

# Desenvolvimento de Sistema IoT para Monitoramento Ambiental Utilizando Rede de Sensores Sem Fio LoRa Mesh

Ana Carolina Marcelo da Silva  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, SC, Brasil  
ana.ms06@aluno.ifsc.edu.br

Prof. Me. Tiago Quartiero Pereira  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, SC, Brasil  
tiago.quartiero@ifsc.edu.br

Prof. Dr. Pedro Rosso  
Engenharia Mecatrônica  
Instituto Federal de Santa Catarina  
Criciúma, SC, Brasil  
pedro.rosso@ifsc.edu.br

**Resumo**—Este artigo sugere a arquitetura de um Sistema de Monitoramento Ambiental (SMA) acessível e móvel, fundamentado nos princípios da Internet das Coisas (IoT). O sistema adota uma rede de sensores sem fio em topologia de malha (*mesh*) com tecnologia LoRa, para superar as limitações de cobertura e os pontos únicos de falha das arquiteturas LoRaWAN convencionais. A proposta é coletar, processar e disponibilizar em tempo real informações sobre a qualidade do ar (Material Particulado e monóxido de carbono), bem como temperatura e umidade, seguindo as diretrizes estabelecidas pela legislação brasileira (CONAMA N° 506/2024), e, em um segundo momento, instalar o sistema no município de Morro da Fumaça, SC. A proposta arquitetônica aborda a escolha de sensores econômicos, a comunicação em malha e a plataforma na nuvem, permitindo a criação de redes de monitoramento que são tanto densas quanto escaláveis.

**Index Terms**—Monitoramento Ambiental, Internet das Coisas (IoT), LoRa, LoRa Mesh, Qualidade do Ar, Redes de Sensores Sem Fio (RSSF).

## I. INTRODUÇÃO

Impulsionado pela necessidade de dados precisos sobre a qualidade do ar e da água e os níveis de poluição [1], o monitoramento ambiental se estabeleceu como uma ferramenta essencial para a gestão dos recursos naturais e para a qualidade de vida nas áreas urbanas. A qualidade do ar é, especialmente, um fator decisivo para a saúde das pessoas, influenciada por poluentes como material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e outros gases resultantes da atividade industrial e da queima de combustíveis [2]. O Brasil ainda enfrenta enormes desafios em termos de monitoramento da qualidade do ar.

A poluição atmosférica representa um dos maiores desafios ambientais e de saúde pública da atualidade. Em Santa Catarina, a dinâmica das emissões é influenciada por uma complexa interação entre fontes veiculares, industriais e queima de biomassa. Estudos recentes apontam que a contribuição dessas fontes varia significativamente conforme a região e a época do ano.

No que tange às fontes de poluição, é fundamental destacar o papel das queimadas e das emissões industriais. Segundo a *Avaliação do impacto das emissões veiculares, queimadas,*

*industriais e naturais na qualidade do ar em Santa Catarina - ano base 2021*, as emissões por queima de biomassa apresentaram um aumento significativo em anos recentes, influenciando diretamente a concentração de poluentes como monóxido de carbono (CO) e material particulado (MP<sub>2,5</sub>) em diversas mesorregiões do estado [3]. Paralelamente, o setor industrial exerce forte pressão sobre a qualidade do ar local. O estudo *Levantamento das emissões atmosféricas da indústria da cerâmica vermelha no sul do estado de Santa Catarina, Brasil* aponta que a concentração de olarias na região sul do estado, muitas vezes operando com tecnologias de forno e controle de emissões defasadas, contribui de forma relevante para a deterioração da qualidade do ar local [4].

Para demonstrar a relevância científica e social deste estudo, a escolha do local de monitoramento é estratégica. O município de Morro da Fumaça, situado na mesorregião Sul Catarinense, possui uma população estimada de 19.490 habitantes [5]. A região caracteriza-se economicamente e ambientalmente por pertencer à Região Carbonífera e por abrigar um vasto polo de indústria de cerâmica vermelha. A alta densidade de olarias em Morro da Fumaça e arredores, somada ao histórico de exploração de carvão na região, configura um cenário de potencial conflito entre o desenvolvimento econômico e a preservação da qualidade ambiental, justificando a necessidade de monitoramento contínuo e caracterização detalhada dos poluentes atmosféricos para subsidiar políticas públicas de saúde e meio ambiente.

No Brasil, o monitoramento da qualidade do ar enfrenta desafios significativos. O Relatório Mundial de Qualidade do Ar de 2024 indicou que o país não atende às recomendações da Organização Mundial da Saúde (OMS), destacando uma grande disparidade na disponibilidade de dados [6]. Eventos como queimadas agravam problemas respiratórios, que apresentam riscos elevados para crianças, idosos e gestantes [7].

A ausência de dados contradiz a implementação de políticas públicas, como a Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQAr) [8] e a Resolução CONAMA N° 506/2024 [9], bem como impede o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 e 13 da ONU [10]. Não existem

dados contínuos em Morro da Fumaça, SC, o que impossibilita um diagnóstico preciso sobre a exposição da população a poluentes oriundos da atividade industrial (cerâmica) [11] ou de queimadas esporádicas [12].

Para ajudar a resolver esse problema, este artigo propõe a criação e implementação de um Sistema de Monitoramento Ambiental (SMA) acessível e portátil, fundamentado na Internet das Coisas (IoT) e em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) utilizando a tecnologia LoRa em uma topologia *mesh*. A rede *mesh* é mais resiliente e se adapta melhor a terrenos acidentados do que as soluções convencionais que utilizam tecnologia LoRaWAN, já que não depende de um *gateway* central, que seria o único ponto de falha.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A Seção II discute os trabalhos relacionados e as tecnologias de comunicação. A Seção III detalha o contexto legislativo do trabalho, enquanto a Seção IV faz uma análise técnica e financeira dos sensores e estações utilizados no caso de estudo do trabalho. As Seções V a VIII descrevem a implementação das plataformas de *hardware*, *software*, os testes e os resultados. A Seção IX conclui o trabalho.

## II. FUNDAMENTAÇÃO E TRABALHOS RELACIONADOS

### A. IoT para Monitoramento Ambiental

A Internet das Coisas (IoT) é a conexão de dispositivos e sensores à Internet [13], [14], o que possibilita o monitoramento e controle à distância de sistemas. A IoT impulsiona inovações em gestão urbana e saúde em cidades inteligentes [15]. No monitoramento ambiental, sistemas baseados em IoT permitem a coleta de dados em larga escala, porém, dependem de tecnologias de comunicação eficientes.

### B. Tecnologias de Comunicação: LoRaWAN vs. LoRa Mesh

LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de modulação na camada física que possibilita uma comunicação sem fio de longa distância e com baixo consumo de energia, empregando a técnica de Espectro de Espalhamento por *Chirp* (CSS) [16], [17].

O protocolo mais utilizado em comunicação LoRa é o LoRaWAN, que estabelece uma arquitetura de rede em formato estrela (veja a Figura 1). Nela, os dispositivos finais (nós sensores) enviam seus dados diretamente para um *gateway* central, que os repassa para um servidor de rede [17]. Apesar de ser funcional, essa topologia apresenta sérias limitações para o monitoramento ambiental em grandes áreas ou em regiões com terreno acidentado, incluindo:

- **Dependência do Gateway:** Um ponto de falha único é o *gateway*. Se ele não funcionar, toda a rede local para de operar.
- **Cobertura Limitada:** A comunicação é baseada na linha de visão direta entre o nó e o *gateway*. Obstáculos (edifícios, colinas, antenas, etc.) geram "zonas de sombra" onde a comunicação não é possível.

Diversos trabalhos utilizaram LoRaWAN para monitoramento ambiental [18]–[21], mas frequentemente enfrentam esses desafios de cobertura e robustez.

