJ: 10.626.896/0018-10 - Telefone: (31) 3561-1269

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulada **UaiGelô: Sistema embarcado para conversão de geladeiras convencionais em adegas ou cervejeiras** apresentada pelo aluno **Matheus Custódio Vidigal Lana (0017273)** do Curso **Bacharelado em Engenharia Elétrica (Campus Itabirito)**. Os trabalhos foram iniciados às **16:45** do dia **08/04/2026** pelo Professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- **Arthur Caio Vargas e Pinto** (Orientador)
- **Claudia Rejane de Mesquita** (Examinadora Interna)
- **Diego Augusto Gonzaga** (Examinador Interno)

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Nota (quando exigido): 75,47

Observação / Apreciações:

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu **Arthur Caio Vargas e Pinto** lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Documento assinado digitalmente
gov.br DIEGO AUGUSTO GONZAGA
Data: 10/04/2026 08:35:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Diego Augusto Gonzaga

ITABIRITO / MG, 08/04/2026

Documento assinado digitalmente
gov.br CLAUDIA REJANE DE MESQUITA
Data: 08/04/2026 18:33:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Claudia Rejane de Mesquita

Documento assinado digitalmente
gov.br ARTHUR CAIO VARGAS E PINTO
Data: 08/04/2026 18:25:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Arthur Caio Vargas e Pinto

AGRADECIMENTOS

Expresso minha mais sincera gratidão aos meus pais, pelo esforço, apoio incondicional e por acreditarem em meu potencial mesmo diante das adversidades. Seu suporte foi fundamental para que eu pudesse trilhar parte significativa desta caminhada acadêmica.

Agradeço também aos colegas e amigos que estiveram presentes ao longo da graduação, pela constante troca de conhecimentos, incentivo mútuo e pelos momentos de convivência que tornaram essa trajetória mais leve e enriquecedora.

Manifesto minha profunda gratidão aos docentes e orientadores do Instituto Federal de Minas Gerais, em especial ao Professor Arthur Caio Vargas e Pinto, pela orientação técnica, dedicação e confiança depositada em meu trabalho. Ressalto, ainda, a relevante oportunidade que me foi concedida ao ser convidado para integrar o projeto “Atuação de uma Mão Robótica a partir da Identificação dos Movimentos de uma Mão Real Utilizando Visão Computacional”, o qual contribuiu significativamente para minha formação acadêmica e profissional.

Estendo meus agradecimentos aos amigos e familiares da cidade de Ouro Preto, cuja convivência foi essencial durante o período em que residi no município para a realização de grande parte da graduação.

Por fim, registro minha gratidão a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho. Cada gesto de apoio e cada palavra de incentivo foram essenciais para a superação dos desafios enfrentados ao longo dessa jornada.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de controle de temperatura para geladeiras convencionais, proporcionando maior precisão e flexibilidade nos ajustes térmicos. A proposta visa adaptar equipamentos comuns, como geladeiras e *freezers*, para funcionarem como adegas ou cervejeiras, por meio de uma solução acessível e eficiente. O sistema foi desenvolvido utilizando sensores digitais de temperatura, *encoders* rotativos para ajuste fino dos limites térmicos, *buzzer* para alertas sonoros, LEDs indicativos e um display LCD para visualização local das informações. Além disso, foi integrada comunicação sem fio (*Bluetooth*), permitindo o envio de dados a um aplicativo, com alertas remotos quando os valores saem dos parâmetros definidos. Os testes realizados demonstraram que o sistema é funcional e confiável, com resposta precisa aos ajustes realizados, além de apresentar estabilidade na leitura dos sensores e efetividade nos alertas, tanto locais quanto remotos. Conclui-se que a solução proposta atende às necessidades de controle térmico personalizado em geladeiras convencionais, oferecendo uma alternativa prática e de baixo custo para ampliar o uso desses equipamentos.

Palavras-chave: Adega, Alarme, Automação, *Bluetooth*, Cervejeira, *Encoders*, Geladeira, Monitoramento, Sensores, Temperatura.

ABSTRACT

This work aims to develop a temperature control system for conventional refrigerators, providing greater precision and flexibility in thermal adjustments. The proposal seeks to adapt common equipment, such as refrigerators and freezers, to function as wine cellars or beer coolers, through an accessible and efficient solution. The system was developed using digital temperature sensors, rotary encoders for fine adjustment of thermal limits, buzzers for audible alerts, indicator LEDs, and an LCD display for local information visualization. In addition, wireless communication (Bluetooth) was integrated, allowing data transmission to an application, with remote alerts when values go beyond defined parameters. The tests carried out demonstrated that the system is functional and reliable, with precise response to adjustments, as well as stability in sensor readings and effectiveness in alerts, both local and remote. It is concluded that the proposed solution meets the needs of personalized thermal control in conventional refrigerators, offering a practical and low-cost alternative to expand the use of such equipment.

Keywords: Wine cellar, Alarm, Automation, Bluetooth, Beer cooler, Encoders, Refrigerator, Monitoring, Sensors, Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxo de funcionamento do sistema UaiGelô com monitoramento de temperatura.	12
Figura 2: Ilustração do sistema UaiGelô integrado a geladeiras e freezers, com sensores, encoders, display LCD e Bluetooth.	13
Figura 3: Fluxograma do sistema de controle de temperatura com sensores digitais, buzzers e led RGB	14
Figura 4: Conexão “parasitic power mode” do Sensor de temperatura a Prova D'água DS18B20.	17
Figura 5: Diagrama de pinagem da placa de desenvolvimento ESP32.	19
Figura 6: Conexão do LCD I2C gerando a interface IHM.	20
Figura 7: Conexão dos relés para fazer o controle do acionamento do compressor.	21
Figura 8: Etapas do ciclo de refrigeração: compressão, condensação, expansão e evaporação.	21
Figura 9: Conexão do ESP32 na placa de expansão.	24
Figura 10: Fita condutora utilizada para evitar que haja troca de temperatura da geladeira com o ambiente externo.	25
Figura 11: Vista inferior e vista superior da case desenvolvida no Autodesk Fusion.	26
Figura 12: Primeiro teste para validação do código.	27
Figura 13: Dispositivo com fita de cobre e base plástica para passagem de fios sem comprometer a vedação da geladeira.	28
Figura 14: Temperatura medida no instante em que as latas foram colocadas no refrigerador.	28
Figura 15: Momento em que a temperatura do sensor ativa o alarme, acendendo o led RGB e ativando o buzzer.	29
Figura 16: Temperatura sendo medida pelo sensor 3 após a bebida ser servida.	29
Figura 17: Ilustração do modo Control, com acionamento automático do refrigerador via ESP32, utilizando histerese para maior eficiência e proteção do sistema.	30
Figura 18: Fluxograma de funcionamento do sistema nos modos Watch e Control	32
Figura 19: Diagrama de ligação interna do sistema UaiGelô.	39
Figura 20: Case montada com o ESP32 e os componentes do sistema UaiGelô.	39
Figura 21: Diagrama de ligação de potência do sistema UaiGelô.	40
Figura 22: Case responsável por abrigar os relés e fonte de alimentação.	41
Figura 23: Visão interna da case.	41
Figura 24: Tomadas de 20A.	42
Figura 25: Cano de PVC de 100 mm cortado e fixado à base de madeira com cola quente para formar o molde	43
Figura 26: Copo plástico centralizado e fixado na base, formando o molde interno que definirá o diâmetro do anel	43
Figura 27: Pesagem do recipiente, tara ajustada e medição de 300 g de borracha de silicone azul para preparo da mistura do anel.	44
Figura 28: Pesagem do recipiente, tara ajustada e medição de 9 g de catalisador para preparo da mistura do anel.	44

Figura 29: Mistura de borracha de silicone já homogênea despejada no molde para a formação do anel	45
Figura 30: Molde aberto após o processo de cura, revelando o anel de borracha formado com espessura uniforme	45
Figura 31: Fita condutora montada para passagem do cabo pela porta da geladeira	46
Figura 32: Detalhe da fixação do ímã de neodímio na fita condutora.....	46
Figura 33: Fita condutora instalada na porta do refrigerador para passagem do cabo do sensor	47
Figura 34: Programação em blocos no MIT App Inventor 2 para conexão Bluetooth entre o aplicativo UaiGelô e o ESP32	47
Figura 35: Telas principais do aplicativo UaiGelô desenvolvidas no MIT App Inventor 2: conexão Bluetooth, modo Watch e modo Control.	48
Figura 36: Valor da temperatura do freezer.....	50
Figura 37: Valor medido pelo sensor dentro do freezer.	50
Figura 38: Sensor da esquerda com manta térmica/ sensor da direita sem manta térmica.....	51
Figura 39: Temperatura inicial das duas latas.	51
Figura 40: Momento em que o sensor 3 aciona o alarme.....	52
Figura 41: Momento em que o sensor 1 aciona o alarme.....	52
Figura 42: Momento em que as latas foram passadas para o congelador.....	53
Figura 43: Temperatura inicial de quando as latas foram passadas para o congelador.....	53
Figura 44: Temperatura média após 60 minutos.	54
Figura 45: Temperatura média após 90 minutos e abertura dos relés.	54
Figura 46: Temperatura exibida pelo aplicativo e ajuste da histerese.	55
Figura 47: Temperatura medida após a geladeira permanecer aberta.	55
Figura 48: Temperatura medida após 12 horas de teste.	56
Figura 49: Latas intactas após 12 horas de teste.....	56
Figura 50: Copo de 200 ml adicionado ao congelador para teste de congelamento.....	57
Figura 51: Início da solidificação da água após 2 horas.....	57
Figura 52: Temperatura interna do congelador registrada antes da retirada das latas (-1,25 °C).	58
Figura 53: Temperatura da lata servida após estabilização (0,69 °C).	58
Figura 54: Temperatura medida no momento da retirada da segunda lata.....	59
Figura 55: Última lata retirada, com temperatura de -2,59 °C medida pelos sensores.....	59
Figura 56: Sistema UaiGelô desligado, mas geladeira funcionando via relé do modo Control.	60
Figura 57: Sensor 1 acoplado à lata para o teste no modo Watch.	60
Figura 58: Lata sendo colocada no congelador e temperatura ajustada no refrigerador.	61
Figura 59: Temperatura registrada próxima do limite ajustado.	61
Figura 60: Acionamento do LED RGB e buzzer ao atingir o limite de temperatura.	62
Figura 61: Medição da temperatura do líquido após ser servido em copo.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais especificações técnicas do sensor DS18B20	18
Tabela 2: Temperatura Ideal vs. Congelamento por Estilo de Cerveja	23
Tabela 3: Inicialização do código.....	34
Tabela 4: Configurações feitas no bloco setup().	35
Tabela 5: Implementação do moto Watch.....	36
Tabela 6: Implementação do modo Control	37
Tabela 7: Função responsável por exibir se o sensor está conectado.....	38
Tabela 8: Resumo dos testes realizados no sistema UaiGelô e seus respectivos objetivos.	49
Tabela 9: Comparativo dos resultados da manta térmica.	52

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização do Tema	13
1.2	Objetivos	14
1.2.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>14</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>15</i>
1.3	Estrutura da Monografia.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Controle de Temperatura	17
2.2	Sensores Digitais de Temperatura	17
2.3	Sistemas Embarcados.....	18
2.4	Interface Homem-Máquina (IHM).....	19
2.5	Alarmes em Sistemas de Automação	20
2.6	Princípios de Funcionamento e Controle em Sistemas de Refrigeração	20
2.7	Condições térmicas recomendadas para diferentes tipos de cerveja	22
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Materiais e Equipamentos	24
3.2	Procedimentos Metodológicos	26
3.2.1	<i>Bibliotecas utilizadas.....</i>	<i>33</i>
3.2.2	<i>Estrutura do código.....</i>	<i>33</i>
3.2.3	<i>Diagrama Elétrico</i>	<i>38</i>
3.2.4	<i>Diagrama de Potência</i>	<i>40</i>
3.2.5	<i>Anel de fixação do sensor.....</i>	<i>42</i>
3.2.6	<i>Desenvolvimento da fita condutora para passagem do cabo pela porta da geladeira</i>	<i>46</i>
3.2.7	<i>Aplicativo de Monitoramento e Controle.....</i>	<i>47</i>
4	RESULTADOS	49
4.1	Teste de Validação da Precisão dos Sensores.....	50
4.2	Teste de Isolamento Térmico com Manta Metalizada	51
4.3	Teste do modo <i>Control</i>	53
4.4	Teste Individual de Monitoramento no Modo <i>Watch</i>	60
5	CONCLUSÕES.....	64
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

O controle preciso da temperatura em equipamentos de refrigeração é essencial para garantir a qualidade e conservação de diversos produtos, desde alimentos até bebidas especiais como vinhos e cervejas artesanais. Geladeiras e *freezers* convencionais, amplamente encontrados em residências e estabelecimentos comerciais, normalmente apresentam controles de temperatura limitados, com ajustes imprecisos e faixa restrita, dificultando sua adaptação para usos que exigem maior rigor térmico.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema eletrônico que conforme ilustrado na Figura 1 é capaz de aprimorar o controle de temperatura em geladeiras e *freezers* convencionais, sejam eles verticais ou horizontais. O projeto transforma esses equipamentos em soluções versáteis, possibilitando configurações personalizadas que atendem necessidades específicas, como a criação de cervejeiras ou adegas caseiras.

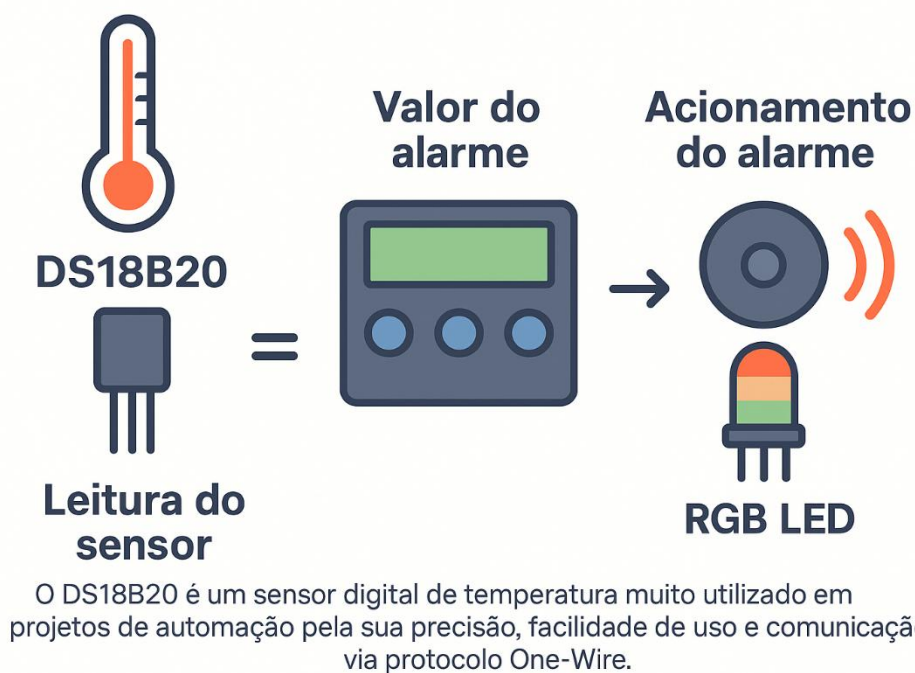


Figura 1: Fluxo de funcionamento do sistema UaiGelô com monitoramento de temperatura.

Para o desenvolvimento, foram utilizados modelos comuns de geladeiras e *freezers*, com capacidade variada e controles originais simples. O sistema desenvolvido incorpora sensores digitais de temperatura, controladores eletrônicos com ajuste por meio de encoders rotativos, display LCD para monitoramento local e comunicação *Bluetooth* para envio de dados a dispositivos móveis, conforme ilustrado na Figura 2. Além disso, o projeto contempla alertas em tempo real para variações fora dos limites configurados, aumentando a segurança e a eficiência do controle térmico.



