

Uma Abordagem IoT com Software Livre para o Monitoramento Inteligente e Controle Ambiental na Saúde

Thiago Bezerra

Instituto Federal de Pernambuco
Palmares, Brasil

thiago.bezerra@palmares.ifpe.edu.br

Marcos Vinícius

Instituto Federal de Pernambuco
Palmares, Brasil

mvvm@discente.ifpe.edu.br

Flávio Wallafy

Instituto Federal de Pernambuco
Palmares, Brasil

fwso@discente.ifpe.edu.br

Filipe Bezerra

Instituto Federal de Pernambuco
Recife, Brasil

filipe.valentim@ead.ifpe.edu.br

Cleunio França

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Informática - CinRecife, Brasil
cbff@cin.ufpe.br

Gustavo Callou

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Departamento de Computação - DCRecife, Brasil
gustavo.callou@ufrpe.br

Resumo—Internet of Things (IoT) opens new avenues for monitoring critical environments in the healthcare sector, where maintaining controlled parameters such as temperature, humidity, air quality, and ensuring the cold chain, are essential for patient safety and the integrity of medical supplies. This paper details the development and implementation of a monitoring system for this purpose, built entirely upon open-source technologies. The proposed solution utilizes a set of sensors to collect environmental data and temperature readings from refrigeration units. Data is transmitted to a central server running the Debian operating system, stored in the InfluxDB time-series database, and visualized in real-time through interactive dashboards on the Grafana platform. This work demonstrates the technical feasibility and robustness of an open-source architecture, presenting an integrated and scalable solution to enhance safety and quality in healthcare.

Keywords—Internet of Things; Open Technologies; Environmental Monitoring; Cold Chain.

Resumo—A Internet das Coisas (IoT) apresenta novas oportunidades para o monitoramento de ambientes críticos no setor da saúde, onde a manutenção de parâmetros como temperatura, umidade, qualidade do ar e a garantia da cadeia de frio são essenciais para a segurança do paciente e a integridade de insumos. Este artigo detalha o desenvolvimento e a implementação de um sistema de monitoramento para esses fins, fundamentado integralmente em tecnologias abertas. A solução proposta utiliza um conjunto de sensores para a coleta de dados ambientais e de temperatura de unidades de refrigeração. As informações são transmitidas a um servidor central com sistema operacional Debian, armazenadas no banco de dados de séries temporais InfluxDB e visualizadas em tempo real por meio de painéis interativos na plataforma Grafana. O trabalho demonstra a viabilidade técnica e a robustez de uma arquitetura de código aberto, apresentando uma solução integrada e escalável para aprimorar a segurança e a qualidade no cuidado

em saúde.

Palavras-chave—Internet das Coisas; Tecnologias Abertas; Monitoramento Ambiental; Cadeia de Frio.

I. INTRODUÇÃO

A ascensão da Internet das Coisas (IoT) representa um paradigma tecnológico transformador, redefinindo a interconectividade entre o mundo físico e o digital por meio de um ecossistema diversificado de tecnologias de sensoriamento e comunicação [1]. Este fenômeno catalisa inovações disruptivas em múltiplos setores, incluindo saúde, indústria e agricultura. O potencial da IoT é particularmente acentuado em regiões em desenvolvimento, onde a implementação de soluções abertas e eficientes pode superar desafios infraestruturais crônicos e fomentar um progresso socioeconômico significativo [2].

No domínio da saúde, a aplicação de sistemas de monitoramento é de importância crítica. Em ambientes de alta complexidade como as Unidades de Terapia Intensiva (UTIs), o controle rigoroso da temperatura e da umidade é fundamental para o bem-estar do paciente e para a prevenção de infecções nosocomiais. Da mesma forma, a detecção de gases como amônia, óxidos de nitrogênio e outros compostos voláteis é vital para garantir a qualidade do ar [3]. Adicionalmente, a manutenção de uma cadeia de frio rigorosa é um requisito indispensável. Isso é especialmente verdadeiro para o armazenamento de vacinas, imunobiológicos e medicamentos termolábeis, onde qualquer desvio de temperatura pode comprometer a eficácia do

tratamento, acarretar perdas financeiras e, fundamentalmente, colocar em risco a saúde pública [4].

Diante deste cenário, o presente artigo propõe o desenvolvimento e a implementação de um sistema de monitoramento de baixo custo, que se fundamenta no uso estratégico de tecnologias abertas para garantir sua viabilidade econômica. A solução utiliza sensores para a coleta de dados de temperatura, umidade e gases em ambientes críticos, além de um sensor digital para o monitoramento da temperatura em unidades de refrigeração. Toda a infraestrutura de software, desde o sistema operacional do servidor (Debian) até o armazenamento de séries temporais (InfluxDB) e a plataforma de visualização (Grafana), foi implementada com componentes de código aberto. Este trabalho visa demonstrar que é possível construir uma arquitetura de monitoramento robusta e escalável com um investimento financeiro substancialmente inferior ao de soluções proprietárias, apresentando-se como uma alternativa acessível para a melhoria da qualidade e segurança assistencial.

O artigo se encontra conforme descrito a seguir. A Seção II aborda os conceitos fundamentais para que se possa ter uma melhor compreensão deste trabalho. A Seção III apresenta a metodologia utilizada nesse trabalho. A Seção IV apresenta as soluções de mercado, e faz um comparativo com a tecnologia proposta nesse trabalho. A Seção V apresenta a arquitetura IoMT. A Seção VI mostra os resultados obtidos a partir do estudo de caso e, por fim, na Seção VII são apresentadas as conclusões e os futuros direcionamentos dessa pesquisa.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os principais conceitos necessários para uma melhor compreensão deste trabalho.

A. Internet das coisas

A IoT é um paradigma que estabelece um mundo de objetos físicos embarcados com sensores e atuadores, conectados por redes sem fio e comunicando-se através da Internet [5]. A organização desses diversos componentes recebe o nome de arquitetura. Segundo [6], uma arquitetura básica de IoT pode ser dividida nas seguintes camadas: dispositivos, comunicação, processamento e apresentação (Figura 1).

A camada de dispositivos é responsável por realizar a coleta de dados e contempla, por exemplo, os equipamentos dos sensores e microcontroladores. A camada de comunicação realiza a transferência de dados através de protocolos, para processamento posterior. A camada de processamento manipula dados para executar serviços do sistema. Por fim, a camada de apresentação fornece mecanismos para interação com o usuário final. É importante destacar que os sensores têm um papel fundamental nesse contexto, pois são responsáveis por coletar dados de vários dispositivos [7].