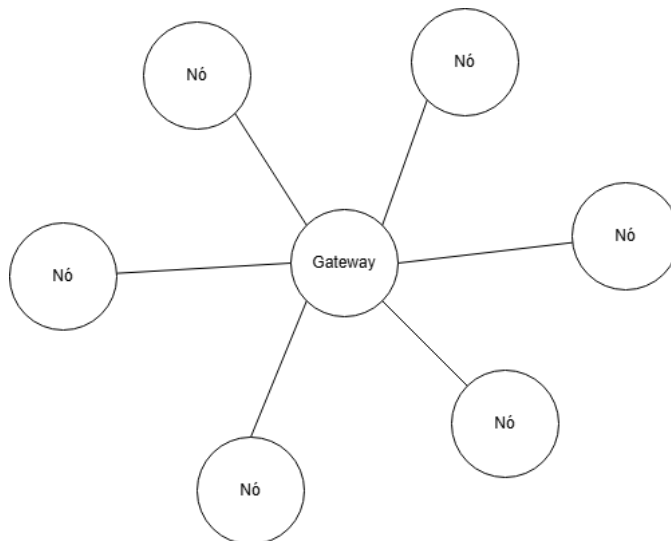


Figura 1. Diagrama de uma topologia estrela.

Este trabalho, para superar tais limitações, utiliza topologia LoRa *Mesh* (em malha). Nessa arquitetura, os próprios nós sensores funcionam como roteadores, repassando mensagens de outros nós, como ilustrado na Figura 2. Isso cria múltiplos caminhos de comunicação, eliminando a dependência de um *gateway* central, aumentando a robustez da rede contra falhas e estendendo a área de cobertura de forma escalável [22], [23]. Enquanto trabalhos anteriores focaram na validação de protocolos *mesh* [22], [23], este projeto foca na aplicação de uma solução *mesh* (baseada na tecnologia proprietária LoRa-MESH da Radioenge [24]) em um sistema de monitoramento ambiental completo e de ponta a ponta.

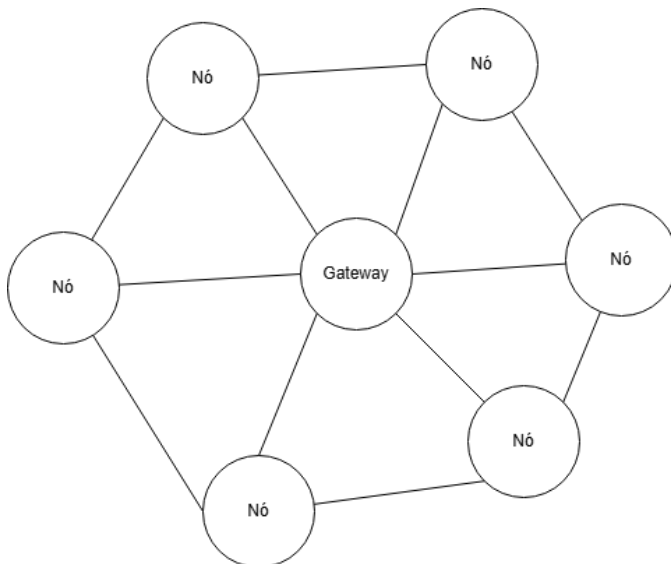


Figura 2. Diagrama de uma topologia *mesh*.

### III. LEGISLAÇÃO BRASILEIRA E POLUENTES

O arcabouço legal brasileiro para a qualidade do ar é fundamental para definir os requisitos do sistema. A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) [25] estabeleceu as bases para o controle da poluição. Recentemente, a Política Nacional de Qualidade do Ar (PNQAr) [8] e a Resolução CONAMA N° 506/2024 [9] atualizaram e detalharam os padrões de qualidade do ar.

A legislação define o Índice de Qualidade do Ar (IQAr) como ferramenta de comunicação [26], com o intuito de simplificar para a sociedade o acesso às informações sobre a qualidade do ar. O IQAr é um índice que transforma, de forma simplificada, as concentrações de poluentes em uma única escala, tornando mais fácil para a população entender.

Para determinar o IQAr, são levados em conta os principais poluentes [9], [26], sendo que cada um é avaliado segundo tempos de média específicos e estabelecidos da seguinte maneira:

- **Materiais particulados (MP10 e MP2,5):** Partículas que entram nos pulmões e podem provocar sérios danos à saúde. Medição média de 24 horas.
- **Ozônio (O3):** Poluente que se forma na atmosfera. Verificação pela média móvel de 8 horas, sempre na máxima.
- **Monóxido de Carbono (CO):** Gás tóxico que se forma pela queima incompleta de combustíveis. Aferição com a média móvel de 8 horas do limite máximo.
- **Dióxido de Nitrogênio (NO2):** Gás que causa irritação e está relacionado à queima de combustíveis fósseis. Aferição pela maior média horária (1 hora).
- **Dióxido de Enxofre (SO2):** Gás que causa irritação, também relacionado a combustíveis fósseis e ao setor industrial. Aferição pela média de 24 horas.

Para cada poluente, um índice individual é calculado usando a equação de interpolação linear (Eq. 1) [26], que normaliza a concentração medida ( $C$ ) dentro das faixas de limite definidas na Resolução [9].

$$IQAr = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \times (C - C_{ini}) \quad (1)$$

Onde  $I$  representa os valores do índice (ex.: 0-40, 41-80) e  $C$  as concentrações (inicial e final) de cada faixa [26]. O IQAr final a ser divulgado para uma estação é sempre o maior valor (pior classificação) dentre todos os índices individuais calculados.

Apesar da legislação vigente, o monitoramento oficial da qualidade do ar em Santa Catarina é escasso. A rede registrada pelo Instituto do Meio Ambiente (IMA-SC) limita-se a quatro estações, que estão concentradas em poucas cidades (como Tubarão e Florianópolis) e são majoritariamente operadas por outras entidades — três pertencentes à Diamante Energia e uma à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) [27]. Essa cobertura restrita justifica a necessidade de redes de monitoramento complementares e acessíveis.

### IV. SENSORES DE CUSTO REDUZIDO

O alto custo de estações de monitoramento oficiais e de grau de referência é um dos principais entraves para a expansão da cobertura de monitoramento. Um fomento recente do Governo de Santa Catarina para a instalação de uma estrutura pioneira, incluindo quatro estações de monitoramento meteorológico, de gases poluentes e de material particulado, foi de R\$ 2,5 milhões [32]. A título de referência, o custo apenas dos componentes eletrônicos de cada módulo desenvolvido neste trabalho é de aproximadamente R\$ 2.000,00 — valor que não inclui mão de obra, impostos, certificações e demais custos operacionais inerentes a uma solução comercial. Ainda assim, essa estimativa inicial evidencia o potencial de economia significativa em relação às estações de grau de referência, justificando a abordagem deste trabalho, focada no desenvolvimento de um sistema acessível e escalável que depende do uso de sensores quantitativos econômicos. Um sensor é um instrumento que gera um sinal (normalmente elétrico) em reação a um estímulo mecânico ou químico [28].

Para este projeto, foram escolhidos sensores que fazem uso de princípios operacionais destacados a seguir:

1) *Material Particulado (MP2,5 e MP10):* Faz-se uso do princípio do espalhamento da luz (*light scattering*), conforme mostrado na Figura 3. Um feixe de laser passa por uma câmara de ar; quando partículas no ar cruzam o feixe, elas dispersam a luz. Um fotodetector avalia a intensidade da luz dispersa, o que possibilita determinar a concentração e o tamanho das partículas [28], [29]. O sensor *Air Quality Monitor (DFRobot SEN0233)* [30] foi selecionado por operar com base neste princípio.

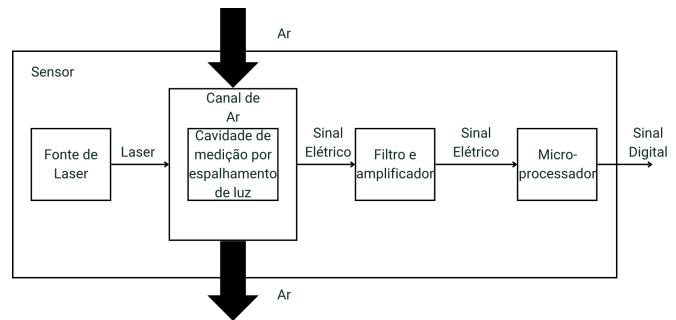


Figura 3. Funcionamento de um sensor baseado em espalhamento de luz.

2) *Monóxido de Carbono (CO):* Baseia-se no princípio eletroquímico. O gás (CO) passa por uma membrana e interage com um eletrólito em um eletrodo de trabalho, como mostrado na Figura 4, produzindo uma corrente elétrica que é proporcional à concentração do gás [28]. O sensor *Gravity: Gas Sensor (DFRobot SEN0465)* [29] foi selecionado por sua alta sensibilidade.