Figura 2: Ilustração do sistema UaiGelô integrado a geladeiras e freezers, com sensores, encoders, display LCD e Bluetooth.

O sistema também conta com dois modos de operação: *Watch* e *Control*. No modo *Watch*, o dispositivo monitora continuamente os sensores e informa ao usuário, tanto no display quanto por notificações, sempre que a temperatura ultrapassar os limites definidos, funcionando como um sistema de supervisão térmica. Já o modo *Control* atua diretamente sobre o refrigerador, acionando ou desligando o compressor por meio de um relé. Nesse modo, foi implementada uma lógica de *histerese* para evitar comutação excessiva, garantindo um funcionamento mais estável, eficiente e seguro para o equipamento.

Com esta solução, tem como objetivo oferecer uma alternativa acessível e prática para usuários que desejam ampliar a funcionalidade de seus equipamentos de refrigeração, aliando tecnologia, precisão e facilidade de uso. O presente trabalho detalha o desenvolvimento, implementação e testes do sistema, evidenciando os resultados obtidos e as contribuições para o campo da automação residencial.

1.1 Contextualização do Tema

O controle preciso da temperatura em equipamentos de refrigeração é fundamental para a conservação adequada de alimentos, bebidas e outros produtos sensíveis à variação térmica. Geladeiras e *freezers* convencionais, amplamente utilizados em residências e estabelecimentos comerciais, geralmente possuem sistemas de controle simples e limitados, que dificultam a manutenção de temperaturas específicas fora dos padrões de fábrica. Essa limitação compromete a versatilidade desses equipamentos para usos diferenciados, como a transformação em adegas, cervejeiras ou câmaras frigoríficas especializadas.

Com o avanço das tecnologias digitais e a popularização de dispositivos eletrônicos embarcados, tornou-se possível desenvolver soluções de controle e monitoramento mais eficientes e acessíveis. O uso de sensores de temperatura digitais, controladores eletrônicos e

interfaces de comunicação sem fio oferece a oportunidade de modernizar geladeiras convencionais, ampliando sua funcionalidade e precisão.

Neste contexto, o projeto proposto visa a criação de um sistema eletrônico para controle e monitoramento de temperatura com ajuste fino conforme apresentado no fluxograma da Figura 3, capaz de substituir ou complementar os controles tradicionais. Além de proporcionar maior flexibilidade de uso, o sistema incorpora funcionalidades como alertas em tempo real via *Bluetooth*, contribuindo para a segurança e comodidade dos usuários. Esta solução se alinha às tendências de automação residencial e Internet das Coisas (IoT), que vêm transformando a forma como equipamentos domésticos são gerenciados.

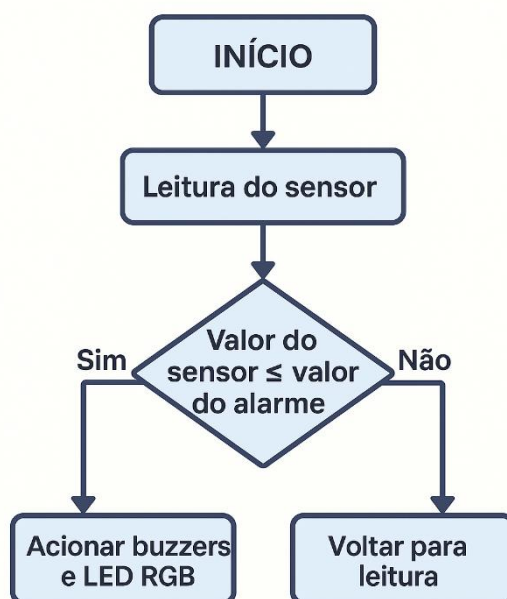


Figura 3: Fluxograma do sistema de controle de temperatura com sensores digitais, buzzers e led RGB

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema eletrônico inovador para controle e monitoramento de temperatura em geladeiras e *freezers* convencionais, ampliando a faixa de ajuste e proporcionando maior precisão no controle térmico. O sistema visa transformar equipamentos comuns, que possuem controles limitados, em dispositivos multifuncionais, como adegas ou cervejeiras, capazes de conservar diferentes tipos de produtos com necessidades específicas de temperatura. O projeto também busca garantir a segurança dos alimentos e bebidas armazenados, oferecendo recursos modernos de monitoramento e alerta via comunicação *Bluetooth*, permitindo o acompanhamento remoto e em tempo real das condições internas do equipamento. Assim, o trabalho contribui para a inovação tecnológica na refrigeração doméstica e comercial, atendendo à crescente demanda por controle preciso e facilidade de uso.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Utilizar sensores digitais de temperatura de alta precisão para garantir leituras confiáveis, minimizando erros e possibilitando ajustes finos na faixa térmica desejada.
2. Desenvolver uma interface de usuário intuitiva por meio de *encoders* rotativos para ajustar os limites de temperatura, substituindo métodos tradicionais menos precisos como potenciômetros, proporcionando maior facilidade e a exatidão do controle.
3. Integrar um display LCD para a visualização em tempo real da temperatura atual e dos limites configurados, proporcionando feedback imediato ao usuário sobre o estado do sistema.
4. Implementar um sistema de alertas sonoros e visuais, por meio de *buzzer* e LEDs RGB, para notificar o usuário quando a temperatura ultrapassar os limites programados, de modo a garantir a segurança dos produtos armazenados.
5. Estabelecer comunicação via *Bluetooth* para o envio de dados e alertas a um aplicativo móvel, possibilitando o monitoramento remoto e a notificação em tempo real, ampliando a funcionalidade e o controle do sistema.
6. Realizar testes práticos em diferentes tipos de geladeiras e *freezers*, avaliando a eficiência do sistema em condições reais de uso e ajustando os parâmetros para garantir desempenho consistente e confiável.

1.3 Estrutura da Monografia

No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho, contemplando a contextualização do tema, os objetivos gerais e específicos, a justificativa da pesquisa e a organização estrutural do estudo.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, no qual são abordados os principais conceitos relacionados ao projeto, incluindo o controle de temperatura em sistemas de refrigeração, o funcionamento de sensores digitais como o DS18B20, a utilização do microcontrolador ESP32, o emprego de displays LCD com comunicação I2C, módulos Bluetooth, buzzers, LEDs RGB, relés e a aplicação de encoders para o ajuste de parâmetros.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento do sistema, abrangendo a seleção e especificação dos componentes eletrônicos, a programação do microcontrolador ESP32, a lógica de controle de temperatura, o acionamento do relé responsável pela operação da geladeira, além da integração com o display LCD e da comunicação via Bluetooth com um aplicativo externo.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e a discussão, detalhando os testes realizados com o sistema proposto, incluindo a leitura de temperatura, os alarmes visuais e sonoros, a resposta do sistema aos comandos dos encoders e a comunicação com dispositivos móveis. Também são discutidas as melhorias obtidas em comparação com métodos convencionais de controle de temperatura.

No Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais, que sintetizam os principais resultados alcançados e destacam as contribuições do projeto para o aprimoramento do controle de temperatura em geladeiras e freezers. Esse capítulo também aponta as limitações encontradas e propõe sugestões para trabalhos futuros, como a integração do sistema a plataformas em nuvem e interfaces de visualização online (dashboards).

No Capítulo 6 são apresentadas as referências que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho, incluindo livros, artigos científicos, manuais técnicos e outros materiais utilizados como base teórica e prática.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Controle de Temperatura

O controle de temperatura é essencial em diversos setores industriais, garantindo que processos e equipamentos operem dentro de faixas térmicas específicas para preservar qualidade, segurança e eficiência energética. Sistemas de controle térmico normalmente utilizam sensores para monitorar a temperatura e atuadores para realizar ajustes, compondo sistemas de malha fechada que promovem estabilidade e precisão (Katsaros et al., 2017). Segundo Ogata (2010), diferentes estratégias podem ser aplicadas em sistemas de controle térmico, variando desde métodos simples de acionamento ligado–desligado (on-off) até técnicas mais elaboradas, como os controles proporcional, integral e derivativo (PID). Estes últimos são amplamente empregados devido à sua versatilidade, capacidade de resposta a variações no processo e eficiência na manutenção da temperatura dentro dos limites estabelecidos.

2.2 Sensores Digitais de Temperatura

Sensores digitais como o DS18B20 (ver Figura 4) são amplamente utilizados em sistemas embarcados para medições precisas de temperatura. Eles operam utilizando o protocolo *OneWire*, que permite a comunicação de múltiplos sensores em um único barramento, reduzindo a quantidade de fios e facilitando a implementação (Silva e Pereira, 2019). Conforme apresentado por Santos et al. (2018), sensores digitais oferecem vantagens significativas em relação aos sensores analógicos, dentre elas, maior imunidade a ruído elétrico, leitura precisa e menor manutenção associada à calibração. Na Tabela 1, são apresentadas as principais características do sensor.

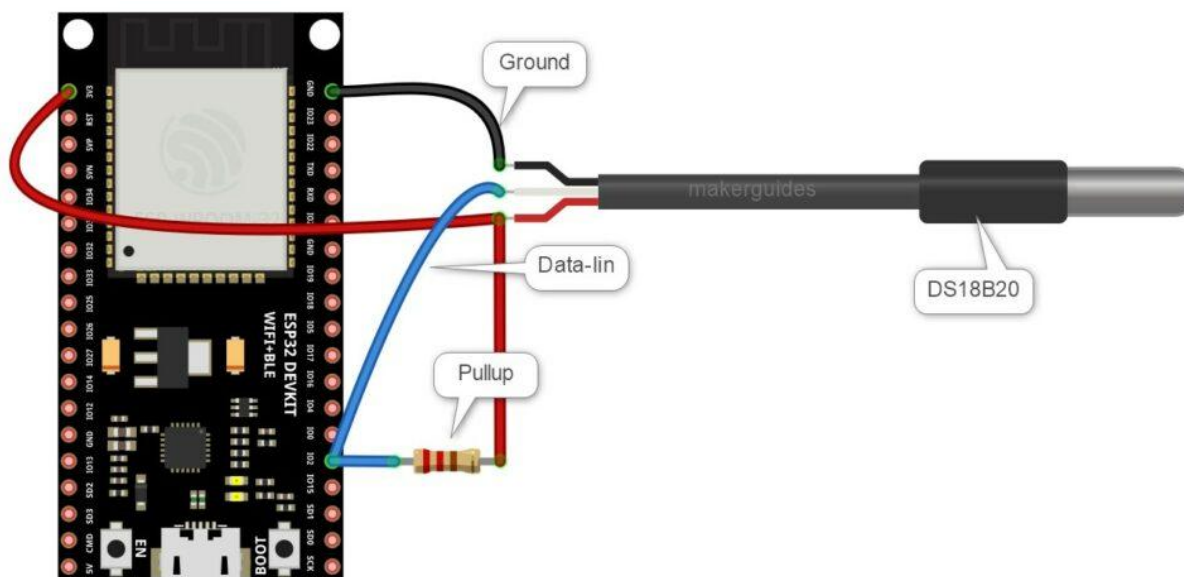


Figura 4: Conexão “parasitic power mode” do Sensor de temperatura a Prova D’água DS18B20.

Tabela 1: Principais especificações técnicas do sensor DS18B20

Parâmetro	Valor / Descrição
Modelo	DS18B20
Tipo de Sensor	Sensor digital de temperatura
Interface de Comunicação	OneWire (bidirecional)
Tensão de Operação	3,0 V a 5,5 V
Faixa de Medição	-55 °C a +125 °C
Precisão	±0,5 °C (na faixa de -10 °C a +85 °C)
Resolução Ajustável	9 a 12 bits
Tempo de Conversão	93,75 ms (9 bits) até 750 ms (12 bits)
Calibração	Já calibrado de fábrica
Modo de Alimentação	Normal ou “ <i>parasitic power mode</i> ”
Corrente em operação típica	1,5 mA durante conversão, 1 µA em standby
Identificação Única	Código serial de 64 bits gravado de fábrica
Encapsulamento	TO-92, SOIC 8 ou encapsulamentos personalizados (à prova d’água etc.)
Aplicações Típicas	Termômetros digitais, sistemas HVAC, monitoramento industrial etc.

2.3 Sistemas Embarcados

Sistemas embarcados são plataformas computacionais dedicadas ao controle de dispositivos e processos específicos, integrando hardware e software para executar funções em tempo real. No âmbito do projeto Uaigelô, microcontroladores como o ESP32 (ver Figura 5) são empregados devido à sua versatilidade, baixo custo e ampla comunidade de desenvolvimento (Tanenbaum e Wetherall, 2015). O ESP32 destaca-se por combina conectividade sem fio — com Wi-Fi e *Bluetooth* 4.2 — com um poder de processamento significativo, sendo baseado no microprocessador Tensilica Xtensa LX6, que pode operar em até 240 MHz. De acordo com a MakerHero (2020), o ESP32 destaca-se por fornecer ao desenvolvedor uma plataforma completa para aplicações IoT, unindo conectividade, alto desempenho e suporte a múltiplos periféricos.

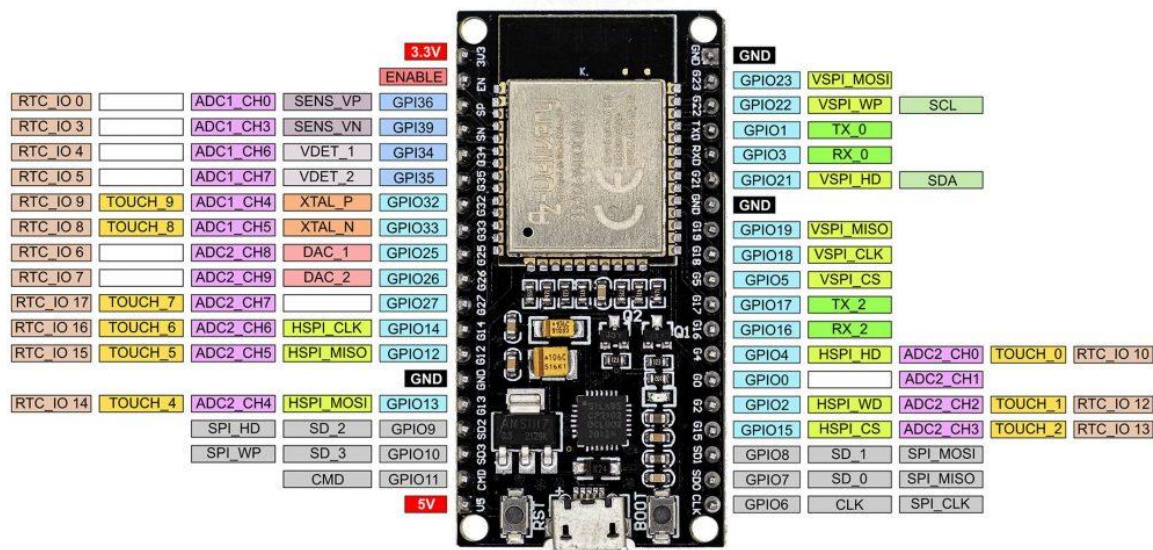


Figura 5: Diagrama de pinagem da placa de desenvolvimento ESP32.

Outra vantagem do ESP32 é o seu coprocessador de ultrabaixo consumo (ULP- *Ultra Low Power*), que permite executar algumas tarefas simples enquanto os núcleos principais entram em modo de sono profundo (“deep sleep”), contribuindo para economia de energia — uma característica de grande relevância para projetos IoT (*Internet of Things*). Também merece destaque o suporte a aceleração por hardware para criptografia (como AES (*Advanced Encryption Standard*), SHA (*Secure Hash Algorithm*), RSA (*Rivest Shamir Adleman*) e ECC (*Elliptic Curve Cryptography*)), o que aumenta a segurança nas comunicações e é particularmente relevante em aplicações conectadas. Conforme destacado pela MakerHero (2020), o ESP32 integra ainda diversos recursos avançados, como sensores capacitivos de toque, suporte a DACs (*Digital-to-Analog Converter*), ADCs (*Analog-to-Digital Converter*) e múltiplas interfaces de comunicação, ampliando sua aplicabilidade em sistemas embarcados modernos.