Figura 1. Arquitetura básica de uma aplicação de IoT.

B. Internet das Coisas Médicas

A Internet das Coisas Médicas (IoMT) tem por definição uma infraestrutura de interconexão através dos protocolos, de aplicativos, dispositivos e equipamentos médicos que buscam, por meio dessa integração, tornar os serviços de saúde mais eficientes e econômicos [8], [9].

Dentro do âmbito hospitalar, a IoMT abrange o monitoramento remoto de pacientes por meio de sensores e plataformas inteligentes, redes de comunicação, armazenamento em nuvem, processamento, análise e gerenciamento de dados de maneira integrada e eficaz, garantindo segurança e controle das informações de saúde [10].

Em um ambiente hospitalar, onde os pacientes estão internados e muitas vezes aguardando atendimento de emergência, a segurança e o bem-estar precisam ser considerados [11]. Para melhorar ainda mais a qualidade dos cuidados médicos, a utilização de sensores, câmeras e algoritmos de aprendizado de máquina tem se mostrado uma solução eficaz. Essas tecnologias contribuem com benefícios significativos para a saúde dos pacientes e a eficiência dos processos hospitalares [12].

A IoMT tem sido amplamente utilizada para monitoramento e coleta de dados, possibilitando a prevenção e intervenção eficaz em situações de emergência. No entanto, suas aplicações vão além disso, abrangendo melhorias na qualidade de vida, reabilitação de pacientes, gerenciamento em tempo real de condições médicas e aprimoramento da experiência do usuário [13].

C. Grafana

O Grafana é uma plataforma de código aberto para visualização e análise de dados, amplamente utilizada para o monitoramento de sistemas e aplicações. Ele permite que os usuários criem painéis (*dashboards*) interativos e dinâmicos a partir de diversas fontes de dados. Originalmente projetado para

visualizar dados de séries temporais, o Grafana se tornou uma ferramenta central em pilhas de monitoramento, especialmente em aplicações de IoT, DevOps e infraestrutura de TI [14].

A principal força do Grafana reside em sua capacidade de se conectar a múltiplas fontes de dados simultaneamente, incluindo bancos de dados de séries temporais como o InfluxDB, bancos de dados relacionais como PostgreSQL e fontes de dados de provedores de nuvem. Sua interface web, intuitiva e baseada em navegador, oferece um editor de painéis robusto, onde os usuários podem construir visualizações complexas arrastando e configurando painéis.

Esses painéis podem exibir dados em uma vasta gama de formatos, como gráficos de linha, medidores (*gauges*), estatísticas únicas, mapas de calor (*heatmaps*) e tabelas. Além da visualização, o Grafana possui um sistema de alerta integrado que permite aos usuários definir regras baseadas nos dados e enviar notificações através de múltiplos canais, como *e-mail* ou *Slack*, quando determinadas condições são atendidas. Sua arquitetura extensível, baseada em *plugins*, permite que a comunidade adicione novas fontes de dados, painéis e funcionalidades, tornando-o uma solução altamente flexível para a observação de dados em tempo real [14].

III. METODOLOGIA

Esta seção descreve a abordagem metodológica adotada para o desenvolvimento e validação do sistema proposto. O objetivo foi criar uma plataforma para a visualização e análise de parâmetros ambientais e de cadeia de frio em contextos de saúde, empregando sensores IoT e uma arquitetura de software inteiramente aberta. A Figura 2 ilustra o fluxo de trabalho executado.

A primeira fase, de compreensão do sistema, consistiu no levantamento dos requisitos funcionais e não funcionais. Nesta etapa, foram definidos os parâmetros a serem aferidos, como temperatura, umidade, qualidade do ar e temperatura de refrigeração. Foram então selecionados os sensores mais adequados para cada tarefa, incluindo sensores para medições de temperatura e umidade ambiente, para a detecção de qualidade do ar e gases, e sensores de temperatura à prova d'água para o monitoramento preciso da cadeia de frio.

A fase seguinte foi dedicada à montagem e configuração dos dispositivos de aquisição de dados. Cada conjunto de sensores foi integrado a um microcontrolador com capacidade de comunicação sem fio, que foi programado para coletar e transmitir os dados periodicamente. A transmissão para o servidor foi implementada utilizando um protocolo de mensagem leve, escolhido por sua eficiência em aplicações IoT. Posteriormente, a infraestrutura do servidor foi configurada em uma instância de um sistema operacional de código aberto. Um *broker* de mensageria foi instalado para receber os dados

dos sensores, que são então persistidos em um banco de dados de séries temporais. Para a visualização, foi desenvolvido um painel de controle interativo em uma ferramenta de visualização de código aberto, permitindo a análise em tempo real das variáveis monitoradas.

A quarta etapa do projeto foi dedicada aos experimentos. Foram conduzidos experimentos em um ambiente controlado para aferir a precisão e a confiabilidade dos sensores. O fluxo metodológico previu um ciclo iterativo, no qual resultados não satisfatórios na fase de experimentos implicariam um retorno à etapa de compreensão do sistema para ajustes e reconfiguração. Por fim, a análise dos resultados obtidos nos experimentos permitiu confirmar a capacidade do sistema em monitorar os parâmetros propostos com a devida precisão, demonstrando a robustez e a aplicabilidade da arquitetura de código aberto desenvolvida para o setor de saúde. Ressalta-se que, por se tratar de um estudo focado exclusivamente no monitoramento de parâmetros ambientais, sem qualquer coleta de dados ou interação direta com pacientes, a aprovação por um comitê de ética em pesquisa não se fez necessária.



Figura 2. Metodologia

IV. ANÁLISE COMPARATIVA COM SOLUÇÕES DE MERCADO

Esta seção apresenta uma análise comparativa entre a solução desenvolvida e os dispositivos comerciais disponíveis no mercado. Os critérios de avaliação foram selecionados para abranger os aspectos mais críticos de uma solução de IoT, incluindo o custo estimado, a arquitetura de sensoriamento, o método de transmissão de dados e a capacidade de visualização remota via web. A Tabela I apresenta os dados [15]–[18].

A análise da conectividade apresenta uma segmentação no mercado. Dispositivos como o IZONE TEMPU06 e o Hiato S700 são primariamente focados em monitoramento local (via Bluetooth ou USB), o que restringe o acesso remoto. Em contraste, a solução proposta alinha-se com o Hiato S700-WIFI e as soluções da TandD/Lascar, ao adotar uma arquitetura nativa em nuvem (via Wi-Fi/4G), permitindo a visualização e o gerenciamento dos dados de qualquer local através da plataforma Grafana.