3) *Temperatura e Umidade:* O módulo utiliza o sensor *Adafruit Sensirion SHT40*. A umidade relativa é medida por meio de um elemento sensor capacitivo, que reage às mudanças na constante dielétrica de um polímero higroscópico, à medida que ele retém ou solta vapor d'água. A umidade altera a

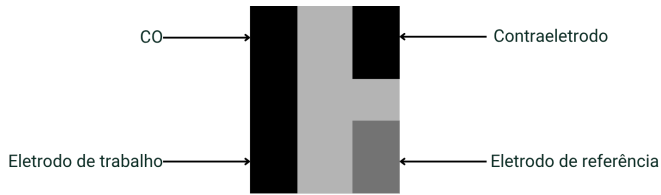


Figura 4. Representação de um sensor baseado em princípio eletroquímico.

capacitância, que é então convertida em um sinal digital. Ao mesmo tempo, um termistor de precisão também está presente no chip para medir a temperatura, cuja resistência elétrica muda de maneira previsível com as alterações de temperatura, e essa variação também é convertida em um valor digital [28].

A utilização desses sensores econômicos, que, embora não possuam a certificação das estações de referência, permite a criação de uma rede densa. Essa densidade espacial proporciona a captura de uma perspectiva muito mais detalhada da poluição, "microclimas" de poluição que estações únicas e caras não conseguem identificar.

## V. PLATAFORMA DE HARDWARE

A plataforma de hardware desenvolvida neste trabalho adota uma arquitetura unificada, na qual tanto os nós sensores quanto o nó mestre (*gateway*) compartilham o mesmo design de sistema, diferenciando-se apenas pelo *firmware*. Essa abordagem torna a produção, a manutenção e a escalabilidade muito mais simples da rede. O microcontrolador ESP32-WROOM-32U foi escolhido por sua capacidade de suportar várias interfaces seriais (UART e I2C) ao mesmo tempo, além de ter suporte nativo para o FreeRTOS, um sistema operacional de tempo real que é crucial para o gerenciamento simultâneo das tarefas de aquisição de dados, comunicação LoRa Mesh e conectividade Wi-Fi. A primeira abordagem de empregar o Arduino Mega com as bibliotecas *SoftwareSerial* foi abandonada, pois não era compatível com o FreeRTOS e apresentava limitações de desempenho em sistemas multitarefa.

O sistema é baseado no ESP32-WROOM-32U (38 pinos, 240 MHz, Xtensa 32-Bit LX6 Dual Core), que está acoplado a um módulo LoRaMESH da Radioenge, que funciona na frequência de 915 MHz e pode alcançar distâncias de até 6 km em condições ideais. Os componentes se comunicam por meio de três interfaces: UART1 (GPIO2/GPIO4) para o transceptor LoRa, UART2 (GPIO16/GPIO17) para o sensor de material particulado e I2C (GPIO21/GPIO22) para o sensor de monóxido de carbono e para o sensor de temperatura e umidade. Na Seção IV, detalhamos os sensores ambientais utilizados. O diagrama de blocos completo do sistema, que ilustra as conexões entre o microcontrolador, os sensores e o módulo de comunicação, está mostrado na Figura 5.

Todas as partes eletrônicas foram encapsuladas em invólucros com grau de proteção IP67, que são produzidos pela Patola em ABS cinza, com medidas de 160×160×90 mm, para assegurar o funcionamento em ambientes externos. Os orifícios que eram necessários para a instalação de sensores externos e conectores de antenas LoRa e Wi-Fi foram selados

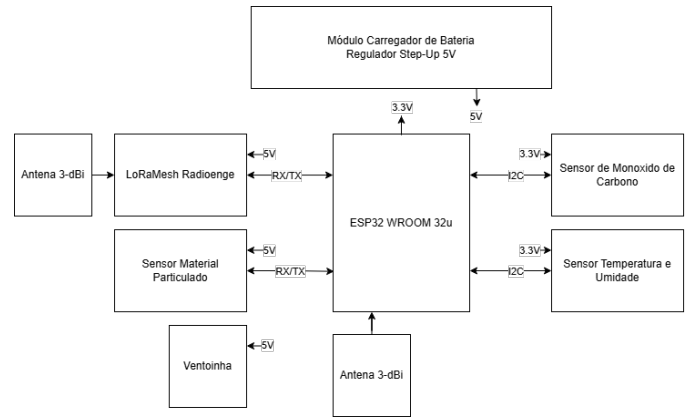


Figura 5. Diagrama de blocos do sistema.

com silicone, garantindo que fossem resistentes à infiltração de água e poeira, como pode ser observado em um dos módulos desenvolvidos na Figura 6. Este encapsulamento possibilita que os nós sejam instalados em ambientes urbanos, expostos às intempéries, sem que a integridade dos circuitos eletrônicos seja comprometida.

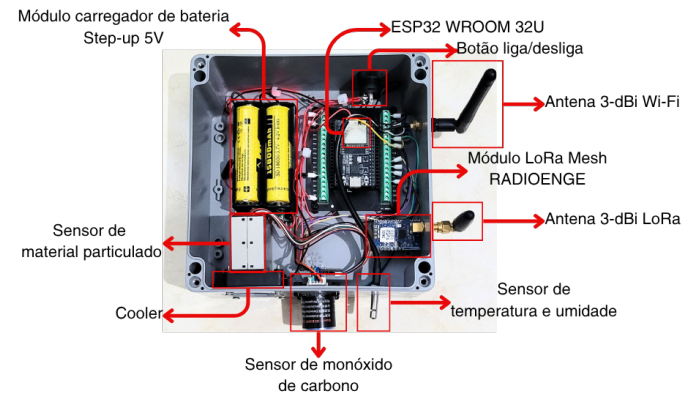


Figura 6. Módulo sensor/*gateway* desenvolvido.

O sistema de alimentação é baseado em duas baterias de íon-lítio de 3,7 V e 15.800 mAh conectadas em paralelo, totalizando 31.600 mAh de capacidade. Um módulo carregador integrado com conversor *step-up* fornece tensão regulada de 5V ao ESP32 por meio do pino VIN, além de gerenciar o carregamento via interface USB-C e implementar proteção BMS (*Battery Management System*). O monitoramento do nível de carga é realizado por meio de um divisor de tensão resistivo ( $2 \times 10 \text{ k}\Omega$ ) conectado ao conversor analógico-digital (ADC) do ESP32 no pino GPIO36, permitindo estimativas de autonomia em tempo real. Os testes realizados acerca da autonomia energética serão discutidos na Seção VII.

A arquitetura unificada adotada oferece vantagens significativas em termos de escalabilidade e manutenção. A possibilidade de reconfigurar qualquer nó como *gateway* ou sensor por meio de uma simples entrada em modo de configuração por Ponto de Acesso (AP) reduz custos logísticos e facilita a expansão da rede. Além disso, a padronização de componentes

simplifica o processo de fabricação e permite reposição ágil em caso de falhas.

## VI. PLATAFORMA DE SOFTWARE

A arquitetura de software do sistema é dividida em duas frentes principais: o *firmware* embarcado, que opera nos dispositivos de *hardware* (Nós Sensores e *Gateway*), e a plataforma de nuvem, uma arquitetura *serverless* na AWS que processa, armazena e exibe os dados.

### A. Firmware Embarcado e Rede Local (LoRa Mesh)

O firmware embarcado, desenvolvido em C/C++ sobre o sistema operacional de tempo real (RTOS) FreeRTOS, é responsável pela lógica de baixo nível dos dispositivos em campo.

Os Nós Sensores realizam a leitura dos sensores ambientais (CO, MP2,5, MP10, umidade e temperatura) e transmitem os pacotes de dados via rede LoRa Mesh. Esta comunicação utiliza o protocolo da Radioenge [24], que implementa funcionalidades de roteamento automático (*auto-route*) e auto-cura (*auto-healing*) [31]. Após o envio de dados, os Nós Sensores entram em modo de hibernação (*deepsleep*) até a próxima leitura.