Dessa forma, sistemas embarcados com ESP32 permitem realizar leituras de sensores, processamento de dados e acionamento de atuadores de forma automatizada, garantindo controle e monitoramento contínuo — características essenciais para a eficiência de sistemas de refrigeração (Marques et al., 2020).

2.4 Interface Homem-Máquina (IHM)

A Interface Homem-Máquina (IHM) é um componente fundamental para o uso e monitoramento de sistemas automatizados. Interfaces que utilizam displays LCD (ver Figura 6), botões e *encoders* viabilizam a interação do operador com o sistema, permitindo configurações e visualização em tempo real de parâmetros como temperatura e alarmes (Nielsen, 1994). Segundo Barbosa et al. (2019), o desenvolvimento de uma IHM (Interface Homem-Máquina) eficiente deve priorizar a clareza na exibição das informações, simplicidade na navegação e resposta rápida às ações do usuário, garantindo maior usabilidade e segurança operacional.

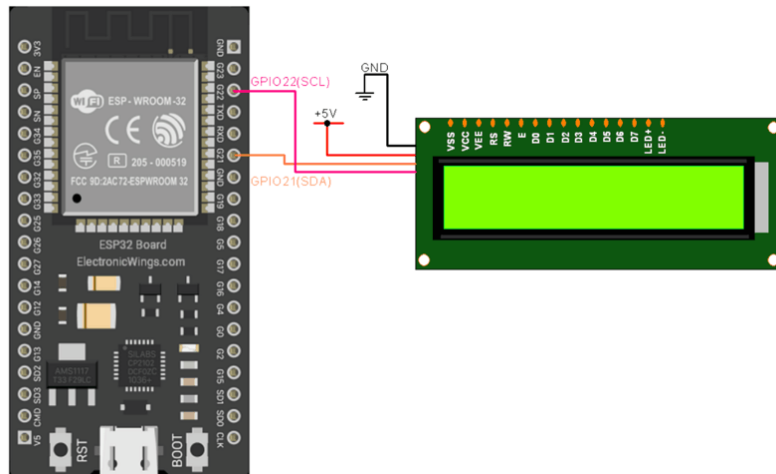


Figura 6: Conexão do LCD I2C gerando a interface IHM.

2.5 Alarmes em Sistemas de Automação

Alarmes são mecanismos que indicam condições anormais ou emergenciais no sistema, como temperaturas fora da faixa permitida. A combinação de alertas visuais (LEDs) e sonoros (*buzzer*) permite uma resposta rápida para evitar falhas ou danos (Karlsson e Johansson, 2018). De acordo com Lima et al. (2021), a implementação adequada de sistemas de alarme em automação industrial reduz o tempo de inatividade e previne acidentes, sendo fundamental para a segurança dos processos.

2.6 Princípios de Funcionamento e Controle em Sistemas de Refrigeração

O controle de temperatura é especialmente crítico em sistemas de refrigeração, onde a manutenção da cadeia de frio garante a conservação de alimentos, medicamentos e outros produtos sensíveis (Martins e Almeida, 2020). O uso de sistemas automatizados (ver Figura 7) com sensores, controle de relés e alarmes contribui para o funcionamento eficiente e seguro desses sistemas (Silva et al., 2017). Além disso, o uso de controladores embarcados facilita o monitoramento remoto e a integração com sistemas maiores de automação industrial (Pereira et al., 2019).

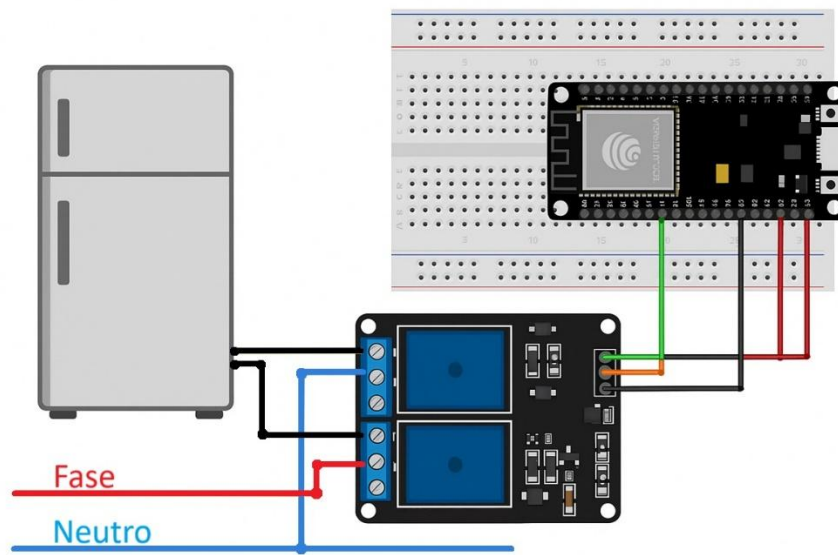


Figura 7: Conexão dos relés para fazer o controle do acionamento do compressor.

O refrigerador opera segundo o princípio de transferência de calor, removendo energia térmica de seu interior para o ambiente externo, com o objetivo de manter alimentos e bebidas em condições térmicas adequadas. De acordo com a Danfoss (2025), o ciclo de refrigeração inicia-se com o compressor, que comprime o gás refrigerante, elevando sua pressão e temperatura. Em seguida, o fluido aquecido passa pelo condensador, onde libera calor para o ar ambiente e se condensa, transformando-se em líquido. Esse líquido então atravessa um dispositivo de expansão (como um tubo capilar), onde ocorre uma queda de pressão, reduzindo sua temperatura antes de entrar no evaporador. Dentro do evaporador, o refrigerante evapora ao absorver o calor do interior do compartimento, promovendo o resfriamento. Na sequência do ciclo — compressão do gás, liberação de calor no condensador, expansão e posterior absorção de calor no evaporador — o refrigerante retorna ao compressor, reiniciando o processo (ver Figura 8). Esse processo é continuamente controlado por um termostato ou sensor de temperatura, que aciona ou interrompe o funcionamento do compressor conforme a necessidade térmica interna do equipamento, mantendo assim a temperatura desejada.

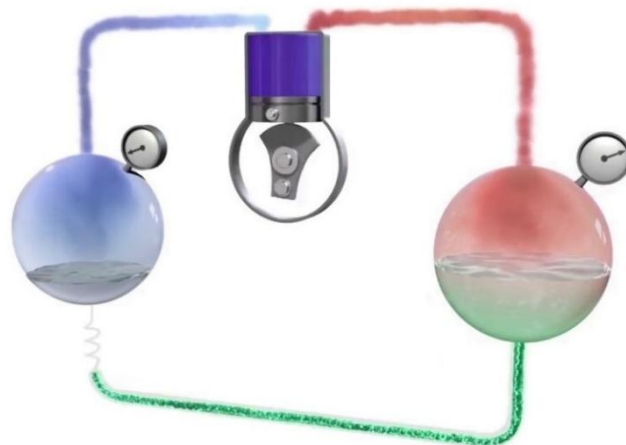


Figura 8: Etapas do ciclo de refrigeração: compressão, condensação, expansão e evaporação.

2.7 Condições térmicas recomendadas para diferentes tipos de cerveja

O controle preciso da temperatura é um fator determinante para a correta conservação e apreciação sensorial da cerveja. Diferentes estilos cervejeiros exigem faixas específicas de temperatura para que suas características — como aroma, sabor, carbonatação e teor alcoólico — sejam plenamente percebidas pelo consumidor. Temperaturas muito baixas, embora frequentemente associadas ao consumo convencional, podem comprometer a percepção das propriedades sensoriais da bebida, enquanto temperaturas elevadas comprometem a estabilidade e qualidade do produto (PAPO DE BAR, 2025; CERVEJARIA NOI, 2025).

Neste contexto, compreender as faixas ideais de consumo e os limites de congelamento de cada estilo é essencial para o dimensionamento adequado de sistemas de refrigeração e automação voltados à adaptação de geladeiras convencionais em cervejeiras. Estilos como lagers claras, por exemplo, devem ser consumidos entre 0 °C e 4 °C, enquanto cervejas mais encorpadas e alcoólicas, como uma Barleywine, requerem temperaturas de até 15 °C para apreciação plena (SUPERINTERESSANTE, 2025; INSTITUTO DA CERVEJA BRASIL, 2025; OPA BIER, 2025).

Além disso, o ponto de congelamento da cerveja varia conforme o teor alcoólico, sendo geralmente inferior a -2 °C para cervejas comuns e podendo chegar a -6 °C em estilos com teor alcoólico elevado, como as do tipo Eisbock (CERVEJA EM MALTE, 2025; CERVEJEIRAS 369, 2025).

A Tabela 2, a seguir apresenta uma síntese das faixas de temperatura recomendadas para o consumo ideal dos principais estilos de cerveja, bem como seus respectivos pontos aproximados de congelamento. Estes dados fornecem embasamento técnico à proposta do sistema UaiGelô, que tem como objetivo oferecer controle térmico customizado e compatível com a diversidade de perfis cervejeiros existentes.

Tabela 2: Temperatura Ideal vs. Congelamento por Estilo de Cerveja

Estilo de Cerveja	Temperatura Ideal de Consumo	Teor Alcoólico Médio	Temperatura de Congelamento Aproximada
American Lager / Light Lager	0 °C a 4 °C	4–5%	–2 °C a –3 °C
Pilsen / Pilsner	4 °C a 6 °C	4.5–5%	–2 °C a –4 °C
Cerveja sem álcool	0 °C a 2 °C	0.5%	–0.5 °C
Weissbier / Witbier (trigo)	5 °C a 7 °C	5–5.5%	–2 °C a –3 °C
Pale Ale	7 °C a 10 °C	5–6%	–3 °C a –4 °C
IPA (India Pale Ale)	7 °C a 10 °C	6–7%	–2 °C a –4 °C
Amber Lager / Vienna / Bock	8 °C a 12 °C	6–7%	–2 °C a –4 °C
Tripel / Dubbel / Belgian Strong Ale	10 °C a 12 °C	8–9%	–3 °C a –5 °C
Stout / Porter	10 °C a 13 °C	6–8%	–2 °C a –4 °C
Barleywine / Quadrupel	12 °C a 15 °C	10–12%	–4 °C a –8 °C
Eisbock	13 °C a 15 °C	12–14%	–6 °C a –10 °C

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais e Equipamentos

Para o desenvolvimento do protótipo do sistema UaiGelô, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos eletrônicos e estruturais:

- Microcontrolador ESP32 WROOM: responsável pelo processamento das informações e controle geral do sistema;
- Placa de expansão para ESP32: utilizada para facilitar o acesso aos pinos e a organização dos componentes, como pode ser visto na Figura 9;



Figura 9: Conexão do ESP32 na placa de expansão.

- 3 Sensores de temperatura DS18B20: sensores digitais do tipo *OneWire* utilizados para monitorar a temperatura ambiente em diferentes pontos do sistema, foi utilizado 3 sensores para permitir que no modo *Watch* consiga monitorar até 3 objetos;
- 1 Display LCD 16x2 com interface I2C: utilizado para exibir as informações dos sensores e dos alarmes em tempo real;
- 3 *encoders* rotativos com botão: utilizados para ajustar os limites de temperatura de cada sensor de forma independente. Os botões integrados aos *encoders* também desempenham funções específicas: permitem ativar ou silenciar os alarmes e alternar entre os modos de operação *Watch* e *Control* do sistema;
- 1 LED RGB: utilizado para indicar visualmente qual sensor atingiu o limite de temperatura;
- 1 LED verde: utilizado para sinalizar quando o alarme foi completamente desativado pelo usuário;
- 1 LED vermelho: utilizado para indicar que o alarme está ativado;
- 2 *buzzers*: utilizados para sinalização sonora de alarme;

- 4 Portas RJ45: utilizadas tanto para conectar os sensores DS18B20 quanto para conectar os relés responsáveis pelo acionamento de dispositivos externos de controle térmico, como sistemas de refrigeração;
- 2 relés de 30A (110–250V): utilizados para controle de carga externa, como o acionamento automático de refrigeradores com base nos parâmetros definidos;
- 1 Fonte de alimentação de 5V DC: utilizada especificamente para alimentar os relés, garantindo sua operação independente da alimentação do microcontrolador;
- 1 *Powerbank* de 10.000 mAh: utilizado como fonte de energia autônoma, permitindo que o protótipo funcione de forma portátil, sem depender de conexão direta à rede elétrica;
- Fitas de cobre condutoras: utilizadas para permitir que os fios dos sensores passem entre a porta do refrigerador sem comprometer o isolamento térmico, evitando trocas de temperatura causadas por fechamento inadequado da porta, ver Figura 10;



Figura 10: Fita condutora utilizada para evitar que haja troca de temperatura da geladeira com o ambiente externo.

- Fios de 2,5 mm²: utilizados para as ligações de potência, garantindo segurança e suporte à corrente elétrica exigida pelos dispositivos;
- 1 tomada fêmea de 20A e 1 tomada macho de 20A: utilizadas para conectar o sistema à rede elétrica de forma prática e segura;
- Borracha líquida isolante: aplicada para formar uma espécie de anel em torno da lata ou garrafa em contato com o sensor, assegurando maior aderência e estabilidade no monitoramento da temperatura do recipiente.
- Manta Térmica Metalizada Face Única – 100% Polietileno – Metalizado. Utilizada para proporcionar melhor isolamento térmico entre os sensores de temperatura e o ambiente externo, reduzindo a interferência das variações de temperatura ambiente nas medições e garantindo maior precisão nas leituras.

- Caixa de CFTV Plástica: utilizada para acomodar e proteger os componentes do circuito de potência, como a fonte de alimentação e os relés, garantindo uma montagem segura e organizada.

Além dos componentes mencionados, foi desenvolvida uma estrutura física (case) para o sistema embarcado utilizando impressão 3D, como pode ser visto na Figura 11. A impressão foi realizada em filamento PLA (*Polylactic Acid*), material amplamente utilizado em prototipagem devido à sua boa resistência mecânica, facilidade de impressão e estabilidade dimensional. O case foi projetado de forma personalizada para abrigar o ESP32, os encoders, o display LCD e os demais componentes eletrônicos, garantindo não apenas a organização interna dos módulos, mas também a proteção contra impactos leves, poeira e manuseio inadequado. O uso da impressão 3D permitiu ajustar medidas, espessuras, posicionamento de furos e encaixes com precisão, resultando em uma estrutura robusta, funcional e com acabamento visual adequado ao protótipo final. Além disso, esse método de fabricação possibilita rápidas modificações de design, caso futuras melhorias ou expansões do sistema sejam necessárias.

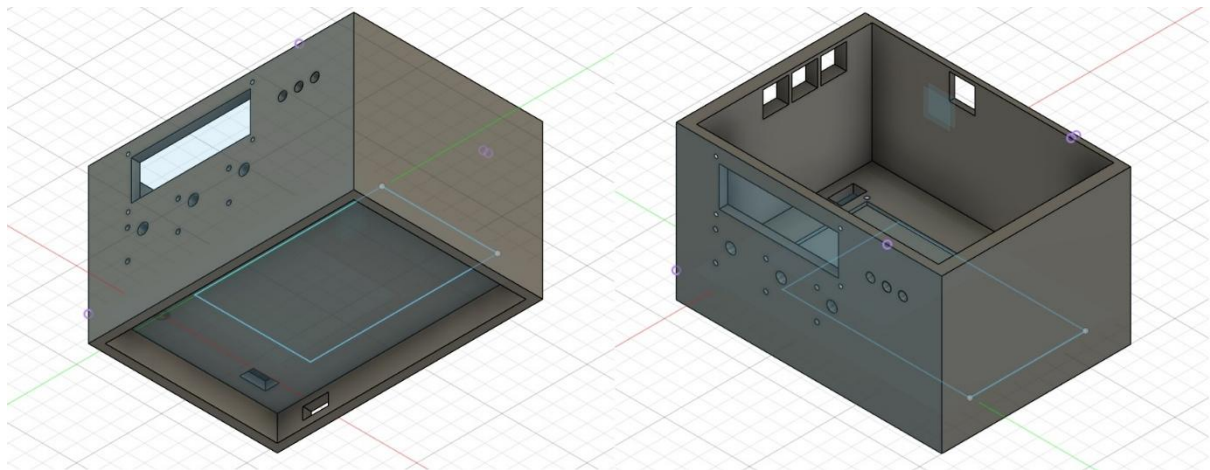


Figura 11: Vista inferior e vista superior da case desenvolvida no Autodesk Fusion.