No que tange aos recursos e características, a versatilidade do protótipo desenvolvido é um diferencial. Enquanto soluções comerciais frequentemente se especializam, como o IZONE TEMPU06 (com seu sensor PT100 de alta precisão e proteção industrial IP66) ou os modelos da TandD/Lascar (com sensores específicos para CO_2 , UV e certificações CE/ISO para uso

Tabela I
COMPARATIVO DAS SOLUÇÕES

Produto	Preço Estimado	Envio de Dados	Recursos e Características	Visualização Web
Nossa Solução	R\$ 144	Wi-Fi e 4G	MQ135 (Gases/Qualidade do Ar): Detecta fumaça, amônia, benzeno, NOx. DHT22 (Temperatura e Umidade): Mede de -40°C a 80°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) e 0-100% umidade ($\pm 2\%$). DS18B20 (Temperatura Digital): Alta precisão ($\pm 0.5^\circ\text{C}$), ideal para líquidos e ambientes úmidos.	Sim, supporta cloud
Huato S700-WIFI	R\$ 870,00	Wi-Fi e LAN	Sensores internos/externos (normalmente termistores para temperatura e sensores capacitivos para umidade), memória para 43.000 registros, alarme sonoro, display LCD e bateria de longa duração.	Sim, suporta cloud
Huato S700	R\$ 870 – R\$ 1.200	Wi-Fi	Sensor interno (geralmente para temperatura e umidade ambiente), display LCD, alarmes.	Não possui ou não é mencionado
TZONE TempU06	R\$ 435 – R\$ 545	Bluetooth	Sensor externo PT100: Padrão industrial de alta precisão e estabilidade. Ampla faixa de medição (tipicamente -200°C a +650°C). Proteção IP65, 32.000 registros.	Sim, apenas visualização local
Huato S400W-ZigBee	R\$ 270 – R\$ 810	ZigBee e LAN	Sensores interno/externo, tecnologia anti-interferência, alarme sonoro.	Não possui ou não é mencionado
TandD / Lascar	R\$ 1.575 – R\$ 3.000	Wi-Fi e Bluetooth	Alta precisão com múltiplos sensores: CO: Medição específica de dióxido de carbono. Luz/UV: Sensores para monitorar luminosidade e radiação ultravioleta.	Sim, suporta cloud

hospitalar), a nossa solução se destaca por integrar nativamente uma arquitetura de sensoriamento tripla. Ela combina o monitoramento da qualidade do ar (MQ-135), a medição de temperatura e umidade ambiente (DHT22) e a aferição precisa de temperatura para a cadeia de frio (DS18B20), oferecendo uma visão holística do ambiente.

O fator econômico, contudo, emerge como a proposta de valor mais contundente. Com um custo estimado em R\$ 144, a solução proposta apresenta uma ordem de magnitude de custo inferior à vasta maioria dos concorrentes. Mesmo soluções com funcionalidades mais limitadas, como as da Hiato, possuem um custo de 2 a 8 vezes superior. Dispositivos com múltiplas capacidades e certificações, como os da TandD/Lascar, podem ultrapassar R\$ 1.500. Portanto, o protótipo desenvolvido não apenas é funcionalmente competitivo, mas se posiciona como uma alternativa de grande viabilidade econômica. Ele oferece um conjunto de recursos de monitoramento abrangente e uma arquitetura aberta e flexível por uma fração do custo das soluções comerciais proprietárias, sendo ideal para pesquisa, customização e implementação ágil.

V. ARQUITETURA IOMT

Esta seção detalha a arquitetura do sistema de monitoramento desenvolvida neste trabalho. A arquitetura, ilustrada na Figura 3, descreve o fluxo de coleta, transmissão, armazenamento e visualização dos dados, utilizando uma pilha de tecnologias de software livre. O processo se inicia na camada de dispositivo, onde os nós sensores capturam os parâmetros do ambiente.

Cada nó sensor é composto por um microcontrolador da família ESP, responsável pelo processamento e conectividade, e um conjunto de sensores específicos. Foram utilizados os sensores DHT22 para aferir temperatura e umidade, MQ-135

para a qualidade do ar e DS18B20 para a medição precisa de temperatura em refrigeradores. Os dados coletados são publicados em uma rede Wi-Fi utilizando o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), que garante uma comunicação leve e confiável entre os dispositivos e o servidor.

A camada de processamento foi implementada em uma instância do sistema operacional Debian, centraliza o recebimento e o processamento dos dados. Um *broker* MQTT recebe as informações publicadas pelos nós sensores e as disponibiliza para um serviço que persiste os dados no InfluxDB, um banco de dados otimizado para séries temporais. A camada de apresentação é gerenciada pelo Grafana, que se conecta ao InfluxDB como fonte de dados. No Grafana, foram construídos painéis de controle interativos para exibir as informações em gráficos e medidores, permitindo que a equipe responsável analise as condições ambientais e da cadeia de frio de forma intuitiva.

Um diferencial da arquitetura proposta é sua modularidade e escalabilidade. A adição de novos pontos de monitoramento, seja um novo ambiente ou outro refrigerador, requer apenas a implantação de um novo nó sensor configurado para publicar na mesma infraestrutura de servidor. A arquitetura baseada em componentes de código aberto como MQTT e InfluxDB é projetada para suportar um grande volume de dispositivos e dados, permitindo que a solução escale de uma pequena unidade para uma instalação hospitalar completa sem a necessidade de uma reestruturação fundamental do sistema.

A. Implementação da arquitetura

A fase de implementação da arquitetura abrangeu a construção de dois modelos de protótipos para os nós sensores, cada um projetado para uma finalidade específica dentro do

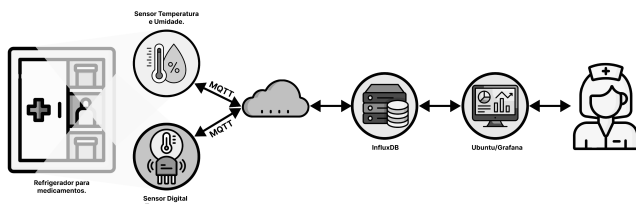


Figura 3. Arquitetura de funcionamento da solução IoMT utilizada nesta pesquisa.

ecossistema de monitoramento. O primeiro protótipo, focado no monitoramento ambiental, é detalhado na Figura 4. A subfigura (a) exibe os componentes selecionados para esta tarefa, que incluem a placa microcontroladora, a *proto-board* para conexões, o sensor de temperatura e umidade DHT22 e o sensor de qualidade do ar MQ-135. A subfigura (b) mostra o circuito completo após a montagem, com os sensores devidamente interligados e em operação para a coleta de dados do ambiente.

