

# **SISTEMA AUTOMATIZADO PARA QUALIFICAÇÃO TÉRMICA**

**FRANCISCO RODRIGO MORENI DOS REIS**

**SALVADOR**

**2024**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DA BAHIA  
CAMPUS SALVADOR**

**FRANCISCO RODRIGO MORENI DOS REIS**

**SISTEMA AUTOMATIZADO  
PARA QUALIFICAÇÃO TÉRMICA**

**SALVADOR - BAHIA**

**2024**

**FRANCISCO RODRIGO MORENI DOS REIS**

## **SISTEMA AUTOMATIZADO PARA QUALIFICAÇÃO TÉRMICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Produtos, área de concentração em Projeto e Desenvolvimento Tecnologias/Produtos em Sistemas Biomédicos, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Antonio Gabriel Souza Almeida

Co Orientador: Handerson Jorge Dourado Leite

**SALVADOR**

**2024**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS  
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

R375s      Reis, Francisco Rodrigo Moreni dos

Sistema automatizado para qualificação térmica /  
Francisco Rodrigo Moreni dos Reis; orientador  
Antonio Gabriel Souza Almeida; coorientador  
Handerson Jorge Dourado Leite -- Salvador, 2024.

91 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Sistemas e Produtos) --  
Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Qualificação. 2. Temperatura. 3. Validação. 4.  
Iot. 5. Térmica. I. Almeida, Antonio Gabriel Souza,  
orient. II. Leite, Handerson Jorge Dourado,  
coorient. III. TÍTULO.

CDU 621.565

INSTITUTO FEDERAL DA BAHIA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E  
PRODUTOS – PPGESP

SISTEMA AUTOMATIZADO PARA QUALIFICAÇÃO TÉRMICA

FRANCISCO RODRIGO MORENI DOS REIS

Produto(s) Gerado(s): Relatório Descritivo Redação Patente

Orientador: Prof. Dr. Antonio Gabriel Souza Almeida  
Coorientador: Prof. Dr. Handerson Jorge Dourado Leite

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Prof. Dr. Antonio Gabriel Souza Almeida  
Orientador – Instituto Federal da Bahia (IFBA)

---

Prof. Dr. Handerson Jorge Dourado Leite  
Coorientador – Instituto Federal da Bahia (IFBA)

---

Profa. Dra. Luanda Kivia de Oliveira Rodrigues  
Membro Interno – Instituto Federal da Bahia (IFBA)

---

Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos  
Membro Externo – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial ( SENAI/CIMATEC)

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 24/04//2024.



Documento assinado eletronicamente por **ANTONIO GABRIEL SOUZA ALMEIDA, Docente Permanente**, em 25/04/2024, às 14:52, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **Alex Alisson Bandeira Santos, Usuário Externo**, em 25/04/2024, às 14:57, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **HANDERSON JORGE DOURADO LEITE, Professor Titular**, em 25/04/2024, às 15:13, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **LUANDA KIVIA DE OLIVEIRA RODRIGUES, Docente Permanente**, em 29/04/2024, às 20:22, conforme decreto nº 8.539/2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site [http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&acao\\_origem=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **3495809** e o código CRC **030ECF5A**.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta produção a Deus, à  
minha esposa Patrícia, minhas filhas  
Ana Cecília e Maria Thereza, à  
minha família, em especial minha mãe Martha e ao  
meu avô Francisco, aos  
amigos, aos Professores e ao IFBA, que  
me incentivaram e ajudaram na  
realização desse sonho.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me ajudado a superar os desafios, não apenas profissionais, mas também pessoais e emocionais e ter colocado em meu caminho pessoas que fizeram a diferença e contribuíram em várias maneiras para que pudesse chegar a este momento de conclusão e organização de ideias. Esse período foi marcado por um intenso aprendizado, pela troca de experiências e conhecimentos.

É importante destacar que o alto custo envolvido nessa jornada e as frequentes viagens de São Paulo à Salvador, muitas vezes distantes da minha família, foram aspectos desafiadores. Esses sacrifícios financeiros e a separação temporária daqueles que amo foram parte integrante de tudo isso.

Mesmo diante dessas dificuldades, agradeço imensamente à minha esposa Patrícia Cardozo Moreni pela contribuição intelectual e a toda minha família por seu apoio incondicional, compreensão e encorajamento ao longo desse percurso desafiador. Essa superação conjunta fortaleceu ainda mais nossos laços, tornando cada conquista compartilhada ainda mais significativa.

Agradeço ao professor e orientador Antônio Gabriel, cuja orientação e suporte contínuo foram fundamentais para a realização deste projeto. Sua sabedoria e orientação foram a luz guia na jornada de pesquisa e desenvolvimento.

Agradeço imensamente à equipe de desenvolvimento, especialmente ao amigo Anderson Rodrigues, cuja iniciativa e vasto conhecimento não apenas me inspirou, mas também foram cruciais na elaboração e aprovação do projeto na iniciativa Catalisa.

Minha gratidão estende-se também a Henrique Sandes e Rafael Requião, por sua colaboração excepcional e comprometimento que foram vitais para o sucesso deste projeto. Suas habilidades únicas e trabalho em equipe exemplar foram indispensáveis para alcançarmos os objetivos.

Um agradecimento especial ao professor Handerson, por sua co-orientação valiosa e por me encorajar a participar da iniciativa Catalisa. Seu apoio e orientação foram fundamentais não apenas para nossa participação no programa, mas também para nosso crescimento profissional e acadêmico.

Além disso, quero expressar nossa gratidão pelo apoio e conhecimento técnico excepcional da Adriana Oliveira, que desempenhou um papel crucial em nosso projeto. Sua experiência e orientação foram elementos-chave para o sucesso de nossa empreitada.

*A scientist who is also a human being  
cannot rest while knowledge which might  
be used to reduce suffering rests on the shelf.*

**Albert Sabin**

## RESUMO

O projeto trata do desenvolvimento de um produto para qualificação térmica de ambientes controlados, tais como: câmaras refrigeradas de armazenagem, caminhões refrigerados, armazéns com climatização, caixas térmicas de transporte, visando garantir o bom funcionamento de tais equipamentos e estruturas. Foi construído um protótipo eletrônico utilizando integração com *Open Hardware*, desenvolvimento de *firmware* de controle dos protótipos eletrônicos, para monitoramento dos parâmetros, exibição de dados em display, gerenciamento de energia da bateria e envio sem fio dos dados para um *smartdevice*, o qual faz e executa leitura dos dispositivos eletrônicos e executará o processamento da qualificação remota.

**Palavras-chave:** qualificação, temperatura, *validação*, *iot*, térmica

## **ABSTRACT**

The project deals with the development of a product for the thermal qualification of controlled environments, such as: refrigerated storage chambers, refrigerated trucks, air-conditioned warehouses, thermal transport boxes, in order to guarantee the proper functioning of such equipment and structures. An electronic prototype was built using Open Hardware integration, firmware was developed to control the electronic prototypes, monitor parameters, display data, manage battery power and send data wirelessly to a smartdevice, which reads the electronic devices and processes the remote qualification.

**Keywords:** qualification, temperature, validation, iot, thermal

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>18</b>
<b>3. MÉTODO .....</b>	<b>19</b>
3.1. Projeto Inicial .....	19
3.2. Projeto Informacional.....	20
3.3. Projeto Final .....	20
3.4. Construção dos protótipos .....	21
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
4.1. Projeto Inicial .....	23
4.1.1. Pesquisa de anterioridade – Patentes similares encontradas.....	23
4.1.2. Pesquisa de anterioridade - Produtos similares encontrados .....	25
4.2. Projeto informacional .....	29
4.3. Projeto Conceitual .....	37
4.3.1. Sensor Portátil.....	37
4.3.2. Aplicativo de qualificação térmica.....	40
4.3.3. Hub concentrador.....	42
4.3.4. Servidor em nuvem .....	45
4.4. Projeto Final .....	47
4.4.1. Projeto do sensor portátil.....	47
4.4.2. Projeto do hub concentrador.....	55
4.4.3. Projeto do aplicativo qualificador .....	61
4.4.4. Projeto do servidor em nuvem.....	64
4.5. Construção do protótipo .....	65
4.5.1. Construção do hub concentrador .....	65
4.5.2. Construção dos sensores portáteis.....	68
4.5.3. Construção do aplicativo qualificador.....	75
4.5.4. Construção do servidor em nuvem.....	75
4.6. Validação e testes .....	76
4.6.1. Testes em laboratório .....	76
4.6.2. Testes em campo.....	80
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Kaye Validator AVS (Fonte: (KAYE, 2023)).....	24
Figura 2 - Kaye Validator 2000 (Fonte: (Plante, 2016)).....	24
Figura 3 - Analisador de qualificação térmica Akmeds Otto (Fonte: (ARKMEDS, 2024)).....	26
Figura 4 - Analisador Néos AQT100 (Fonte: (NEOS, 2024)).....	27
Figura 5 - Aquisitor de dados Yokogawa (Fonte: (YOKOGAWA, 2024)).....	28
Figura 6 - DataLogger Testo 174T (Fonte: ((TESTO, 2024)).....	29
Figura 7 - Matriz CSD (Fonte: o autor).....	30
Figura 8 - Saída da seção de brainstorm (Fonte: o autor).....	31
Figura 9 - Matriz de priorização de inovação (Fonte: o autor).....	34
Figura 10 - Projeto arquitetura de hardware do sensor portátil.....	37
Figura 11 - Fluxograma de funcionamento do sensor portátil (Fonte: o autor).....	39
Figura 12 - Imagem conceito do sensor portátil produzida pela IA DALL-E 3 em 15-11-2023.....	40
Figura 13 - Tela aplicativo de qualificação térmica (Fonte: o autor).....	41
Figura 14 - Projeto arquitetura de hardware do Hub Concentrador (Fonte: o autor).....	42
Figura 15 - Fluxograma de funcionamento do hub concentrador.....	44
Figura 16 - Imagem conceito do hub concentrador produzida pela IA DALL-E 3 em 15-11-2023.....	45
Figura 17 - Diagrama de função da nuvem no projeto (Fonte: o autor).....	46
Figura 18 - Lado componentes da placa Lilygo T5 V2.4.1 (Fonte: (LILYGO, 2024)).....	48
Figura 19 - Dimensões da placa Lilygo T5 V2.4.1 (Fonte: (LILYGO, 2024)).....	48
Figura 20 - Dimensões da placa Lilygo T5 V2.4.1 (Fonte: (LILYGO, 2024)).....	48
Figura 21 - Módulo com sensor SHT31 da Sensirion (Fonte: (BAU DA ELETRONICA, 2024)).....	50
Figura 22 - Display de 1,54" da GoodDisplay (Fonte: (GOOD DISPLAY, 2024)).....	51
Figura 23 - Bateria da Rontek de 1150 mAh (Fonte: o autor).....	52
Figura 24 - Dimensões sensor portátil (Fonte: o autor).....	53
Figura 25 - Frontal Invólucro plástico do sensor portátil (Fonte: o autor).....	53
Figura 26 - Traseira invólucro do sensor portátil (Fonte: o autor).....	53
Figura 27 - Tela de teste do sensor portátil (Fonte: o autor).....	55
Figura 28 - Raspberry Pi 4 Model B de 2GB (Fonte: (RASPBERRY PI, 2024)).....	56
Figura 29 - TF Card para Raspberry Pi (Fonte: (SANDISK, 2024)).....	57
Figura 30 - Fonte de alimentação 5V1 com 3A e plugue USB C (Fonte: o autor).....	58
Figura 31 – Vista traseira do hub concentrador (Fonte: o autor).....	58
Figura 32 – Vista do painel frontal do hub concentrador (Fonte: o autor).....	58
Figura 33 – Vista Interior do hub concentrador (Fonte: o autor).....	59
Figura 34 - Dimensões do hub concentrador (Fonte: o autor).....	60
Figura 35 - Raspberry Pi Imager (Fonte: o autor).....	61
Figura 36 - Esboço tela App Inicial (Fonte: o autor).....	62
Figura 37 - Esboço tela App menu (Fonte: o autor).....	62

<i>Figura 38 - Esboço tela App cadastro de sensors (Fonte: o autor)</i> .....	62
<i>Figura 39 - Esboço tela App qualificações em andamento (Fonte: o autor)</i> .....	63
<i>Figura 40 - Esboço tela App acompanhamento qualificação (Fonte: o autor)</i> .....	63
<i>Figura 41 - Esboço tela App escolha de protocol (Fonte: o autor)</i> .....	63
<i>Figura 42 - Esboço tela App iniciar qualificação (Fonte: o autor)</i> .....	64
<i>Figura 43 - Esboço tela fase abrir porta (Fonte: o autor)</i> .....	64
<i>Figura 44 – TagoCore (Fonte: (TAGO IO, 2020))</i> .....	65
<i>Figura 45 - Interface visual TagoIO (Fonte: o autor)</i> .....	66
<i>Figura 46 - Impressão 3D do hub concentrador (Fonte: o autor)</i> .....	67
<i>Figura 47 - Impressão 3D do hub concentrador vista frontal (Fonte: o autor)</i> .....	68
<i>Figura 48 - Componentes acomodados no hub concentrador (Fonte: o autor)</i> .....	68
<i>Figura 49 - LayOut tela do sensor portátil (Fonte: o autor)</i> .....	69
<i>Figura 50 - Placa Lilygo instalada no refrigerador em teste (Fonte: o autor)</i> .....	69
<i>Figura 51 - Placa Lilygo em caixa plástica (Fonte: o autor)</i> .....	70
<i>Figura 52 - Impressão 3D do invólucro do sensor portátil (Fonte: o autor)</i> .....	72
<i>Figura 53- Sensor portátil montado (Fonte: o autor)</i> .....	72
<i>Figura 54 - Componentes internos do sensor portátil (Fonte: o autor)</i> .....	73
<i>Figura 55 - Caixa do sensor portátil (Fonte: o autor)</i> .....	73
<i>Figura 56 – Sensor portátil em carregamento da bateria (Fonte: o autor)</i> .....	74
<i>Figura 57 - Medidor de USB FNB48S (Fonte: o autor)</i> .....	74
<i>Figura 58 - Refrigerador frigobar em teste pelo sistema desenvolvido (Fonte: o autor)</i> .....	77
<i>Figura 59 - Tela do aplicativo durante teste de qualificação (Fonte: o autor)</i> .....	78
<i>Figura 60 - Tela do aplicativo para posicionamento do sensor (Fonte: o autor)</i> .....	79
<i>Figura 61 - Tela do sensor portátil (Fonte: o autor)</i> .....	79
<i>Figura 62 - Conjunto de sensores e hub para qualificação térmica automatizada</i> .....	80
<i>Figura 63 - Caminhão refrigerado para transporte de termolábeis (Fonte: o autor)</i> .....	81
<i>Figura 64 - Solução sendo apresentada em reunião (Fonte: o autor)</i> .....	82
<i>Figura 65 - Câmara utilizada para instalação dos sensores (Fonte: o autor)</i> .....	82
<i>Figura 66 - Sensores instalados na câmara refrigerada (Fonte: o autor)</i> .....	83
<i>Figura 67 - Sensor grudado na parede pelos imãs cravados no gabinete plástico (Fonte: o autor)</i> .....	83
<i>Figura 68 - Montado no teto metálico utilizando imãs cravados no gabinete (Fonte: o autor)</i> .....	84
<i>Figura 69 - Marca e Logo VallyDroid</i> .....	87

## **LISTA DE TABELAS**

<i>Quadro 1 - Necessidades e requisitos do projeto identificadas (Fonte: o autor).....</i>	<i>35</i>
<i>Quadro 2 - Matrix QFD da solução proposta (Fonte: o autor).....</i>	<i>36</i>

## 1. INTRODUÇÃO

O termo qualificação é utilizado para descrever o processo através do qual se obtém garantia e confiabilidade de uso de um determinado produto ou processo.

Segundo o Inmetro (HÜBNER, 2011), qualificação é “conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, que os resultados dos testes de determinado equipamento demonstram que o mesmo apresenta o desempenho previsto”.

Segundo (CLOUD, 2007) qualificação térmica é um processo que consiste em três fases: qualificação de instalação (QI), qualificação de operação (QO) e qualificação de performance (QP). O objetivo é garantir que o equipamento instalado funcione de forma precisa, uniforme e estável, de acordo com as especificações do fabricante e do protocolo de requisitos de qualificação construído previamente.

Ao final da qualificação térmica, é produzido um relatório que documenta todas as etapas do processo e comprova que os requisitos estabelecidos no protocolo de qualificação foram atendidos com sucesso. Esse relatório contém informações detalhadas sobre o equipamento qualificado, incluindo sua instalação, acessórios e manuais de utilização segura. Além disso, o relatório apresenta gráficos, tabelas e imagens que descrevem as medições realizadas durante a qualificação e uma conclusão detalhada sobre os resultados comparativos com os requisitos do protocolo (CLOUD, 2007).

Em resumo, a qualificação térmica é um processo importante para garantir o funcionamento adequado do equipamento e o relatório final é uma comprovação documentada de que o equipamento atendeu a todas as especificações estabelecidas.

No mercado farmacêutico e médico a qualificação ganha extrema importância, haja vista a criticidade das atividades envolvidas, principalmente no que se refere a guarda e armazenagem de medicamentos, sangue, vacina e demais produtos de interesse à saúde os quais demandam temperatura controlada (termolábeis).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) define estabilidade farmacêutica como a capacidade do produto farmacêutico manter a suas propriedades químicas, físicas, microbiológicas e biofarmacêuticas dentro dos limites especificados durante todo o seu prazo de validade (WHO, 2015).

Mundialmente, a WHO (Organização Mundial de Saúde) homologa e define critérios e exigências para equipamentos de qualificação, conforme o documento WHO – Qualification of temperature controlled storage – Supplement 07 (WHO, 2015).

O Ministério da Saúde e grandes laboratórios movimentam milhares de SKUs (unidade dentro do estoque) por ano para todos os Estados brasileiros, atendendo desde hospitais de primeira linha até Unidades Básicas de Saúde - UBS, muitas das quais são abastecidas através de barcos ou pequenos aviões, haja vista dificuldade de acesso.

Em abril de 2017, a CGU – Controladoria Geral da União divulgou um estudo no qual é demonstrado que em 36% dos estados o armazenamento de medicamentos é inadequado e 44% dos estados ocorreu o descarte de medicamentos por más condições de armazenagem (OLIVEIRA, 2019).

O monitoramento e garantia da estabilidade dos produtos sob temperatura controlada é crucial para que a população receba medicamentos eficazes e que não coloquem em risco a saúde.

A chegada da RDC 304/2019 (ANVISA, 2019) e 430/2020 (ANVISA, 2020) tornaram ainda mais rigorosa a qualificação e validação de equipamentos de armazenagem e transporte de termolábeis.

A qualificação dos equipamentos relativos a guarda ou transporte de termolábeis é requisito essencial a toda a cadeia de frio, desde o embarque do produto no fabricante até o usuário final, eis então, as inúmeras possibilidades e necessidades a serem supridas aos que participam de cada etapa da logística de medicamentos e demais produtos de interesse à saúde.

O cenário brasileiro é composto por equipamentos utilizados para qualificação térmica não contribuem para a facilidade de uso, ou seja, apenas profissionais com elevado treinamento são capazes de operar e extrair dados corretamente, assim como grande parte daqueles possuem alto custo financeiro, eis que importados, o que torna o processo de qualificação custoso e demorado.

O presente projeto visa trazer ao mercado brasileiro equipamento de qualificação descomplicado e de fácil manuseio, intuitivo, seguro e financeiramente mais acessível.

O processo de qualificação atual além de moroso e analógico, demanda a contratação de empresas especializadas para sua realização, o que além de trazer maior custo (exigência de equipamentos e mão de obra qualificados) impede a qualificação de equipamentos de refrigeração em locais remotos e economicamente não privilegiados.