A seleção dos componentes foi feita com base na confiabilidade, compatibilidade com o microcontrolador ESP32 e viabilidade para a aplicação embarcada proposta.

3.2 Procedimentos Metodológicos

O desenvolvimento do sistema UaiGelô seguiu uma abordagem prática e interativa, dividida em etapas que contemplaram o desenvolvimento do código, a montagem do circuito e a realização de testes funcionais.

Inicialmente, foi elaborado o código responsável pela leitura dos sensores de temperatura DS18B20, realizando a comparação entre os valores lidos e os limites de alarme definidos por meio dos *encoders* rotativos. A lógica programada determinava que, ao atingir uma temperatura menor ou igual ao valor limite estabelecido para um determinado sensor, o sistema acionaria os buzzers como sinal de alarme sonoro, além de acender o LED RGB com uma cor específica correspondente ao sensor que atingiu o limite.

Com o código básico funcional, passou-se à etapa de montagem dos sensores e dos demais dispositivos eletrônicos — incluindo os LEDs, *buzzers*, relés, display LCD e *encoders* — conectados ao microcontrolador ESP32 por meio da placa de expansão. As conexões foram organizadas e fixadas de forma a facilitar os testes e garantir a estabilidade do sistema.

Após a verificação de que o sistema estava operando corretamente e os sensores estavam realizando leituras confiáveis, deu-se início ao primeiro teste prático. Nesse teste, duas latas de cerveja foram utilizadas como objeto de monitoramento. Cada uma recebeu um sensor DS18B20 fixado diretamente à sua superfície, utilizando pedaços de isopor para isolamento térmico e elásticos para garantir o contato com o corpo metálico da lata, como registrado na Figura 12.



Figura 12: Primeiro teste para validação do código.

As latas foram colocadas dentro de um freezer doméstico e, graças à utilização de fitas condutoras no cabo do sensor, como é possível observar na Figura 13, foi possível fechar a porta do equipamento sem comprometer a vedação e, conseqüentemente, sem permitir a troca térmica com o ambiente externo.

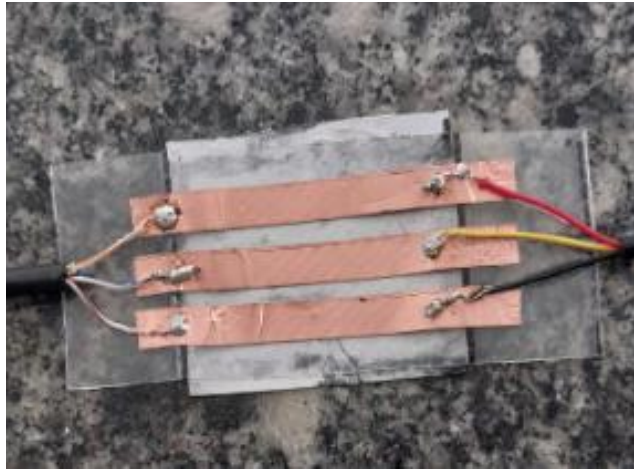


Figura 13: Dispositivo com fita de cobre e base plástica para passagem de fios sem comprometer a vedação da geladeira.

Durante o resfriamento das latas, o sistema iniciou o monitoramento em tempo real das temperaturas, exibidas no *display* LCD, como pode ser visto na Figura 14. O usuário pôde acompanhar a evolução térmica e, por meio dos encoders, ajustar dinamicamente o valor limite que definia o acionamento do alarme para cada sensor.

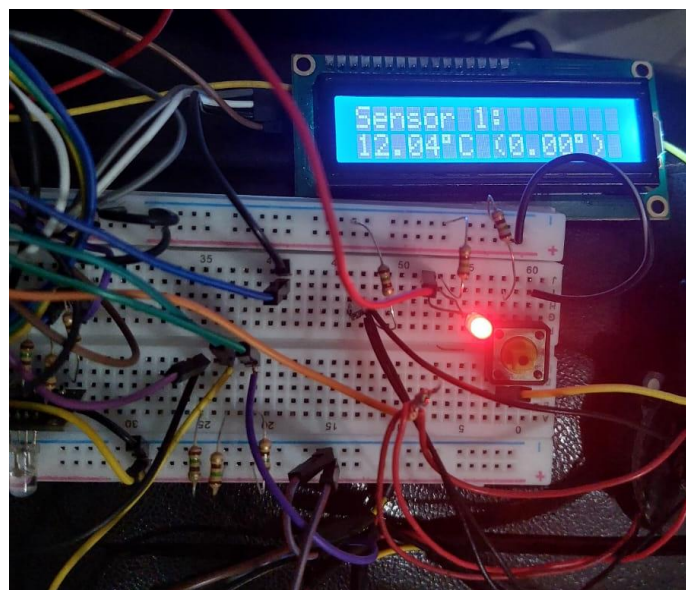


Figura 14: Temperatura medida no instante em que as latas foram colocadas no refrigerador.

Ao atingir o limite definido, o sistema emitiu o alarme sonoro e visual, confirmando o correto funcionamento da lógica programada. O LED RGB acendeu na cor vermelha para sinalizar que o sensor 1 havia ultrapassado o valor configurado no alarme, conforme ilustrado na Figura 15.

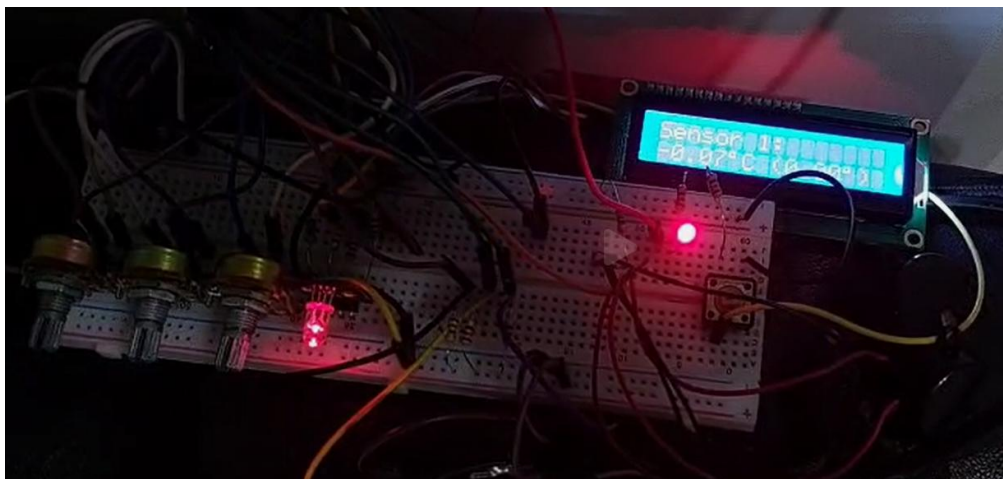


Figura 15: Momento em que a temperatura do sensor ativa o alarme, acendendo o led RGB e ativando o buzzer.

A lata foi então retirada do freezer e a bebida servida em um copo à temperatura ambiente. Esse contato com o copo provocou uma pequena troca de calor entre o líquido e o recipiente, o que pôde ser observado na Figura 16 pelo leve aumento na leitura da temperatura no sensor, validando também a sensibilidade e a precisão do sistema de medição.

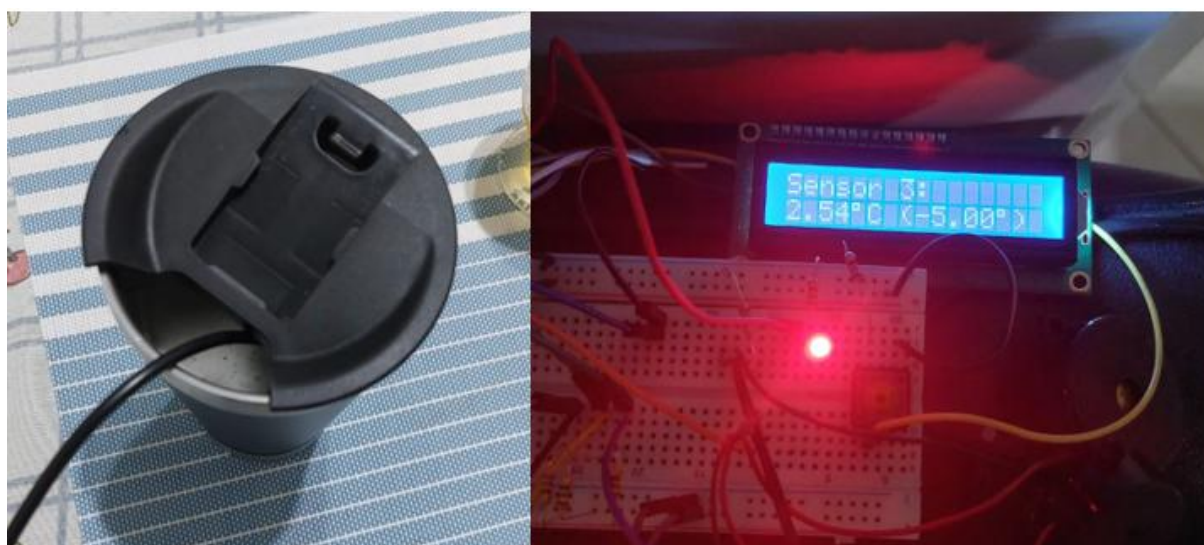


Figura 16: Temperatura sendo medida pelo sensor 3 após a bebida ser servida.

Esses testes permitiram validar o desempenho funcional do sistema embarcado, demonstrando sua capacidade de monitorar e controlar a temperatura de bebidas de forma prática, confiável e automatizada.

Após a confirmação de que a ideia inicial era funcional e o sistema operava conforme esperado nos testes práticos, foram realizadas modificações e melhorias com o objetivo de tornar o protótipo mais completo e aplicável a diferentes contextos.

Uma das principais melhorias foi a implementação do modo *Control*, que possibilita ao sistema atuar de forma automatizada sobre o refrigerador, como mostra o esquema da Figura 17. Nesse modo, o ESP32 passa a controlar o acionamento e desligamento do refrigerador com base nos valores de temperatura definidos pelos usuários.

Para garantir a estabilidade do controle e evitar que o relé mudasse de estado repetidamente devido às pequenas oscilações naturais na leitura dos sensores, foi implementado um mecanismo de histerese. Esse mecanismo cria uma diferença intencional entre o ponto de desligamento e o ponto de religamento do sistema, estabelecendo uma faixa segura de operação.

Na prática, a histerese define uma margem de tolerância térmica: o compressor só é desligado quando a temperatura atinge o limite superior e só volta a ser religado quando ultrapassa um valor inferior previamente determinado. Essa lógica impede acionamentos sucessivos e desnecessários, reduz o número de ciclos do compressor, melhora a eficiência energética e contribui para a proteção e durabilidade do equipamento.

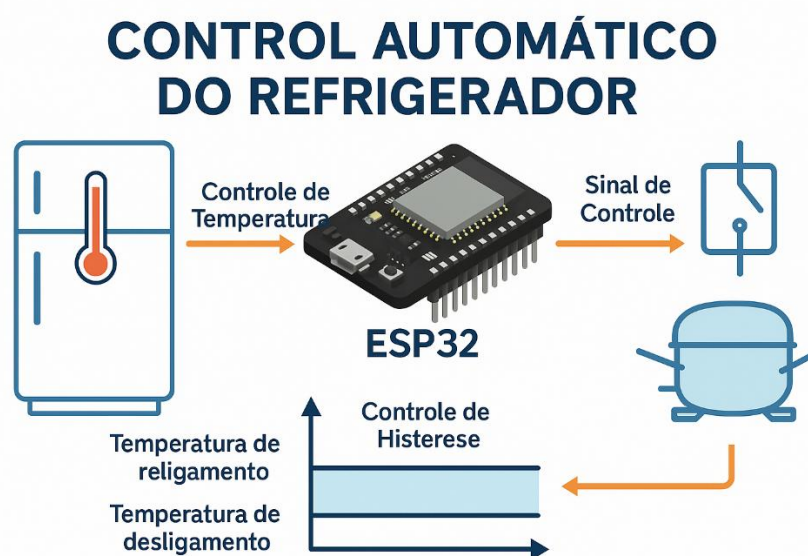


Figura 17: Ilustração do modo Control, com acionamento automático do refrigerador via ESP32, utilizando histerese para maior eficiência e proteção do sistema.

Além do aprimoramento funcional local, foi desenvolvida uma solução para monitoramento e ajuste remoto. Para isso, criou-se um aplicativo de controle que se comunica diretamente com o ESP32. Essa comunicação permite ao usuário visualizar, em tempo real, as temperaturas registradas pelos sensores, bem como ajustar os valores de alarme e alterar os modos de operação (*Watch* ou *Control*) à distância.

Para que a integração entre o aplicativo e o sistema embarcado fosse viável, o código principal do ESP32 passou por adaptações, incorporando funcionalidades de comunicação via Bluetooth Serial. Essa alteração exigiu a criação de rotinas específicas para interpretar os comandos enviados pelo aplicativo, garantindo uma interface intuitiva, confiável e responsiva entre o usuário e o dispositivo.

Essas melhorias estenderam significativamente as funcionalidades do sistema, tornando-o não apenas um monitor de temperatura, mas também um controlador inteligente de refrigeração com capacidade de operação autônoma e supervisão remota.

O fluxograma da Figura 18 sintetiza o funcionamento do sistema desenvolvido, representando de forma visual a lógica implementada no código e o comportamento do dispositivo nos modos *Watch* e *Control*.

Nele, é possível observar as etapas de inicialização do ESP32, leitura dos sensores DS18B20, verificação de conectividade dos sensores, exibição das informações no *display* LCD e as ações decorrentes de cada modo de operação.

No modo *Watch*, o sistema monitora continuamente as temperaturas dos três sensores, exibindo-as no display e acionando o LED RGB e o buzzer quando algum valor atinge o limite configurado pelo usuário. Já no modo *Control*, o sistema atua diretamente sobre o compressor por meio do relé, utilizando um mecanismo de histerese para determinar o momento de ligar ou desligar o equipamento, garantindo estabilidade operacional e evitando acionamentos excessivos.

O diagrama resume, portanto, todo o fluxo lógico do sistema, desde a coleta das medições até as ações tomadas em cada cenário, facilitando a compreensão da estrutura de decisão e do comportamento do controlador embarcado.