O dispositivo *Gateway* atua como o mestre da rede: ele recebe os pacotes LoRa dos nós remotos, agrega-os com as suas próprias leituras locais (feitas pelos seus próprios sensores) e, por fim, utiliza o seu módulo Wi-Fi para se conectar à internet e transmitir o conjunto de dados para a plataforma em nuvem. Diferentemente dos Nós Sensores o *Gateway* fica sempre ativo, tendo um consumo de energia mais elevado.

Além do fluxo padrão de funcionamento, algumas rotinas de segurança foram implementadas: 1) Ao ligar o dispositivo, ele irá gerar um servidor Ponto de Acesso (AP) para configuração do dispositivo, caso não seja configurado em 15 minutos, o dispositivo funcionará como um Nó Sensor; 2) Quando o *Gateway* perde a conexão Wi-Fi existe uma rotina responsável por reestabelecer a conexão, nesse tempo, os dados lidos são salvos na partição NVS (acrônimo para *Non-Volatile Storage*) do microcontrolador, atuando como uma fila de tentativa (*retry*) que posteriormente é limpa ao enviar os dados com sucesso para AWS; 3) Todas as rotinas de inicialização dos dispositivos do sistema (sensores, LoRa e Wi-Fi) são realizadas em até três tentativas por padrão.

### B. Plataforma de Nuvem (AWS Serverless)

Para a plataforma de *backend*, banco de dados, API e *dashboard*, foi implementada uma arquitetura *serverless* (sem servidor) na *Amazon Web Services* (AWS). Esta abordagem garante alta escalabilidade, segurança e um custo operacional quase nulo para o nível de tráfego do projeto. A plataforma é composta por cinco serviços principais que atuam de forma integrada.

1) *Amazon S3 (Simple Storage Service): O Frontend:* O *dashboard* de visualização, [qualiar.ninaeng.com.br](http://qualiar.ninaeng.com.br), é um site estático (HTML, CSS/Tailwind, JavaScript). Todos estes ficheiros, incluindo a documentação da API ([qualiar.ninaeng.com.br/docs](http://qualiar.ninaeng.com.br/docs)), estão hospedados num *bucket* (repositório) do S3. Este *bucket* é configurado como privado, não permitindo acesso público direto.

2) *Amazon CloudFront (CDN): O Ponto de Entrada:* O CloudFront é uma rede de entrega de conteúdo da AWS. No projeto, ele serve três propósitos:

- **CDN (Rede de Distribuição):** Armazena cópias (*cache*) do site S3 em servidores de borda globais, garantindo que o *dashboard* (Figura 7) carregue rapidamente em qualquer lugar.
- **Segurança (HTTPS):** Gere o certificado SSL/TLS (obtido via *AWS Certificate Manager - ACM*), forçando todo o tráfego a usar HTTPS seguro.
- **Roteamento:** Atua como um roteador unificado. Pedidos para a raiz (/) ou /docs são encaminhados para o S3. Pedidos para /api/\* são encaminhados para o API *Gateway*.

3) *Amazon API Gateway: A API (Interface de Programação):* O API *Gateway* gerencia a entrada/saída para a lógica de *backend*. Ele define os *endpoints* (URLs) que o *firmware* e o *dashboard* podem chamar:

- *GET /api/sensors:* Lista os sensores cadastrados (usado pelo *dashboard*).
- *GET /api/data:* Busca dados históricos para os gráficos (usado pelo *dashboard*).
- *POST /api/data:* Recebe novos dados (usado pelo *Gateway* LoRa).

A segurança da ingestão é garantida de forma que os métodos *GET* são públicos, mas o método *POST* é protegido e requer uma Chave de API (*x-api-key*), assegurando que apenas dispositivos autorizados (como o *Gateway* LoRa) possam enviar dados. Para otimizar a performance do *dashboard*, o API *Gateway* também armazena em *cache* (0,5 GB) as respostas *GET* por 5 minutos.

4) *AWS Lambda: O Backend:* A *Lambda* gerencia toda a lógica de armazenamento e requisição de dados do projeto, escrito em Node.js. Uma única função é acionada pelo API *Gateway* e executa lógicas diferentes com base no pedido:

- Se *GET:* A *Lambda* consulta o DynamoDB (usando *Query* ou *Scan*) e retorna os dados formatados em JSON para o *dashboard*.
- Se *POST:* A *Lambda* recebe o JSON do *Gateway* LoRa, valida os dados, gera um *timestamp* Unix automaticamente e escreve (*PutItem*) o novo registro no DynamoDB.

5) *Amazon DynamoDB: O Banco de Dados (NoSQL):* O DynamoDB é o banco de dados NoSQL utilizado. Sendo otimizado para séries temporais, ele é dividido em duas tabelas:

- **Sensors:** Uma tabela de catálogo que armazena os IDs e nomes dos dispositivos.
- **AirQualityReadings:** A tabela principal que armazena todas as leituras. Ela usa *device\_id* como Chave de Partição

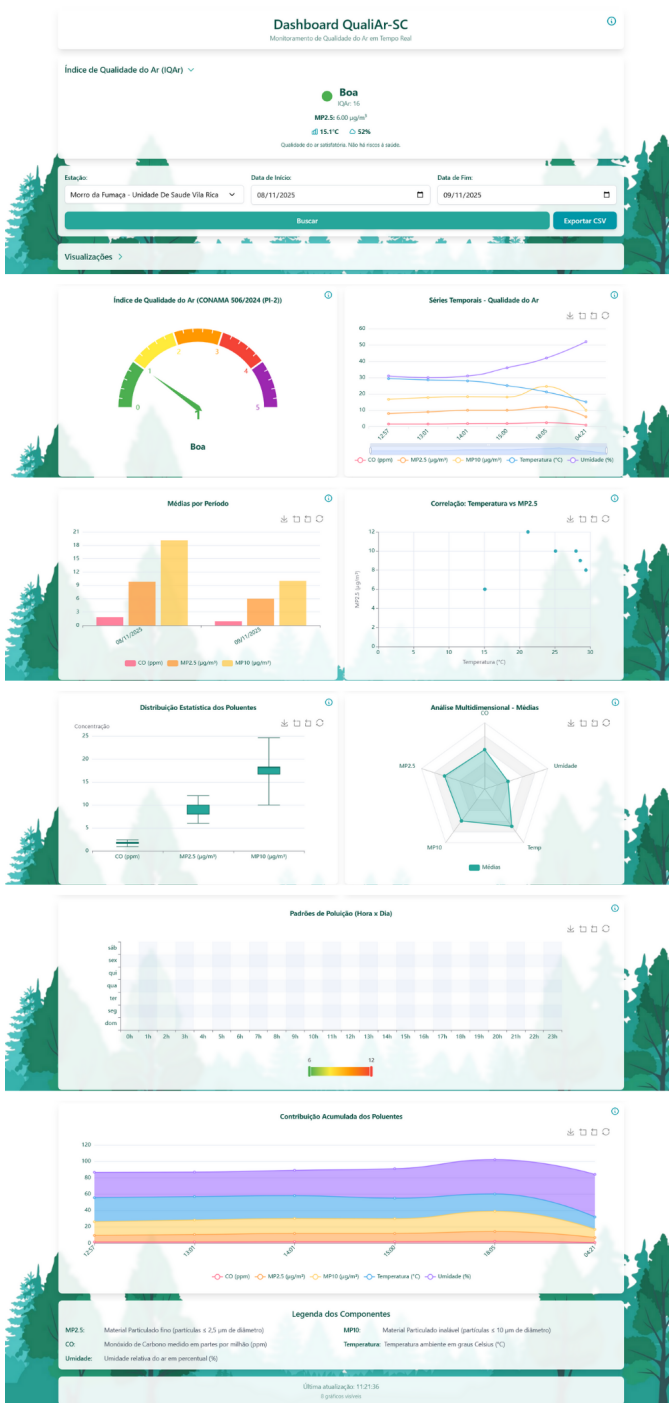


Figura 7. Tela principal do *dashboard* desenvolvido.

e *timestamp* como Chave de Classificação, permitindo consultas por período de tempo (ex.: "buscar dados do Sensor 1 entre a Data X e a Data Y") de forma eficiente.

## VII. TESTES E EXPERIMENTOS

A validação do sistema foi dividida em frentes metodológicas para assegurar a aferição dos dados, a eficiência energética e a integração da solução.

### A. Validação da Acurácia dos Sensores

O objetivo desta etapa é quantificar a acurácia e a confiabilidade dos sensores de custo reduzido em comparação com padrões de referência.