A grande inovação proposta é a democratização do acesso à qualificação térmica e de umidade (além de outros fatores, à critério do usuário final), através de um sistema descomplicado, de fácil utilização e financeiramente mais viável.

O projeto prevê a qualificação automatizada, em que o usuário final possa realizar de forma autônoma, através da alocação do sensor no equipamento que pretenda qualificar, possibilitando o acompanhamento *on line*, por meio do *smartdevice* de todo o processo de qualificação, tornando assim tal processo completamente rastreável, além de permitir a paralisação da qualificação quando for percebido erros ou desvios no processo.

Ou seja, a inovação, dentre outros fatores, está na previsibilidade de problemas antes mesmo do término da qualificação, o que tornará o processo mais rápido e eficiente, eis que o usuário poderá, ao menor sinal de erros, corrigir o processo e reiniciar a qualificação.

Ademais, o projeto prevê a entrega do laudo *on line*, ou seja, dispensa-se neste momento a etapa de análise humana, impressão e demais burocracias atualmente empregadas, eis que o sistema processará as informações em nuvem e possibilitará a impressão do laudo ao próprio usuário final.

O produto leva em consideração uma interface com informações mais claras e assertivas para que o usuário final tenha sempre a percepção do funcionamento do processo de qualificação, dispensando-se dessa forma a mão de obra qualificada (contratação de empresas terceiras) para a confecção de laudo e de todo o processo de qualificação.

A democratização do processo de qualificação, através de sistema automatizado e simples, possibilitará o cumprimento das normativas da ANVISA por parte dos entes públicos e empresas privadas de todo o país, garantindo-se dessa forma o cumprimento exíguo da lei, além de trazer confiabilidade aos produtos armazenados e transportados em ambientes refrigerados e de umidade controlados.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral é desenvolver o protótipo de um sistema automatizado e inteligente para qualificação térmica de câmaras de conservação. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver protótipo qualificador, com sistema eletrônico embarcado utilizando *Open Hardware* e *firmware* com rotinas e sub-rotinas em ambiente *Open Source*;
- Desenvolver aplicativo em *smartdevice* que fará leitura dos dispositivos eletrônicos que coletam umidade e temperatura, e envia para um servidor em nuvem;
- Desenvolver aplicação em nuvem para processamento das informações enviadas pelo *smartdevice* e devolução do relatório de qualificação;
- Elaborar o documento de propriedade intelectual do produto.

### 3. MÉTODO

O desenvolvimento do método segue quatro etapas para a construção do projeto: Projeto Inicial, Projeto Informacional, Projeto Conceitual e Projeto Final, conforme metodologia apresentada por (ROZENFELD, 2017) em sua obra “Gestão de Desenvolvimento de Produtos”.

#### 3.1. Projeto Inicial

O Projeto Inicial representa a base para as demais etapas, por meio dele foi possível detalhar o ferramental teórico para a construção do método e para a fase prática do processo. No projeto inicial foi realizada, busca de artigos, livros, teses, pesquisa de mercado e pesquisas de patentes.

Bases de dados como a Scielo, Plataforma Capes e a busca de patentes nos portais do INPI, ESPACENET e Google Patents, forneceram alguns artigos que possibilitaram um entendimento sobre o projeto proposto, contudo foi com o estudo das referências bibliográficas “*WHO – Qualification of temperature controlled storage – Supplement 07*” e a Portaria RDC430:2020 que foi possível encontrar os artigos utilizados e alinhados com este projeto.

Durante o levantamento de requisitos foram verificados os equipamentos presentes no mercado e suas funcionalidades. Para isso foi necessário diálogos com gestores hospitalares, profissionais de saúde e técnicos em metrologia, que descreveram as preferências, necessidades e detalhes utilizados nos processos de qualificação térmica. Realizou-se também visitas em farmácias, hospitais e operadores logísticos com a finalidade de realizar acompanhamento de todo o processo de qualificação térmica, desde seu planejamento, até a finalização com a entrega do relatório de aprovação, que qualifica o equipamento para seu uso pretendido.

Das soluções encontradas, e utilizadas não só pelos proprietários de equipamentos a serem qualificados, mas também pelos profissionais de metrologia, os modelos tipo *Data Logger* portátil, foram os campeões de utilização devido a seu preço reduzido, ausência de fio e precisão compatível com a necessidade.

Para realizar a pesquisa de patentes e identificar produtos similares, foram utilizadas três bases de dados: o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI), o Escritório Europeu de Patentes (*European Patent Office*, ESPACENET) e o Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos (USPTO), além da base de artigos científicos da Scielo. As palavras-chave utilizadas foram: temperatura da vacina, diagnóstico de temperatura, rede de frio, cadeia do frio, qualificação térmica, diagnóstico térmico, qualificação térmica e validação de ativos.

### 3.2. Projeto Informacional

O Projeto Informacional consiste na elaboração do ciclo de vida do produto e na construção da Matriz QFD (*Quality Function Deployment* – Desdobramento da Função Qualidade) que permite identificar as principais necessidades dos usuários além de organizar o planejamento do projeto e proporcionar o rumo inicial do desenvolvimento.

O ciclo de vida tem a finalidade identificar as fases do desenvolvimento do produto através da estruturação da introdução, do crescimento, da maturidade e do declínio com o encerramento da vida útil da solução. A introdução origina o descobrimento do produto e serviço, as pesquisas de mercado citadas acima e a existência da necessidade de utilização dele.

O incremento do projeto foi caracterizado pela busca de tecnologia, componentes e solução de *software* mais adequada, definindo os melhores métodos de intercomunicação com os elementos da solução de qualificação térmica automatizada. No rumo da maturidade definiu-se como metas futuras o *marketing*, vendas e logística (armazenamento, transporte e entrega) e manutenção do dispositivo, seguindo para o declínio com o surgimento de um novo produto que incrementa a solução anterior e por final descarte e a reciclagem.

Na construção do QFD foi possível identificar e entender as necessidades dos potenciais clientes/usuários e por meio dela definir os requisitos do produto no qual atendam essas necessidades. As necessidades e os requisitos foram listados para que se pudesse visualizar as prioridades hierárquicas que serão utilizadas na construção do produto. Utilizando as ferramentas de *Design Thinking* (BROWN, 2020) para organização das ideias e elaboração do desafio estratégico, foi possível elaborar um plano de inovação contendo: matriz CSD (certezas, suposições e dúvidas), guia de entrevistas com as personas de interesse e guia de observação das visitas realizadas.

### 3.3. Projeto Final

Com as etapas projeto inicial, informacional e conceitual definidas, e já determinados o embasamento teórico do projeto e seu processo de desenvolvimento. A próxima etapa é o projeto final, que consiste na elaboração do projeto de um protótipo que sintetize as soluções tecnológicas concebidas e possibilite que a equipe de desenvolvimento verifique e valide as principais funções idealizadas.

Durante o projeto final serão verificados no mercado a disponibilidade de peças, partes e ferramentas que atendam os requisitos necessários para construção do protótipo. Um

importante conceito nesta etapa, é o de se buscar soluções que permitam modularizar, testar e incrementar rapidamente cada requisito técnico do projeto.

A modularização possibilita o teste e verificação individual de cada subparte do protótipo, e essas partes ao decorrer do desenvolvimento, podem ser interconectadas até formar o produto evoluído e validado de forma compartimentalizada.

Para este projeto estão previstos 04 elementos que podem ser modularizados e testados individualmente utilizando ferramentas de simulação por software ou até mesmo com pequenos ensaios unitários em bancada:

- Aplicativo assistente virtual, responsável pela condução da qualificação térmica;
- Aplicação em nuvem, responsável por captar dados e processar relatório;
- Sensores portáteis, responsável por colher a temperatura. Demais grandezas do processo, como umidade, movimento e outras, serão abordadas futuramente com a evolução até o produto objetivo;
- Hub concentrador, responsável requisitar os dados dos sensores e enviar para a nuvem.

### **3.4. Construção dos protótipos**

O protótipo foi construído em fases, com um direcionamento para o desenvolvimento de hardware, firmware e software da solução proposta.

Uma metodologia bem estruturada é necessária para desenvolver um protótipo que integre hardware mecânico, eletrônico, software e firmware para garantir eficiência, precisão e as funcionalidades desejadas. Sendo assim, segue a estratégia gradual elaborada para essa integração:

- A. **Análise e Requisitos:** Uma compreensão clara das características necessárias, bem como as interações entre os componentes mecânicos e eletrônicos e as interfaces de software que serão utilizadas, foi alcançada ao analisar de perto os requisitos do projeto.
- B. **Projeto Mecânico:** Desenvolve-se várias alternativas para acomodar o sensor portátil e o hub em seus respectivos alojamentos. Alguns modelos tridimensionais (CAD) foram desenvolvidos para detalhar a estrutura física do protótipo, incluindo aspectos como ergonomia, resistência dos materiais e integração de componentes eletrônicos. Para garantir uma experiência de usuário satisfatória, detalhes como a fixação dos sensores portáteis no interior do refrigerador, robustez de transporte e recursos de visualização de distância foram levados em consideração.

- C. **Integração Eletrônica:** Para acelerar o desenvolvimento e testes da solução, em um primeiro momento não se desenvolveu nenhum tipo de placa eletrônica, utilizando somente placas prontas de mercado, conhecidas como *Open Hardware*. O esforço aplicado nesta fase foi em localizar placas eletrônicas de mercado que atendessem as necessidades do projeto proposto e que possibilitassem a experiência de uso e operação da solução projetada.
- D. **Desenvolvimento de Firmware:** A construção do firmware começou com base nos requisitos de projeto e no esquemático das placas eletrônicas escolhidas para os sensores portáteis. O código foi projetado para interagir com hardware eletrônico, como sensores, displays, circuitos de carregamento de baterias e conectividade, bem como facilitar a comunicação com o software do servidor em nuvem.
- E. **Desenvolvimento de Software:** Para garantir uma boa interface com o usuário e interação com o protótipo, este projeto demandou uma espessa camada de software para garantir a integração entre os sensores portáteis, hub concentrador, aplicativo assistente virtual e servidor em nuvem. A solução proposta, foi desenvolvida em código aberto e composta por banco de dados, aplicação para geração do relatório final, drivers de conectividade e interface visual com o usuário.
- F. **Integração e Testes:** Conforme cada nova funcionalidade fosse sendo desenvolvida, ela era integrada com as demais partes anteriormente validadas do projeto, garantindo que o hardware, a eletrônica, o firmware e o software funcionassem de forma conjunta e harmoniosa. Testes de funcionalidade, interoperabilidade e desempenho para identificar e corrigir possíveis falhas, seriam avaliados durante cada nova implementação.
- G. **Iteração e Aperfeiçoamento:** Com base nos resultados dos testes, ocorreram ajustes e melhorias em cada componente, seja na parte mecânica, eletrônica, firmware ou software. O ciclo de teste e iteração se repetiu até alcançar o desempenho e a funcionalidade desejada para realizar testes em ambiente controlado no laboratório ou fora dele.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Projeto Inicial

Com as palavras-chave definidas, foram encontrados 2.451 resultados na base do ESPACENET e 600 resultados no INPI. Nenhuma patente com características semelhantes à patente em desenvolvimento foi encontrada no INPI, enquanto no ESPACENET, apenas uma patente foi encontrada, mas vem sendo constantemente renovada e depositada por uma grande empresa multinacional americana.

A pesquisa também foi direcionada para procura produtos similares já comercializados. E foram encontrados 02 produtos de origem nacional 02 produtos de origem internacional. Certamente existem diversos outros utilizados para a prática de qualificação, mas o foco do estudo foi em trazer exemplos de modelos mais utilizados e quais os pontos fortes e fracos desses produtos.

Para complementar a revisão bibliográfica sobre qualificação térmica e seus métodos, foram realizadas buscas de artigos em bases de dados como Scielo e Google Acadêmico. No entanto, essas buscas não retornaram artigos relevantes que abordassem o tema de forma aprofundada, utilizando as palavras-chave selecionadas. Por outro lado, foram encontrados alguns artigos que tratavam da tecnologia de desenvolvimento de sistemas de IoT (*Internet of Things*), que é uma área relacionada ao escopo deste trabalho. Esses artigos serão citados e discutidos nas próximas seções.

#### 4.1.1. Pesquisa de anterioridade – Patentes similares encontradas

A patente americana encontrada em ESPACENET refere-se ao qualificador, também conhecido pelo termo em inglês *Validator* foi inicialmente adotado pela Kaye Instruments. e trata-se de um equipamento que permite entrar com os parâmetros de qualificação térmica, como temperatura máxima, mínima, tempo máximo de excursão, entre outros. Esta divisão do produto, já trocou algumas vezes de propriedade, atualmente a detentora dos direitos é a Amphenol e o modelo de equipamento mais atual é o Kaye Validator AVS (*Automatic Validation System*), que pode ser verificado na **Error! Reference source not found.**



Figura 1- Kaye Validator AVS (Fonte: (KAYE, 2023))

A primeira patente do produto é a US 2016/0274559 A1 (PLANTE, 2016), publicada em 22 de setembro de 2016, sendo atualizada em setembro de 2018 e novamente em janeiro de 2019 (PLANTE, 2019). Os documentos descrevem uma evolução do produto que eles já haviam desenvolvido anteriormente, o modelo Kaye Validator 2000. A Figura 2 ilustra as imagens 17A e 17B, encontradas na patente de 2016 da Amphenol citada anteriormente.

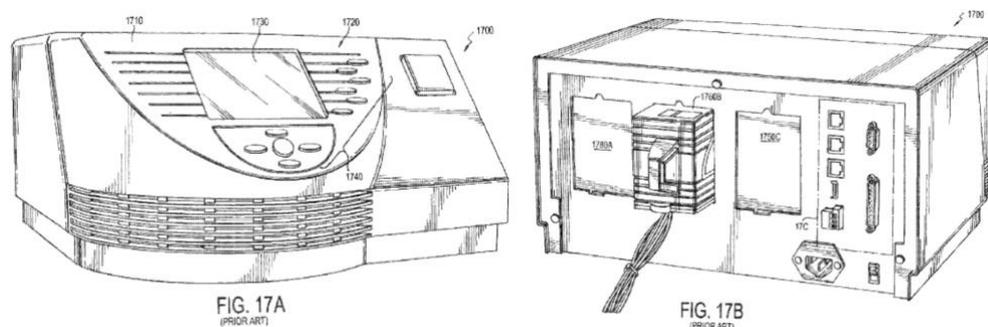


Figura 2 - Kaye Validator 2000 (Fonte: (Plante, 2016))

A evolução demonstrada na patente, o modelo AVS, contempla uma série de avanços, como uso de uma base onde são acoplados vários módulos e neste módulo vários sensores

podendo ser do tipo RTD ou Termopar, dependendo do módulo aquisitado. A patente descreve também um terminal, muito parecido com um tablet, com tela sensível ao toque, que pode ser destacado da base de sensores após feita a parametrização da qualificação. Sendo assim, o usuário pode ter outras bases com outros módulos de sensores, e tudo ser parametrizado por um só *tablet*. O usuário pode criar os estudos de qualificação térmica e salvar cada um deles em memória para que posteriormente possa usá-los em novas qualificações. Ao final do estudo, e da coleta de dados, um relatório é gerado conforme as especificações e parametrizações. Existe a possibilidade de se usar sensores sem fio conectados ao equipamento, mas estes não possuem qualquer indicação local da temperatura e status do ponto em medição, como pode ser visualizado nos produtos do tipo *datalogger*. Este produto possui recursos avançados e muita tecnologia, o seu foco é principalmente para qualificação de produtos estáticos e normalmente usado em autoclave. O alto custo do sistema acaba inviabilizando o uso em escala e nas aplicações embarcadas como caminhões refrigerados, pois a base e os sensores terão que viajar junto com o veículo e o custo de reposição em caso de perda acaba sendo bem elevado.

#### **4.1.2. Pesquisa de anterioridade - Produtos similares encontrados**

Por meio de uma análise de mercado e produtos similares, conforme ilustrado na Figura 3 podemos destacar o qualificador modelo Otto de origem brasileira da empresa Arkmeds (ARKMEDS, [2021]), possui uma interface de utilização que consiste em um display colorido de 7", entrada para 16 sensores de temperatura termopar tipo T e um sensor de pressão absoluta, utilizado para calibração de não somente câmaras de conservação de vacina e sangue, mas também de autoclaves. Os sensores podem monitorar de -200 a 200 oC, sendo assim, utilizando um encapsulamento adequado nos sensores, é possível qualificar também freezers de ultrabaixa temperatura. Os sensores termopar são conectados ao equipamento por cabos específicos para este tipo de sensor, esta solução dificulta e deixa incomoda a qualificação térmica, pois diversos cabos precisam ser passados pela porta do produto que está sendo qualificado. Localizado na parte traseira, existe um sensor digital de temperatura e umidade, que é utilizado para monitorar o ambiente durante o processo de qualificação. Toda a parametrização do equipamento e o acompanhamento do processo qualificatório é realizado pelo display de 7" sensível ao toque. Pequenas janelas indicam a temperatura e é possível observar eventuais não conformidades no estudo de qualificação térmica. O qualificador possui bateria interna, mas a empresa não recomenda que o qualificador seja utilizado em modo bateria por longos períodos de qualificação térmica, processo muito comum em câmaras de conservação de termolábeis. O

profissional que realiza a qualificação precisa estar atento as etapas de carregamento de insumo simulado, abertura de porta e corte de energia do produto em qualificação térmica, pois estas etapas são feitas de forma manual. Após a conclusão do estudo de qualificação térmica, os dados são resgatados do qualificador por meio de uma porta USB posicionada na parte traseira, estes dados são levados a um computador, com acesso a internet, e enviados a uma aplicação Arkmeds em nuvem, que analisa e gera o relatório assinado digitalmente, conforme as parametrizações pertinentes ao estudo específico de qualificação térmica desenvolvido previamente. O manual e catálogo do produto diz que ele atende as normativa FDA 21 CFR Part 11, pois possui controle de acesso individual com login e senha, proteção de dados por criptografia, uma política de recuperação ou troca de senhas e possibilidade de auditoria.



*Figura 3 - Analisador de qualificação térmica Arkmeds Otto (Fonte: (ARKMEDS, 2024))*

Conforme ilustrado na Figura 4, o qualificador modelo AQT110 (NÉOS, 2018) de origem brasileira da empresa Néos, possui uma forma de montagem e apresentação muito semelhante ao anterior citado, tem uma interface com display de 7” sensível ao toque para parametrização e acompanhamento do processo de qualificação térmica. Os 15 sensores de qualificação termopar tipo T, são conectados na parte traseira do qualificador e permitem trabalhar com uma faixa de -100 a 250 C, o que permite também qualificar ultra freezers usando o encapsulamento correto de sensores. É possível também conectar um termistor RTD Platina, Classe A, que atua como sensor de referência para calibração dos demais sensores de temperatura no início de cada qualificação térmica. O qualificador possui também duas outras portas de entrada de sensores, sendo uma para monitoramento da umidade ambiente e outra para monitoramento de pressão em qualificações de autoclave. A adoção da tecnologia utilizando sensores cabeados, pode dificultar a ação do profissional que fara a montagem de cada ponto a ser monitorado, além de dificultar o fechamento das portas em refrigeradores, devido ao alto volume de cabos entre o batente e a borracha de vedação. Em locais com difícil

acesso à energia elétrica e que o estudo de qualificação não seja tão longo, ou seja, menor que 8 horas, o qualificador pode ser utilizado no modo bateria. Após a conclusão do estudo de qualificação térmica, os dados são resgatados do qualificador por meio de uma porta USB posicionada na parte traseira, estes dados são levados a um computador. Os dados podem ser exportados em forma de tabela, ou até se usar um software da própria Néos instalado no computador, para geração mais rápida do relatório final.