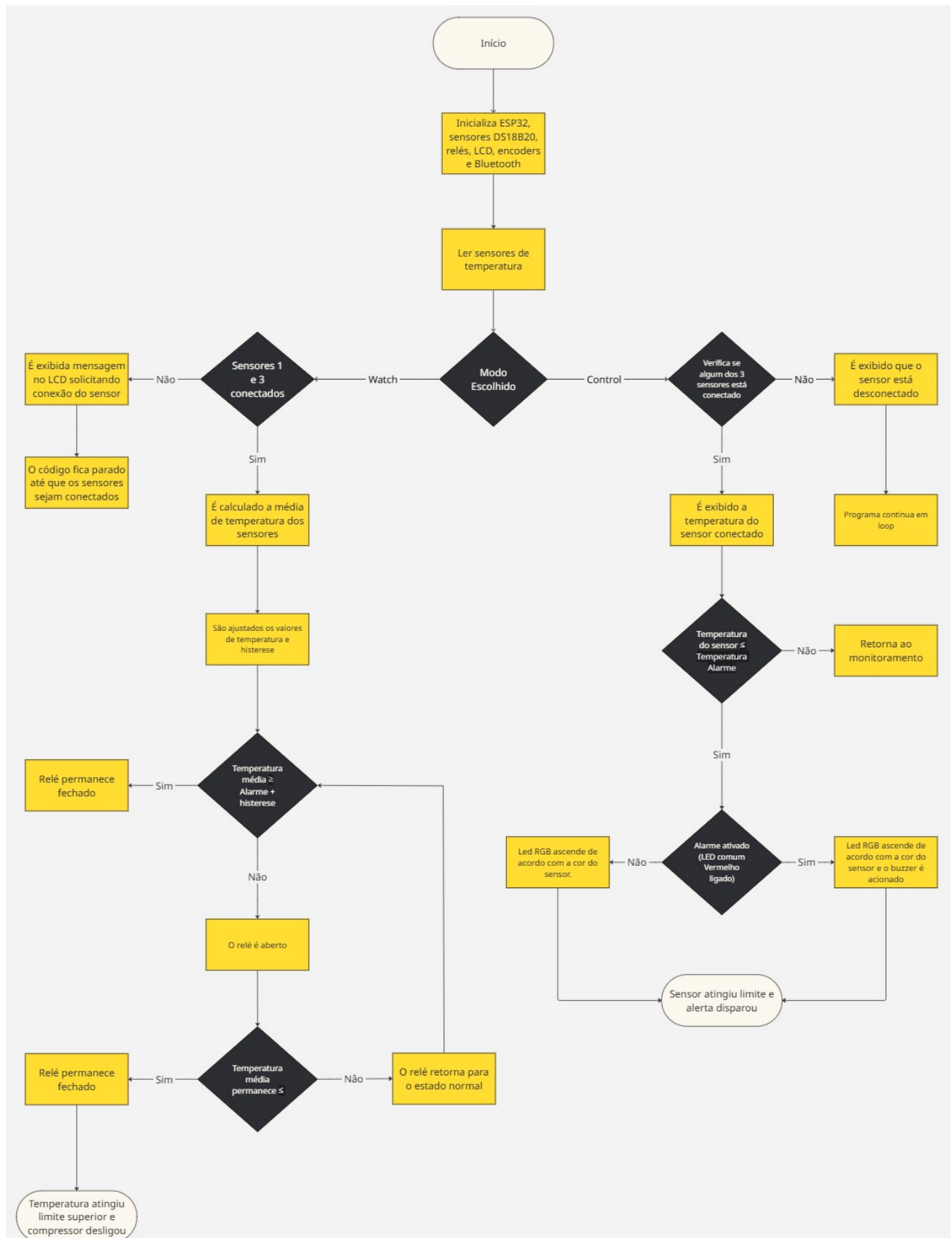


Figura 18: Fluxograma de funcionamento do sistema nos modos Watch e Control

3.2.1 Bibliotecas utilizadas

Para o desenvolvimento do firmware embarcado no ESP32, foram utilizadas bibliotecas específicas da plataforma Arduino, que viabilizam a comunicação com os sensores e periféricos utilizados no projeto. As principais bibliotecas utilizadas foram:

- Wire.h¹

Responsável pela comunicação I2C entre o microcontrolador e dispositivos como o display LCD.

- LiquidCrystal_I2C.h²

Utilizada para controlar o display LCD 16x2 com interface I2C, permitindo a exibição das temperaturas e dos limites definidos diretamente no protótipo.

- OneWire.h³

Permite a comunicação com sensores digitais de temperatura DS18B20 através do protocolo *OneWire*, que possibilita a conexão de múltiplos sensores em um único barramento.

- DallasTemperature.h⁴

Facilita a leitura e o gerenciamento de sensores de temperatura DS18B20, fornecendo funções específicas para obtenção e conversão dos dados de temperatura.

- BluetoothSerial.h⁵

Biblioteca exclusiva da plataforma ESP32, utilizada para estabelecer a comunicação via *Bluetooth* com dispositivos móveis, permitindo o envio e recebimento de dados por meio de um aplicativo externo.

Essas bibliotecas foram incluídas no código e configuradas de forma a garantir a correta integração entre os sensores, atuadores e a interface de usuário.

3.2.2 Estrutura do código

O código do sistema embarcado foi desenvolvido na plataforma Arduino, utilizando a linguagem C++. A estrutura do código foi organizada em blocos funcionais, facilitando a leitura, manutenção e expansão do sistema. A seguir, apresenta-se um resumo da sua arquitetura:

Declaração de Bibliotecas e Pinos: Na Tabela 3 podemos ver as bibliotecas utilizadas e a definição dos pinos para os sensores, botões, LEDs etc.

¹ <https://github.com/PaulStoffregen/Wire.git>

² https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C.git

³ <https://github.com/PaulStoffregen/OneWire.git>

⁴ <https://github.com/milesburton/Arduino-Temperature-Control-Library.git>

⁵ <https://github.com/hen1227/bluetooth-serial.git>

Tabela 3: Inicialização do código.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include "BluetoothSerial.h"

// Pinos de dados para os sensores
#define ONE_WIRE_BUS_1 4
#define ONE_WIRE_BUS_2 16
#define ONE_WIRE_BUS_3 17

// Pinos dos reles
#define rele1 5
#define rele2 19

// Pinos dos encoders
const int pinoCLK1 = 35;
const int pinoDT1 = 14;
const int pinoCLK2 = 34;
const int pinoDT2 = 26;
const int pinoCLK3 = 13;
const int pinoDT3 = 27;
```

Inicialização de Componentes: No bloco *setup()* (ver Tabela 4), foram configurados os modos dos pinos (entrada/saída), inicializados os sensores, o display LCD, a comunicação serial e *Bluetooth*, além do estado inicial dos LEDs e buzzer.

Tabela 4: Configurações feitas no bloco setup().

```
void setup() {
// Inicializa a comunicação I2C para o LCD
Wire.begin(21, 22);
lcd.begin(16, 2); // Inicializa o LCD I2C
lcd.backlight(); // Liga o backlight do LCD

// Define os pinos como entrada
pinMode(pinoCLK1, INPUT);
pinMode(pinoDT1, INPUT);
pinMode(pinoCLK2, INPUT);
pinMode(pinoDT2, INPUT);
pinMode(pinoCLK3, INPUT);
pinMode(pinoDT3, INPUT);

// Inicializa as variáveis de posição dos encoders
ultPosicao1 = digitalRead(pinoCLK1);
ultPosicao2 = digitalRead(pinoCLK2);
ultPosicao3 = digitalRead(pinoCLK3);

// Inicializa os sensores e detecta seus endereços
iniciarSensores();

Serial.begin(9600);
SerialBT.begin("UaiGelô");

pinMode(rele1, OUTPUT);
pinMode(rele2, OUTPUT);
digitalWrite(rele1, LOW);
digitalWrite(rele2, LOW);

pinMode(encoderButton1, INPUT_PULLUP);
pinMode(encoderButton, INPUT_PULLUP); // Configura o botão do encoder

// Configura os pinos do LED RGB
pinMode(ledRed, OUTPUT);
pinMode(ledGreen, OUTPUT);
pinMode(ledBlue, OUTPUT);

// Configuração inicial dos pinos
pinMode(buzzerPin, OUTPUT);
pinMode(ledComum, OUTPUT);
pinMode(ledComum1, OUTPUT);

// Configura o estado inicial
digitalWrite(ledComum, HIGH); // Ativa o LED do comando '8'
noTone(buzzerPin);           // Buzzer inicialmente desligado
digitalWrite(ledComum1, LOW); // Garante que o LED do comando '9' esteja apagado

// Inicializa a variável de estado do botão
estadoAnteriorBotao = digitalRead(encoderButton);
estadoAnteriorEncoderBotao = digitalRead(encoderButton);
}
```

Leitura dos *Encoders*: Três *encoders* rotativos são utilizados para definir os limites de temperatura de alarme para os sensores. O código realiza a leitura dos sinais CLK (*Clock*) e DT (*Data*) com lógica de *debounce*, que evita leituras múltiplas causadas por oscilações mecânicas nos contatos do encoder, garantindo maior precisão e estabilidade no controle. A importância da técnica de *debounce* para a confiabilidade de sistemas embarcados é amplamente reconhecida, como destaca Hanashiro (2022).

Modos de Operação (*Watch* e *Control*): O sistema possui dois modos alternáveis via botão ou comando *Bluetooth*:

Modo *Watch*: exibe sequencialmente a temperatura de cada sensor e verifica se o valor está abaixo do limite definido. Se estiver, ativa alarme sonoro (*buzzer*) e visual (LED RGB). Na Tabela 5 podemos ver a parte responsável pela implementação do modo *Watch*.

Tabela 5: Implementação do modo *Watch*

```
// Modo 1: exibe todos os sensores
if (temperaturaMedia != -127.00) {
  exibirTemperaturaLCD(temperaturaMedia, tempLimite, sensorLabel);
} else {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(sensorLabel);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Desconectado");
}

// Verifica alarme
if (!md2 && tempLimite > temperaturaMedia && temperaturaMedia != -127.00) {
  if (estadoBuzzer) {
    tone(buzzerPin, 1000);
  }
}

switch (currentSensor) {
  case 0:
    digitalWrite(ledRed, HIGH);
    digitalWrite(ledGreen, LOW);
    digitalWrite(ledBlue, LOW);
    break;

  case 1:
    digitalWrite(ledRed, LOW);
    digitalWrite(ledGreen, HIGH);
    digitalWrite(ledBlue, LOW);
    break;

  case 2:
    digitalWrite(ledRed, LOW);
    digitalWrite(ledGreen, LOW);
    digitalWrite(ledBlue, HIGH);
    break;
}
} else {
  noTone(buzzerPin);
  digitalWrite(ledRed, LOW);
  digitalWrite(ledGreen, LOW);
  digitalWrite(ledBlue, LOW);
}
```

Modo *Control*: realiza o controle automático do refrigerador por meio de relé, utilizando a média das temperaturas dos sensores 1 e 3, com *histerese* configurável para evitar acionamentos excessivos. Na Tabela 6 podemos ver a construção do código responsável pelo modo *Control*.

Tabela 6: Implementação do modo Control

```

if (md2) {
  float temperatura1 = 0.0;
  float temperatura3 = 0.0;
  bool conectado1 = sensors1.getAddress(sensor1Address, 0);
  bool conectado3 = sensors3.getAddress(sensor3Address, 0);
  if (currentSensor == 0 || currentSensor == 2) {
    if (conectado1) {
      sensors1.requestTemperatures();
      temperatura1 = sensors1.getTempC(sensor1Address);
    } else {
      temperatura1 = -127.0;
    }
  }
  if (conectado3) {
    sensors3.requestTemperatures();
    temperatura3 = sensors3.getTempC(sensor3Address);
  } else {
    temperatura3 = -127.0;
  }
}
if (temperatura1 == -127.00 || temperatura3 == -127.00) {
  TM = -127.0; // <- Atualiza a variável TM corretamente
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Conecte o");
  lcd.setCursor(0, 1);
  if (temperatura1 == -127.00) {
    lcd.print("Sensor 1");
  } else {
    lcd.print("Sensor 3");
  }
  return;
}
temperaturaMedia = (temperatura1 + temperatura3) / 2.0;
TM = temperaturaMedia;
tempLimite = contadorPos1;
exibirTemperaturaLCD(temperaturaMedia, tempLimite, "Temp. Media");
}
return; // Fim do modo 2

```

Comunicação *Bluetooth*: Através da biblioteca "BluetoothSerial", os valores de temperatura, limites e estados do sistema são enviados via *Bluetooth*, permitindo o monitoramento remoto por aplicativos móveis.

Alerta Sonoro e Visual: O alarme é ativado quando a temperatura medida está abaixo do limite configurado. Um *buzzer* e um LED RGB sinalizam o evento. Dois LEDs comuns indicam o estado geral do sistema e as condições de alarme.

Mensagens e Exibição no LCD: O display LCD 16x2 com interface I2C apresenta em tempo real as temperaturas lidas, os limites de alarme e mensagens informativas como mudança de modo ou desconexão de sensores.

Controle com *histerese*: Para o Modo *Control*, foi implementado um controle de *histerese* ajustável via *Bluetooth*, garantindo estabilidade no acionamento dos relés e protegendo o compressor contra acionamentos frequentes.

Reconhecimento de Sensores: O código realiza verificações periódicas para identificar se os sensores estão devidamente conectados. Quando um sensor está desconectado, o sistema interpreta a leitura como -127.00°C — valor padrão retornado pela biblioteca

DallasTemperature nesse caso. Com base nisso, o LCD exibe automaticamente a mensagem indicando que o sensor correspondente está desconectado, conforme ilustrado na Tabela 7. Essa funcionalidade contribui para a robustez e confiabilidade do sistema, permitindo identificar falhas de conexão em tempo real.

Tabela 7: Função responsável por exibir se o sensor está conectado