1) *Validação do Sensor de Monóxido de Carbono (CO)*: Este teste envolveu a operação de um Nó Sensor acoplado com o sensor *Gravity: Gas Sensor (DFRobot SEN0465)* em um ambiente controlado e vedado, em co-localização com um sensor de CO de grau industrial previamente calibrado, um CBH-4AS da Central Brasil Instrumentos. As leituras de ambos os dispositivos foram registradas simultaneamente durante a exposição a diferentes concentrações de CO (aproximadamente 500, 150 e 50 ppm), geradas pela queima controlada de serragem (Figura 8). A análise estatística foi empregada para determinar o grau de concordância e gerar equações de calibração.

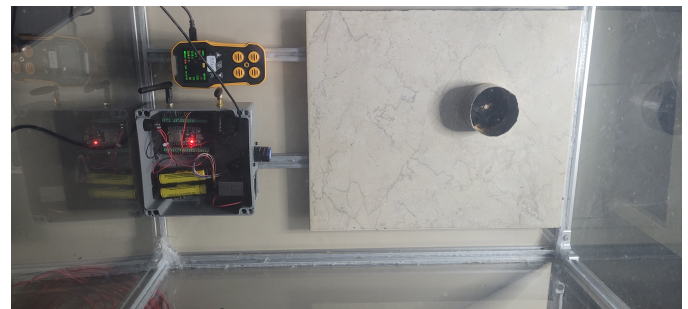


Figura 8. Aparato de teste do sensor de monóxido de carbono.

2) *Validação do Sensor de Material Particulado (MP2,5 e MP10)*: Dada a dificuldade em gerar concentrações controladas de material particulado, a validação do sensor *Air Quality Monitor (DFRobot SEN0233)* foi realizada por meio de co-localização com uma estação de referência. O Nó Sensor foi instalado próximo a uma estação oficial da Diamante Energia situada no bairro Vila Moema, em Tubarão-SC, e seus dados de MP2,5 e MP10 foram comparados aos dados públicos da estação para o mesmo período de tempo. A estação de referência utiliza máquinas *BAM 1020 Beta Attenuation Mass Monitor* da empresa *Met One Instruments* configuradas para medição de MP2,5 e MP10.

### B. Análise de Autonomia Energética

Este experimento visa estimar a autonomia energética dos dispositivos em campo. A metodologia focou na análise do *Gateway*, que foi monitorado continuamente por um período de 24 horas por representar o pior cenário de consumo do sistema. Este dispositivo permanece sempre ativo (*active mode*), realizando leituras locais e gerenciando a rede.

Os dados de consumo real obtidos deste teste (pior caso) são usados para extrapolar a autonomia total do *Gateway*. Adicionalmente, esses dados servem como base para estimar a autonomia do Nó Sensor, que representa o cenário de menor consumo, pois opera em modo *deep sleep* entre os ciclos de coleta e transmissão, também definidos em intervalos de 1 hora. Por fim, os dados empíricos de ambos os cenários serão

comparados com o consumo teórico derivado das especificações dos componentes.

### C. Teste de Alcance Ponto a Ponto

O objetivo deste teste é avaliar o alcance prático da comunicação LoRa em modo balanceado (SF8, BW 250 kHz, CR 4/6) em ambiente urbano costeiro. Foram utilizados dois dispositivos LoRa para estabelecer o alcance máximo de comunicação na frequência de operação de 915 MHz. O experimento foi realizado em Balneário Rincão, SC, caracterizado por topografia plana e proximidade ao mar, com o sensor-002 fixo e o sensor-001 sendo progressivamente afastado em cinco pontos de medição (P1 a P5).

## VIII. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### A. Validação do Sensor de Monóxido de Carbono (CO)

Os testes de validação do sensor de Monóxido de Carbono (CO) (*Gravity: Gas Sensor (DFRobot SEN0465)*) foram realizados em ambiente vedado, expondo o sensor desenvolvido e um sensor de referência com certificado de calibração (CBH-4AS da Central Brasil Instrumentos) a concentrações de 500 ppm, 150 ppm e 50 ppm, geradas pela queima controlada de serragem. As leituras temporais (Figura 9) e a análise de correlação (Figura 10) demonstram alta concordância entre os dispositivos, especialmente quando a concentração máxima foi menor e mais próxima da realidade, tendo em vista que a resolução CONAMA N° 506/2024 prevê uma leitura máxima de 9 ppm de monóxido de carbono para uma máxima média móvel de 8h [9].

A Tabela I resume as métricas estatísticas. O sensor testado apresentou forte correlação linear ( $r > 0,91$ ) e  $R^2$  elevado (0,9778 na faixa de 50 ppm) com o sensor de referência. O Erro Absoluto Médio (MAE) foi de 61,90 ppm (faixa alta), 21,72 ppm (faixa média) e 2,41 ppm (faixa baixa), demonstrando a viabilidade do sensor.

Tabela I  
AVALIAÇÃO DO SENSOR *DFRobot SEN0465*

Métrica	Teste 500 ppm	Teste 150 ppm	Teste 50 ppm
N° de Pontos	192	1689	1509
MAE (ppm)	61,90	21,72	2,41
RMSE (ppm)	83,44	29,62	3,56
$R^2$	0,8623	0,7728	0,9778
Correlação (r)	0,9695	0,9112	0,9900
Bias (ppm)	-54,90	-11,80	-1,15
MRE (%)	44,38	60,32	11,73
Erro $\leq 5\%$	1,0%	2,7%	56,7%
Erro $\leq 10\%$	6,2%	6,0%	60,4%

A regressão linear simples (Eq. 2), derivada do teste de 150 ppm, resultou em  $R^2 = 0,931$  ao ser validada com os dados de 500 ppm.

$$CO_{CBH-4AS} = 1,127 \times CO_{SEN0465} + 8,29 \quad (2)$$

Contudo, o *offset* constante de 8,29 ppm introduz erros significativos em baixas concentrações (relevantes para ar limpo). Para corrigir isso, foi implementada uma calibração

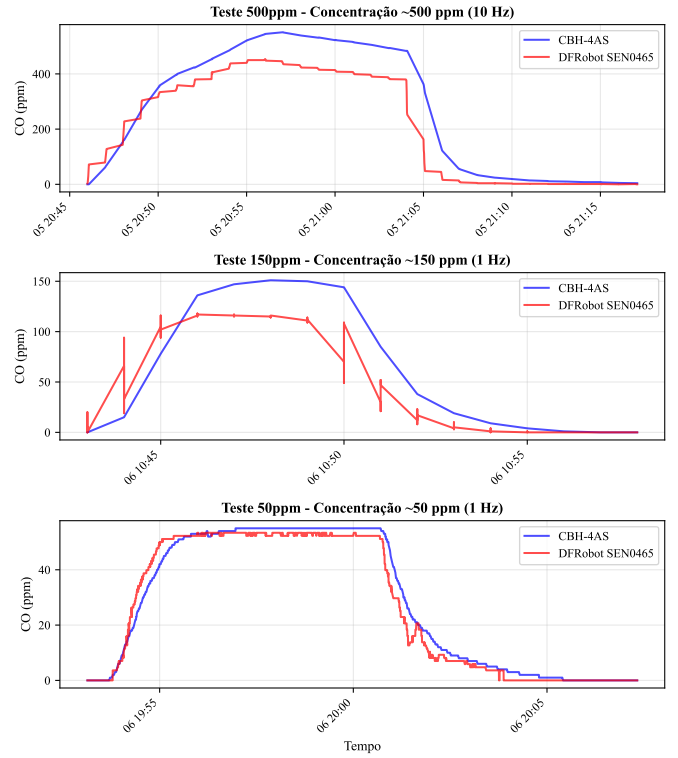


Figura 9. Comparação temporal entre o sensor *Gravity: Gas Sensor (DFRobot SEN0465)* (vermelho) e o sensor CBH-4AS da Central Brasil Instrumentos (azul) nos três testes de validação. (a) Teste de alta concentração (500 ppm) com taxa de amostragem de 10 Hz. (b) Teste de média concentração (150 ppm) com taxa de amostragem de 1 Hz. (c) Teste de baixa concentração (50 ppm) com taxa de amostragem de 1 Hz.

segmentada adaptativa conhecida como *zero-forcing*, dividida em quatro zonas: (1) 0-0,5 ppm:  $CO_{CBH-4AS} = 0$ ; (2) 0,5-10 ppm:  $CO_{CBH-4AS} = 1,127 \times CO_{SEN0465} + 2,5$  (melhoria de 42% no erro); (3) 10-15 ppm: transição linear entre offsets; (4)  $\geq 15$  ppm: uso da Eq. 2.