Figura 4 - Analisador Néos AQT100 (Fonte: (NEOS, 2024))

O produto da empresa Yokogawa, ilustrado na Figura 5, apresenta alguns modelos de sistemas de aquisição dados que podem ser utilizados como qualificadores, ela classifica esta linha como registradores de dados sem papel com submodelos GX e GP (YOKOGAWA, [2022]). A interface com tela sensível ao toque, pode ser encontrada nos tamanhos de 12,1” e 5.7”. Possui diversos tipos de entrada para sensores com fios, como termistores, termopares, tensão, corrente, entre outros. E a quantidade de canais pode chegar a 450 pontos de aquisição. A possibilidade de conectividade ethernet, facilita a retirada dos dados e a geração de relatório com dados brutos e gráficos. O manual e catálogo do produto diz que ele atende as normativa FDA 21 CFR Part 11, pois possui controle de acesso individual com login e senha, proteção de dados por criptografia, uma política de recuperação ou troca de senhas e possibilidade de auditoria. Por ser um sistema de multiusuário, inclusive para aplicações industriais, a sua usabilidade acaba sendo um pouco mais complicada e normalmente exige um conhecimento aprofundado para extração das variáveis medidas e geração manual do relatório de qualificação.

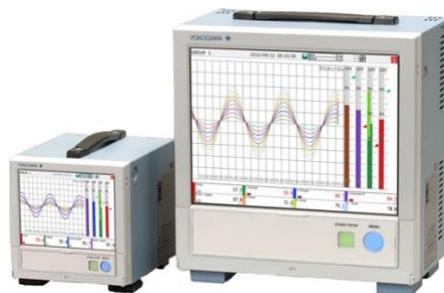


Figura 5 - Aquisitor de dados Yokogawa (Fonte: (YOKOGAWA, 2024))

Um dispositivo muito utilizado no processo de qualificação térmica são os dataloggers. Diferente dos qualificadores, estes dispositivos possuem alta portabilidade e podem ser montados individualmente em cada ponto de interesse termodinâmico. Seus sensores de temperatura ficam alojados na parte interna da caixa. Possuem um display de temperatura que permite o operador visualizar a temperatura e alguns parâmetros como temperatura máxima, mínima e se ele está adquirindo alguma informação e guardando em memória interna. Ilustrado na Figura 6, o modelo mais usual é o da marca Testo modelo 174T (TESTO, 2022), possui um bom preço, permite calibração e tem uma longa duração da bateria. Este modelo em específico não possui conexão de dados, então a coleta de dados acontece ao final da qualificação térmica, por meio de uma base USB conectada a um computador. A empresa LogTag (LOGTAG RECORDERS, [2022]), também possui dataloggers semelhantes ao da Testo, porém alguns deles possuem certificação WHO (Organização Mundial de Saúde), sendo assim, a aquisição de temperatura é sempre comparada aos parâmetros de controle da WHO e caso algo esteja fora da normalidade, é possível verificar um alerta na tela do datalogger. Estas marcas também possuem versões com conectividade sem fio, WiFi, Bluetooth etc. Porém a aquisição de dados ocorre somente para uma verificação da temperatura e não para entrada em um banco de dados onde será processado um relatório automático, ou seja, toda a etapa de pós processamento ainda acontecendo, o usuário deve exportar os dados de cada datalogger, analisar se não houve alguma excursão de temperatura, gerar as máximas, mínimas e gráficos de maneira manual e então produzir o relatório final.



Figura 6 - DataLogger Testo 174T (Fonte: ((TESTO, 2024))

Nesse sentido, a solução em desenvolvimento pode ser considerada uma potencial inovação no campo da qualificação térmica e validação de ativos. Ainda que não tenham sido encontradas patentes com características semelhantes no INPI, isso não significa que a ideia seja menos inovadora.

#### **4.2. Projeto informacional**

Utilizando as técnicas desenvolvidas durante a etapa Aprender e Estruturar do programa de financiamento do Catalisa ICT, como ilustrado na Figura 7, desenvolveu-se a matriz CSD e identificou-se as certezas, suposições e dúvidas referentes ao produto:

**Desafio Estratégico:**

Como podemos atestar condicionamento adequado de medicamentos e vacinas na cadeia de valor?

Qual é o problema que a sua tecnologia busca resolver?

Quais os setores de mercado afetados por esse problema?

Quem são as pessoas/empresas afetadas por esse problema?

Quais são as principais dores e tarefas dessas pessoas/empresas ao lidar com o problema?

Como elas resolvem o problema atualmente

Reflita sobre aquilo que já sabe, aquilo que precisa de confirmação e aquilo que deseja descobrir.



Conforme ilustrado na Figura 8, após seções de “brainstorm” com os participantes do projeto, resultados colhidos da saída da matriz CSD e pesquisa de mercado, identificou-se a seguinte questão central que guiará o projeto e suas respectivas entregas.

## Brainstorming

Antes de começar, reflitam em conjunto: Qual é a questão central que guiará este momento? Qual é o objetivo de estarmos reunidos?

**AS REGRAS:**

1. Evite...
2. Encoraje...
3. Construa...
4. Foco...
5. Uma co...
- 6.
7. Alme...

**Desafio estratégico redefinido anteriormente:**

Como podemos tornar o processo de qualificação mais rápido, com menos transtorno, mais barato, com relatórios mais robustos para facilitar a vida de Gestores e Qualificadores que operacionalizam a cadeia do frio e dependem de aprovação em inspeções de modo que se utilize hardware de baixo custo num ecossistema de qualificação térmica simplificado, preciso, com dados invioláveis e relatórios irrefutáveis por inspetores.

**2º momento: Coletivo**

Tempo sugerido: 30 minutos

**1º momento: Individual**

Tempo sugerido: 15 minutos

**Espaço de criação do membro 1:**

Eliminar o max possível ação humana na geração do relatório	Blockchain: rastrear toda Cadeia do frio medic/vacina.	Videotutorial em App p/ apoiar usuário na QualifTerm.
Parceria com fabricante para aciona-lo remotamente.	IA para detectar e sugerir solução de problemas	QR Code no display do logger: setup rápido da QualifTerm.
Fotos e ação de sensores p/ enriquecer o Relatório da QualifTerm.	Monitorament o de energia da QualifTerm p/ preder falhas.	Fornecer kits: carga padrão específicas p/ realidade do cliente.
Realidade Aumentada para comissionamento de sensores.	Logger com diversos suportes p/ montagem em equiptos diversos.	

**Espaço de criação do membro 2:**

Usar sensores desocupados p/ monitorar equiptos e ambiente.	Vender bigdata de toda QualifTerm p/ fabricantes.	Variar modelo de negócio: rental, service, aquisição.
Garantir propriedade compartilhada dos dados.	Lobby em inspetores via qualidade do Relatório.	Openhardware lowcost em módulos.
Validação de Software aderente a CFR21 (FDA).	Eliminar o max de fios possível nos sensores.	Setup com diferentes tipos de carga no App  bolsa, glicerol, quant
Log de Sensores Inviolável		

Must to have

Eliminar o max possível ação humana na geração do relatório	QR Code no display do logger: setup rápido da QualifTerm.	Fotos e ação de sensores p/ enriquecer o Relatório da QualifTerm.	Monitoramento de energia da QualifTerm p/ preder falhas.
Validação de Software aderente a CFR21 (FDA).	Vender acesso a Bigdata de QualifTerm p/ fabricantes.	Variar modelo de negócio: Rental, Service, Compra.	Garantir propriedade compartilhada dos dados.
Eliminar o max de fios possível nos sensores.	Openhardware lowcost em módulos.	Logger com diversos suportes p/ montagem em equiptos diversos.	Log de Sensores Inviolável

Nice to have

Blockchain: rastrear toda Cadeia do frio medic/vacina.	Parceria com fabricante para aciona-lo remotamente.	IA para detectar e sugerir solução de problemas	Fornecer kits: carga padrão específicas p/ realidade do cliente.	Setup com diferentes tipos de carga no App  bolsa, glicerol, quant
Videotutorial em App p/ apoiar usuário na QualifTerm.	Usar sensores desocupados p/ monitorar equiptos e ambiente.	Lobby em inspetores via qualidade do Relatório.	Realidade Aumentada para comissionamento de sensores.	

Figura 8 - Saída da seção de brainstorm (Fonte: o autor)

A ideia central do projeto foi identificada por:

“Como podemos tornar o processo de qualificação mais rápido, com menos transtorno, mais barato, com relatórios mais robustos para facilitar a vida de Gestores e Qualificadores que operacionalizam a cadeia do frio e dependem de aprovação em inspeções de modo que se utilize hardware de baixo custo num ecossistema de qualificação térmica simplificado, preciso, com dados invioláveis e relatórios irrefutáveis por inspetores.”

Trabalhando com seções individuais e coletivas, separamos os seguintes requisitos do produto final, e que não necessariamente serão abordados nesta etapa do projeto, pois o trabalho irá evoluir somente até o protótipo:

“*Must to have*” (Deve possuir):

- O processo de qualificação deverá ser conduzido por um assistente virtual instalado em um dispositivo portátil, tipo smartphone ou tablet;
- Os sensores serão de transmissão sem fio, com um display epaper e conjunto eletrônico de baixo consumo, para garantir longevidade da bateria;
- Um sistema de eletrônica embarcada, tipo HUB, será plugado com alimentação elétrica, e este será responsável em coletar o sinal dos sensores e enviar para o servidor em nuvem.
- Eliminar o máximo possível a ação humana na geração do relatório;
- Utilizar tecnologia tipo QRCode ou algo semelhante para possibilitar o rápido cadastramento dos sensores de qualificação térmica na plataforma;
- Todo processo de qualificação precisa ser fotografado e essas fotos serão enviadas ao servidor para produção e enriquecimento do relatório de qualificação;
- É imprescindível que a solução seja verificada e validada pela ANVISA e pelos seus agentes que analisam e aprovam os relatórios de qualificação térmica dos produtos;
- Os dados colhidos podem futuramente servir para processamento e geração de informações no campo da inteligência artificial e aprendizado de máquina;
- Os sensores devem usar algum tipo de tecnologia remota, com envio sem fio dos dados;
- Utilizar o máximo possível de *hardware* aberto, a fim de reduzir custo do que está sendo desenvolvido;
- Os sensores devem possuir soluções com alças ou imãs para facilitar a montagem dentro dos refrigeradores e locais que serão submetidos a qualificação térmica.

“*Nice to have*” (Seria interessante possuir):

- O servidor possuir *Blockchain* para amarrar a qualificação com os equipamentos em análise, com seus proprietários e fabricantes;
- Desenvolver parceria com os fabricantes de equipamento para rápido acionamento caso algum problema seja identificado durante a qualificação térmica;
- Enriquecer o banco de dados com os diversos tipos de qualificação e proporcionar aos usuários uma alternativa rápida e viável no momento da parametrização;
- Desenvolver realidade aumentada para orientar o posicionamento dos sensores dentro do equipamento, com a câmera do dispositivo portátil;
- O HUB pode além de coletar e processar os sinais dos sensores, também cortar alimentação e medir energia do equipamento, durante o processo de qualificação;
- O Sensor portátil pode ter um acelerômetro para identificar movimentos nos sensores e detectar uma possível movimentação não autorizada.

Com os requisitos definidos, utilizamos a matriz de priorização de ideias para isolar e categorizar as principais ideias que norteiam o projeto e que podem solucionar de maneira criativa, técnica e com custo adequado os requisitos demonstrados acima. As principais ideias foram:

IDEIA 01 - Um CoM (*Computer on Module*) rodando um banco de dados que coleta os dados dos sensores portáteis sem fio e armazena cada dado de maneira a ser consumido por um servidor que fará análise e a geração dos relatórios;

IDEIA 02 - A interface de operação com o usuário será um App simplificado, que permite o usuário parametrizar a qualificação térmica, iniciá-la, acompanhá-la e finalizá-la com ou sem sucesso dependendo da performance que o equipamento desempenhar.

IDEIA 03 – Uma aplicação em nuvem, que coleta os dados gerados pelo CoM e pelo App, processa e produz o relatório final.

IDEIA 04 – Além dos sensores de temperatura, a solução pode ter câmera para captação de eventos durante a qualificação térmica, relé instalado no módulo que estará o CoM, para corte de energia do equipamento durante a fase deste em falta de energia, e sensores que detectam a abertura de porta do equipamento para sinalizar o momento exato deste evento.

IDEIA 05 – Algoritmo de inteligência artificial, que aprenda com a massa de dados dos sensores e traga possíveis “insights para os clientes, que podem aprender a operar melhor seus equipamentos.

IDEIA 06 – Aderência as normas 21 CFR Part 11, ISO13485, RDC 430 e demais regulações que definam o plano mestre de validação, inclusive de software.

Com novas seções de “*brainstorms*”, as ideias foram posicionadas e elencadas conforme demonstrado na Figura 9:

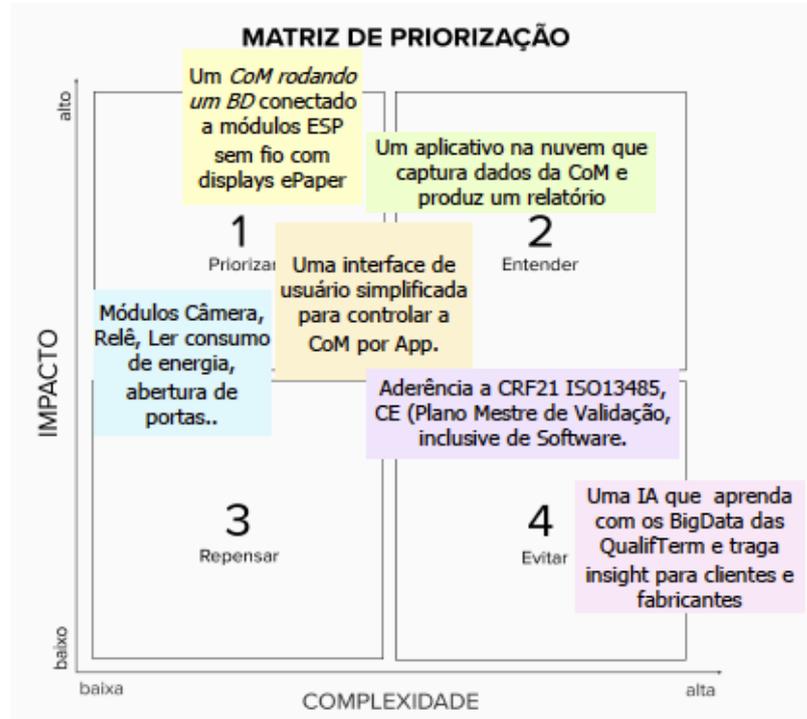


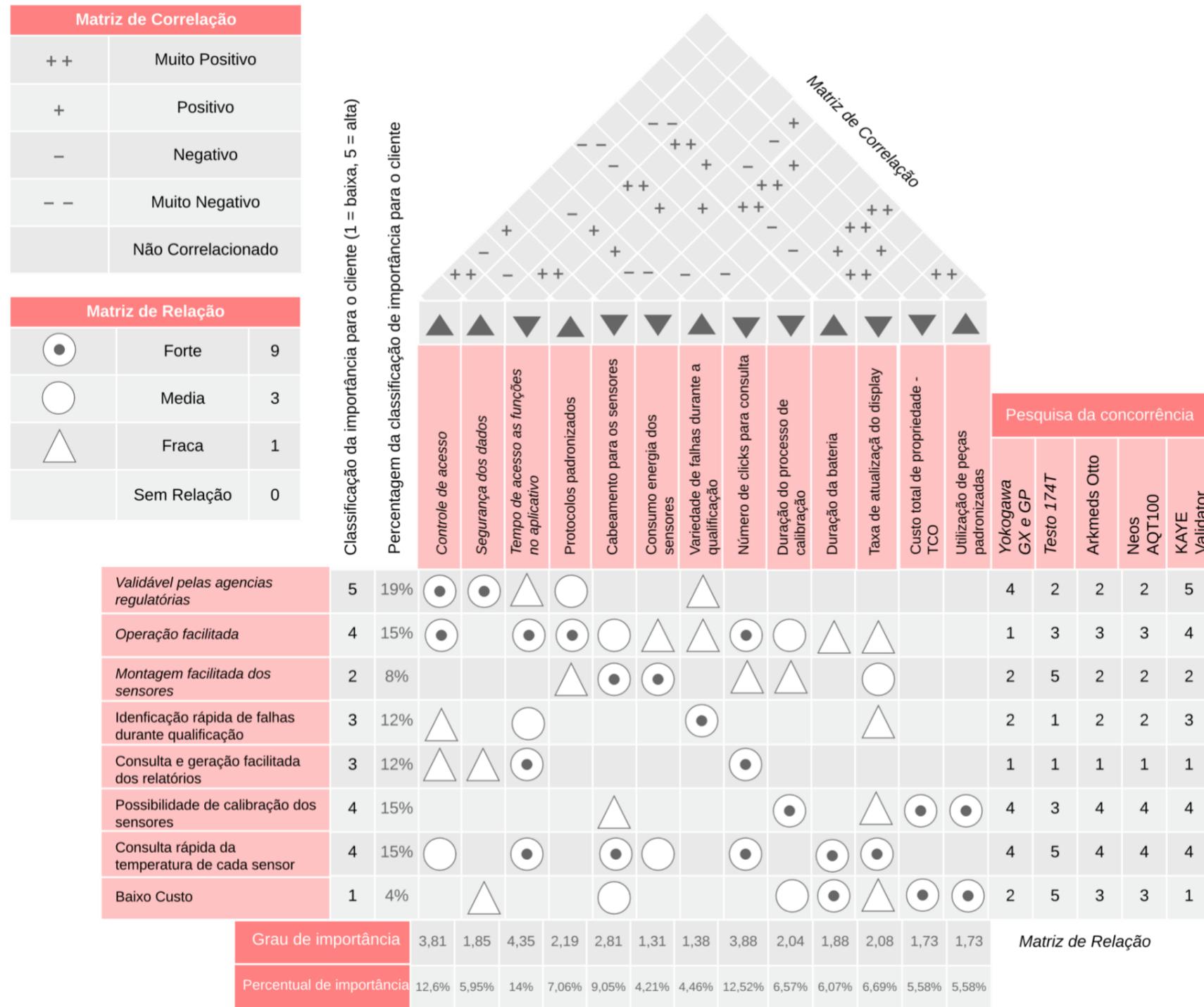
Figura 9 - Matriz de priorização de inovação (Fonte: o autor)

Com as ideias definidas, podemos desenvolver a matriz requisitos e necessidades demonstrada no Quadro 1:

Necessidades do Projeto VallyDroid						
Índice da necessidade	Natureza	Necessidades	Índice do Requisito	Requisitos	Objetivo	Descrição
1	Regulatória	Validável pelas agencias regulatórias	1	Controle de acesso (qtd)	↑ (aumentar)	Controle de acesso das funções no aplicativo com rotinas que possibilitem a rastreabilidade do usuário.
			2	Segurança dos dados (qtd)	↑ (aumentar)	Utilizar técnicas e algoritmos de criptografia para evitar fraude e violação dos dados aqisitados.
2	Operacional	Operação facilitada	3	Tempo de acesso as funções no aplicativo (tempo)	↓ (reduzir)	Utilizar tecnicas de "User Experience" para conduzir o usuário ao processo de qualificação térmica dentro do aplicativo assitente virtual de maneira acertiva e intuitiva.
			4	Protocolos padronizados (qtd)	↑ (aumentar)	A pesquisa e cadastro de protocolos padronizados, permitem que o usuário com pouco conhecimento técnico tenha uma maior adesão e entendimento da plataforma.
3	Operacional	Montagem facilitada dos sensores	5	Cabeamento para os sensores (qtd)	↓ (reduzir)	Sensores wirelles facilitam a montagem dentro do equipamento que será qualificado
			6	Duração da bateria (R\$)	↑ (aumentar)	A bateria embarcada nos sensores deve ter uma alta capacidade, porém o consumo de energia deve ser reduzido e permitir que ela seja recarregada no máxmo intervalo de tempo possível.
4	Operacional	Idenficação rápida de falhas durante qualificação	7	Variedade de falhas durante a qualificação (qtd)	↑ (aumentar)	Durante a qualificação o sistema deve ser capaz de detectar o maior número de falhas possível e comunicar ao usuário para tomada de decisão
5	Funcional	Consulta e geração facilitada dos relatórios	8	Número de clicks para consulta (qtd)	↓ (reduzir)	Utilizar tecnicas de "User Experience" para conduzir o usuário ao processo final de geração de relatórios e posteriormente consulta dos ja gerados, de maneira fluida e com a menor quantidade possível de cliques até o objetivo final.
6	Manutenção	Possibilidade de calibração dos sensores	9	Duração do processo de calibração (tempo)	↓ (reduzir)	O uso de sensores de temperatura e circuito eletrônico bem projetado garantem uma maior intervalo entre calibrações. A reposição dos sensores em calibração deve ser considerada para evitar maiores problemas.
7	Operacional	Consulta rápida da temperatura de cada sensor	10	Consumo energia dos sensores (R\$)	↓ (reduzir)	Devenvolver sistemas e circuitoa que possilitem colocar o sensor portátil em modo "sleep" e poupar o máximo de energia possível.
			11	Taxa de atualizaçã do display (tempo)	↓ (reduzir)	Utilizar displays do tipo epaper com o menor tempo possível de atualização de tela, para minimizar o tempo de uso do microcontrolador durante atualização dos dados em nuvem pelo sensor portátil.
8	Custo	Baixo Custo	12	Custo total de propriedade - TCO (R\$)	↓ (reduzir)	O projeto deve buscar componentes de boa qualidade para aumentar a vida útil. Este incremento melhora o TCO e traz uma gama sustentável de investimentos associados.
			13	Utilização de peças padronizadas (qtd)	↑ (aumentar)	A redução da quantidade de peças variadas ajuda na programação da linha de produção e controle do estoque para peças de reposição.