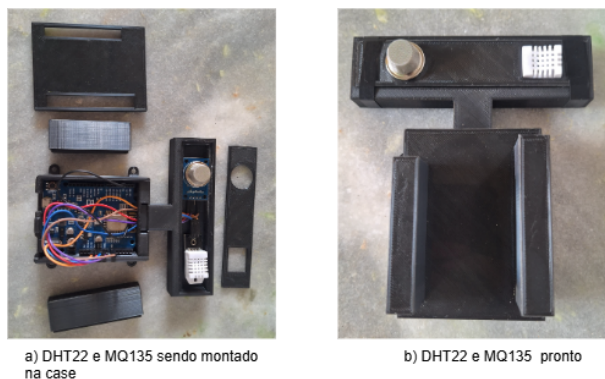


Figura 4. Protótipo DHT22 e MQ-135

O segundo protótipo, dedicado ao monitoramento da cadeia de frio, é apresentado na Figura 5. Para este nó, foi utilizado o sensor de temperatura à prova d'água DS18B20. Sua montagem é ilustrada na subfigura (a), que mostra os componentes eletrônicos internos antes de serem acondicionados em uma caixa protetora fabricada por impressão 3D. Conforme exibido na subfigura (b), o resultado é uma unidade final, compacta e pronta para ser instalada no interior de uma unidade de refrigeração.

A segunda fase concentrou-se no provisionamento da infraestrutura de servidor. Foi provisionada uma máquina virtual dedicada, na qual foi instalado o sistema operacional Debian 12 (*Bookworm*), escolhido por sua estabilidade e por ser importante no ecossistema de software livre. A funcionalidade do ambiente foi validada, como demonstra a Figura 6, que

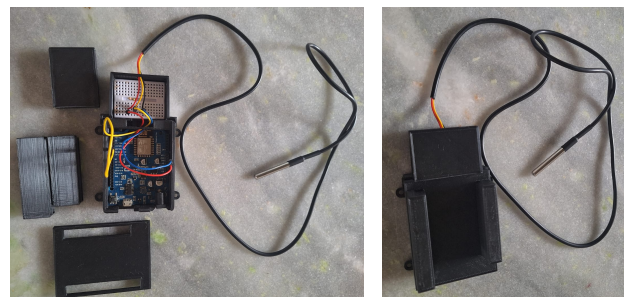


Figura 5. Protótipo DS18B20.

exibe o status ativo do serviço do Grafana. Neste servidor, foi implementado o InfluxDB, um banco de dados de séries temporais otimizado para a alta ingestão e consulta de dados de IoT. Sua configuração envolveu a criação de um *bucket*, um contêiner nomeado para os dados, e a geração de um *token* de autenticação, mecanismo que garante que apenas o dispositivo autorizado possa enviar dados para o banco, assegurando a segurança do *endpoint*.

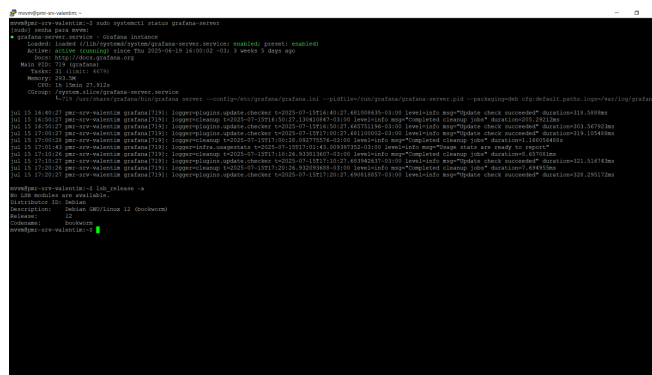


Figura 6. Instância Debian

A fase final foi a integração da plataforma de visualização. O Grafana (cuja interface inicial é mostrada na Figura 7) foi instalado no mesmo servidor Debian. A primeira ação de configuração foi adicionar o InfluxDB como uma fonte de dados (*data source*), fornecendo ao Grafana o endereço do servidor e o *token* de autenticação. A partir daí, foi construído o *dashboard* de monitoramento. Utilizando o editor de painéis do Grafana e a linguagem de consulta Flux, foram criadas as *queries* para buscar os dados de frequência cardíaca e saturação de oxigênio do InfluxDB e exibi-los em painéis do tipo *Time series*, completando assim o fluxo de dados desde o sensor até

a interface do usuário.

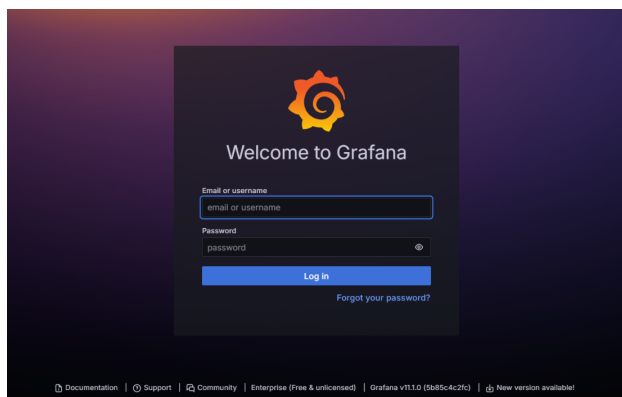


Figura 7. Página inicial do Grafana

Essa visualização facilita a análise por profissionais da área da saúde, promovendo uma interface intuitiva e acessível para a interpretação dos dados coletados. Essa implementação proporcionou um sistema eficiente para a aquisição, processamento e visualização de dados fisiológicos, permitindo a integração entre hardware e software de forma robusta e escalável.

VI. EXPERIMENTOS

Esta seção detalha os resultados experimentais obtidos, organizados em três análises complementares para validar a arquitetura proposta e demonstrar sua eficácia. A primeira análise, Aplicabilidade, foca na validação funcional do sistema, comprovando a correta captura dos dados pelos sensores, sua exibição na plataforma e o funcionamento do sistema de alertas. A segunda, Análise Temporal dos Parâmetros Monitorados, analisa a evolução e a correlação entre as variáveis ao longo de todo o período do experimento. Por fim, a Análise de Padrões Diurnos por Hora caracteriza os ciclos de comportamento recorrentes das variáveis, agregando os dados para revelar as tendências de um dia típico.