A distribuição dos erros absolutos (Figura 11) é simétrica, com a variabilidade atribuída a diferenças na dinâmica de resposta dos sensores, ruído de medição e deriva térmica (24,5°C a 26,9°C). A calibração segmentada demonstrou ser uma estratégia robusta, validando o sensor para monitoramento acessível.

### B. Validação do Sensor de Material Particulado (MP2,5 e MP10)

O teste de co-localização foi realizado no dia 09 de outubro de 2025, na estação da Diamante Energia - Vila Moema, com o sensor *Air Quality Monitor (DFRobot SEN0233)* capturando leituras em intervalos de 2 minutos. Utilizou-se mediana móvel com janela de 5 leituras para sincronização com as medições horárias da estação de referência (com sensor *BAM 1020 Beta Attenuation Mass Monitor* da empresa *Met One Instruments*), resultando em 11 pontos de comparação válidos entre 10h57 e 21h13. A Figura 12 apresenta a evolução temporal das concentrações medidas, evidenciando clara discrepância entre os sensores. A Tabela II resume os resultados quantitativos.

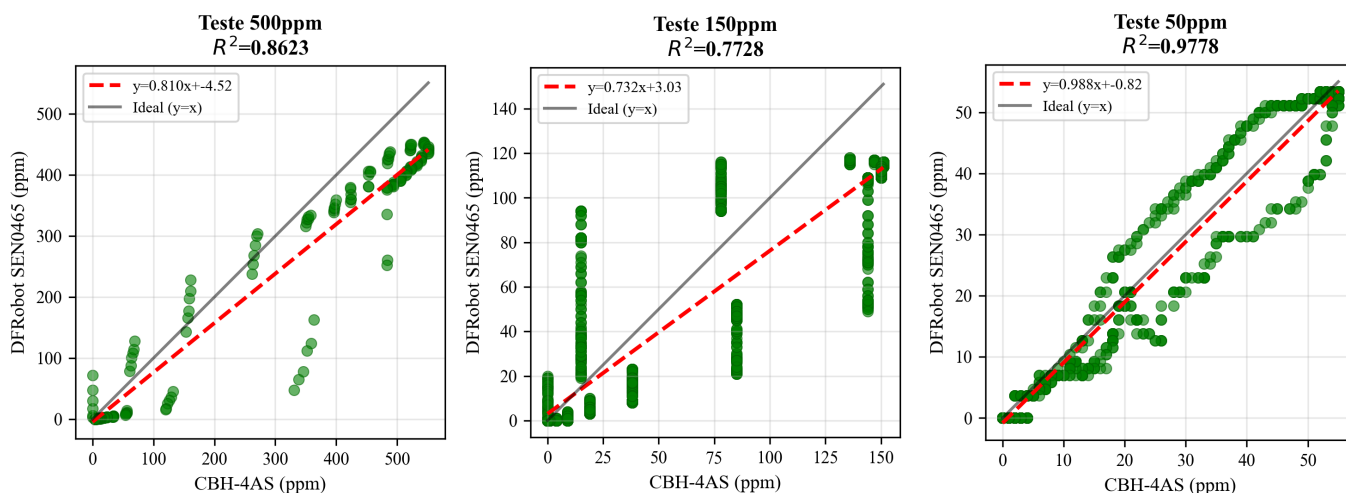


Figura 10. Análise de correlação entre o sensor *Gravity: Gas Sensor (DFRobot SEN0465)* e o sensor CBH-4AS da Central Brasil Instrumentos. *Scatter plots* mostrando a relação linear entre as medições, com linha de regressão (tracejada vermelha) e linha ideal  $y = x$  (sólida preta). Onde os pontos verdes são as leituras experimentais. (a) Teste 500 ppm com  $R^2 = 0,8623$ . (b) Teste 150 ppm com  $R^2 = 0,7728$ . (c) Teste 50 ppm com  $R^2 = 0,9778$ .

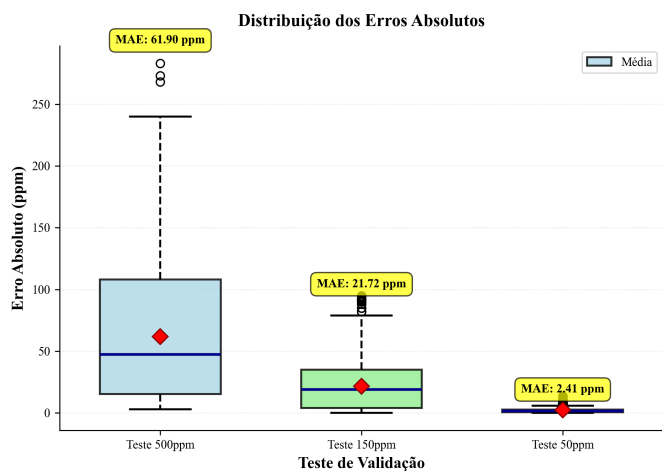


Figura 11. Distribuição dos erros absolutos entre o sensor *Gravity: Gas Sensor (DFRobot SEN0465)* e o sensor CBH-4AS da Central Brasil Instrumentos nos três testes de validação. Os boxplots mostram mediana (linha azul), média (losango vermelho), quartis (caixa) e outliers. Os valores de MAE (Erro Absoluto Médio) estão indicados acima de cada distribuição.

Os resultados demonstram inadequação do sensor *DFRobot SEN0233* para medição precisa de material particulado. Para MP2,5, o sensor apresentou erro absoluto médio (MAE) de  $9,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , erro quadrático médio (RMSE) de  $9,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e bias sistemático de  $-9,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Em termos percentuais, o sensor reportou em média apenas 18,8% dos valores medidos pelo *BAM 1020*, representando subestimação de aproximadamente 81%. Para MP10, a discrepância foi ainda maior: MAE de  $18,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , RMSE de  $19,16 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e bias de  $-18,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , com leituras correspondendo a apenas 12,2% da referência. A Figura 13 ilustra graficamente esta discrepância sistemática.

As causas prováveis desta inadequação incluem: (i) limitações intrínsecas do sensor óptico de custo reduzido para me-

Tabela II  
AVALIAÇÃO DO SENSOR *DFRobot SEN0233*

Métrica	MP2,5	MP10
Nº de Pontos Comparados	11	11
MAE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	9,41	18,86
RMSE ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	9,51	19,16
Bias ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	-9,41	-18,86
Desvio Padrão do Erro ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1,40	3,36
Leitura Média (% da Referência)	18,8%	12,2%
Faixa de Referência ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	10–13	19–28
Faixa do Lida ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0–5	0–6

**Conclusão:** Subestimação sistemática significativa

dição quantitativa precisa, visto que sensores de dispersão de luz são sensíveis à composição, forma e índice de refração das partículas; (ii) possível saturação ou range limitado do sensor, que aparenta atingir um patamar próximo de zero independentemente da concentração real; (iii) diferenças fundamentais nos princípios de medição — dispersão de luz versus atenuação de radiação beta — que podem resultar em sensibilidades drasticamente diferentes; (iv) ausência de calibração específica do sensor para as características do material particulado local.

Portanto, o sensor *DFRobot SEN0233* não é adequado para aplicações que requerem medições quantitativas precisas de MP2,5 e MP10, apresentando subestimação sistemática de aproximadamente 85% em média. O sensor pode, no máximo, servir como indicador qualitativo de presença/ausência de material particulado, mas não para quantificação confiável. Para futuros trabalhos, seria necessária a avaliação de sensores alternativos ou o desenvolvimento de modelos de correção complexos baseados em calibração extensiva, embora a magnitude da discrepância observada sugira limitações fundamentais do *hardware* que podem não ser completamente corrigíveis por *software*.