Quadro 1 - Necessidades e requisitos do projeto identificadas (Fonte: o autor)

Com os requisitos e necessidades construiu-se a matriz QFD, relacionando cada item entre si e o peso do valor para o cliente.



Quadro 2 - Matrix QFD da solução proposta (Fonte: o autor)

### 4.3. Projeto Conceitual

O desenvolvimento da solução foi realizado olhando para os aspectos de *hardware* e *software* necessários para permitir a integração dos módulos sensor portátil, aplicativo instalado em dispositivo móvel, hub concentrador e servidor em nuvem.

#### 4.3.1. Sensor Portátil

Módulo responsável em coletar as informações de temperatura e enviar para hub concentrador e por meio de um display interagir com o usuário sobre algumas informações importantes a respeito da qualificação térmica.

##### 4.3.1.1. Hardware do sensor portátil

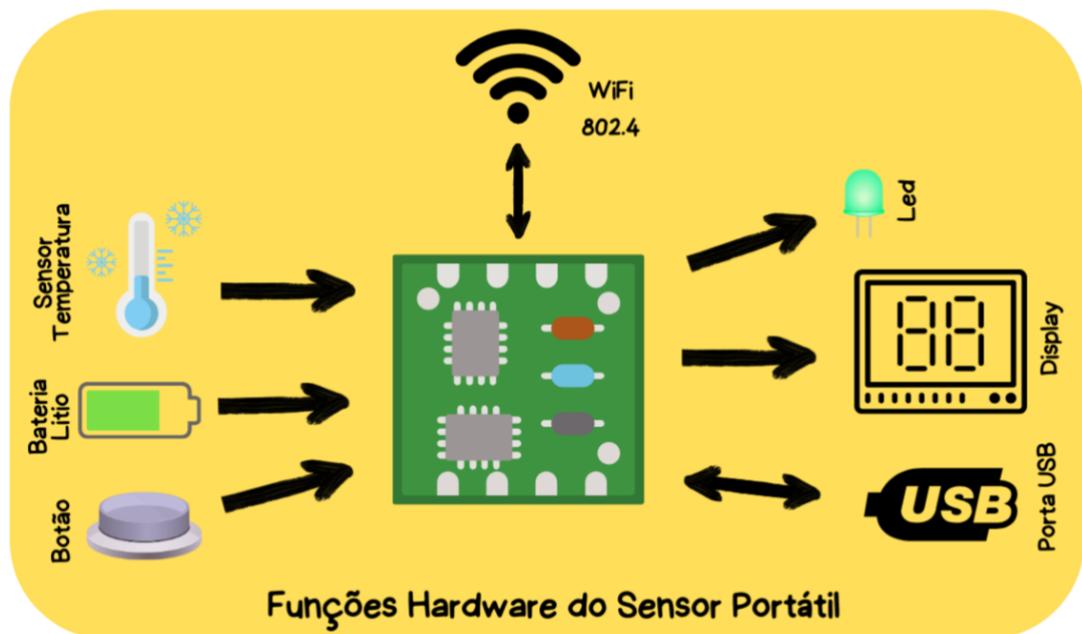


Figura 10 - Projeto arquitetura de hardware do sensor portátil

Conforme o diagrama da Figura 10, são previstos para o hardware do sensor portátil os elementos eletrônicos que possibilitam as seguintes funções:

- Placa eletrônica com microcontrolador, carregador de baterias, entradas e saídas compatíveis com os periféricos necessários.
- Sensor de temperatura digital de baixo consumo e precisão necessária para atender os requisitos da aplicação.

- Bateria de lítio que deve suportar manter o sensor em funcionamento durante todo o período de qualificação térmica.
- Botões na placa eletrônica para possibilitar configurações necessárias no sensor portátil.
- Conectividade WiFi para envio e recebimento de informações do HUB de controle.
- Led para sinalização de erros ou status da carga da bateria.
- Display de baixo consumo para sinalização da temperatura naquele determinado ponto de medição e outras informações pertinentes a qualificação térmica em andamento.
- Porta USB para carregamento da bateria e debug do *firmware* instalado no sensor portátil.

#### **4.3.1.2.Firmware do Sensor Portátil**

Por operar por bateria, o sensor portátil demanda que suas funções básicas sejam executadas e então entre em modo *sleep* periodicamente. O tempo entre acordar, executar as funções e voltar para o modo *sleep*, é determinado pelas configurações de intervalo de medições configurado no aplicativo móvel.

As rotinas básicas projetadas para o sensor são:

- Rotina de entrada e saída do modo *sleep*;
- Rotina de leitura de botões, com tratamento de interrupção para acordar o sensor portátil;
- Rotina de atualização do display com baixo consumo de energia;
- Rotina de configuração do *hardware*;
- Rotina de conexão com o HUB;
- Rotina de envio e recebimento de dados do hub;
- Rotina que empacota ou desempacota os dados recebidos ou enviados;
- Rotina que compara a máxima e mínima temperatura atual e armazena caso seja diferente;

Além das rotinas básicas, funções de acesso ao hardware são necessárias para o uso correto dos periféricos. Dever ser criado drivers para acesso ao display, sensor digital de temperatura, radio WiFi e outros mais presentes no hardware proposto. O fluxograma das rotinas pode ser observado na Figura 11.

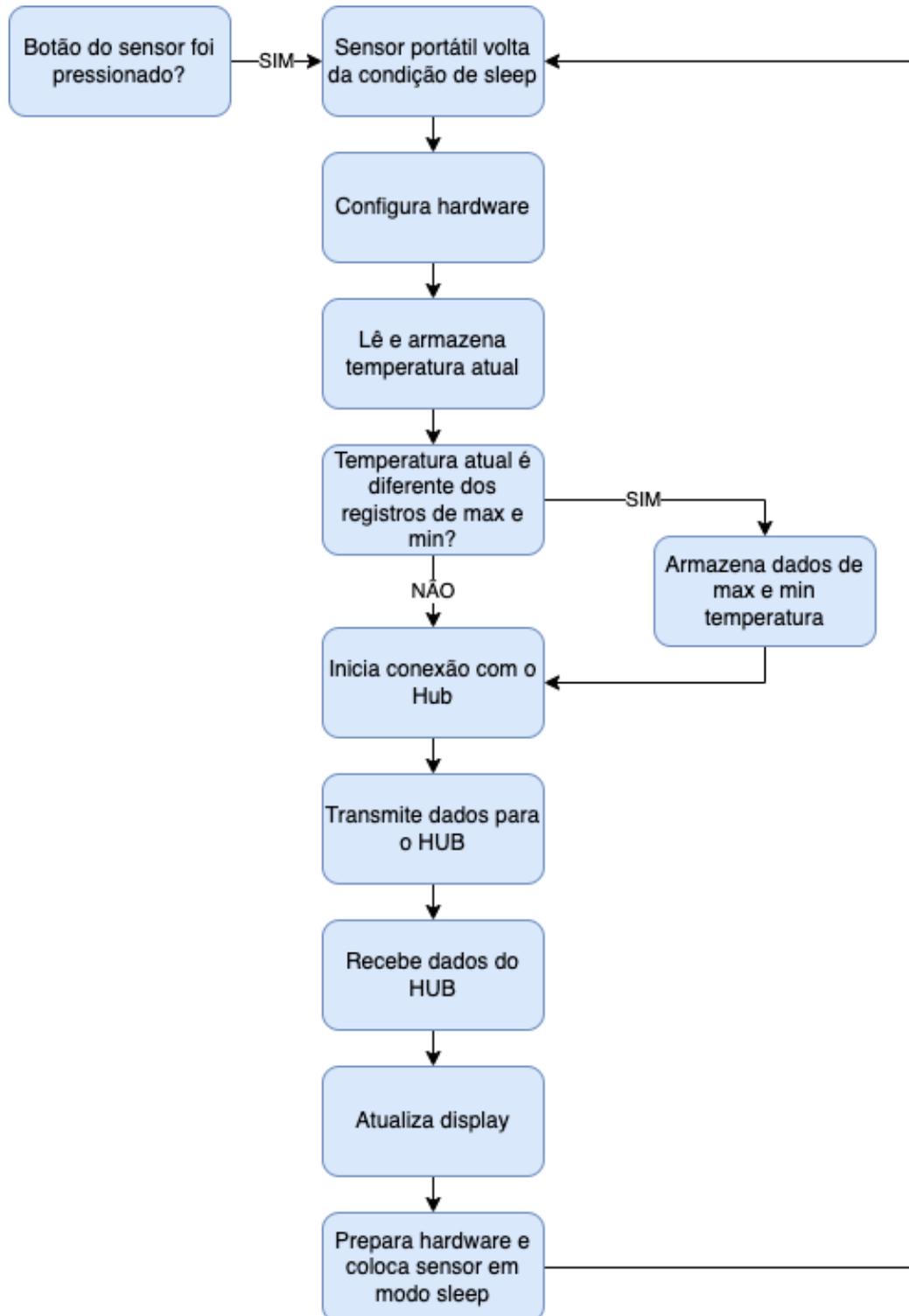


Figura 11 - Fluxograma de funcionamento do sensor portátil (Fonte: o autor)

#### 4.3.1.3. Mecânica e invólucro plástico do sensor portátil

O invólucro plástico do sensor portátil deve ser o menor possível, com dimensões aproximadas de (Largura x Altura x Profundidade) 50 x 70 x 20 mm, ter uma janela na parte frontal para um display e os botões abaixo do display. O sensor de temperatura, a eletrônica e a bateria estão instaladas no interior da caixa.

Para facilitar a montagem dentro das câmaras a serem qualificadas, alguns imãs são cravados nas faces laterais, superior e inferior, permitindo fixar o sensor em paredes metálicas, muito comum nos refrigeradores.

É exposto na parte inferior o conector USB para carregamento da bateria.

A Figura 12 mostra a imagem conceito extraída por meio de uma parametrização da aplicação em nuvem DALL-E. Os requisitos esperados foram inseridos no console da ferramenta para se ter algumas ideias iniciais a respeito do design do invólucro plástico do sensor portátil.



Figura 12 - Imagem conceito do sensor portátil produzida pela IA DALL-E 3 em 15-11-2023

#### 4.3.2. Aplicativo de qualificação térmica

O aplicativo é responsável por interagir com o usuário que realizará a qualificação térmica. Cada usuário possui uma conta que o identifica no sistema e o libera usar os recursos

disponíveis. Neste aplicativo o usuário pode cadastrar seu hardware, os sensores e hub concentrador, configurar seus protocolos e iniciar uma qualificação térmica.

Durante a qualificação térmica o usuário é instruído a realizar abertura de porta, instalar sensores, comprovar existência de documentos da câmara a ser qualificada, tudo isso validado por meio de fotos e cliques.

Qualquer necessidade de intervenção do usuário que possa ocorrer durante a qualificação térmica, será comunicada via aplicativo utilizando o serviço de notificações e alertas.

O acesso ao banco de dados de relatórios também é realizado usando o aplicativo. Nesta seção é possível consultar todos os relatórios gerados pelo sistema dos equipamentos daquele determinado usuário.

Como é possível observar na Figura 13, as temperaturas lidas nos sensores são dispostas em caixas, que sinalizam o status da qualificação térmica em cores específicas. No rodapé encontra-se as próximas ações que serão sinalizadas para o usuário seguir em frente com o processo.

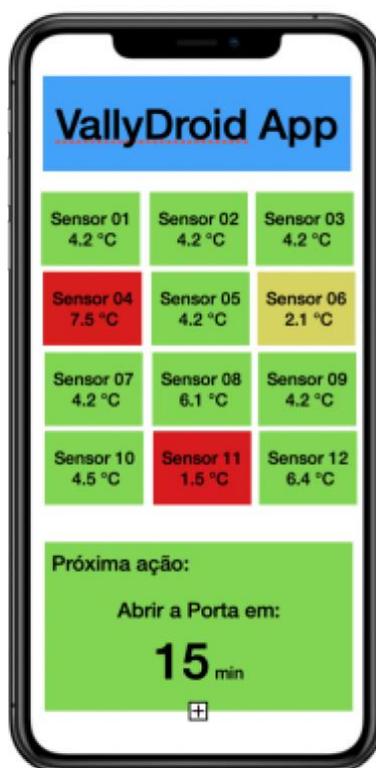


Figura 13 - Tela aplicativo de qualificação térmica (Fonte; o autor)

### 4.3.3. Hub concentrador

Módulo responsável em realizar a ponte de dados entre os sensores portáteis e o servidor em nuvem. O hub concentrador recebe os dados de temperatura dos sensores e envia para o servidor em nuvem. Por sua vez o servidor em nuvem analisa o andamento da qualificação e envia alguns status importantes para o sensor, estes dados são apresentados na tela do sensor. O hub concentrador tem um sistema de comunicação sem fio de baixa velocidade para permitir a troca de informações com os sensores portáteis. Este sistema permite que o sensor faça o envio periódico de dados em baixo consumo de energia. Para comunicação com o servidor, o hub utiliza uma porta *ethernet*.

#### 4.3.3.1. Hardware do HUB concentrador

O HUB concentrador fica normalmente conectado a rede de computadores com acesso a internet por uma porta física *Ethernet* localizada no gabinete do HUB. Conectado com o servidor em nuvem ele informa a leitura de cada sensor que está em monitoramento durante a qualificação térmica.

A conexão com sensor é feita por meio de um link WiFi, cada sensor envia o dado para o HUB utilizando protocolo MQTT.

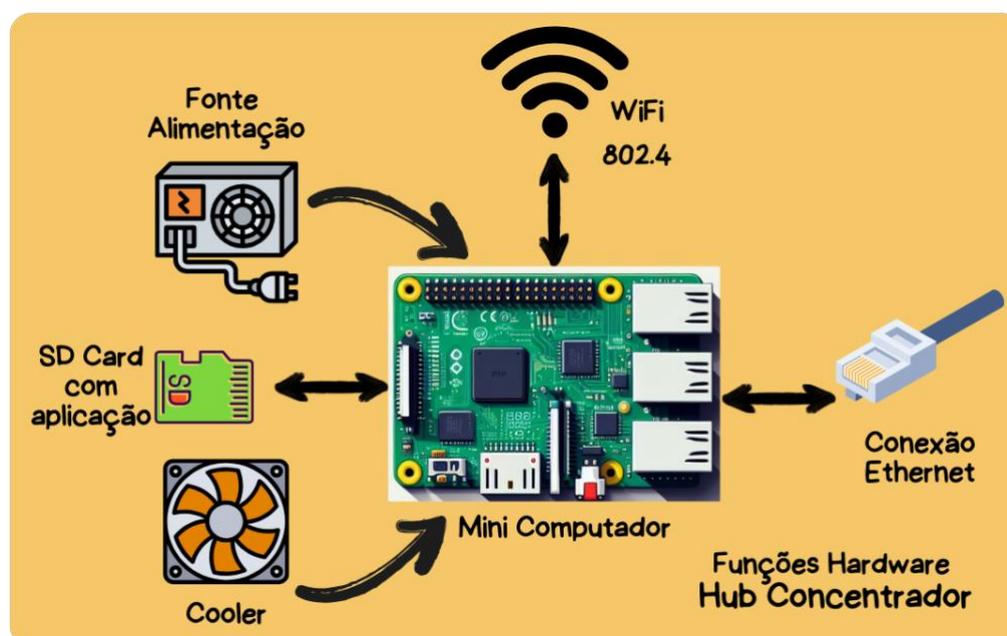


Figura 14 - Projeto arquitetura de hardware do Hub Concentrador (Fonte: o autor)

Como pode ser observado na Figura 14, são previstos para o *hardware* do hub concentrador os elementos eletrônicos que possibilitam as seguintes funções:

- Minicomputador para processamento dos dados enviados pelos sensores portáteis e encaminhamento dos dados para aplicação em nuvem. A aplicação em nuvem recebe os dados e devolve a parametrização necessária para casa sensor.
- Fonte de alimentação para suprir as necessidades de energia do minicomputador e demais periféricos.
- Cartão *SD Card* carregado com a aplicação, com capacidade suficiente para também armazenar os dados de sensores durante o processo de qualificação térmica.
- Micro Ventilador *Cooler* para manter a temperatura ideal para o minicomputador no interior do invólucro plástico do hub concentrador.
- Conexão WiFi usada para conexão e envio de dados entre minicomputador e os sensores portáteis.
- Conexão Ethernet usada para conectar o minicomputador com o servidor em nuvem utilizando rede internet.

#### **4.3.3.2. Software do hub concentrador**

O conjunto de soluções de softwares implementados e embarcados no minicomputador tem por objetivo enviar e receber dados dos sensores alocados para uma determinada qualificação térmica e então enviar esses dados para o servidor em nuvem.

Por se tratar de uma implementação crítica, a qual a máxima quantidade possível de dados precisa ser preservada para garantia de uma análise qualificatória adequada, se faz necessário armazenar os envios em um banco de dados provisório dentro do hub concentrador de todos os dados recebidos dos sensores e da aplicação em nuvem. E assim que houver uma conexão válida, enviar esses dados para o dispositivo pertinente. Essa prática diminui possíveis perdas de informação durante a qualificação térmica. A Figura 15 demonstra o fluxo de dados que as aplicações devem desempenhar no hub concentrador.