A. Aplicabilidade

O primeiro experimento foi delineado para realizar a validação funcional da arquitetura de ponta a ponta, com o objetivo de verificar a capacidade do sistema em capturar, transmitir, armazenar e exibir corretamente os dados provenientes dos múltiplos sensores. Para este fim, os nós sensores foram instalados em um ambiente laboratorial controlado que simulava as condições de um ambiente de saúde. O nó responsável pelo monitoramento ambiental, contendo os sensores DHT22 e MQ-135, foi posicionado no ambiente, enquanto o sensor DS18B20 foi instalado no interior de uma unidade de refrigeração para simular o monitoramento da cadeia de frio.

O sistema foi mantido em operação contínua para registrar as flutuações dos parâmetros ao longo de várias horas.

Os resultados consolidados deste experimento são apresentados no painel de controle do Grafana, conforme ilustrado na Figura 8. O painel exibe os dados coletados para cada variável monitorada. Observam-se os gráficos de temperatura e umidade ambiente, que demonstram a capacidade do sensor DHT22 em registrar com sensibilidade as variações térmicas e de umidade relativa do ar. Adicionalmente, os painéis rotulados como “Gás CO ”, “Gás CO_2 ” e “Gás NH_3 ”, monitorados pelo sensor MQ-135, ilustram a resposta do sensor às variações na qualidade do ar ambiente, apresentando curvas correlacionadas que representam estimativas das concentrações desses gases.

De forma particular, o gráfico “Temperatura - Geladeira” apresenta o funcionamento efetivo do sensor DS18B20, registrando a rápida diminuição da temperatura após o início da operação da unidade de refrigeração até atingir uma faixa estável e baixa (próximo a $4^{\circ}C$), essencial para a cadeia de frio. O pico inicial observado no gráfico reflete a temperatura do refrigerador antes de ser ligado. A estabilização subsequente atesta a capacidade do sistema em monitorar a temperatura interna de forma consistente. A análise conjunta do painel de controle confirma a integração de todos os componentes da arquitetura. A fluidez dos dados, desde o conjunto heterogêneo de sensores até a interface gráfica, demonstra que a comunicação via MQTT, o armazenamento no InfluxDB e a renderização no Grafana operaram de forma coesa e eficiente. Portanto, este experimento valida a funcionalidade do sistema, atestando sua capacidade de monitorar de forma confiável os parâmetros propostos.

Um componente fundamental da arquitetura, também validado durante este experimento, é o sistema de alertas proativos. Integrado à plataforma Grafana, o sistema foi configurado para disparar notificações automáticas sempre que os parâmetros monitorados excedessem os limites pré-definidos como seguros. Estes alertas eram então encaminhados em tempo real para um *chatbot* no *WhatsApp*, garantindo que a equipe responsável fosse notificada imediatamente sobre qualquer anomalia, independentemente de estarem visualizando o painel de controle ativamente.

A Figura 9 demonstra a operação deste mecanismo. Durante o experimento, foram gerados múltiplos alertas, como “Alerta de Temperatura: Alta ($26.50^{\circ}C$) - risco de proliferação bacteriana e desconforto” e “Alerta de Umidade: Alta (78.90%) - risco de fungos, bolor e corrosão”. Notavelmente, o sistema também emitiu um “ALERTA CRÍTICO: Nível de CO_2 acima de 25 ppm ”, destacando a capacidade de diferenciar a severidade dos eventos.

A sequência de notificações “ALERTA: Temperatura da geladeira fora da faixa!” seguida por um “!! LEMBRETE: Tem-