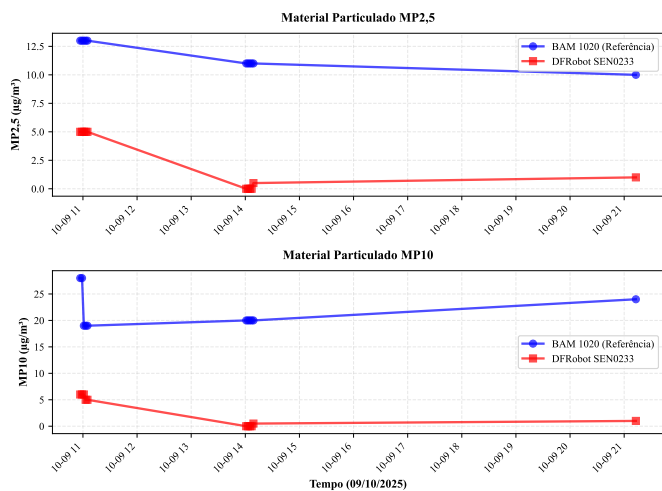


Figura 12. Evolução temporal das concentrações de MP2,5 e MP10 medidas pelo sensor *DFRobot SEN0233* e pela estação de referência com sensor *BAM 1020* durante o teste de co-localização realizado em 09/10/2025. Observa-se clara discrepância entre as medições, com o sensor desenvolvido apresentando leituras sistematicamente inferiores ao equipamento de referência.

### C. Análise de Autonomia Energética

A análise de autonomia energética focou no *Gateway*, que representa o pior cenário de demanda energética por operar continuamente em modo ativo. Em contraste, o *Nó Sensor* representa o cenário otimizado, entrando em *deep sleep* entre as leituras horárias e não utilizando o Wi-Fi. O sistema foi alimentado por uma bateria com capacidade nominal de 31600 mAh (duas células de 3,7 V e 15800 mAh em paralelo). O decaimento da tensão do *Gateway* foi monitorado por aproximadamente 24 horas para extrapolar a autonomia total e comparar os dados empíricos com os valores teóricos.

A Figura 14 apresenta o decaimento do nível de carga da bateria em função do tempo durante o teste experimental com o *Gateway*. Os dados coletados ao longo de aproximadamente 20,4 horas demonstram uma taxa média de descarga de 2,94% por hora, resultando em uma autonomia de 20,4 horas até o ponto de corte da proteção BMS (sistema de gerenciamento de bateria) configurado em 40%. Durante o período monitorado, a bateria descarregou de 100% para exatamente 40%, momento em que o BMS interrompeu a alimentação do circuito. A partir da análise da curva de descarga e considerando a capacidade total da bateria de 31600 mAh, o consumo médio real do *Gateway* foi estimado em aproximadamente 927 mA. Este valor é significativamente superior ao consumo teórico de 405 mA, indicando perdas no regulador de tensão, consumo adicional do módulo Wi-Fi em modo ativo contínuo e ineficiências no circuito de alimentação. A discrepância confirma que a conexão direta dos componentes de 5V (especialmente o ventilador do sensor de material particulado operando continuamente a 300mA) à bateria compromete a eficiência energética do sistema, impedindo que o modo *deep sleep* do ESP32 proporcione a economia esperada.

A Tabela III apresenta uma análise comparativa do consumo

energético teórico dos dispositivos antes e após as alterações propostas no circuito. Na configuração original, o cálculo teórico indica consumo contínuo de aproximadamente 405 mA para o *Gateway*, resultando em autonomia estimada de 78 horas (3,25 dias). O valor experimental observado de 927 mA é significativamente superior ao teórico (diferença de 129%), o que pode ser atribuído a perdas no regulador de tensão *step-up* (conversão de 3,7 V para 5 V com eficiência típica de 80-85%), consumo adicional do módulo Wi-Fi em modo ativo 31600 mAh com transmissões periódicas e ineficiências no circuito de alimentação dos componentes de 5 V. Esta discrepância reforça a necessidade de otimização do circuito. Com a implementação de um relé controlado pelo ESP32, permitindo que o ventilador (300 mA) e outros componentes de 5 V sejam acionados apenas durante as leituras (1 minuto a cada hora), o consumo médio teórico do *Gateway* reduz drasticamente para 110 mA, elevando a autonomia estimada para 287 horas (12 dias)—uma melhoria de 268%. Aplicando-se o mesmo fator de ineficiência observado (2,29×), o consumo real esperado seria de aproximadamente 252 mA, resultando em autonomia prática de 125 horas (5,2 dias). Para o *Nó Sensor*, que já opera em modo *deep sleep* entre leituras com módulo Wi-Fi desabilitado, o consumo mantém-se baixo em aproximadamente 10 mA com autonomia superior a 130 dias. Adicionalmente, para aplicações em que o *Gateway* possa ser instalado em locais com acesso à rede elétrica, recomenda-se a alimentação contínua via adaptador AC/DC, eliminando completamente a dependência de bateria e permitindo operação ininterrupta do sistema.

Tabela III  
ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO E AUTONOMIA DOS DISPOSITIVOS ANTES E APÓS AS ALTERAÇÕES NO CIRCUITO DE ALIMENTAÇÃO.

Dispositivo	Configuração	Consumo (mA)	Autonomia (h/dias)
<i>Gateway</i>	Antes (5V direto)	405	78h / 3,25d
	Depois (relé)	110	287h / 12,0d
<i>Nó Sensor</i>	Antes (5V direto)	10	3160h / 132d
	Depois (relé)	10	3160h / 132d

**Componentes:** ESP32 (80 mA ativo), LoRa RX (20 mA), LoRa TX (111 mA), ventilador 5 V (300 mA), sensor MP (100 mA ativo, 0,2 mA *standby*), sensor CO (5 mA).

**Bateria:** 2x 3,7 V 15800 mAh em paralelo = 31600 mAh.

**Nota:** Autonomia calculada até 40% (proteção BMS) usando 60% da capacidade (18960 mAh).

### D. Teste de Alcance Ponto a Ponto LoRa

Os resultados do teste de alcance LoRa são apresentados na Figura 15, que ilustra os pontos de medição e o status da comunicação em cada um deles. A comunicação foi mantida de forma estável nos pontos P1 (763 m) e P2 (1450 m), sendo P2 o último ponto com comunicação completamente confiável. Estes resultados estão em conformidade com a literatura técnica para LoRa em modo SF8 com BW 250 kHz, que prevê alcances típicos entre 1–3 km em ambientes urbanos [33].

O ponto P3 (2316 m) marcou a primeira falha completa de comunicação, definindo o limite superior do alcance para

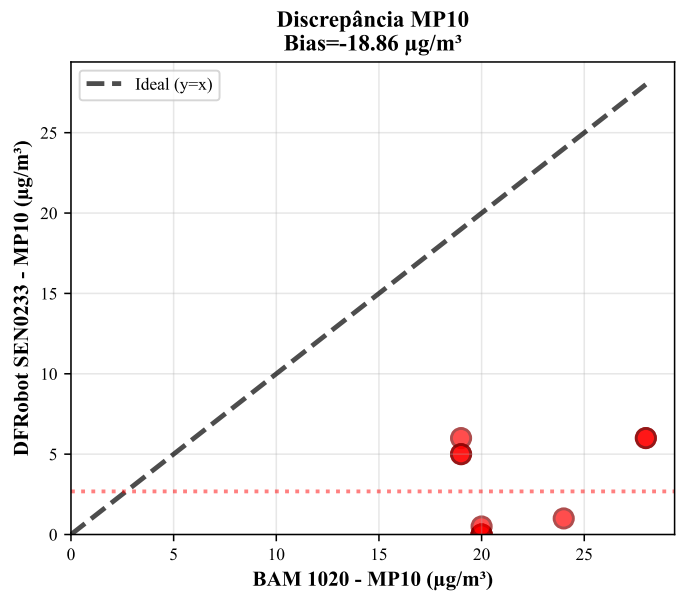
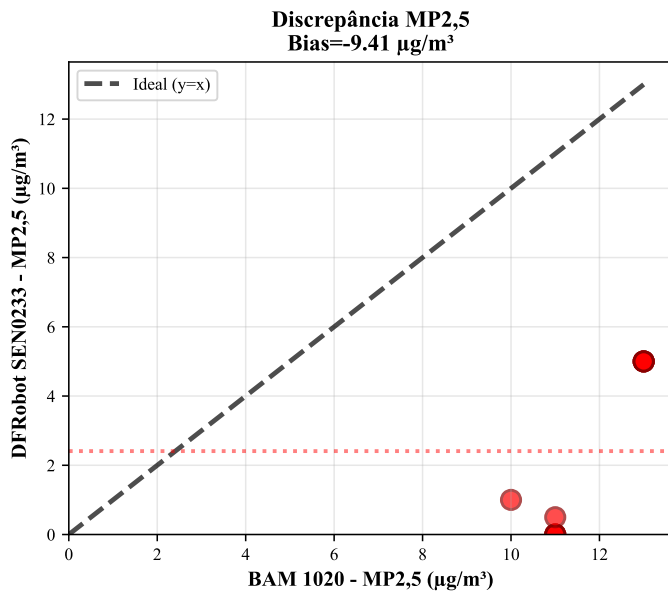


Figura 13. Gráficos de dispersão comparando as medições do sensor *DFRobot SEN0233* com a estação de referência com o sensor *BAM 1020* para MP2,5 e MP10. A linha tracejada preta representa a relação ideal ( $y=x$ ), em que ambos os sensores reportariam valores idênticos. A distância dos pontos em relação à linha ideal evidencia a subestimação sistemática do sensor econômico.