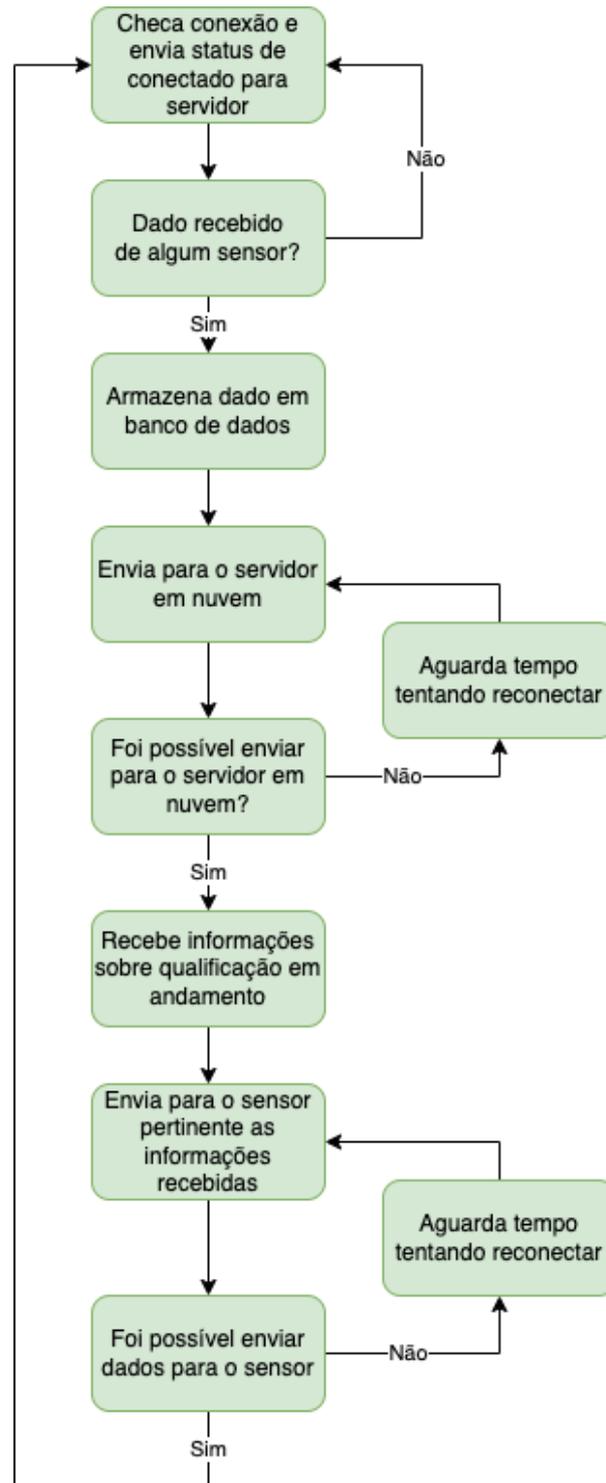


Figura 15 - Fluxograma de funcionamento do hub concentrador

#### 4.3.3.3. Mecânica e invólucro plástico do hub concentrador

O projeto do invólucro plástico do hub concentrador é projetado para acondicionar os elementos de hardware de maneira que proporcione o uso de menor espaço em bancada possível e permita que o mini computador seja resfriado de maneira adequada pelo cooler.

A Figura 16 mostra a imagem conceito, extraída por meio de uma parametrização da aplicação em nuvem DALL-E. Os requisitos esperados foram inseridos no console da ferramenta para se ter algumas ideias iniciais a respeito do design do invólucro plástico do hub concentrador.



Figura 16 - Imagem conceito do hub concentrador produzida pela IA DALL-E 3 em 15-11-2023

#### 4.3.4. Servidor em nuvem

O servidor em nuvem é o módulo responsável por harmonizar a comunicação entre o aplicativo qualificador e o hub que monitora os sensores selecionados para qualificação térmica em andamento.

Todas as regras e parâmetros de uma qualificação, previamente cadastrados no aplicativo, são encaminhados para o banco de dados do servidor e executados durante uma qualificação para guiar o usuário.

Os principais dados manipulados pelo servidor em nuvem são:

Comunicação aplicativo / servidor:

- Cadastro de usuário;

- Cadastro de equipamento a ser qualificado;
- Cadastro de parametrização de protocolo de qualificação térmica;
- Protocolos padronizados de qualificação térmica;
- Fotos comprobatórias durante qualificação térmica;
- Posicionamento espacial de sensores;
- Temperatura dos sensores;
- Informações e tomadas de ação durante qualificação térmica;
- Falhas e alertas durante qualificação térmica;
- Geração do relatório final de qualificação térmica;

Comunicação hub / servidor:

- Temperatura de sensores;
- Posicionamento espacial de sensores;
- Status da qualificação térmica;
- Alarmes e alertas durante qualificação térmica.

A arquitetura que demonstra a responsabilidade da nuvem no sistema de qualificação térmica automatizada, pode ser vista abaixo na Figura 17.

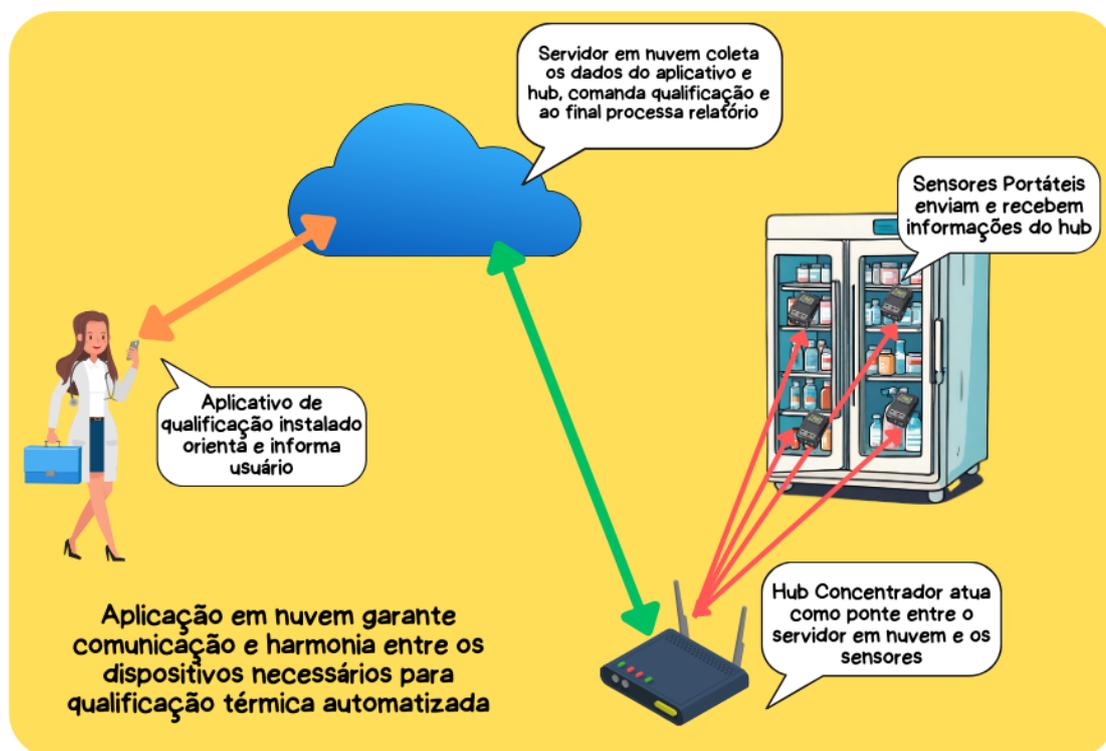


Figura 17 - Diagrama de função da nuvem no projeto (Fonte: o autor)

#### 4.4. Projeto Final

Com o projeto conceitual definido, iniciou-se o desenvolvimento do projeto final, onde cada módulo foi pensado e unitariamente testado para garantir a integração durante a fase de protótipo.

A solução proposta consiste no desenvolvimento de *hardware*, *software* e *firmware*. Todas as camadas foram planejadas de forma a aproveitar ao máximo as soluções de open hardware, nas questões relacionadas às placas eletrônicas e aos elementos mecânicos, e de open *source*, nas questões relacionadas à construção das funções específicas de software do produto desenvolvido e às ferramentas para esse desenvolvimento, como compiladores, depuradores etc.

##### 4.4.1. Projeto do sensor portátil

O projeto do sensor portátil foi dividido em elementos comprados prontos e outros que foram construídos para prototipação de *hardware*. Estes elementos foram testados individualmente antes da montagem do protótipo, para se validar o uso na aplicação.

###### 4.4.1.1. Placa eletrônica do sensor portátil

O *hardware* do sensor portátil foi desenvolvido utilizando-se de uma placa eletrônica de fabricação da Lilygo TTGO T5, uma placa de desenvolvimento de origem chinesa, que atende grande parte dos requisitos necessários para construção do sensor portátil. A placa TTGO T5 possui conexão para um display de papel eletrônico (*e-paper*) de até 2.13 polegadas e comunicação via interface SPI. A placa também conta com um módulo ESP32, que é um microcontrolador com capacidade de conexão Wi-Fi e *Bluetooth*. A placa TTGO T5 é uma solução de *open hardware*, ou seja, seu projeto é aberto e pode ser modificado e adaptado por qualquer pessoa.

A Lilygo disponibiliza exemplos de código e documentação para a placa TTGO T5 em seu repositório no GitHub. A placa TTGO T5 é uma opção interessante para projetos que envolvam sensores portáteis, pois combina a possibilidade de se ligar um display de baixo consumo e alta legibilidade com um microcontrolador poderoso e conectado. Além disso, a placa TTGO T5 possui um carregador de bateria integrado, que permite alimentar a placa com uma bateria externa de 3.7V. A placa também possui um conector de expansão, que disponibiliza GPIOs, GND e 3.3V para conectar outros dispositivos ou sensores.



Figura 18 - Lado componentes da placa Lilygo T5 V2.4.1 (Fonte: (LILYGO, 2024))



Figura 19 - Dimensões da placa Lilygo T5 V2.4.1 (Fonte: (LILYGO, 2024))

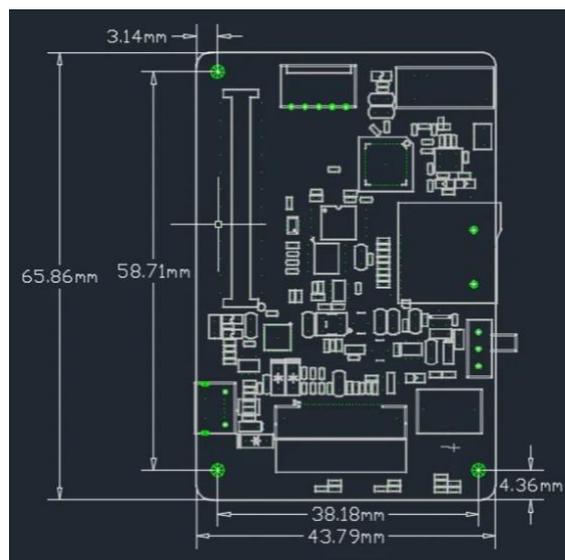


Figura 20 - Dimensões da placa Lilygo T5 V2.4.1 (Fonte: (LILYGO, 2024))

Na Figura 18, Figura 19 e Figura 20 é possível observar a montagem da placa utilizada no protótipo, que possui as seguintes características técnicas:

- Entrada para display *e-paper* com interface SPI;
- Saída de áudio amplificada com micro alto falante;
- 04 botões, sendo 03 de uso geral e 01 de *reset*
- Conector estilo Groove para interface I2C com 5V, 3V3, GND e duas GPIOs;
- Conector para bateria externa de 3,7V de Lítio com carregador embarcado;
- Entrada para SD Card;
- Antena WiFi / *Bluetooth* embarcada e conector para antena externa;
- Conector USB para gravação e depuração microcontrolador, também usado para recarga da bateria;
- Chave liga / desliga, que desconecta a bateria do circuito;
- Conector de expansão de 24 pinos com várias GPIOs;
- Dimensões da placa de 65,86 mm X 43,79 mm.

Demais informações podem ser encontradas no repositório do GitHub da própria Lilygo referente a esta placa (LILYGO, 2024).

#### **4.4.1.2. Sensor de temperatura do sensor portátil**

O sensor de temperatura que será embarcado no sensor portátil é um importante item, pois será por meio dele que a temperatura será medida e enviada a hub concentrador, que por sua vez envia a aplicação em nuvem.

Para evitar a necessidade de circuitos complexos de conversão analógica-digital, que seriam difíceis de implementar na placa Lilygo escolhida, e que poderiam ser afetados por interferências eletromagnéticas de fontes externas de ruído, optou-se por um sensor de temperatura digital, instalado em uma pequena placa de circuito impresso com um conector de saída.

O sensor escolhido foi o SHT31 da empresa suíça Sensirion. O sensor SHT31 da Sensirion é um sensor digital de temperatura e umidade que oferece alta precisão, confiabilidade e versatilidade. Ele é baseado em um novo chip sensor CMOSens® que é o coração da nova plataforma de umidade e temperatura da Sensirion. O sensor SHT31 tem as seguintes características:

- Faixa de medição de umidade relativa: 0 a 100% RH;
- Faixa de medição de temperatura: -40 a 125°C;
- Precisão típica de umidade relativa:  $\pm 2\%$  RH;
- Precisão típica de temperatura:  $\pm 0,2^\circ\text{C}$ ;
- Tempo de resposta: 8 s para umidade e  $> 2$  s para temperatura;
- Tensão de alimentação: 2,4 a 5,5 V;
- Corrente média de alimentação: 1,7  $\mu\text{A}$ ;
- Interfaces: I<sup>2</sup>C ou saída analógica de tensão;
- Dimensão: 2,5 x 2,5 x 0,9 mm;

Mais informações sobre este componente podem ser encontradas no site da própria Sensirion (SENSIRION, 2024).

Por ser um componente SMD de soldagem complicada, optou-se em usar um módulo pronto, onde foi possível soldar os cabos e o conector que vai até a placa da Lilygo, transportando os sinais 3V3, GND, SCL e SDA.

A Figura 21 mostra o módulo com placa eletrônica do sensor SHT31.

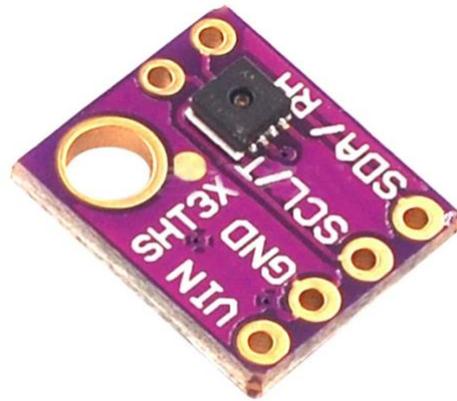


Figura 21 - Módulo com sensor SHT31 da Sensirion (Fonte: (BAU DA ELETRONICA, 2024))

#### 4.4.1.3. Display e-paper

O display montado no sensor portátil é responsável por exibir a temperatura atual, temperatura máxima e mínima, status da conexão, status da qualificação térmica e demais informações que possam ser importantes durante o processo de prototipação.

A tecnologia *e-paper* escolhida permita que o display seja atualizado em casos específicos, sua energia seja interrompida, e a informação permanece ativa na tela.

Compatível com as dimensões e conexão elétrica com placa da Lilygo, o modelo 1,54” com três cores, branco, vermelho e preto, permite não só exibir informações normais em preto e branco, mas também colorir com vermelho informações relevantes como alertas e alarmes.

Exibido na Figura 22, o display GDEY0154Z90 da Good Display é um módulo de display *e-paper* de 1,54 polegadas com três cores (preto, branco e vermelho), que usa a tecnologia de papel eletrônico para mostrar imagens e textos. Esse tipo de display tem baixo consumo de energia, alta legibilidade sob luz solar, ângulo de visão amplo e mantém a imagem estática mesmo quando desligado.

- O display GDEY0154Z90 tem as seguintes características:
- Resolução: 200 x 200 pixels;
- Drive IC: SSD1681;
- Interface: SPI;
- Tensão de trabalho: 3,3V;
- Temperatura de trabalho: 0 a 40°C;
- Dimensões: 37,32 X 31,80 X 0,98 mm.

Mais informações sobre o display podem ser encontradas no site do fabricante Good Display (GOOD DISLPLAY, 2024).



Figura 22 - Display de 1,54" da GoodDisplay (Fonte: (GOOD DISLPLAY, 2024))

#### 4.4.1.4.Bateria

Como explana (CALLEBAUT, 2021) em seu artigo sobre sensores Iot e a longevidade da bateria. É necessário um rigoroso estudo de conectividade, balanceamento das funções da placa eletrônica e um bom conhecimento da aplicação técnica em questão para garantir que em um cenário de conectividade, o sistema sempre preserve a estratégia “pense antes de falar” e

“corra para dormir”, que visam reduzir o tempo e a energia gastos na transmissão e no processamento dos dados.



Figura 23 - Bateria da Rontek de 1150 mAh (Fonte: o autor)

A Figura 23 mostra a bateria usada nos protótipos do sensor portátil, trata-se de uma bateria referência 803048 da Rontek de lítio-íon recarregável que possui três fios e uma capacidade de 1150 mAh. tem as dimensões de 8 mm x 30 mm x 48 mm e pode ser adquirida no site da Rontek

O critério de escolha dessa bateria foi em princípio relacionado ao seu tamanho físico e disponibilidade no mercado brasileiro. As dimensões da bateria são semelhantes ao da placa da Lilygo, dessa maneira a bateria pode ser posicionada com segurança na parte de trás da caixa plástica do sensor portátil.

#### 4.4.1.5. Invólucro plástico

Utilizando o software SolidWorks realizou-se o modelamento do invólucro necessário para acondicionar os itens internos do sensor portátil.