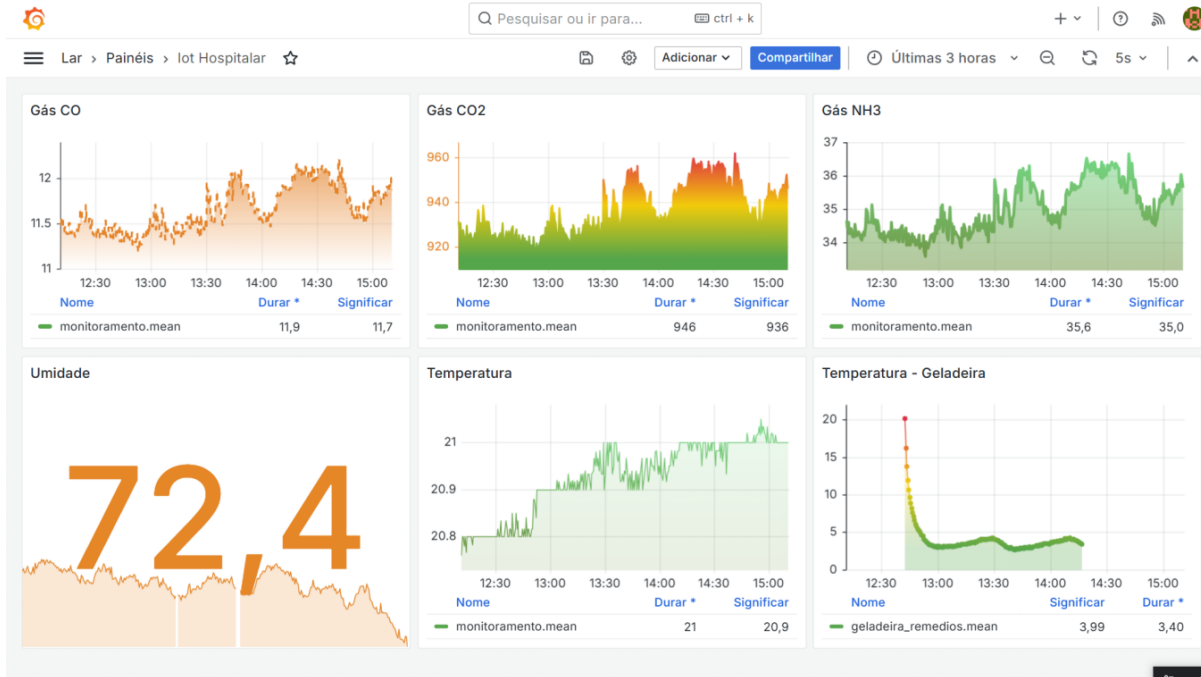


Figura 8. Dashboard com os gráficos

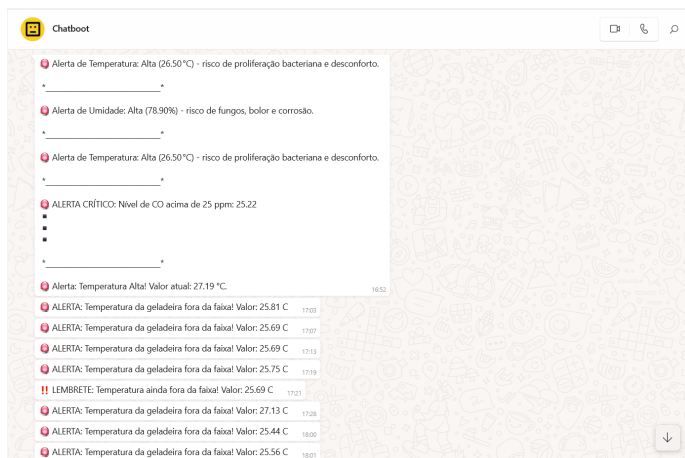


Figura 9. Interface do chatbot exibindo os alertas de temperatura, umidade e gás gerados pelo sistema de monitoramento.

peratura ainda fora da faixa.” ilustra uma lógica de notificação mais sofisticada, projetada para assegurar que uma condição adversa persistente não seja ignorada. A efetiva entrega dessas mensagens via *chatbot* valida a última etapa do fluxo de dados da arquitetura. A implementação deste sistema de notificação transforma a plataforma de uma ferramenta de monitoramento

passivo para um sistema de vigilância ativo, que é um requisito fundamental para a gestão de riscos em ambientes de saúde, permitindo uma resposta rápida e eficaz a eventos críticos.

A Figura 11 exibe uma sequência de notificações focadas exclusivamente na temperatura da unidade de refrigeração, revelando um padrão de oscilação onde mensagens de “*ALERTA: Temperatura da geladeira fora da faixa!*” são imediatamente seguidas por mensagens informativas de “*INFO: Temperatura da geladeira voltou para a faixa segura!*”. Este comportamento, ocorrendo em um curto intervalo de tempo, demonstra a alta sensibilidade e a baixa latência do sistema, que é capaz de registrar com precisão os ciclos de operação do termostato do equipamento quando este opera próximo ao limiar de segurança configurado (neste caso, 8.00°C).

Mais importante, a implementação de notificações de resolução (INFO) constitui um recurso de grande valor operacional. Ao informar ativamente que uma condição de alarme foi normalizada, o sistema evita intervenções desnecessárias e fornece à equipe um registro completo do ciclo de vida de cada evento adverso, desde sua detecção até sua resolução. Essa capacidade de rastrear o estado de um alerta (ativo ou resolvido) eleva a inteligência da plataforma, permitindo uma gestão muito mais eficiente e contextualizada dos equipamentos críticos.

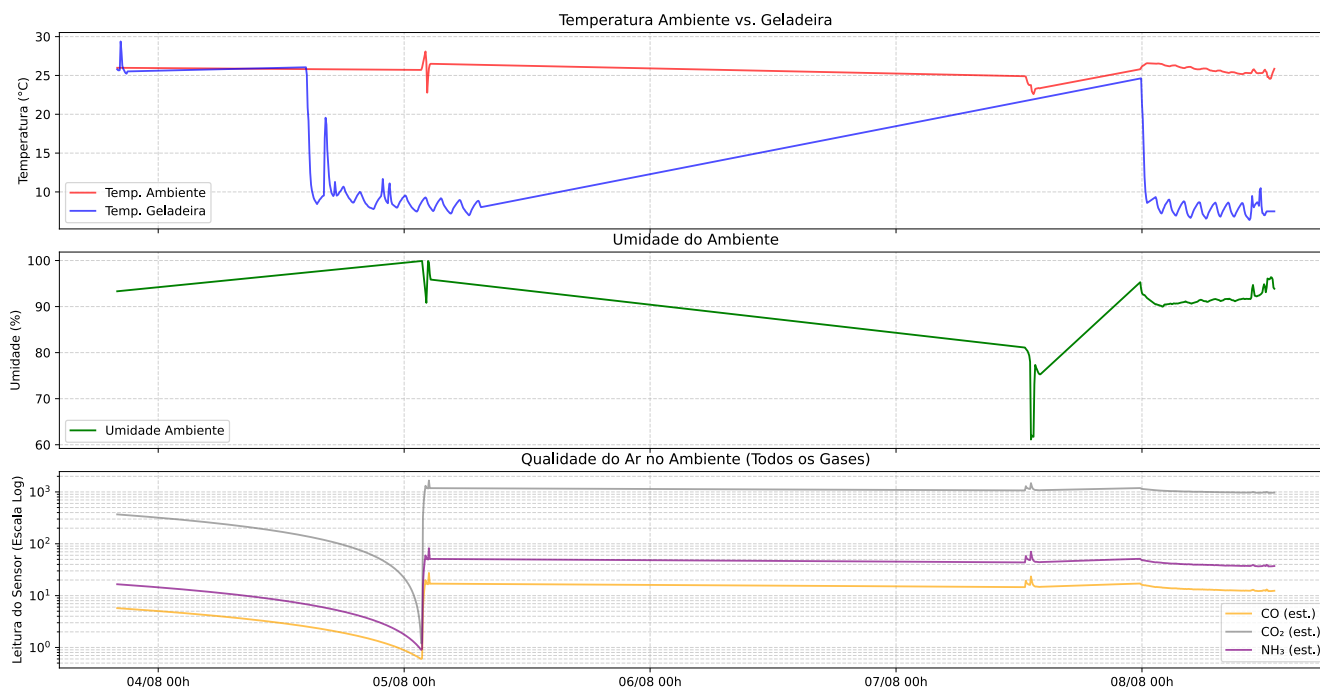


Figura 10. Análise temporal dos dados de temperatura, umidade e qualidade do ar coletados durante o período de monitoramento.