```
if (temperaturaMedia != -127.00) {  
    exibirTemperaturaLCD(temperaturaMedia, tempLimite, sensorLabel);  
} else {  
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print(sensorLabel);  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("Desconectado");  
}
```

3.2.3 Diagrama Elétrico

O circuito desenvolvido tem como função integrar todos os componentes do sistema de monitoramento e controle de temperatura, permitindo a comunicação entre os sensores, o microcontrolador ESP32, os atuadores e a interface de visualização. Ele foi projetado no AutoCAD para garantir clareza nas conexões elétricas e facilitar a montagem do protótipo físico. A disposição dos elementos foi organizada de forma a assegurar a correta leitura das temperaturas, o acionamento dos relés para controle do refrigerador, a sinalização visual e sonora por meio de LEDs RGB e *buzzers*, bem como a interação do usuário por meio dos *encoders*, do display LCD e do aplicativo *Bluetooth*, possibilitando ajustes e monitoramento remoto.

Na Figura 19 é apresentado o diagrama de ligação do ESP32 com os periféricos, incluindo as portas RJ45, responsáveis pela comunicação com os sensores, a conexão com o módulo relé e demais periféricos. Esse diagrama facilita a identificação e compreensão das conexões realizadas no protótipo.

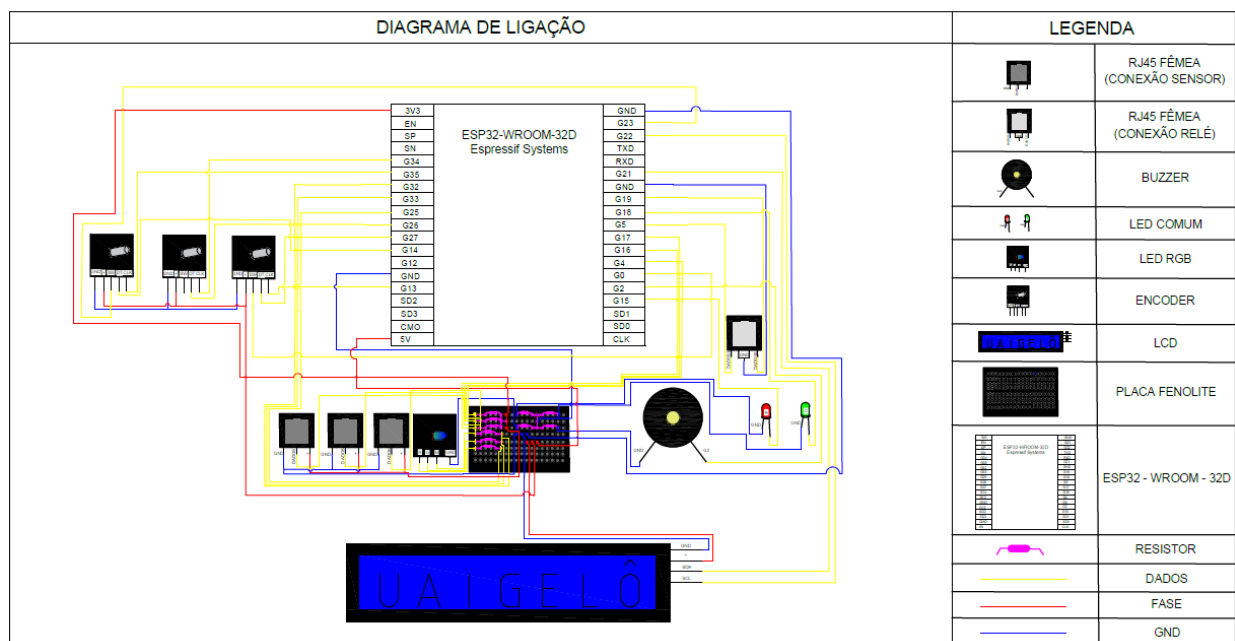


Figura 19: Diagrama de ligação interna do sistema UaiGelô.

Para manter a polarização adequada dos sensores, LEDs, LED RGB e *buzzer*, foram utilizados resistores. No caso dos sensores de temperatura DS18B20, empregaram-se resistores de 4,7 k Ω , conforme recomendação do fabricante, garantindo a estabilidade e a confiabilidade na leitura dos dados.

Ao final da etapa de montagem e testes, foi confeccionada uma case personalizada para abrigar o ESP32 (ver Figura 20) e os demais componentes eletrônicos do sistema. Essa estrutura foi projetada para garantir organização, proteção física e melhor acabamento ao protótipo final, facilitando o manuseio e a integração com os sensores, *encoders*, display LCD e módulo de relé.

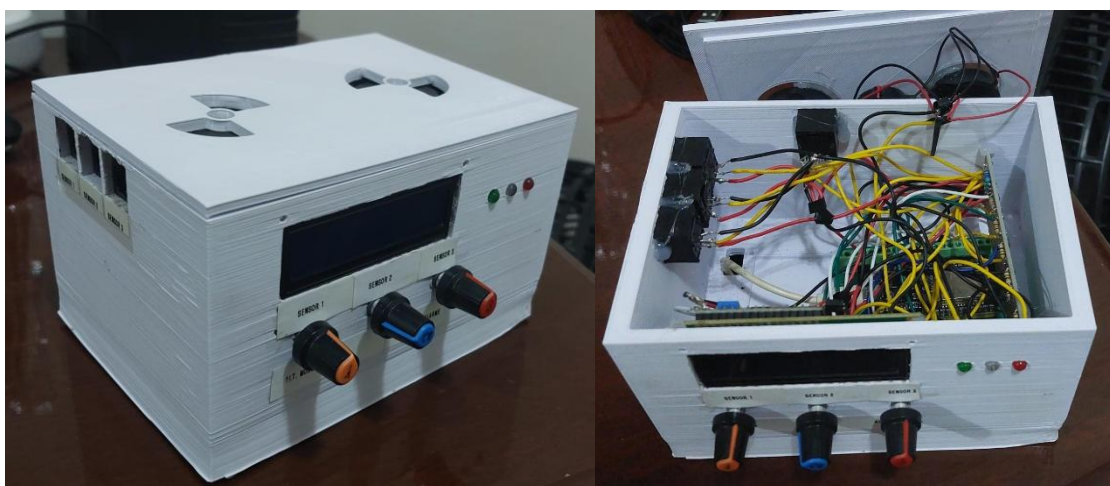


Figura 20: Case montada com o ESP32 e os componentes do sistema UaiGelô.

3.2.4 Diagrama de Potência

O diagrama de potência, ilustrado na Figura 21, apresenta a forma como o sistema embarcado *UaiGelô* interage com os componentes de alimentação e controle do refrigerador. Esse diagrama foi desenvolvido no AutoCAD com o intuito de representar de maneira clara e objetiva a ligação entre o circuito de controle, os módulos de relés, a fonte de alimentação AC/DC e o sistema de refrigeração.

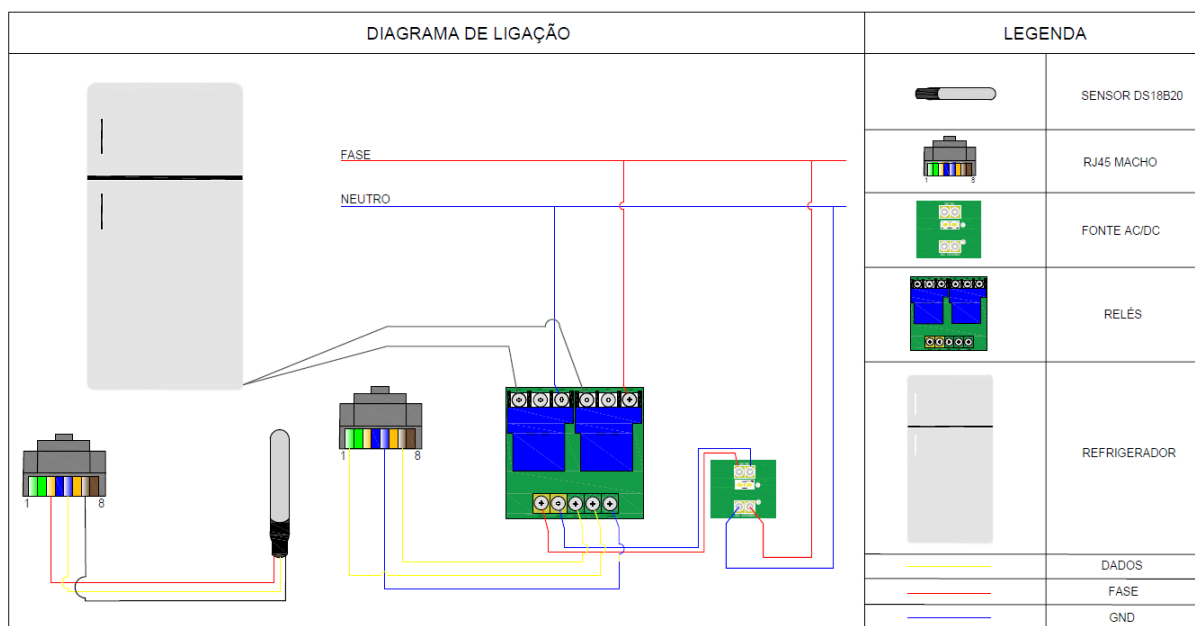


Figura 21: Diagrama de ligação de potência do sistema *UaiGelô*.

O módulo de relés é responsável pelo acionamento do compressor da geladeira, atuando como elemento de interface entre o circuito de baixa tensão em corrente contínua (CC), controlado pelo ESP32, e o circuito de corrente alternada (CA) responsável pela alimentação do refrigerador. A fonte AC/DC, com entrada de 127/220 Vca e saída de 5 Vcc, realiza a conversão da tensão da rede elétrica para níveis compatíveis com a operação dos relés, assegurando estabilidade e segurança ao sistema.

Além disso, observa-se a utilização de conectores RJ45 macho, que facilitam a conexão entre a placa principal e os sensores DS18B20, bem como a ligação com o módulo de relés. Essa padronização das conexões permite uma montagem mais organizada e reduz o risco de erros durante a instalação. O diagrama também indica a distinção entre os condutores de fase, neutro e terra, assegurando o correto dimensionamento e a proteção elétrica do sistema.

Após o desenvolvimento do diagrama de potência, foi realizada a montagem prática do circuito, conforme o esquema apresentado anteriormente. O sistema foi montado em uma caixa de passagem para sistema de CFTV (Circuito Fechado de Televisão), utilizando cabos de 2,5 mm² com 0,5m de comprimento e tomadas macho e fêmea de 20 A, dimensionadas para suportar a corrente máxima de operação, que é de até 20 A. Foram empregados relés de 30 A, configurados de forma sobre dimensionados em relação à corrente de trabalho do circuito, o que aumenta a confiabilidade e a vida útil dos componentes durante o acionamento do compressor do refrigerador.

A alimentação dos relés é feita por uma fonte AC/DC com especificação de entrada de 100–240 V~ (50–60 Hz) 0,5 A e saída de 5 V – 2 A. Essa fonte é conectada em paralelo à tomada macho que alimenta o sistema diretamente da rede elétrica, fornecendo energia estável e isolada para o circuito de controle dos relés. Essa configuração garante que o circuito de potência opere de forma segura e eficiente, isolando o microcontrolador e os sinais de controle do circuito de potência em corrente alternada (CA).

As Figuras 22, 23 e 24 a seguir apresentam a montagem física do circuito de potência, destacando a disposição dos componentes, o cabeamento e as conexões entre os módulos de relé, a fonte de alimentação e o sistema UaiGelô através do conector RJ45.



Figura 22: Case responsável por abrigar os relés e fonte de alimentação.



Figura 23: Visão interna da case.



Figura 24: Tomadas de 20A.

3.2.5 Anel de fixação do sensor

Para garantir a correta fixação do sensor DS18B20 em superfícies como latas, garrafas ou outros recipientes, foi necessário desenvolver um dispositivo que assegurasse tanto o contato firme do sensor com o objeto quanto o isolamento térmico em relação ao ambiente externo. Essa solução é fundamental para que a leitura da temperatura represente fielmente o estado térmico da bebida ou material monitorado, evitando interferências provocadas pelo ar ao redor.

Para isso, foi projetado um anel de borracha com manta térmica interna, responsável por acomodar o sensor e isolar ao máximo a influência da temperatura ambiente. A manta térmica foi posicionada exatamente na região onde o sensor é encaixado, assegurando que a medição seja realizada diretamente na superfície do objeto.

A borracha utilizada na fabricação do anel foi a borracha de silicone azul de alta flexibilidade da Uppertrend, comercializada em estado líquido e curada mediante a adição de catalisador. Seguindo as especificações do fabricante, foram adicionados 3% de catalisador em relação à massa total da borracha para que, após a cura, o material adquirisse resistência, firmeza e flexibilidade adequadas ao uso.

Para a produção do molde do anel, foram utilizados materiais simples e de fácil manipulação: um cano de PVC (Policloreto de Vinila) de 100 mm, um copo plástico de 60 mm de diâmetro e uma base plana de madeira. Conforme mostrado na Figura 25, o cano de PVC (Policloreto de Vinila) foi cortado longitudinalmente para facilitar o desmolde. A peça foi posteriormente posicionada sobre a madeira e vedada com cola quente tanto na área do corte quanto na base, evitando vazamento do material líquido durante a cura.



Figura 25: Cano de PVC de 100 mm cortado e fixado à base de madeira com cola quente para formar o molde

Na etapa seguinte, apresentada na Figura 26, o copo plástico foi centralizado dentro do cano de PVC (Policloreto de Vinila) e fixado à madeira com cola quente, garantindo que nenhuma parte da mistura pudesse se infiltrar por baixo da peça. Esse copo atuou como parte interna do molde, definindo o diâmetro interno do anel.



Figura 26: Copo plástico centralizado e fixado na base, formando o molde interno que definirá o diâmetro do anel

Com o molde montado, foi calculada a quantidade necessária de borracha para atingir uma espessura aproximada de 40 mm e altura de 60 mm, resultando em um volume que exigiu 300 g de borracha líquida. Como mostrado na Figura 27, uma vasilha plástica de 12,5 g foi utilizada na balança, tendo sua tara descontada antes da medição do material.



Figura 27: Pesagem do recipiente, tara ajustada e medição de 300 g de borracha de silicone azul para preparo da mistura do anel

Para medir a quantidade correta de catalisador (3% da massa total), foi necessário o uso de uma balança de maior precisão, conforme ilustrado na Figura 28. Utilizando outra vasilha plástica, com tara registrada em 2,1 g, foram pesados 9 g de catalisador, correspondentes aos 3% de catalisador para os 300 g de borracha.



Figura 28: Pesagem do recipiente, tara ajustada e medição de 9 g de catalisador para preparo da mistura do anel.

Após as pesagens, os dois componentes foram misturados até formar uma solução totalmente homogênea. Em seguida, a mistura foi despejada no molde, como mostrado na Figura 29, permanecendo em repouso até a cura completa e obtenção do anel de borracha final.



Figura 29: Mistura de borracha de silicone já homogênea despejada no molde para a formação do anel

Após o período de cura de 12 horas, o molde pôde ser aberto com facilidade devido ao corte longitudinal previamente realizado no cano de PVC (Policloreto de Vinila). A remoção do copo plástico interno também ocorreu sem dificuldades, revelando o anel de borracha completamente formado, com espessura uniforme e superfície lisa. O resultado final (ver Figura 30) foi um anel resistente, flexível e devidamente dimensionado para acomodar o sensor DS18B20 com firmeza, permitindo seu encaixe seguro em latas, garrafas ou outros recipientes. Esse componente garante um excelente contato térmico entre o sensor e a superfície do objeto monitorado, além de proporcionar isolamento adequado contra interferências da temperatura ambiente, cumprindo plenamente o objetivo do projeto.

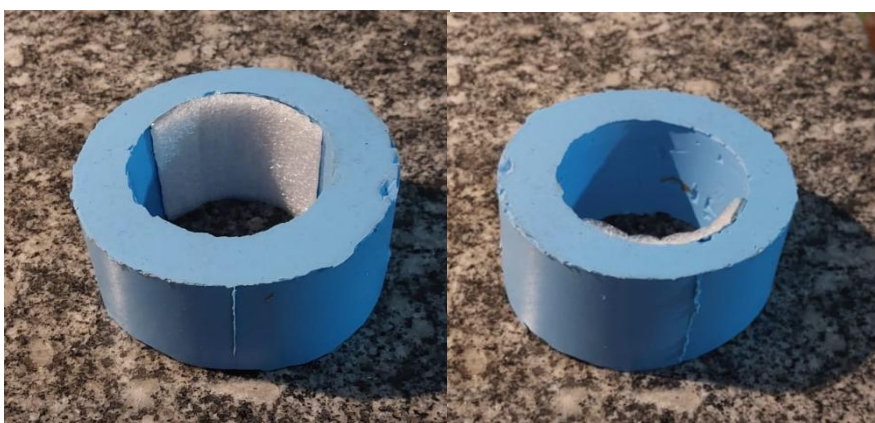


Figura 30: Molde aberto após o processo de cura, revelando o anel de borracha formado com espessura uniforme

3.2.6 Desenvolvimento da fita condutora para passagem do cabo pela porta da geladeira

Para possibilitar a utilização do sistema de monitoramento com os sensores posicionados no interior do refrigerador, tornou-se necessário desenvolver uma solução que permitisse a passagem do cabo do sensor pela porta da geladeira sem comprometer sua vedação térmica. A vedação adequada é fundamental para evitar trocas térmicas com o ambiente externo, as quais poderiam interferir diretamente na eficiência do controle de temperatura e na precisão das medições realizadas pelo sistema.

Para atender a esse requisito, foi desenvolvida uma fita condutora adaptada (ver Figura 31), capaz de conduzir o sinal elétrico dos sensores e, ao mesmo tempo, manter o isolamento térmico do refrigerador. A estrutura da fita foi projetada para ser fina o suficiente para se moldar ao contorno da borracha de vedação da porta, evitando frestas que pudessem permitir a entrada de ar externo.

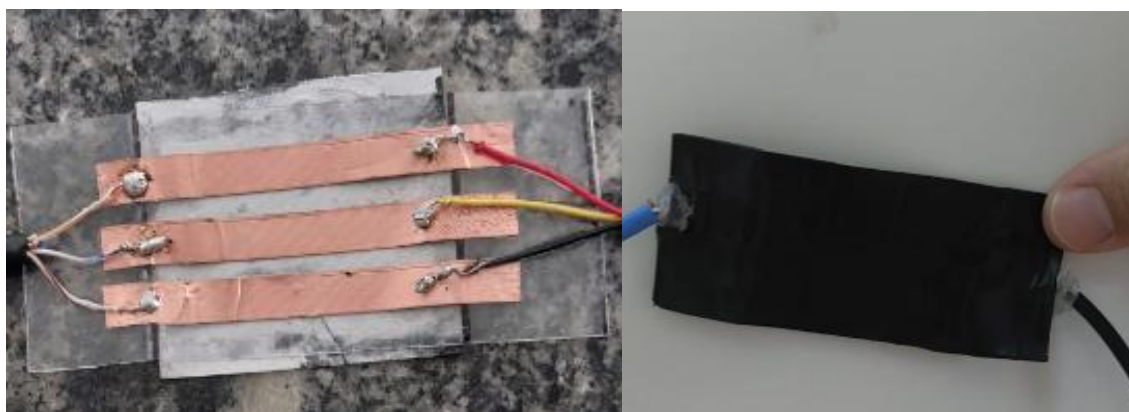


Figura 31: Fita condutora montada para passagem do cabo pela porta da geladeira

Para a confecção da fita condutora, foram utilizados materiais simples e de fácil obtenção: uma lâmina plástica retangular como base estrutural, fita adesiva de cobre de 7 mm para a condução elétrica do sinal, fita isolante para proteção mecânica e isolamento dos condutores, além de um ímã de neodímio para garantir a fixação da fita à estrutura metálica da geladeira. A lâmina plástica atuou como suporte rígido para a fita de cobre, enquanto a fita isolante protegeu as trilhas condutoras contra curtos-circuitos e danos mecânicos. O ímã de neodímio da Figura 32 permitiu a fixação firme, assegurando estabilidade durante o uso sem a necessidade de perfurações ou modificações permanentes na geladeira.



Figura 32: Detalhe da fixação do ímã de neodímio na fita condutora

Essa solução mostrou-se eficiente durante os testes práticos, uma vez que foi possível manter o sensor em operação contínua no interior do refrigerador com a porta completamente fechada como pode ser visto na Figura 33, preservando a estabilidade térmica do sistema e garantindo a confiabilidade das leituras realizadas.



Figura 33: Fita condutora instalada na porta do refrigerador para passagem do cabo do sensor

3.2.7 Aplicativo de Monitoramento e Controle

Para complementar o sistema embarcado desenvolvido, foi criado um aplicativo móvel com o objetivo de possibilitar o monitoramento remoto e o ajuste dos parâmetros de temperatura do sistema UaiGelô. O aplicativo foi desenvolvido utilizando a plataforma MIT App Inventor 2, uma ferramenta criada pelo Massachusetts *Institute of Technology* (MIT) que permite o desenvolvimento de aplicativos Android de forma visual e intuitiva (MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2025). Ele permite a criação de aplicações Android por meio de programação em blocos visuais, como pode ser visto na Figura 34, facilitando o processo de prototipagem e integração com sistemas embarcados.