O projeto do invólucro precisa contemplar a acomodação dos seguintes itens:

- Placa Lilygo TTGO T5 montada na parte frontal do invólucro;
- Display e-paper montado na placa Lilygo T5 e posicionado em uma janela na face do invólucro;
- Bateria conectada na placa Lilygo T5 e colada na face interna da tampa traseira do invólucro;
- Sensor de temperatura SHT31 conectado na placa Lilygo T5 e posicionado em um orifício frontal do invólucro;

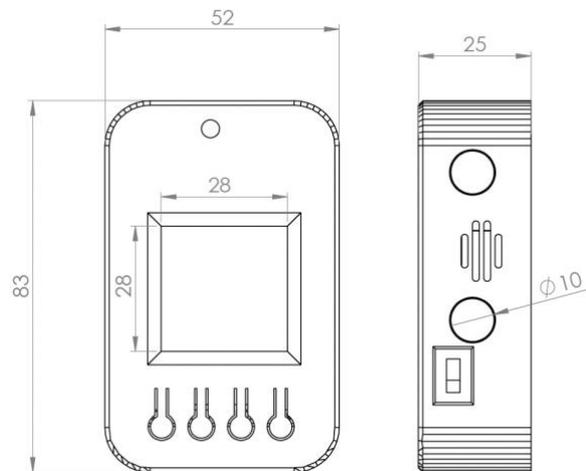


Figura 24 - Dimensões sensor portátil (Fonte: o autor)

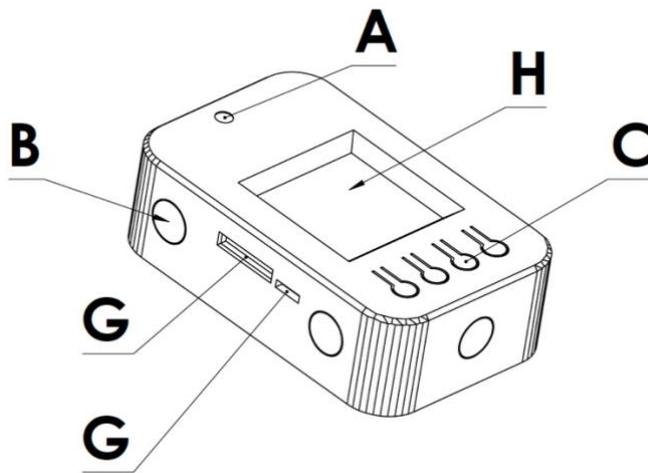


Figura 25 - Frontal Invólucro plástico do sensor portátil (Fonte: o autor)

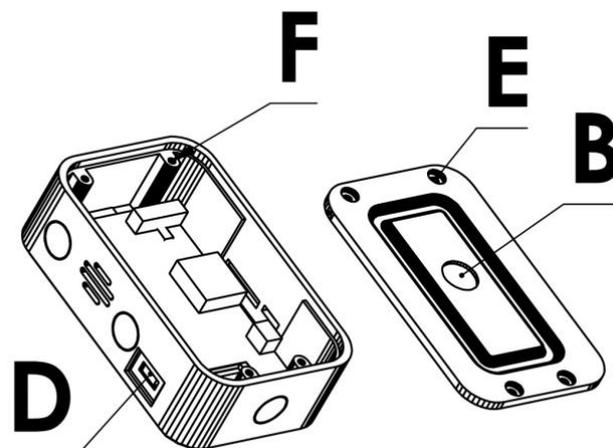


Figura 26 - Traseira invólucro do sensor portátil (Fonte: o autor)

Na Figura 24, Figura 25 e Figura 26 é possível verificar o invólucro plástico projetado para ser impresso em impressora 3D do sensor portátil. Além dos requisitos para montagem dos

elementos apontados acima, com referências as figuras, os seguintes pontos de atenção podem ser observados:

- A. O sensor SHT31 foi montado em alojamento, que expõe um orifício na parte frontal do invólucro, a fim de se evitar o máximo da interferência da temperatura da caixa na medida da temperatura externa;
- B. Nas bordas e na tampa do invólucro foram projetados pequenos rebaixos circulares para possibilitar a montagem de ímãs de neodímio nos sensores, esses ímãs serão usados para montagem em refrigeradores de parede metálica;
- C. Foram projetadas pequenas alavancas nos botões na parte frontal do invólucro, que permite atuar nos botões que estão na placa eletrônica interna;
- D. Uma pequena janela para carregamento de bateria e *debug* via porta Micro USB foi projetada na lateral do invólucro;
- E. A montagem da tampa é feita com pequenos parafusos em aço inoxidável, para se evitar oxidação, visto que o ambiente em um refrigerador pode ser extremamente úmido;
- F. Todo o invólucro foi construído com paredes robustas, para evitar que o sensor seja danificado em quedas, principalmente quando a qualificação ocorrer em ambientes móveis como o baú de um caminhão refrigerado;
- G. Apesar de não serem requisitos de projeto, mas a placa da TTGO T5 possui uma chave liga / desliga e entrada para cartão SD, então foram dimensionados dois rasgos laterais no invólucro para atuar nesses elementos, caso seja necessário no decorrer dos testes;
- H. Janela para o display *e-paper* com rebaixo e vedação anti condensação.

#### **4.4.1.6.Firmware do sensor portátil**

O *BringUp*, fase em que se testou os periféricos da placa e verificou-se a viabilidade para projeto, este foi realizado com rotinas, sub-rotinas e bibliotecas em C/C++ no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE.

As seguintes bibliotecas foram utilizadas para testar cada elemento de forma individual:

Biblioteca para interface com placa da TTGO (versão 2.0.9):

Esse framework Arduino da própria empresa Espressif, fabricante do microcontrolador ESP32 presente na placa da TTGO, constitui a camada básica de software para o acesso aos

periféricos e funções de hardware. Os testes com a conexão WiFi também foram realizados utilizando as funções dessa biblioteca (ESPRESSIF, 2019).

Biblioteca para interface com o sensor de temperatura SHT31:

Utilizando o sensor conectado aos pinos da porta de comunicação I2C, foram realizados testes de leitura do sensor e impressão na porta serial padrão das leituras aleatórias de temperatura e umidade.

Acesso ao barramento I2C (versão 1.11.6) (ADAFRUIT, 2022).

Acesso ao sensor (versão 1.5.1) (CLOSEDCUBE, 2023).

Biblioteca para interface com o display *e-paper* (versão 1.4.4):

Esta biblioteca permite criar figuras primitivas, textos e até carregar arquivos de figuras no display e-paper. Após alguns ajustes de pinagem da porta SPI, temporização e modelo do chip de *hardware* do display, foi possível criar algumas telas de teste do sensor portátil. Como a construída na Figura 27 para validar o drive de comunicação com o display (ZINGGJM, 2023).



Figura 27 - Tela de teste do sensor portátil (Fonte: o autor)

#### 4.4.2. Projeto do hub concentrador

O projeto do hub concentrador foi dividido em elementos comprados prontos e outros que foram construídos para prototipação de hardware. Estes elementos foram testados individualmente antes da montagem do protótipo, para se validar o uso na aplicação.

##### 4.4.2.1. Computador em módulo Raspberry Pi 4

O microcomputador em módulo utilizado para construção do hub concentrador mostrado na Figura 28, é uma Raspberry Pi 4 com as seguintes especificações (RASPBERRY PI, 2024):

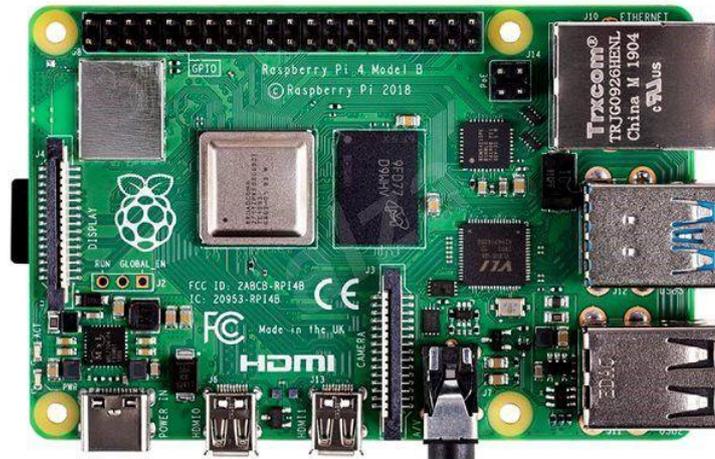


Figura 28 - Raspberry Pi 4 Model B de 2GB (Fonte: (RASPBERRY PI, 2024))

- Processador: Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit @ 1.5GHz
- Memória: 2GB LPDDR4
- Conectividade: 2.4 GHz e 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 5.0, BLE
- Ethernet Gigabit;
- 2 portas USB 3.0;
- 2 portas USB 2.0;
- GPIO: 40 pinos;
- Armazenamento: cartão micros;
- Saída de vídeo: 2 portas micro-HDMI (suporta até 4Kp60);
- Porta de display MIPI DSI de 2 vias;
- Porta de câmera MIPI CSI de 2 vias;
- Áudio estéreo de 4 polos e porta de vídeo composto;
- Decodificação H.265 (4kp60), H264 (1080p60 decode, 1080p30 encode);
- OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0;
- Alimentação: 5V DC via conector USB-C (mínimo 3A\*);
- Temperatura de operação ambiente: 0 – 50 C;
- Uma fonte de alimentação de boa qualidade de 2,5A pode ser usada se os periféricos USB consumirem menos de 500mA no total.

A Figura 29 mostra o cartão de memória que carrega o sistema operacional e as aplicações do hub concentrador, é um Sandisk Ultra TF Card de 16 GB Classe 10 (SANDISK, 2024).



Figura 29 - TF Card para Raspberry Pi (Fonte: (SANDISK, 2024))

Demais informações podem ser entradas no site da raspberry pi referente a esta placa (RASPBERRY PI, 2024)

Este microcomputador em módulo atende bem as especificações necessárias para prototipagem do hub concentrador, com a alocação dos seguintes recursos:

- Porta *Ethernet* será usada para conectar o hub concentrador a internet e garantir conectividade com o servidor, esta porta deve estar para fora do invólucro plástico;
- Radio WiFi será usado para conexão com os sensores portáteis por meio do protocolo MQTT;
- Saida HDMI será usada para configuração da Raspberry em um monitor externo;
- Memória RAM de 2GB será usada para sustentar as demandas das ferramentas de software do hub concentrador;
- A demais portas do microcomputador poderão ser requisitados durante a construção do protótipo para outros fins;
- Porta USB C usada para uma fonte de alimentação externa.

#### 4.4.2.2. Fonte de alimentação para Raspberry Pi 4

A fonte de alimentação da Raspberry Pi 4 é um componente essencial para o funcionamento do dispositivo. Ela fornece a energia elétrica necessária para o processador, a memória, os periféricos e os circuitos integrados. A fonte de alimentação deve ser capaz de fornecer uma tensão de 5.1V e uma corrente de 3A, pois o modelo utilizado, a versão 4 exige muita potência. Além disso, a fonte de alimentação deve ter um conector USB-C.

A Figura 30 mostra a fonte com o cabo mais espesso. Esta fonte de alimentação deve desmontada de sua caixa plástica e o circuito eletrônico acomodado no interior do invólucro plástico desenvolvido para o hub concentrador.



Figura 30 - Fonte de alimentação 5V1 com 3A e plugue USB C (Fonte: o autor)

#### 4.4.2.3. Gabinete plástico

Utilizando o software SolidWorks realizou-se o modelamento do gabinete necessário para acondicionar os itens internos do hub concentrador.

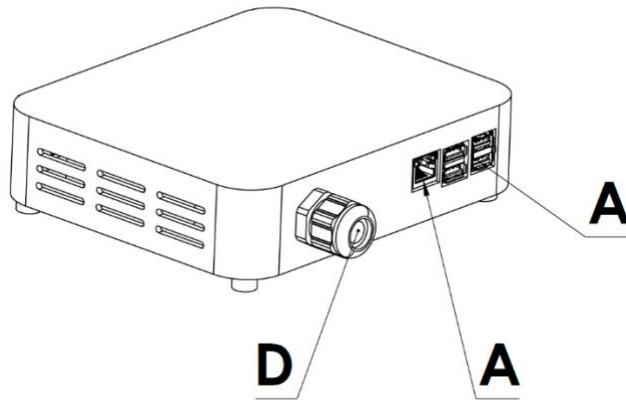


Figura 31 – Vista traseira do hub concentrador (Fonte: o autor)

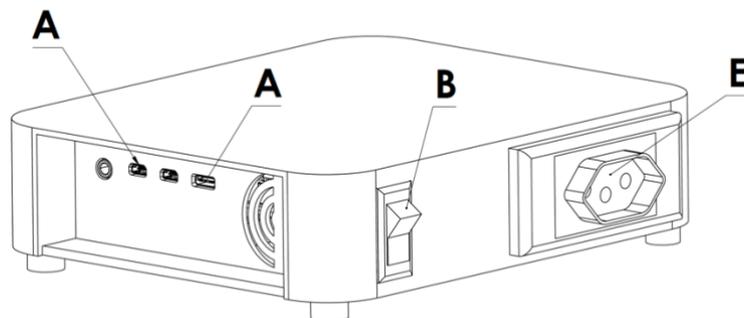
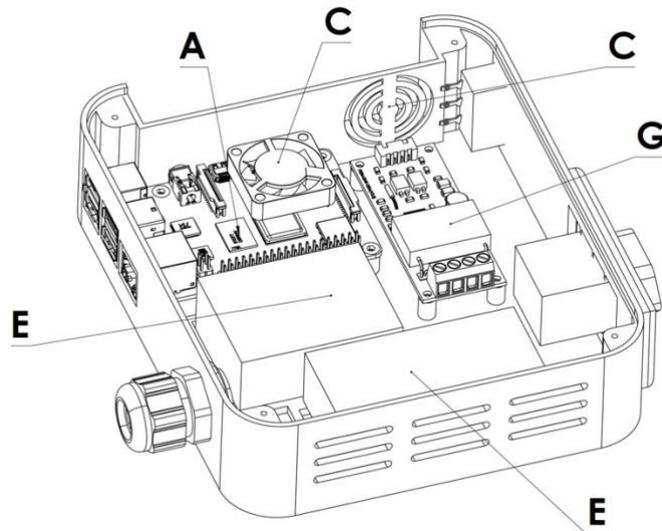


Figura 32 – Vista do painel frontal do hub concentrador (Fonte: o autor)



*Figura 33 – Vista Interior do hub concentrador (Fonte: o autor)*

A Figura 31, Figura 32 e Figura 33 mostram o projeto do invólucro plástico para ser impresso em impressora 3D do hub concentrador, que precisa contemplar a acomodação dos seguintes itens:

- A. Microcomputador Raspberry Pi 4 Modelo B com saídas USB, Ethernet, HDMI e USB C expostas para o exterior do invólucro;
- B. Chave Liga / Desliga para cortar a alimentação do hub concentrador;
- C. Grades perfuradas para acomodar o micro ventilador de resfriamento da Raspberry Pi 4;
- D. Cabo de alimentação do hub concentrador;
- E. Também esta prevista a instalação de uma tomada de força, medidor de energia AC e um relé estado sólido acomodados no invólucro plástico, para serem usados futuramente em uma versão do hub concentrador que poderá também realizar o corte de energia da câmara refrigerada em qualificação, durante o ensaio de performance em falta de energia;
- F. Placa eletrônica removida da fonte chaveada 5V1 / 3A.

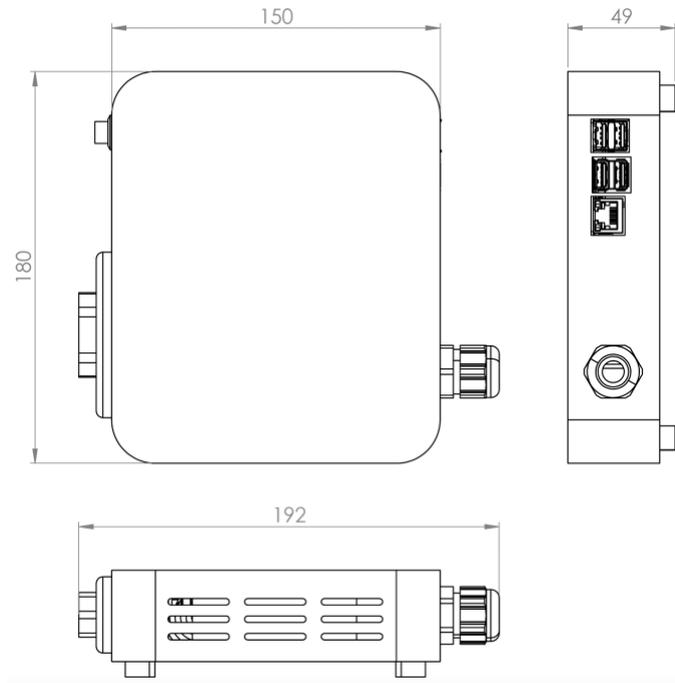


Figura 34 - Dimensões do hub concentrador (Fonte: o autor)

A Figura 34 mostra as dimensões gerais do invólucro plástico desenvolvido para o hub concentrador. O espaço interno foi otimizado para permitir uma menor dimensão externa possível e salvar espaço em bancada no local da instalação.

#### 4.4.2.4. Software do hub concentrador

A preparação da base de *software* para desenvolvimento das aplicações do hub concentrador tem como ponto de partida instalação do sistema operacional.

O sistema operacional da Raspberry Pi é o *software* que permite que esse pequeno computador funcione. Existem vários sistemas operacionais compatíveis com a Raspberry Pi, dependendo do seu propósito e preferência. Para este projeto escolheu-se o Raspberry Pi OS.

Raspberry Pi OS: é o sistema operacional oficial e recomendado pela Raspberry Pi Foundation. É baseado no Debian Linux e otimizado para o *hardware* da Raspberry Pi. Ele oferece uma interface gráfica de usuário amigável, uma grande variedade de aplicativos pré-instalados e um gerenciador de pacotes para instalar outros programas. É possível baixar e instalar o Raspberry Pi OS usando o Raspberry Pi Imager mostrado na Figura 35 ou o NOOBS2 (RASPBERRY PI, 2024).



Figura 35 - Raspberry Pi Imager (Fonte: o autor)

A versão “*Raspberry Pi OS with desktop and recommended software*” foi usado na preparação da imagem que foi gravada no cartão de memória do hub concentrador.

#### 4.4.3. Projeto do aplicativo qualificador

O desenvolvimento das soluções de aplicativo e servidor para o sistema de qualificação térmica automatizada, com diversas etapas manejadas com a metodologia ágil (SUTHERLAND, 2014).

No início foi feito um levantamento de requisitos sobre o projeto e em conjunto com a discussão um desenho inicial da solução, evoluindo para um processo de prototipação de baixa fidelidade utilizando as ferramentas Google Meet e Google Jamboard.

Após uma definição clara do escopo do projeto, a próxima etapa de desenvolvimento do software se deu através da criação dos protótipos de alta fidelidade para as telas da aplicação móvel, utilizando a plataforma Figma (FIGMA, 2023), iterando sob as sprints semanais para alcançar uma proposta visual e funcional que servisse bem ao propósito da solução.

Nesse processo o foco se deu nos fluxos de: Login; Cadastro; gerenciamento e criação de Qualificações, Protocolos, Hubs e Sensores. Além disso, para formalizar os atributos dos objetos a serem utilizados nas aplicações antes de começar o seu desenvolvimento, foi criado um modelo Entidade-Relacionamento na ferramenta draw.io ([app.diagrams.net](http://app.diagrams.net)).

Nas imagens presentes na Figura 36 a Figura 43 é possível verificar alguns exemplos de esboços de tela que foram desenvolvidos para o aplicativo de qualificação térmica. O aplicativo foi projetado a fim de possibilitar o usuário cadastrar seus sensores portáteis e hubs concentradores, parametrizar seus protocolos e usar facilmente esses protocolos em

qualificações térmicas em seus mais diversos equipamentos de refrigeração presentes na planta de trabalho.

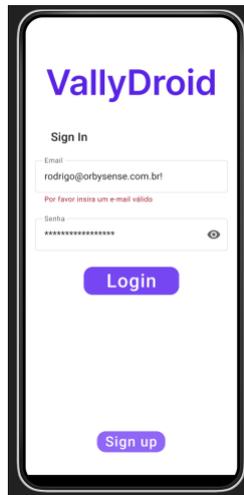


Figura 36 - Esboço tela App Inicial (Fonte: o autor)

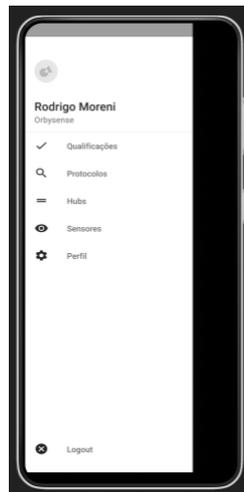


Figura 37 - Esboço tela App menu (Fonte: o autor)



Figura 38 - Esboço tela App cadastro de sensores (Fonte: o autor)

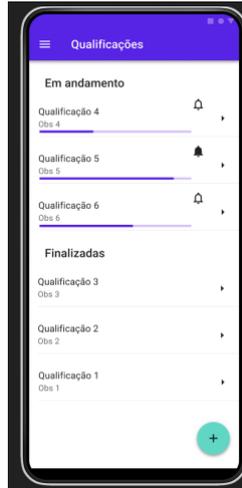


Figura 39 - Esboço tela App qualificações em andamento (Fonte: o autor)



Figura 40 - Esboço tela App acompanhamento qualificação (Fonte: o autor)



Figura 41 - Esboço tela App escolha de protocol (Fonte: o autor)

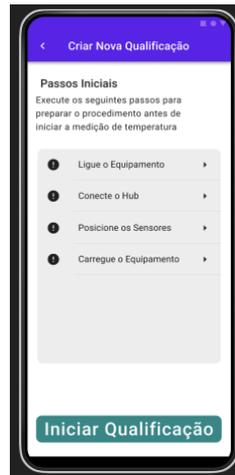


Figura 42 - Esboço tela App iniciar qualificação (Fonte: o autor)



Figura 43 - Esboço tela fase abrir porta (Fonte: o autor)

#### 4.4.4. Projeto do servidor em nuvem

Para a aplicação de qualificação térmica automatizada, estima-se a alocação de servidor em nuvem que é um serviço que permite armazenar dados e aplicações em um ambiente virtual, sem a necessidade de investir em infraestrutura física. Com a alocação de servidor em nuvem, é possível ter acesso aos recursos de forma rápida, segura e escalável, pagando apenas pelo que usar. Existem diferentes tipos e provedores de alocação de servidor em nuvem, dependendo das necessidades e preferências.