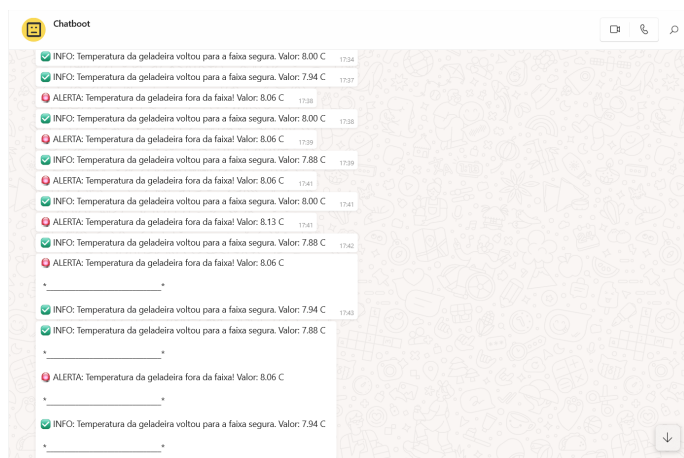


Figura 11. Detalhe dos alertas de estado para a cadeia de frio, mostrando notificações de saída e retorno à faixa de segurança.

B. Análise Temporal dos Parâmetros Monitorados

Para avaliar a dinâmica integrada do sistema de monitoramento, foi realizada uma análise temporal comparativa das variáveis coletadas ao longo de um período contínuo de cinco dias. A Figura 10 apresenta a evolução temporal dos dados de temperatura, umidade e qualidade do ar, exibidos em três

painéis.

O painel superior detalha a relação entre a temperatura ambiente (linha vermelha) e a temperatura interna da unidade de refrigeração (linha azul). A análise deste gráfico é de particular importância, pois evidencia uma correlação positiva direta entre as duas variáveis. Observa-se que as flutuações da temperatura interna do refrigerador acompanham a variação da temperatura externa, em vez de se manterem em uma faixa estável e controlada. Este comportamento indica um isolamento térmico potencialmente deficiente do equipamento, o que compromete sua capacidade de manter uma cadeia de frio rigorosa. O painel central exibe a umidade relativa do ambiente (linha verde). Os dados demonstram que, durante o período de observação, a umidade se manteve em níveis consistentemente elevados, com variações pontuais.

O painel inferior, apresentado em escala logarítmica, ilustra a resposta do sensor de qualidade do ar (MQ-135). As múltiplas linhas (CO , CO_2 , NH_3) representam as estimativas de concentração para diferentes compostos gasosos, calculadas a partir da resistência medida pelo único sensor. O paralelismo entre as curvas confirma que elas derivam de uma única fonte de medição, refletindo a sensibilidade do sensor a um conjunto amplo de gases, em vez de medições independentes para cada composto. A análise temporal demonstra a estabilidade do sensor e sua capacidade de registrar mudanças na qualidade

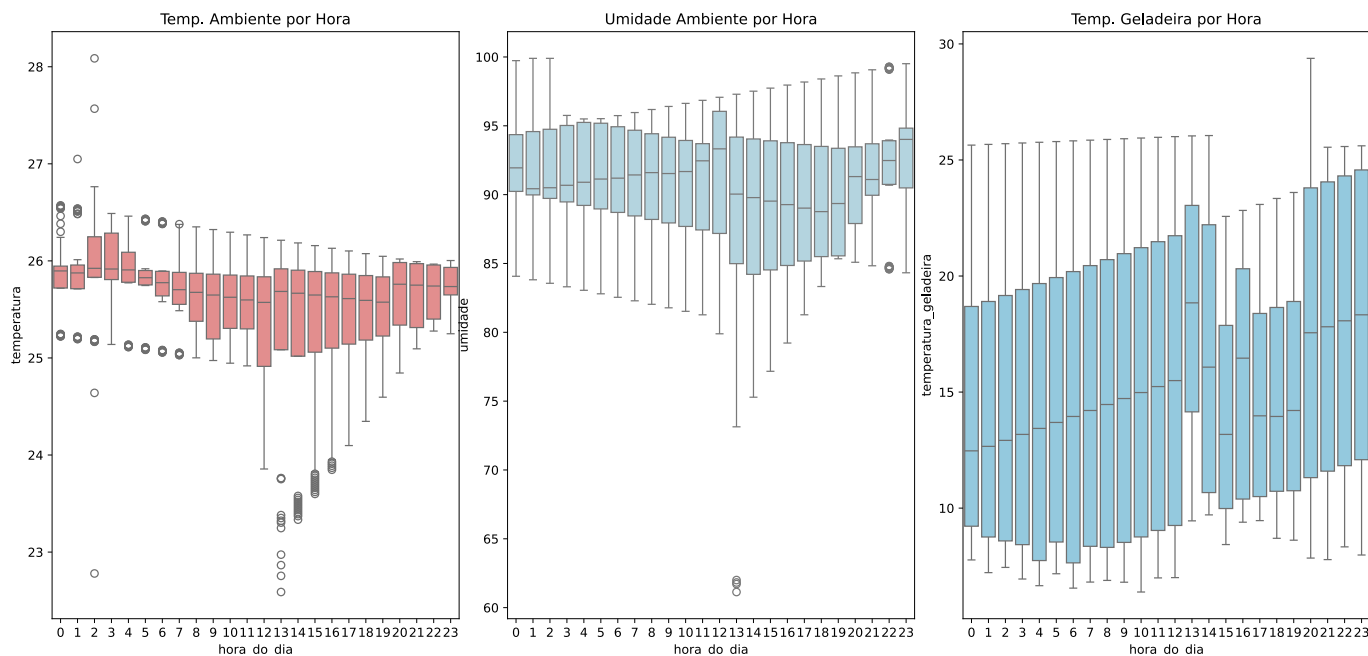


Figura 12. Análise temporal dos dados de temperatura, umidade e qualidade do ar coletados durante o período de monitoramento.

geral do ar.

C. Análise de Padrões Diurnos por Hora

Uma análise focada nos padrões cíclicos diários (diurnos) foi realizada para detalhar o comportamento das variáveis monitoradas. A Figura 12 apresenta um conjunto de diagramas de caixa (*boxplots*), onde os dados de todo o período experimental foram agregados pela hora do dia (0-23h). Este método de visualização permite caracterizar a tendência central (mediana) e a dispersão (intervalo interquartil) dos dados para cada hora de um dia típico, revelando a rotina operacional do ambiente e dos equipamentos.

O painel esquerdo, referente à temperatura ambiente, exibe um ciclo diurno característico, com valores mínimos registrados durante a madrugada (entre 0h e 6h) e um pico de temperatura no período da tarde (aproximadamente entre 14h e 18h). De forma complementar, o painel central, que ilustra a umidade ambiente, demonstra um comportamento inversamente proporcional ao da temperatura. A umidade atinge seus valores máximos durante as horas mais frias e seus mínimos durante as mais quentes, o que é consistente com os fenômenos físicos esperados.