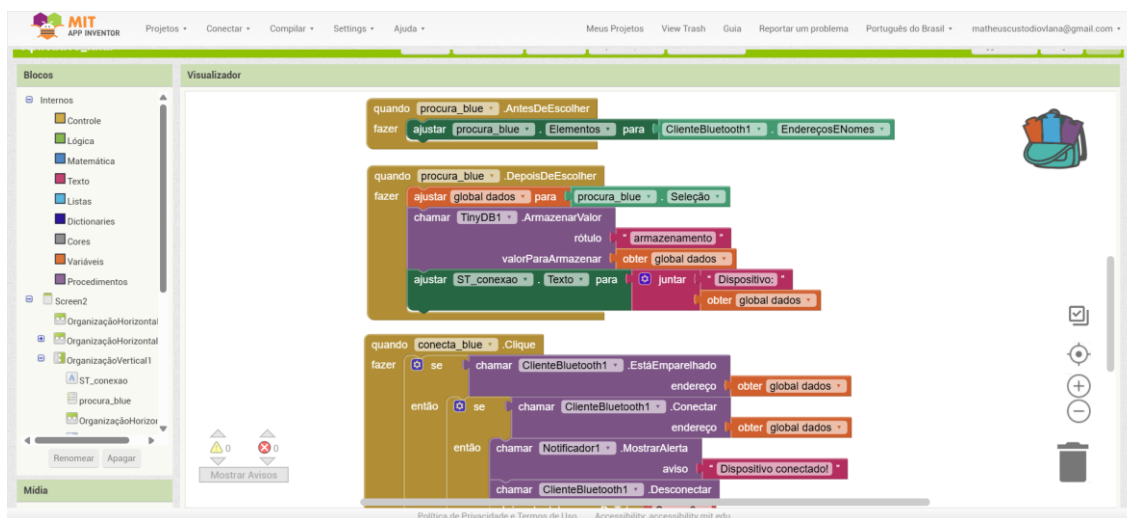


Figura 34: Programação em blocos no MIT App Inventor 2 para conexão Bluetooth entre o aplicativo UaiGelô e o ESP32

A interface do aplicativo foi planejada de forma simples e intuitiva, permitindo ao usuário visualizar, em tempo real, as temperaturas medidas pelos sensores, bem como os valores de alarme configurados no ESP32, como mostra os prints na Figura 35. Por meio da conexão

Bluetooth, o aplicativo realiza a comunicação bidirecional com o microcontrolador: recebe dados de temperatura e estado do sistema, e envia comandos de controle, como alteração de limites de alarme, mudança de modo de operação (*Watch* ou *Control*) e ativação ou desativação do alarme sonoro.

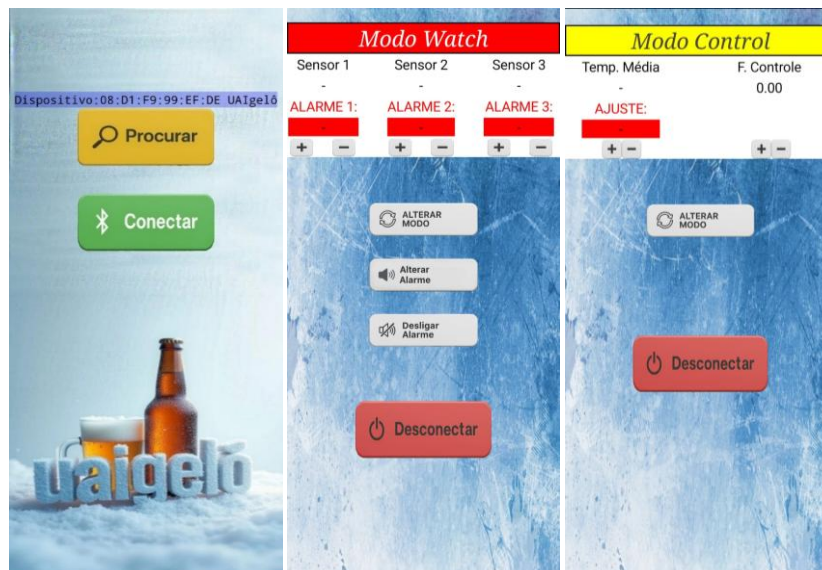


Figura 35: Telas principais do aplicativo UaiGelô desenvolvidas no MIT App Inventor 2: conexão Bluetooth, modo Watch e modo Control.

A estrutura do aplicativo é composta por blocos de programação lógicos que gerenciam a conexão *Bluetooth* e tratam os dados recebidos do ESP32, atualizando automaticamente as informações exibidas na tela. A utilização do MIT App Inventor 2 proporcionou uma interface de fácil customização, com botões, indicadores de temperatura e campos de configuração claramente identificados.

Entre as principais funcionalidades implementadas, destacam-se:

- Exibição em tempo real das temperaturas lidas pelos sensores DS18B20;
- Indicação visual do estado de cada sensor (ativo, inativo ou em alarme);
- Ajuste remoto dos limites de temperatura e da *histerese*;
- Seleção do modo de operação do sistema (“*Watch*” ou “*Control*”);
- Envio de comandos de controle ao ESP32 por meio de interface amigável;
- Emissão de alerta no dispositivo móvel, com vibração e som opcional, sempre que algum sensor ultrapassa o limite de temperatura configurado.

Essa funcionalidade de notificação imediata aumenta a confiabilidade do sistema, permitindo que o usuário seja informado em tempo real sobre qualquer variação crítica de temperatura, mesmo que esteja distante do equipamento monitorado, dentro do alcance da comunicação Bluetooth, que pode atingir aproximadamente 10 metros em condições ideais, sem a presença de obstáculos.

Com a integração do aplicativo ao sistema UaiGelô, o usuário passou a contar com uma ferramenta móvel de monitoramento e controle inteligente, que amplia significativamente a autonomia e a praticidade no uso do protótipo. Essa solução reforça o caráter inovador do projeto, demonstrando a aplicação de conceitos de Internet das Coisas (IoT) e automação residencial na gestão térmica de equipamentos de refrigeração convencionais.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os testes realizados no sistema UaiGelô, com o objetivo de validar seu funcionamento, precisão e confiabilidade em diferentes condições de operação. Os ensaios foram organizados de forma a avaliar aspectos fundamentais do sistema, incluindo a precisão dos sensores de temperatura, a influência do isolamento térmico nas medições, o desempenho do controle automático do compressor no modo *Control* e o funcionamento do monitoramento e dos alertas no modo *Watch*.

A Tabela 8 apresenta um resumo dos testes realizados e seus respectivos objetivos, com a finalidade de estruturar a apresentação dos resultados e facilitar a compreensão do leitor ao longo do capítulo.

Tabela 8: Resumo dos testes realizados no sistema UaiGelô e seus respectivos objetivos.

Teste	Descrição	Objetivo
4.1	Validação da precisão dos sensores de temperatura	Verificar a exatidão das medições em relação a uma temperatura de referência conhecida.
4.2	Teste de isolamento térmico com manta metalizada	Avaliar a influência do isolamento na estabilidade e resposta térmica dos sensores.
4.3	Teste do modo Control	Avaliar o desempenho do sistema de controle do compressor, verificando a atuação do relé em função da temperatura e a eficácia da <i>histerese</i> na redução de chaveamentos excessivos.
4.4	Teste do modo Watch	Validar o funcionamento do sistema de monitoramento em tempo real, verificando o acionamento dos alertas visuais, sonoros e via aplicativo quando os limites de temperatura são atingidos.

4.1 Teste de Validação da Precisão dos Sensores

Para validar a precisão dos sensores de temperatura utilizados no sistema, foi realizado um teste simples em condições controladas. Um dos sensores foi colocado dentro do freezer de uma geladeira doméstica, cuja temperatura estava previamente ajustada para $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, como podemos ver na Figura 36.



Figura 36: Valor da temperatura do freezer.

Durante o experimento, observou-se que o valor medido pelo sensor estabilizou em $-16,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ver Figura 37), demonstrando uma excelente correspondência com a temperatura de referência. Essa diferença de apenas $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ está dentro da margem de erro especificada pelo fabricante, de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, confirmando assim a precisão e confiabilidade das medições realizadas pelo sensor.



Figura 37: Valor medido pelo sensor dentro do freezer.

4.2 Teste de Isolamento Térmico com Manta Metalizada

Com o objetivo de avaliar a eficiência da manta térmica metalizada na redução da troca de calor entre o ambiente e o sensor de temperatura, foi realizado um experimento comparativo utilizando duas latas metálicas com condições iniciais idênticas.

Em cada lata foi inserido um sensor de temperatura, ver Figura 38:

- Sensor 1: envolto por uma manta térmica metalizada dentro de um anel de borracha;
- Sensor 3: inserido apenas com o anel de borracha, sem o uso da manta.



Figura 38: Sensor da esquerda com manta térmica/ sensor da direita sem manta térmica

A temperatura inicial das latas era de 8,38 °C (Sensor 1) e 8,63 °C (Sensor 3). O sistema foi configurado com um limite de alarme de -1 °C, como pode ser visto na Figura 39.



Figura 39: Temperatura inicial das duas latas.

Durante o resfriamento, observou-se que o Sensor 3 atingiu o limite primeiro, acionando o alarme ao registrar -1,06 °C, enquanto o Sensor 1 ainda apresentava 0,25 °C, como pode ser visto na Figura 40.

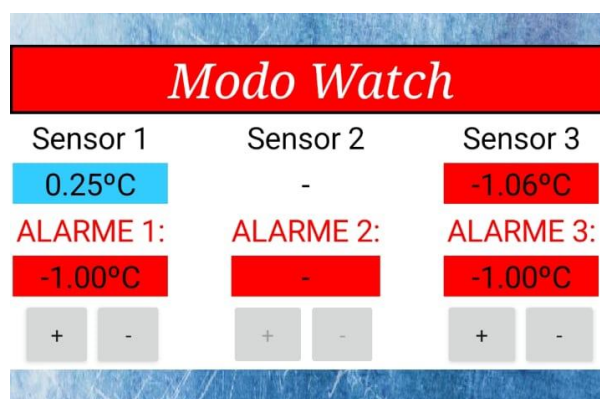


Figura 40: Momento em que o sensor 3 aciona o alarme.

O teste prosseguiu até que ambos os sensores atingissem o limite de temperatura. Quando o Sensor 1 chegou a -1,00 °C, o Sensor 3 já indicava -2,12 °C, como pode ser visto na Figura 41, evidenciando que o isolamento térmico proporcionado pela manta retardou a troca de calor entre o ambiente e o sensor.

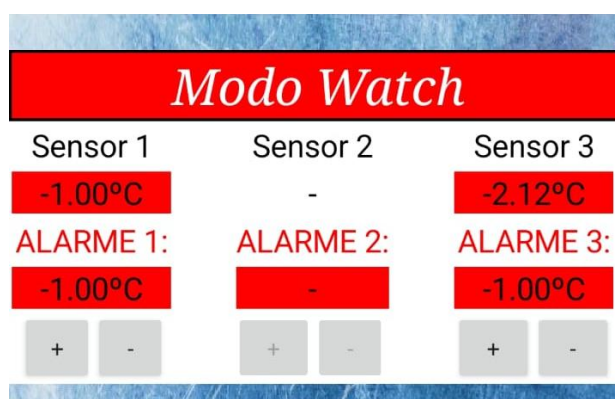


Figura 41: Momento em que o sensor 1 aciona o alarme

Esses resultados (ver Tabela 8) demonstram que o uso da manta térmica metalizada contribui significativamente para reduzir a influência do ambiente nas medições, tornando-as mais estáveis e representativas da temperatura real do objeto monitorado.

Tabela 9: Comparativo dos resultados da manta térmica.

Sensor	Tipo de Isolamento	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura no Alarme (°C)	Temperatura Final (°C)	Diferença Final (°C)
Sensor 1	Manta térmica + anel de borracha	8,38	0,25	-1,00	9,38
Sensor 3	Apenas anel de borracha	8,63	-1,06	-2,12	10,75

4.3 Teste do modo *Control*

Foi realizado o primeiro teste com o modo *Watch*, responsável por controlar a temperatura média dos sensores 1 e 3. A partir do valor de temperatura ajustado, o relé é acionado para realizar o ligamento e desligamento automático do refrigerador, de acordo com a variação térmica configurada. Esse modo também conta com *histerese*, que impede que o relé alterne constantemente de estado diante de pequenas flutuações de temperatura, garantindo maior estabilidade e preservação do sistema.

Para o ensaio, foram colocadas duas latas dentro do congelador de uma geladeira convencional sem sistema *frost free*, conforme mostrado na Figura 42, cada uma contendo um sensor de temperatura.



Figura 42: Momento em que as latas foram passadas para o congelador.

O teste teve início às 19 horas, sendo que as latas estavam inicialmente em uma temperatura média de 6,37 °C, conforme registrado na Figura 43, momento em que foram transferidas para o congelador.



Figura 43: Temperatura inicial de quando as latas foram passadas para o congelador.

Após uma hora de funcionamento, o sistema já se aproximava da temperatura limite de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, mantendo o relé acionado e conduzindo corrente elétrica. Esse comportamento pode ser observado na Figura 44, que mostra a temperatura atual do sistema e a corrente medida pelo amperímetro.



Figura 44: Temperatura média após 60 minutos.

Decorridos 90 minutos de teste, o sistema atingiu a temperatura limite e o relé abriu o circuito, interrompendo o funcionamento do compressor para manter a temperatura ajustada. Na Figura 45, observa-se que a temperatura registrada era de $-0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, como o circuito estava aberto, o amperímetro indicava corrente igual a zero.



Figura 45: Temperatura média após 90 minutos e abertura dos relés.

Inicialmente, a *histerese* estava ajustado em $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que fazia com que o relé reagisse a qualquer mínima variação de temperatura. Em seguida, o parâmetro foi ajustado para $0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$, permitindo uma variação de $\pm 0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes de qualquer atuação do relé. Essa configuração foi realizada diretamente pelo aplicativo, cuja interface é apresentada na Figura 46, onde se observa o valor ajustado da *histerese*.

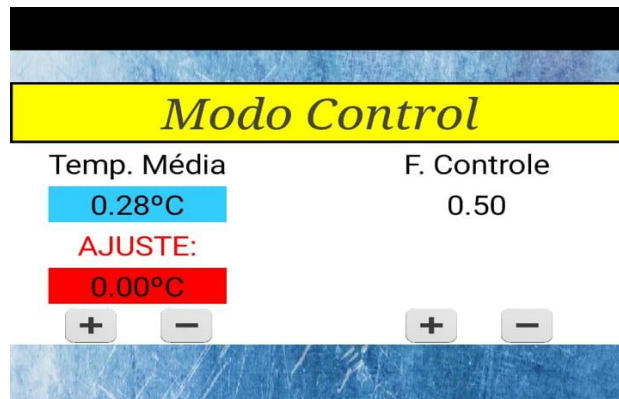


Figura 46: Temperatura exibida pelo aplicativo e ajuste da histerese.

Durante o experimento, as latas foram temporariamente retiradas do congelador para verificar se o conteúdo havia congelado ou permanecia em estado líquido. Nesse momento, a porta da geladeira permaneceu aberta para simular uma situação de uso real, como a abertura do refrigerador para retirada de um produto. Na sequência, conforme ilustrado na Figura 47, o relé voltou a fechar o circuito, restabelecendo a condução de corrente observada pelo amperímetro, pois a temperatura no interior do refrigerador havia atingido 0,94 °C, ultrapassando o limite configurado e o valor da *histerese*.



Figura 47: Temperatura medida após a geladeira permanecer aberta.

O sistema permaneceu em operação contínua durante toda a noite. Às 7 horas do dia seguinte, verificou-se que o circuito estava aberto, com o sistema estabilizado em $-0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$, dentro da faixa permitida, como pode ser visto na Figura 48.



Figura 48: Temperatura medida após 12 horas de teste.

As latas mantinham-se intactas e com o conteúdo ainda em estado líquido, conforme mostrado na Figura 49, demonstrando que o sistema de controle manteve a temperatura estável durante todo o período de teste.



Figura 49: Latas intactas após 12 horas de teste.

O sistema UaiGelô operou por mais de 24 horas. Às 18 horas, foi adicionado um copo de 200 ml de água (Figura 50) e a temperatura de ajuste foi alterada de 0 °C para -1 °C. O objetivo era verificar se o sistema estaria próximo à temperatura de solidificação da água, permitindo observar o início do congelamento. Esperava-se que a água começasse a congelar na superfície em poucas horas.



Figura 50: Copo de 200 ml adicionado ao congelador para teste de congelamento.

Após aproximadamente 2 horas, o copo foi retirado, apresentando uma fina camada de gelo na superfície, conforme ilustrado na Figura 51.



Figura 51: Início da solidificação da água após 2 horas.

Uma das latas previamente colocadas no congelador foi retirada em seguida. Antes da retirada, a temperatura interna do congelador foi registrada em $-1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 52).



Figura 52: Temperatura interna do congelador registrada antes da retirada das latas ($-1,25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Uma das latas foi servida em um copo e, com o sensor no modo *Watch*, a temperatura estabilizou em $0,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 53).



Figura 53: Temperatura da lata servida após estabilização ($0,69\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Em seguida, uma nova lata, na mesma temperatura inicial das anteriores, foi adicionada ao congelador e o sistema ajustado para -2°C . Após aproximadamente 2 horas, a lata inicial foi retirada, permanecendo em estado líquido e então foi registrado qual era a temperatura que o sistema estava medindo no momento, como pode ser visto na Figura 54.