Os serviços de nuvem pública são oferecidos por grandes provedores, como AWS, Google Cloud e Microsoft Azure<sup>2</sup>, que disponibilizam seus recursos para vários usuários, com preços variáveis e flexíveis.

Durante a construção do protótipo serão experimentados alguns dos serviços citados acima, sendo muitos deles oferecem um período de gratuidade, com recursos controlados para experimentação e testes de performance.

#### 4.5. Construção do protótipo

Com todos os elementos já definidos no Projeto Final, iniciou-se a construção, integração e testes no protótipo do sistema de qualificação térmica automatizada de câmaras de conservação.

O primeiro módulo preparado para o sistema de qualificação térmica automatizada foi o hub concentrador. Para realizar os testes com os demais módulos era necessário ter essa ponte funcionando de forma básica, capturando os dados enviados pelo sensor e enviando para a nuvem.

##### 4.5.1. Construção do hub concentrador

A ferramenta escolhida para tratamento dos dados recebidos pelos sensores foi a TagoCore Figura 44, trata-se de uma plataforma gratuita, rápida e de código aberto para computação de borda em IoT (Internet das Coisas). Com o TagoCore, os desenvolvedores podem processar e armazenar dados localmente, gerenciar dispositivos, usar conectores e definir ações de forma semelhante ao que podem fazer hoje na nuvem com o TagoIO. A TagoIO é uma plataforma web, 100% cloud e de alto nível para monitoramento de ambientes via dispositivos IoT conectados à sua rede. TagoCore e TagoIO são produtos da empresa Tago, fundada em 2014 nos Estados Unidos (TAGO IO, 2020).

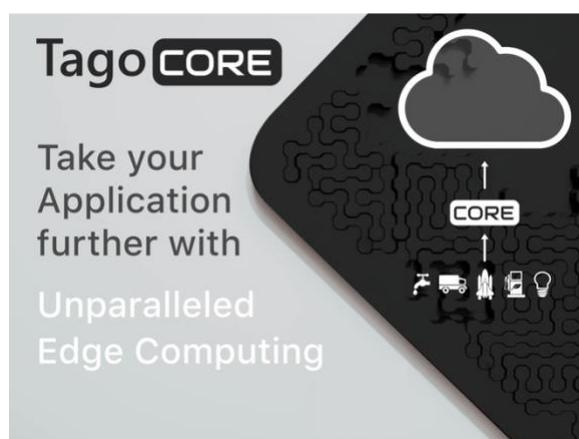


Figura 44 – TagoCore (Fonte: (TAGO IO, 2020))

A ferramenta TagoCore se mostrou ideal para a prototipação do hub concentrador, pois ela já possui o módulo MQTT *Broker* para comunicação leve e eficiente via WiFi com os sensores, banco de dados para armazenar os dados recebidos e uma interface visual padrão para checar localmente, Figura 45, no hub concentrador, os dados que estão chegando.



Figura 45 - Interface visual TagoIO (Fonte: o autor)

O TagoCore foi instalado em PC Desktop para ensaios de envios dos sensores ainda simulados na rede por meio de scripts Python, que geravam os sinais aleatórios de temperatura e enviava para o TagoCore por meio de uma conexão MQTT para validação da ferramenta.

Com a solução simulada e validada. O TagoCore foi instalado na Raspberry Pi 4, que estava com o sistema operacional previamente instalado. A TagoIO disponibiliza uma versão

da ferramenta para ARM64, sendo assim, plenamente compatível com sistema computacional da Raspberry Pi 4.

Com os sensores portáteis montados e enviando para o hub concentrador, iniciou a construção de scripts em Python que permitissem o acesso ao banco de dados do TagoCore e enviasse os dados de cada sensor para o servidor em nuvem. O envio foi projetado para ocorrer de maneira síncrona, ou seja, assim o dado de um determinado sensor chegasse no hub via MQTT WiFi, este automaticamente empacotado via API RESTful e enviado para o servidor em nuvem pela porta ethernet da Raspberry Pi.

Ao enviar um dado para o servidor em nuvem, a API RESTful também verifica se o servidor tem algum dado que deve ser atualizado no sensor portátil, como posição de prateleira, início ou fim de qualificação térmica etc. Caso exista dado para o sensor portátil, o hub é atualizado e depois o dado é transmitido para o sensor.

Em resumo, a ferramenta TagoCore cuida da comunicação MQTT publicando e se inscrevendo em tópicos de dados entre sensores e o hub concentrador. E os scripts Python do hub concentrador acessam a API RESTful desenvolvida no servidor em nuvem para troca de dados entre os dois.

O invólucro plástico do hub concentrador foi impresso em 3D, conforme mostrado na Figura 46, Figura 47 e Figura 48, utilizando material PETG. As peças foram acomodadas conforme desenvolvido no Projeto Final. A impressão foi realizada em uma impressora 3D Ender 6 da Creality.



*Figura 46 - Impressão 3D do hub concentrador (Fonte: o autor)*



Figura 47 - Impressão 3D do hub concentrador vista frontal (Fonte: o autor)

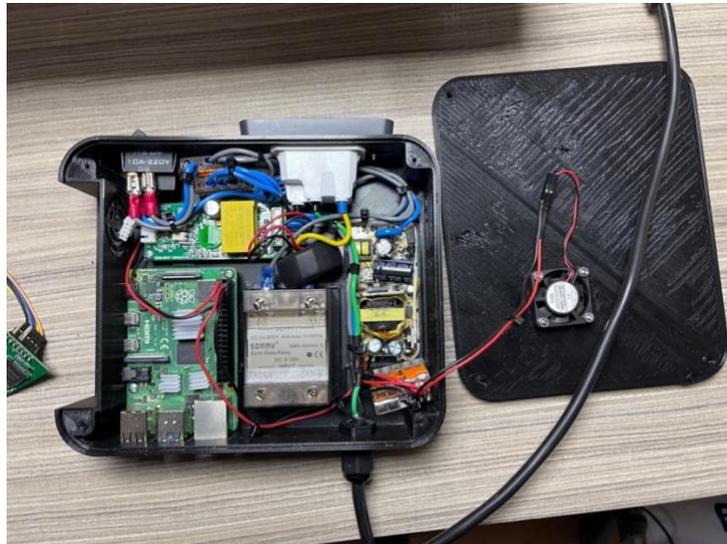


Figura 48 - Componentes acomodados no hub concentrador (Fonte: o autor)

#### 4.5.2. Construção dos sensores portáteis

A construção do protótipo dos sensores portáteis pode ser dividida em 03 fases:

##### 4.5.2.1. Desenvolvimento do firmware

Nesta fase integrou-se todas as bibliotecas mencionadas no capítulo do Projeto Final.

A Figura 49 mostra a placa eletrônica Lilygo sendo programada utilizando o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE. A tela do sensor portátil foi idealizada para suportar a temperatura atual posicionada bem ao meio com números maiores, referente ao ponto de medição em que o sensor portátil está instalado.

Na parte de cima, na barra superior, alguns ícones que podem sinalizar informações importantes como qualificação em andamento, alarmes, sensor alocado em alguma qualificação etc.

A indicação de temperatura máxima e mínima medida pelo sensor também foi projetada para ficar logo abaixo da temperatura principal e possibilitar ao usuário conferir esta temperatura facilmente caso o refrigerador em qualificação tenha porta de vidro.

Um relógio na barra inferior sinaliza o tempo transcorrido da qualificação térmica em andamento.



Figura 49 - LayOut tela do sensor portátil (Fonte: o autor)

Nesta fase realizou-se alguns testes do sensor portátil, ainda somente com a placa eletrônica sem um gabinete plástico. Instalado dentro de um refrigerador, como mostrado na Figura 50, para teste de transmissão do dado até o hub concentrador, levando em consideração que o refrigerador tem paredes com chapa metálica.

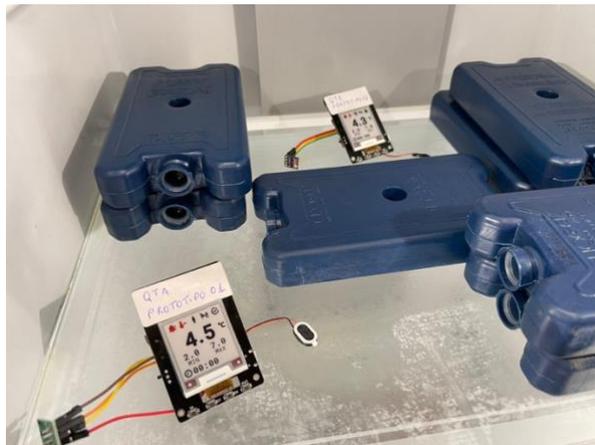


Figura 50 - Placa Lilygo instalada no refrigerador em teste (Fonte: o autor)

Foi possível verificar que o sensor portátil respondeu bem a esse bloqueio e com uma transmissão de 1 em 1 minuto, o hub concentrador instalado a +/- 2 m de distância do refrigerador, os dados foram entregues com integridade.

Entretanto, a bateria utilizada, inicialmente de 3,7V / 1150 mAh suportou somente 24 horas de transmissão. O que não atende a demanda necessária de uma qualificação térmica.

A bateria foi trocada por um modelo de 2000 mAh e o firmware modificado para manter o rádio de transmissão o menor tempo possível ligado, o ciclo de acordar, medir e transmitir em um curto intervalo de tempo.

Observou-se também que a placa da Lilygo, mesmo com o sistema em modo sleep, ainda matinha um residual consumo de energia que drenava alguns miliamperes da bateria. Ponto que será complicado de sanar neste protótipo, visto que a placa é comprada pronta.

Nesta primeira abordagem o desempenho do sensor digital SHT31 foi excelente e se manteve nos limites de precisão declarados em manual, mesmo quando a temperatura do refrigerador atingiu os 4 C de controle.

#### **4.5.2.2. Testes em ambiente controlado com caixa improvisada**

Nesta fase a placa da Lilygo foi instalada em uma caixa plástica transparente simples, conforme mostrado na Figura 51. O intuito foi diminuir a condensação em cima dos componentes eletrônicos, ocorrida intensamente na fase de teste anterior.



*Figura 51 - Placa Lilygo em caixa plástica (Fonte: o autor)*

O *firmware* foi melhorado para poupar o máximo de energia possível durante a transmissão, o sensor ainda não recebe dados do servidor, somente envia.

A bateria instalada foi a de 2000 mAh e taxa de transmissão foi modificada para a cada 5 minutos, sendo esta uma taxa normal usada em procedimentos normais de qualificação térmica. Com essa configuração a durabilidade da bateria saltou para aproximadamente 72 horas, tempo suficiente para se realizar uma qualificação térmica simples, com monitoramento de 24 horas com e 24 horas sem carga simulada.

Nesta versão, os ícones de conexão, sinal de WiFi e bateria estão funcionais e possível identificar esses dados ao visualizar a tela do sensor.

Para efeito de teste e análise da temperatura, os dados coletados e transmitidos são consumidos pela interface visual do TagoCore + TagoIO.

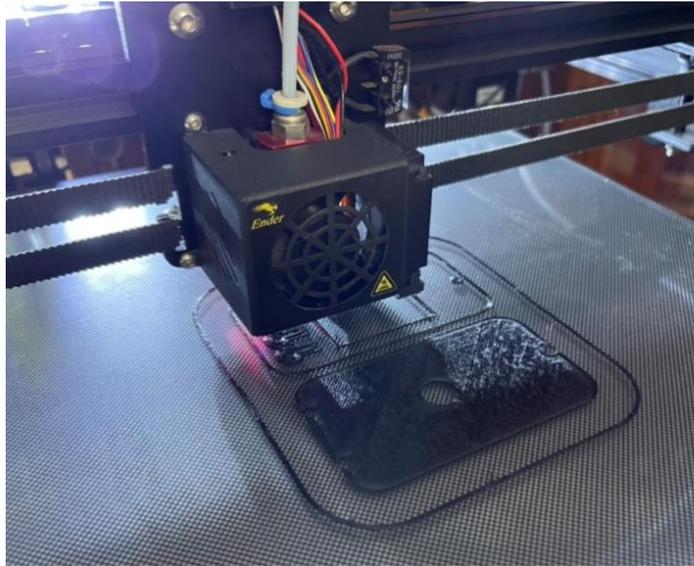
Foram montados 08 sensores portáteis e todos eles instalados em um refrigerador para testes.

#### **4.5.2.3. Testes em ambiente controlado com invólucro plástico impresso**

Nesta fase, a placa eletrônica, sensor e bateria foram acomodados no gabinete plástico conforme projetado e demonstrado no capítulo Protótipo Final.

O invólucro plástico foi impresso em uma impressora 3D do tipo FDM usando o material tipo filamento de PETG. Se comparado aos materiais ABS e PLA, esse material tem boa resistência a impacto, atrito e químicos, e alta dureza, aspectos importantes para as características esperadas dessa peça (BESKO et al., 2017).

A Figura 52 mostra a impressão 3D do invólucro plástico do sensor portátil sendo realizada em uma impressora Ender 6 da Creality.



*Figura 52 - Impressão 3D do invólucro do sensor portátil (Fonte: o autor)*

Foram impressos 15 invólucros plásticos para os sensores e o resultado pode ser visto na Figura 53, Figura 54 e Figura 55 que demonstra o invólucro vazio e com os componentes montados.



*Figura 53- Sensor portátil montado (Fonte: o autor)*



*Figura 54 - Componentes internos do sensor portátil (Fonte: o autor)*



*Figura 55 - Caixa do sensor portátil (Fonte: o autor)*



Figura 56 – Sensor portátil em carregamento da bateria (Fonte: o autor)

A Figura 56 mostra uma série de sensores portáteis em carregamento. A recarga é feita por um cabo micro USB conectado a uma estação de carga para até 10 sensores simultâneos. A recarga da bateria de 2000 mAh leva em torno de 3 horas. Nesta mesma figura, é possível observar em uma das portas o analisador de energia em portas USB da FNIRSI, com ele foi possível analisar a tensão e corrente consumida pelo sensor durante a recarga de bateria.

Na Figura 57 demonstra o medidor de USB FNB48S, foi com ele que se realizou as medidas de consumo em cada versão de bateria e os ajustes em firmware para otimizar consumo durante os testes de medição de temperatura do sensor portátil.



Figura 57 - Medidor de USB FNB48S (Fonte: o autor)

### 4.5.3. Construção do aplicativo qualificador

O aplicativo qualificador teve o seu desenvolvimento concomitante ao do servidor em nuvem, já que ambas as partes do projeto evoluíram em conjunto. Para se adequar ao requisito de disponibilização da solução para aparelhos com sistema operacional tanto Android quanto iOS e ter uma base de código limpa e bem-estruturada, enquanto é mantido o desempenho do programa, foi utilizado no projeto o framework Flutter (FLUTTER, 2019), que utiliza a linguagem Dart.

O maior foco da implementação foi voltado à parte das qualificações, ponto central do projeto, que interage com todo o hardware sendo desenvolvido em paralelo, incluindo: o monitoramento e criação de novas Qualificações de Instalação, Operação e Desempenho; notificações para acompanhamento das Qualificações e das próximas ações necessárias; criação e utilização de protocolos pré-instalados para parametrizar as qualificações do usuário; cadastro e monitoramento dos sensores adquiridos pelos usuários, de forma a utilizá-los em suas Qualificações; e cadastro e gerenciamento dos endereços e itens do inventário do usuário a serem utilizados para identificar as qualificações em suas instalações.

Para isso, foram escritos no total 19 modelos de objetos e 44 componentes, além da utilização das bibliotecas: *provider*; *flutter\_barcode\_scanner*; *intl*; *mqtt\_client*; *http*; *background\_fetch*; *flutter\_local\_notifications*; *image\_picker*; *carousel\_slider*; *url\_launcher*; e *flutter\_speed\_dial*; disponibilizados no repositório oficial para pacotes de Flutter e Dart (<https://pub.dev/>).

### 4.5.4. Construção do servidor em nuvem

O servidor em nuvem responsável por abrigar o banco de dados do ecossistema e servir como ponte de comunicação entre o hub concentrador, que se comunica com os sensores, e o aplicativo qualificador, presente nos celulares dos usuários.

Inicialmente o Web Server, cujo código foi escrito em Python utilizando o Django REST Framework (<https://www.django-rest-framework.org/>) e disponibilizado utilizando as ferramentas uWSGI e Nginx, foi hospedado em um computador local pessoal, passando depois por testes em máquinas na nuvem da AWS, até ter sua versão mais recente integrada à Google Cloud Platform.

Para implementar a solução foram utilizados no total 16 tabelas no banco de dados, com mais de 150 atributos, e uma API RESTful com 12 *endpoints*, cada um deles recebendo chamadas dos métodos POST, GET, PATCH, PUT e DELETE.

#### **4.6. Validação e testes**

Com o protótipo final definido e construído, iniciou-se os testes para validação da ideia. A sequência de ensaios foi definida como testes em laboratório e testes em campo.

A sequência de testes do protótipo do sistema desenvolvido foi planejada e executada para garantir a coleta de dados funcionais e melhoria da solução construída. Inicialmente, os sensores portáteis passaram por testes individuais de calibração e precisão em ambientes controlados, simulando diferentes condições de temperatura. Posteriormente, o hub concentrador foi testado para garantir a comunicação eficiente com os sensores, coletando e transmitindo os dados de maneira adequada.

O servidor responsável por processar as informações foi submetido a testes de desempenho para assegurar sua capacidade de lidar com os dados envolvidos. Por fim, o aplicativo foi testado para garantir uma boa interface, permitindo que o usuário pudesse monitorar e controlar o processo. Essa abordagem abrangente possibilitou a identificação de vários pontos de melhoria do protótipo.

##### **4.6.1. Testes em laboratório**

Para realizar dos testes em laboratório utilizou-se um refrigerador tipo frigobar simples para simular a presença de uma câmara de refrigeração de termolábil.

A estabilidade térmica de um frigobar é muito deficiente, pois não possui circulação forçada do ar refrigerado e o controlador de temperatura é do tipo termostato mecânico. Sendo assim, a parametrização do sistema para possibilitar a qualificação térmica foi bastante relaxado com os níveis aceitáveis de variação de temperatura, muito acima do permitido, com por exemplo para vacinas, que é de  $4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

A Figura 58 mostra o teste de qualificação de um frigobar convencional. Os sensores portáteis foram distribuídos dentro do refrigerador com o objetivo de se captar as diferentes variações de temperatura em diferentes posições na área refrigerada. Algumas caixas de papelão foram inseridas para permitir a simulação da qualificação com carga.



Figura 58 - Refrigerador frigobar em teste pelo sistema desenvolvido (Fonte: o autor)

A Figura 59 evidencia a visualização da tela do aplicativo durante o processo de qualificação em curso. Nota-se, na seção "Ações necessárias" localizada na parte inferior da tela, que o aplicativo já emitiu instruções para a inserção de carga no frigobar. Sequencialmente, iniciou-se o teste de estabilização da temperatura com a carga e então deu-se início ao teste de falta de energia com o frigobar desconectado da fonte de alimentação.

A fase atual trata da monitoração da temperatura de cada sensor até que todos atingissem a temperatura máxima programada e a energia possa ser religada pelo usuário, com a instrução do aplicativo no momento exato.