A análise mais crítica provém do painel direito, que detalha a temperatura da unidade de refrigeração por hora. Este gráfico corrobora os achados da análise temporal, evidenciando que

a mediana da temperatura interna da geladeira aumenta de forma significativa em conjunto com a elevação da temperatura ambiente. Além do aumento da mediana, observa-se também um aumento na dispersão dos dados (maior altura das caixas e maior alcance das hastes) nas horas de maior calor. Este padrão demonstra que a eficiência de refrigeração do equipamento é degradada sob maior estresse térmico externo, reforçando o diagnóstico de um sistema de isolamento ineficaz.

VII. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou o desenvolvimento e a validação de um sistema de monitoramento baseado em IoT, projetado para o controle de parâmetros ambientais e da cadeia de frio em ambientes de saúde. A arquitetura, fundamentada em tecnologias de software livre, demonstrou ser uma solução robusta, flexível e de baixo custo para a coleta, armazenamento, visualização e emissão de alertas.

Os resultados experimentais confirmaram a viabilidade e a utilidade da abordagem em três análises complementares. Primeiramente, a validação da aplicabilidade do sistema atestou a integração bem-sucedida de todos os componentes, desde a captura de dados pelos sensores até a visualização no painel de controle e o envio de notificações proativas via *chatbot*. A análise temporal revelou uma descoberta crítica: uma forte correlação positiva entre a temperatura ambiente e a interna da

unidade de refrigeração, indicando um isolamento térmico deficiente. Essa vulnerabilidade foi corroborada e quantificada pela análise de padrões diurnos, que demonstrou que a eficiência do refrigerador é degradada durante as horas de maior estresse térmico, com aumento tanto da mediana quanto da variabilidade da temperatura interna.

O principal impacto deste trabalho reside em demonstrar que uma arquitetura aberta e acessível, além de realizar o monitoramento, pode servir como uma ferramenta de diagnóstico para identificar falhas operacionais e de infraestrutura que podem comprometer a segurança do paciente e a integridade de insumos. Reconhece-se como limitação que o protótipo não possui certificações para uso clínico e os experimentos foram conduzidos em ambiente laboratorial. Como trabalhos futuros, pretende-se realizar a validação do sistema em um ambiente hospitalar real, expandir a gama de sensores e desenvolver algoritmos de análise preditiva para antecipar falhas antes que ocorram, ampliando assim o impacto e a aplicabilidade da solução na assistência à saúde.

REFERÊNCIAS

- [1] T. Cisco and A. Internet, "Cisco: 2020 ciso benchmark report," *Comput. Fraud Secur.*, vol. 2020, no. 3, pp. 4–4, 2020.
- [2] K. Sorri, N. Mustafee, and M. Seppänen, "Revisiting iot definitions: A framework towards comprehensive use," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 179, p. 121623, 2022.
- [3] H. Lv, J. Li, Y. Xu, X. Tao, and L. Wang, "Multi-scene intelligent environmental monitoring system," in *2024 IEEE 17th International Conference on Signal Processing (ICSP)*. IEEE, 2024, pp. 737–742.
- [4] M. L. Fahrni, I. A.-N. Ismail, D. M. Refi, A. Almeman, N. C. Yaakob, K. M. Saman, N. F. Mansor, N. Noordin, and Z.-U.-D. Babar, "Management of covid-19 vaccines cold chain logistics: a scoping review," *Journal of pharmaceutical policy and practice*, vol. 15, no. 1, p. 16, 2022.
- [5] M. C. Schenfeld, "Fog e edge computing: uma arquitetura híbrida em um ambiente de internet das coisas," Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2017.
- [6] S. Vishnu, S. J. Ramson, and R. Jegan, "Internet of medical things (iomt)-an overview," in *2020 5th international conference on devices, circuits and systems (ICDCS)*. IEEE, 2020, pp. 101–104.
- [7] M. H. Kashani, M. Madanipour, M. Nikravan, P. Asghari, and E. Mahdipour, "A systematic review of iot in healthcare: Applications, techniques, and trends," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 192, p. 103164, 2021.
- [8] A. Gatouillat, Y. Badr, B. Massot, and E. Sejdić, "Internet of medical things: A review of recent contributions dealing with cyber-physical systems in medicine," *IEEE internet of things journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3810–3822, 2018.
- [9] T. Valentim, G. Callou, C. França, and E. Tavares, "Availability and performance assessment of iomt systems: A stochastic modeling approach," *Journal of Network and Systems Management*, vol. 32, no. 4, p. 95, 2024.
- [10] T. Bezerra, M. Vinicius, A. Ciane, G. Callou, C. França, and E. Tavares, "An approach based on iot and machine learning for monitoring patients on healthcare centers," in *Simpósio Brasileiro de Computação Aplicada à Saúde (SBCAS)*. SBC, 2025, pp. 260–271.
- [11] N. A. Askar, A. Habbal, A. H. Mohammed, M. S. Sajat, Z. Yusupov, and D. Kodirov, "Architecture, protocols, and applications of the internet of medical things (iomt)," *Journal of Communications*, vol. 17, no. 11, 2022.
- [12] L. Xing, "Reliability in internet of things: Current status and future perspectives," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 8, pp. 6704–6721, 2020.
- [13] R. Hireche, H. Mansouri, and A.-S. K. Pathan, "Security and privacy management in internet of medical things (iomt): A synthesis," *Journal of Cybersecurity and Privacy*, vol. 2, no. 3, pp. 640–661, 2022.
- [14] Grafana Labs. (2025) Grafana documentation. Acessado em 10 de julho de 2025. [Online]. Available: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/>
- [15] Shenzhen Huato Opto-electronics Co., Ltd., "Huato - soluções de monitoramento de temperatura e umidade," <https://www.huato.cn/>, acessado em: 14 de ago. de 2025.
- [16] Tzone Digital Technology Co., Ltd., "Monitores de temperatura e data loggers para cadeia de frio," <https://www.tzonetemperature.com/>, acessado em: 14 de ago. de 2025.
- [17] T&D Corporation, "Sistemas de monitoramento e data loggers sem fio," <https://www.tandd.com/>, acessado em: 14 de ago. de 2025.
- [18] Lascar Electronics, "Data logger inc. - soluções de monitoramento e registro de dados," <https://www.dataloggerinc.com/>, acessado em: 14 de ago. de 2025.