Figura 54: Temperatura medida no momento da retirada da segunda lata.

Para o final do teste, os dois sensores foram inseridos na última lata. Após 1 hora, a lata foi retirada, ainda em estado líquido, e no momento o sistema registrava a temperatura de $-2,59^{\circ}\text{C}$, como é mostrado na Figura 55.



Figura 55: Última lata retirada, com temperatura de $-2,59^{\circ}\text{C}$ medida pelos sensores.

Por fim, o sistema UaiGelô foi desligado, mas a geladeira continuou funcionando via relé do modo *Control*, mantendo o funcionamento normal, como se estivesse conectada diretamente à tomada. Isso é evidenciado na Figura 56, onde o sistema desligado ainda permite a passagem de corrente.



Figura 56: Sistema UaiGelô desligado, mas geladeira funcionando via relé do modo *Control*.

4.4 Teste Individual de Monitoramento no Modo *Watch*

O modo *Watch* permite que até três latas ou garrafas sejam monitoradas simultaneamente, emitindo alertas sonoros e visuais diretamente pelo dispositivo UaiGelô, além de alertas sonoros e de vibração por meio do aplicativo móvel.

Para este teste, foi utilizado apenas o sensor 1, que foi acoplado a uma lata inicialmente em temperatura ambiente. Na Figura 57, é possível visualizar o sensor fixado à lata.



Figura 57: Sensor 1 acoplado à lata para o teste no modo *Watch*.

Em seguida, a lata foi colocada no congelador de uma geladeira com sistema *frost free*, ajustada para $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme mostrado na Figura 58.



Figura 58: Lata sendo colocada no congelador e temperatura ajustada no refrigerador.

Após certo tempo no congelador, a temperatura da lata começou a se aproximar do valor de referência ajustado, que era de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na Figura 59, observa-se que o sensor já registrava uma temperatura de $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 59: Temperatura registrada próxima do limite ajustado.

Quando o sensor atingiu a temperatura limite configurada, o dispositivo UaiGelô acionou automaticamente os *buzzer* e acendeu o LED RGB na cor vermelha, indicando que o sensor 1 havia atingido o valor programado de alarme. Simultaneamente, o aplicativo emitiu um alerta sonoro e vibração, confirmando a integração entre o hardware e a interface móvel. A Figura 60 ilustra o momento em que o sensor atingiu o limite e o LED RGB foi acionado.



Figura 60: Acionamento do LED RGB e buzzer ao atingir o limite de temperatura.

Posteriormente, a lata foi retirada do congelador e seu conteúdo foi servido em um copo, permitindo medir a temperatura direta do líquido. Como o copo estava em temperatura ambiente, ocorreu uma troca térmica entre o líquido e o recipiente, o que justificou a variação de aproximadamente 3 °C após o líquido ser transferido. Essa diferença pode ser observada na Figura 61, onde é possível visualizar a temperatura final medida após o processo de retirada.



Figura 61: Medição da temperatura do líquido após ser servido em copo.

Para a realização dos testes, foi utilizada cerveja do tipo lager, amplamente consumida no Brasil e que apresenta melhor aceitação quando servida em baixas temperaturas. De modo geral, esse tipo de cerveja possui uma faixa ideal de consumo entre aproximadamente 0 °C e 4 °C, conforme apresentado na Tabela 2. Considerando que o Brasil é um país de clima predominantemente tropical, com temperaturas ambientes frequentemente elevadas, observa-

se uma preferência cultural pelo consumo da bebida na menor temperatura possível dentro dos limites recomendados, de modo a proporcionar maior sensação de refrescância. Dessa forma, os testes foram conduzidos com o objetivo de atingir e manter temperaturas próximas de $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, sem ocasionar o congelamento do líquido.

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema UaiGelô possibilitou a criação de uma solução funcional e eficiente para o monitoramento e controle de temperatura em aplicações de refrigeração. O projeto integrou de forma satisfatória componentes eletrônicos, sensores de temperatura, módulos de controle e uma interface de comunicação com o usuário, resultando em um sistema embarcado confiável e de fácil operação.

Os testes realizados comprovaram o bom desempenho dos sensores de temperatura DS18B20, cuja precisão medida foi de aproximadamente $\pm 0,5$ °C, dentro das especificações do fabricante. O uso da manta térmica metalizada demonstrou melhoria significativa na estabilidade das medições, reduzindo a influência da temperatura ambiente sobre os sensores e garantindo maior fidelidade às condições reais do objeto monitorado.

No que se refere ao modo *Control*, os ensaios comprovaram a eficiência do controle automático de temperatura, permitindo o acionamento e desligamento do relé de forma precisa conforme a média das temperaturas medidas pelos sensores. O sistema apresentou comportamento estável, evitando oscilações desnecessárias no estado do relé graças à implementação da *histerese*, o que assegurou maior confiabilidade ao processo de comutação.

A integração entre o dispositivo físico e o aplicativo móvel mostrou-se plenamente funcional, oferecendo ao usuário alertas visuais, sonoros e por vibração, tanto no dispositivo quanto no aplicativo, reforçando a usabilidade e a segurança operacional.

Por fim, o conjunto de testes confirmou que o UaiGelô atende plenamente aos objetivos propostos, apresentando desempenho consistente, medições confiáveis e um sistema de controle térmico eficiente, capaz de ser aplicado em diferentes contextos de refrigeração e monitoramento de temperatura.

O sistema desenvolvido apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A distribuição térmica irregular dentro de geladeiras e *freezers*, que possuem zonas naturalmente mais frias ou mais quentes, pode influenciar a precisão do controle dependendo da posição dos sensores. Além disso, por se tratar de um protótipo ainda não industrial, montado com conexões manuais, uso de protoboard e case impresso em 3D, é possível que ocorram ruídos ou instabilidades elétricas que não estariam presentes em um produto final robusto. A *histerese* implementada, embora eficiente para evitar acionamentos repetitivos, opera de forma manual e não adaptativa, exigindo ajustes sempre que houver mudanças nas condições ambientais, como abertura frequente da porta ou variação da carga térmica interna. Também se destaca a limitação do *Bluetooth*, cujo alcance reduzido pode restringir o monitoramento à proximidade física do equipamento. Por fim, é importante ressaltar que os testes foram realizados em condições controladas, e o desempenho do sistema pode variar em ambientes extremamente frios, quentes ou sujeitos a maior oscilação térmica.

Como projeção de melhorias ou trabalhos futuros, sugere-se a implementação de comunicação sem fio entre os sensores e o UaiGelô, bem como entre os relés e o dispositivo, utilizando uma placa de comunicação *Bluetooth*. Essa abordagem permitiria reduzir significativamente a quantidade de fios, simplificando a instalação e aumentando a flexibilidade

do sistema, além de possibilitar maior mobilidade e integração com diferentes aplicações de monitoramento remoto. Além disso, a adoção de comunicação via rede *Wi-Fi* no aplicativo ampliaria consideravelmente o alcance da transmissão de dados, permitindo o monitoramento do sistema a distâncias muito maiores quando comparado ao *Bluetooth*, o que aumenta a praticidade e a versatilidade da solução.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, L. F. et al. Desenvolvimento de interface homem-máquina para sistemas embarcados utilizando display LCD e botões rotativos. *Revista Brasileira de Engenharia de Sistemas e Computação*, v. 8, n. 1, p. 23–34, 2019.

CERJEIRAS 369. Cervejeira Ambev: Guia Completo. Disponível em: <https://cervejeiras369.com.br/glossario/cervejeira-ambev-guia-completo/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

CERVEJA EM MALTE. Temperatura ideal da cerveja. 2021. Disponível em: <https://cervejaemalte.com.br/blog/temperatura-ideal-da-cerveja/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

CERVEJARIA NOI. Estupidamente gelada? Mimimi! Vamos falar sobre a temperatura da sua cerveja. Disponível em: <https://www.cervejarianoi.com.br/post/estupidamente-gelada-mimimi-vamos-falar-sobre-a-temperatura-da-sua-cerveja>. Acesso em: 29 jul. 2025.

DANFOSS. How a fridge works. Disponível em: <https://www.danfoss.com/pt-br/about-danfoss/our-businesses/cooling/the-fridge-how-it-works/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

ELECTRONICWINGS. LCD16x2 I2C Interfacing with ESP32. Disponível em: <https://www.electronicwings.com/esp32/lcd16x2-i2c-interfacing-with-esp32>. Acesso em: 23 jul. 2025.

FRIGELAR. Como regular a cervejeira. Blog Frigelar, 2023. Disponível em: <https://blog.frigelar.com.br/como-regular-a-cervejeira/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

HANASHIRO, Akira. O que é debounce e qual sua importância para a performance. TreinaWeb, 2022. Disponível em: <https://www.treinaweb.com.br/blog/o-que-e-debounce-e-qual-sua-importancia-para-a-performance>. Acesso em: 28 jul. 2025.

INSTITUTO DA CERVEJA BRASIL. Temperatura da cerveja: saiba qual a temperatura ideal para apreciar a bebida. 2021. Disponível em: <https://www.institutodacerveja.com.br/dicas/temperatura-da-cerveja-saiba-qual-a-temperatura-ideal-para-apreciar-a-bebida/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

KARLSSON, J.; JOHANSSON, A. Alarm management in industrial control systems: A review. *Journal of Process Control*, v. 65, p. 14–24, 2018.

KATSAROS, I. et al. Temperature control techniques for industrial applications. *International Journal of Industrial Electronics and Control*, v. 2, n. 3, p. 45–51, 2017.

LIMA, M. P. et al. Implementação de sistema de alarme para automação industrial. *Revista de Automação Industrial*, v. 12, n. 2, p. 56–62, 2021.

MAKERGUIDES. ESP32 with DS18B20 Temperature Sensor using Arduino IDE. Disponível em: <https://www.makerguides.com/esp32-ds18b20-digital-thermometer/>. Acesso em: 23 jul. 2025.

MAKERHERO. ESP32 – um grande aliado para o Maker IoT. 2020. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/esp32-um-grande-aliado-para-o-maker-iot/>. Acesso em: 17 nov. 2025.

MARQUES, A. S. et al. Desenvolvimento de sistema embarcado para controle de temperatura em processos industriais. Anais do Congresso Brasileiro de Automação, 2020.

MARTINS, F.; ALMEIDA, R. Controle automático de sistemas de refrigeração industrial. Revista de Engenharia Térmica, v. 14, n. 1, p. 12–19, 2020.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY. MIT App Inventor. Disponível em: <https://appinventor.mit.edu/>. Acesso em: 28 jul. 2025.

NIELSEN, J. Usability engineering. Academic Press, 1994.

OGATA, K. Modern Control Engineering. 5th ed. Pearson, 2010.

OPA BIER. Temperatura ideal para cerveja especial. Blog Opa Bier, 2022. Disponível em: <https://opabier.com.br/blog-opa-bier-abc-da-cerveja/temperatura-ideal-para-cerveja-especial/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

PAPO DE BAR. Temperatura ideal para uma cerveja. Disponível em: <https://www.papodebar.com/temperatura-ideal-para-uma-cerveja/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

PEREIRA, J. L. et al. Sistemas embarcados para automação industrial: desafios e soluções. Revista Brasileira de Engenharia de Automação, v. 7, n. 1, p. 40–50, 2019.

SANTOS, C. R.; SILVA, D. A.; PEREIRA, F. A. Utilização de sensores digitais DS18B20 para monitoramento térmico. Revista Eletrônica de Tecnologia e Engenharia, v. 6, n. 1, p. 100–110, 2018.

SILVA, M. C.; PEREIRA, R. J. Comunicação e aplicações do sensor digital DS18B20. Revista de Instrumentação e Automação, v. 5, n. 2, p. 50–59, 2019.

SILVA, T. et al. Controle de temperatura em sistemas de refrigeração com microcontroladores. Anais do Simpósio Brasileiro de Automação, 2017.

SUPERINTERESSANTE. A temperatura certa para cada tipo de cerveja. Abril, 2019. Disponível em: <https://super.abril.com.br/sociedade/a-temperatura-certa-para-cada-tipo-de-cerveja/>. Acesso em: 29 jul. 2025.

TANENBAUM, A. S.; WETHERALL, D. J. Sistemas embarcados: conceitos e aplicações. Editora Campus, 2015.

WOLLE’S ELEKTRONIKKISTE. Programming the ESP32 with Arduino Code. Disponível em: <https://wolles-elektronikkiste.de/en/programming-the-esp32-with-arduino-code>. Acesso em: 23 jul. 2025.