A seção "Sensores" exibida na tela, mostra a situação atual de cada sensor e a temperatura que o sensor está sendo submetido, além do status "OK" ou "Excursionado", que demonstra o quanto o sensor está saindo da temperatura definida pelo protocolo de qualificação térmica programado. Como dito anteriormente, o frigobar testado apresenta uma grande deficiência de uniformidade térmica, isto é demonstrado pela diferença de 7,7 °C entre a maior e menor temperatura.



Figura 59 - Tela do aplicativo durante teste de qualificação (Fonte: o autor)

Foram realizados vários ensaios como este e foram detectados e corrigidos vários pontos de melhoria e falhas nos softwares do sensor portátil, servidor e hub concentrador. Algumas das correções e melhorias são:

- Tempo de envio do dado do sensor portátil até o hub, a fim de incrementar o tempo de bateria;
- Correção do indicador de energia da bateria para possibilitar, com a conversão da tensão da bateria em um desenho com barras no display e envio desse dado para o sensor;
- Como mostrado na Figura 60, o aplicativo permite o usuário posicionar o sensor em uma prateleira virtual. Essa informação não era passada para o sensor, o que dificultava o usuário saber em qual posição montar o sensor na prateleira. Com a modificação no protocolo de comunicação APLICATIVO -> SERVIDOR -> HUB -> SENSOR PORTÁTIL, foi possível enviar o dado para o sensor portátil e este então exibir na tela *epaper* onde o sensor deve ser posicionado. A Figura 61 mostra na tela do sensor portátil a indicação S02MC, que significa

prateleira 02 e MC (*Middle Center*), ou seja, sensor posicionado na fileira central e no meio da prateleira.

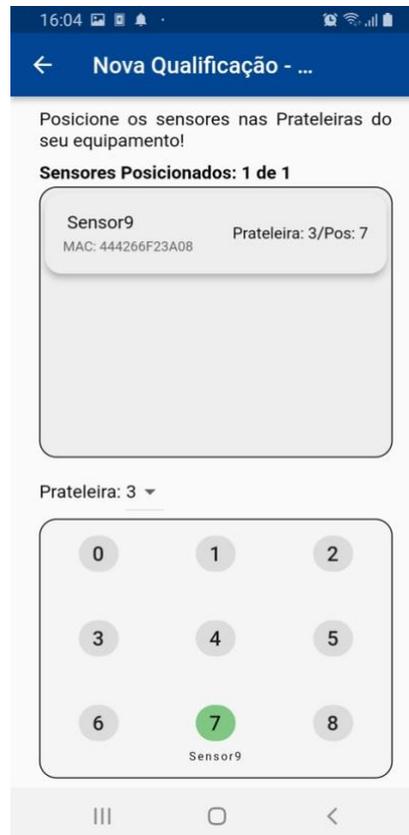


Figura 60 - Tela do aplicativo para posicionamento do sensor (Fonte: o autor)



Figura 61 - Tela do sensor portátil (Fonte: o autor)

Com uma estabilização aceitável do conjunto da solução, Hub + Sensor Portátil + Aplicativo + Servidor, iniciou-se a rodada de teste em campo, onde visitou-se um potencial usuário da solução para demonstrar a evolução do projeto e realizar alguns ensaios de funcionamento em ambiente relevante.

#### 4.6.2. Testes em campo

Nesta etapa, o conjunto da solução de qualificação térmica automatizada, como mostrado na Figura 62, foi levado até um potencial usuário e apresentado cada detalhe funcional desenvolvido, bem como as facilidades oferecidas durante a qualificação térmica.



*Figura 62 - Conjunto de sensores e hub para qualificação térmica automatizada*

O local de testes foi um operador logístico da área de armazenamento de medicamentos, vacinas e outros termolábeis, que utiliza para manter os produtos resfriados uma câmara refrigerada de alta capacidade. Além das câmaras refrigeradas de armazenamento presentes no galpão, como mostrado na Figura 63, o transporte dos termolábeis são feitos por caminhões com baú refrigerado, que periodicamente também são estacionados e submetidos a qualificação térmica.



*Figura 63 - Caminhão refrigerado para transporte de termolábeis (Fonte: o autor)*

Na Figura 64 é possível observar a reunião de apresentação da solução a pessoa responsável pelo setor de garantia da qualidade da empresa. Neste momento, alguns testes foram realizados a fim de se perceber a diferença de temperatura exibida entre os sensores e a variação quando reprogramado o ar condicionado da sala. Os sensores responderam perfeitamente e a impressão foi positiva.

A câmara refrigerada utilizada para testes é a demonstrada na Figura 65, trata-se de um freezer com temperatura ajustada de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Equipamento utilizado para se armazenar alguns tipos de vacinas e medicamentos específicos que necessitam de temperatura mais baixa.



*Figura 64 - Solução sendo apresentada em reunião (Fonte: o autor)*



*Figura 65 - Câmara utilizada para instalação dos sensores (Fonte: o autor)*

Os sensores foram posicionados dentro da câmara conforme mostrado na Figura 66, Figura 67 e Figura 68. Nestas figuras é possível verificar a versatilidade de montagem do sensor

utilizando os imãs cravados no gabinete plástico. Com eles é possível posicionar os sensores em locais onde seria necessário uma base ou fita para fixação.



*Figura 66 - Sensores instalados na câmara refrigerada (Fonte: o autor)*



*Figura 67 - Sensor grudado na parede pelos imãs cravados no gabinete plástico (Fonte: o autor)*



*Figura 68 - Montado no teto metálico utilizando ímãs cravados no gabinete (Fonte: o autor)*

Durante esta visita, foi possível identificar e absorver os seguintes pontos de melhoria para a solução:

- O Hub concentrador deve ter um sistema de comunicação com a internet muito robusto, talvez com redundância entre as conectividades WiFi, Celular e Ethernet. Não serão todos os locais onde haverá disponibilidade de conectividade e caso isso ocorra, o servidor fica “cego” e não recebe as medidas dos sensores.

- O Hub concentrador deve possuir um sistema de *backup* das medidas, pois caso ocorra perda do sinal de internet, os dados podem ser enviados posteriormente.

- Os gabinetes plásticos dos sensores devem ser robustos para suportar quedas e coloridos em vermelho, laranja ou alguma cor chamativa, pois facilita a localização no recolhimento após a qualificação térmica.

Não foi possível realizar uma qualificação térmica completa, em função do tempo que os equipamentos estavam cedidos e a disposição para realização das verificações e ensaios necessários, mas foi possível colher ideias de melhoria de projeto e detectar problemas que a solução pode encontrar quando instalada em um ambiente relevante.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema inovador destinado à qualificação térmica de câmaras de conservação, abordando desde a concepção inicial até a prototipagem e testes de validação. A solução proposta combina hardware e software dedicados para automatizar a coleta, análise e relatório de dados térmicos, representando avanços em relação às metodologias tradicionais, que são tipicamente manuais, devendo ser realizadas por profissionais qualificados, demoradas e suscetíveis a erros.

Uma das principais contribuições deste estudo é a integração de tecnologias de Internet das Coisas (IoT), permitindo o monitoramento remoto e em tempo real das condições térmicas, o que não só otimiza a eficiência dos processos de qualificação térmica, mas também aumenta a precisão e confiabilidade dos dados coletados. Além disso, a modularidade e flexibilidade do sistema proposto facilitam a sua aplicação em diversos contextos industriais e de pesquisa, desde laboratórios farmacêuticos até armazéns de alimentos, onde a manutenção de condições térmicas específicas é crítica.

A implementação do sistema proposto pode resultar em uma redução dos custos associados à qualificação térmica, democratizando o seu acesso para uma gama mais ampla de usuários, incluindo pequenas e médias empresas que anteriormente poderiam ser impedidas pelos altos custos de equipamentos importados e especializados. Esta acessibilidade ampliada é particularmente importante em regiões remotas ou em desenvolvimento, onde a infraestrutura de cadeia de frio é muitas vezes insuficiente ou inexistente.

O estudo também destaca a importância de um design centrado no usuário, com uma interface intuitiva e relatórios automatizados que simplificam o processo de qualificação para operadores não especializados. Esta abordagem não apenas melhora a usabilidade, mas também promove a adoção de práticas de qualificação térmica mais rigorosas, contribuindo para a segurança e eficácia dos produtos armazenados e transportados sob condições controladas.

Em conclusão, este trabalho representa um marco importante na área de qualificação térmica, oferecendo uma solução inovadora que aborda as limitações das metodologias existentes e propõe um caminho viável para a otimização dos processos de qualificação. A aplicação do sistema desenvolvido tem o potencial de impactar positivamente a indústria, garantindo a integridade de produtos sensíveis à temperatura, e pavimenta o caminho para futuras investigações e desenvolvimentos na área de sistemas automatizados de monitoramento e controle de qualidade.

A realização dos objetivos propostos neste trabalho é evidenciada pela eficácia do sistema automatizado desenvolvido, que demonstrou capacidade de realizar a qualificação térmica de câmaras de conservação com alta precisão e confiabilidade. Por meio da implementação de tecnologias avançadas, como sensores de temperatura de alta precisão, comunicação IoT, aplicação em servidor e aplicativo em dispositivo portátil, o sistema alcançou uma melhoria significativa na coleta, segurança e análise de dados, superando os desafios associados aos métodos manuais.

Esta inovação permite uma monitorização contínua e detalhada das condições térmicas e das rotinas de teste envolvidas. Isto garante que os padrões de qualidade e segurança estabelecidos pelas agências reguladoras sejam atendidos, o que é crucial para a integridade dos produtos conservados.

O sucesso do projeto é reforçado pela sua aplicabilidade em diversos contextos, comprovando a flexibilidade e adaptabilidade do sistema. A aceitação positiva por parte dos usuários finais, evidenciada pelo *feedback* durante a fase de testes, confirma que o sistema não só atende às necessidades práticas de qualificação térmica, mas também contribui para a eficiência operacional, redução de custos e prazos. Portanto, o alcance dos objetivos deste trabalho é uma demonstração clara de como soluções inovadoras podem transformar práticas estabelecidas, promovendo melhorias significativas na qualidade, segurança e eficiência dos processos relacionados à cadeia de frio.

Os testes realizados no protótipo do Sistema de Qualificação Térmica Automatizada confirmaram sua capacidade conforme planejado e projetado. Este protótipo foi concebido com os elementos tecnológicos essenciais para ser um mínimo produto viável de média fidelidade e assim validar e testar a proposta do sistema. Durante os testes em campo, em proximidade com os futuros usuários, identificamos diversos aspectos que podem ser aprimorados para aperfeiçoar o sistema.

Dado que o objetivo principal deste sistema é automatizar e tornar mais acessível o processo de qualificação térmica para usuários com pouca experiência técnica, é fundamental que sua operação seja extremamente simples. Nesse sentido, reconhecemos a necessidade de realizar melhorias adicionais no desenvolvimento do produto, a fim de garantir uma operação fluida em todo o processo. Esses incrementos são essenciais para assegurar que o sistema atenda às expectativas e demandas dos usuários, tornando-se uma solução verdadeiramente viável para comercialização.

Este projeto foi aprovado pela iniciativa CATALISA ICT (SEBRAE, 2021), promovida pelo SEBRAE para desenvolvimento de inovação aberta e incentivo a entrada no mercado de potenciais pesquisas científicas. O CATALISA ICT proveu importante mentoria nas áreas de gestão de projetos, validação e relacionamento com possíveis clientes. Também aportou recursos para aquisição dos dispositivos utilizados e financiamento da equipe de apoio para construção do protótipo.

A expectativa é que seja negociada uma nova etapa do programa de incentivo no início de 2024. Nesta etapa 04, o projeto será consolidado com os testes em uma nova e dedicada placa para o sensor portátil, ajustes para emissão automática do relatório de qualificação térmica e então novos usuários parceiros poderão ser acessados para os testes de desempenho e melhoria da solução.

Conforme demonstrado na Figura 69 e seguindo as solicitações do programa Catalisa ICT, realizou-se o pedido de registro de marca de produto, que foi depositado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial INPI e o logo / marca VallyDroid.



*Figura 69 - Marca e Logo VallyDroid*

## REFERÊNCIAS

ADAFRUIT. **Adafruit Bus IO Library**. GitHub. Disponível em: <[https://github.com/adafruit/Adafruit\\_BusIO](https://github.com/adafruit/Adafruit_BusIO)>. Acesso em: 15 fev. 2024.

ANVISA. **Fixados requisitos de Boas Práticas de Armazenagem e Transporte de Medicamentos**. www.in.gov.br. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-de-diretoria-colegiada-rdc-n-430-de-8-de-outubro-de-2020-282070593>>.

ANVISA. **RESOLUÇÃO-RDC nº 304, DE 17 DE SETEMBRO DE 2019 - DOU - Imprensa Nacional**. www.in.gov.br. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-rdc-n-304-de-17-de-setembro-de-2019-216803526>>.

ARKMEDS, Instrumentos. **Analizador de Qualificação Térmica**. Arkmeds. Disponível em: <<https://www.arkmeds.com.br/solucoes/analizadores-e-simuladores-stran-lab/analizador-de-qualificacao-termica-otto>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

BAU DA ELETRONICA, Empresa. **Sensor de Umidade e Temperatura I2C de Precisão SHT-31**. Disponível em: <<https://www.baudaeletronica.com.br/produto/sensor-de-umidade-e-temperatura-i2c-de-precisao-sht31.html>>. Acesso em: 15 fev. 2024.

BESKO, Marcos; BILYK; SIEBEN; *et al.* Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gest. Tecnol. Inov**, v. 01, n. 3, 2017. Disponível em: <<https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>>.

BROWN, Tim. **Design Thinking**. [s.l.]: Alta Books, 2020.

CALLEBAUT, Gilles; LEENDERS, Guus; VAN MULDER, Jarne; *et al.* The Art of Designing Remote IoT Devices—Technologies and Strategies for a Long Battery Life. **Sensors**, v. 21, n. 3, p. 913, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/3/913/htm>>.

CLOSEDCUBE. **closedcube/ClosedCube\_SHT31D\_Arduino**. GitHub. Disponível em: <[https://github.com/closedcube/ClosedCube\\_SHT31D\\_Arduino](https://github.com/closedcube/ClosedCube_SHT31D_Arduino)>. Acesso em: 16 fev. 2024.

CLOUD, Phillip A. **Pharmaceutical equipment validation : the ultimate qualification handbook**. New York: Informa Healthcare, 2007.

ESPRESSIF. **espressif/arduino-esp32**. GitHub. Disponível em: <<https://github.com/espressif/arduino-esp32>>. Acesso em: 15 fev. 2024.

FIGMA. **Figma: the collaborative interface design tool.** Figma. Disponível em: <<https://www.figma.com/>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

FLUTTER. **Flutter - Beautiful native apps in record time.** Flutter.dev. Disponível em: <<https://flutter.dev/>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

GOOD DISPLAY, Company. **Color Epaper 1.54 inch e-ink small display screen, GDEY0154Z90\_Good Display.** www.good-display.com. Disponível em: <<https://www.good-display.com/product/436.html>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

HÜBNER, Marise. **Qualificação De Equipamentos Térmicos Utilizados Em Ensaios. INMETRO.** Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/docs%5CP8\\_QualificacaoEquipamentos\\_MariseHubner.pdf](http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/docs%5CP8_QualificacaoEquipamentos_MariseHubner.pdf)>. Acesso em: 16 fev. 2024.

KAYE, Instruments. **Temperature Validation System - Kaye Validator AVS - Advanced Thermal Validation.** www.kayeinstruments.com. Disponível em: <<https://www.kayeinstruments.com/en/validation-systems/wired-systems/kaye-validator-avs>>. Acesso em: 12 out. 2023.

LILYGO, Company. **Xinyuan-LilyGO/LilyGo-T5-Epaper-Series.** GitHub. Disponível em: <<https://github.com/Xinyuan-LilyGO/LilyGo-T5-Epaper-Series/tree/master>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

LOGTAG. **Products.** LogTag. Disponível em: <<https://logtagrecorders.com/products/?application=vaccine-transportation-who-protocol>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **MINISTÉRIO DA SAÚDE 5 a Edição MANUAL DE REDE DE FRIO Do Programa Nacional De Imunizações.** [s.l.]: Ministério Da Saúde, 2017.

NEOS, Industria. **AQT110.** Néos. Disponível em: <<https://neos.ind.br/produto/aqt110/>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

OLIVEIRA, Fernanda Pereira de. Logística De medicamentos: Um Estudo De Caso Na Secretaria Municipal De Saúde De Um Município Do Espírito Santo – ES. **app.uff.br**, 2019. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/16778>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

PLANTE, Dennis. **Intelligent Thermal Validation & Monitoring System with Asset Management and Self Diagnosis Capabilities US20160274559A1.**

PLANTE, Dennis. Intelligent Thermal Validation & Monitoring System with Asset Management and Self Diagnosis Capabilities US20190004502A1.

RASPBERRY PI. **Raspberry Pi 4 Model B**. Raspberry Pi. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>>. Acesso em: 15 fev. 2024.

ROZENFELD, HENRIQUE. **Gestão de desenvolvimento de produtos uma referência para a melhoria do processo**. [s.l.]: São Paulo: Saraiva, 2017.

SANDISK. **Cartão SanDisk Ultra® microSDHC™/microSDXC™ UHS-I**. Disponível em: <<https://www.westerndigital.com/pt-br/products/memory-cards/sandisk-ultra-lite-uhs-i-microsd?sku=SDSQUNS-016G-GN3MA>>. Acesso em: 15 fev. 2024.

SEBRAE. **Catalisa ICT - Sebrae**. sebrae.com.br. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/catalisa/ictedital>>. Acesso em: 14 mar. 2021.

SENSIRION, Company. **SEK-SHT31-Humidity and Temperature Evaluation Kit SHT31**. Sensirion AG. Disponível em: <<https://www.sensirion.com/products/catalog/SEK-SHT31/>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

SUTHERLAND, Jeff. **Scrum : a revolutionary approach to building teams, beating deadlines, and boosting productivity**. London: Random House Business Books, 2014.

TAGO IO. **Cloud IoT Platform | Internet of Things - TagoIO**. tago.io. Disponível em: <<https://tago.io/>>. Acesso em: 16 fev. 2024.

TEMPORÃO, José Gomes. O Programa Nacional de Imunizações (PNI): origens e desenvolvimento. **História, Ciências, Saúde-Manguinhos**, v. 10, p. 601–617, 2003. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-59702003000500008](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-59702003000500008)>.

TESTO, Instruments. **Testo 174T - Datalogger/Instrumento p/ medição de temperatura**. www.testo.com. Disponível em: <<https://www.testo.com/pt-BR/testo-174-t/p/0572-1560>>. Acesso em: 9 fev. 2024.

WHO. **Qualification of temperature-controlled storage areas**. [s.l.: s.n.], 2015. Disponível em: <<https://www.who.int/docs/default-source/medicines/norms-and-standards/guidelines/distribution/trs961-annex9-supp7.pdf>>.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO Expert Committee on Specifications for Pharmaceutical Preparations**. [s.l.]: Geneva Who, 2015.

YOKOGAWA, Industry. **Touch Screen GP10/GP20 | Yokogawa Electric Corporation.** [www.yokogawa.com](https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/measurement/data-acquisition-products/data-logger/touch-screen-gp10-gp20/#Details__Easy-Predictive-Detection). Disponível em: <[https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/measurement/data-acquisition-products/data-logger/touch-screen-gp10-gp20/#Details\\_\\_Easy-Predictive-Detection](https://www.yokogawa.com/solutions/products-and-services/measurement/data-acquisition-products/data-logger/touch-screen-gp10-gp20/#Details__Easy-Predictive-Detection)>. Acesso em: 9 fev. 2024.

ZINGGJM. **GxEPD2**. GitHub. Disponível em: <<https://github.com/ZinggJM/GxEPD2>>. Acesso em: 15 fev. 2024.