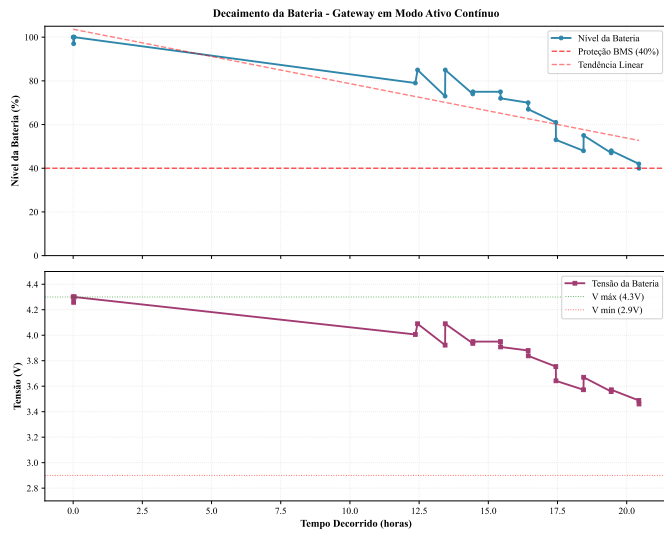


Figura 14. Decaimento do nível de carga e tensão da bateria do *Gateway* ao longo do tempo durante teste experimental. A linha tracejada vermelha indica o ponto de corte da proteção BMS (40%). A tendência linear demonstra a taxa constante de descarga durante a operação em modo ativo contínuo.

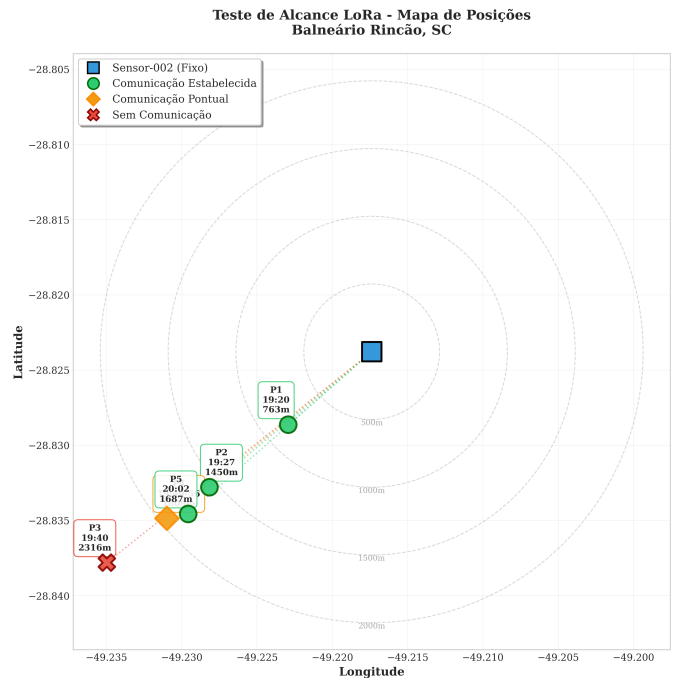


Figura 15. Mapa dos pontos de teste de alcance LoRa em Balneário Rincão, SC. Os marcadores verdes indicam comunicação estável, amarelos indicam comunicação intermitente e vermelhos indicam falha de comunicação.

a configuração testada. Já o ponto P4 (1809 m) apresentou comunicações esporádicas, comportamento característico de operação em zona de transição, onde o sinal oscila próximo ao limiar de sensibilidade do receptor. A recuperação da comunicação no ponto P5 (1687 m) demonstra a complexidade da propagação em ambiente real, influenciada por variações na linha de visada e condições de reflexão.

A Figura 16 apresenta a relação entre o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e a distância. O RSSI médio ob-

servado foi de  $-114,29$  dBm, com variações entre  $-108$  e  $-115$  dBm, indicando operação em condições moderadas próximas ao limite de sensibilidade típico de  $-123$  dBm para a configuração utilizada.

Com base nos resultados obtidos, recomenda-se para o

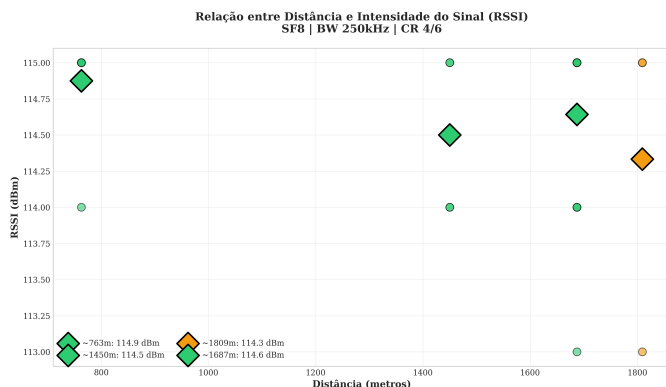


Figura 16. Relação entre RSSI e distância nos pontos de teste. Observa-se a degradação do sinal com o aumento da distância, com valores operando na faixa de  $-108$  a  $-115$  dBm.

dimensionamento da rede uma distância máxima entre nós de aproximadamente 1000 m (70% do alcance máximo confiável), garantindo margem de segurança para compensar variações ambientais. Para aplicações que demandem maior alcance, sugere-se aumentar o *Spreading Factor* (SF) para 10 ou 12, o que pode estender o alcance para 5–10 km com o *trade-off* de maior tempo de transmissão e consumo energético.

## IX. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou a concepção e a arquitetura de um sistema IoT acessível para monitoramento da qualidade do ar, focado em suprir a lacuna de dados no município de Morro da Fumaça, SC. A principal contribuição do sistema proposto é o seu *design* focado em mobilidade e acessibilidade, permitindo a implantação de uma rede de monitoramento complementar e de alta granularidade.

A flexibilidade da plataforma foi plenamente validada. Diferente de estações de referência, que são fixas e de alto custo [28], o sistema desenvolvido é móvel, alimentado por bateria e conectado via Wi-Fi, com retransmissão LoRa. Isso possibilita não apenas a realização de medições hiperlocais para identificar "microclimas" de poluição ou monitorar eventos específicos, mas também abre precedentes para o uso da arquitetura em diversos cenários que exijam monitoramento móvel ou temporário, tais como: detecção de gases em galerias de minas e ambientes confinados, monitoramento da qualidade do ar em túneis rodoviários, avaliação de impacto ambiental em áreas de construção civil, acompanhamento de eventos pontuais como queimadas ou grandes aglomerações, e estudos em zonas agrícolas sujeitas à aplicação de agrotóxicos ou queima de biomassa. Além disso, a arquitetura modular do sistema permite a substituição ou adição de diferentes tipos de sensores, viabilizando estudos pontuais com finalidades diversas — como monitoramento de ruído, radiação ultravioleta, ou outros gases poluentes ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ) — ampliando significativamente o escopo de aplicações da plataforma para além do monitoramento da qualidade do ar. A arquitetura detalha o uso de sensores econômicos, com destaque para a

performance do sensor de monóxido de carbono, e se alinha às demandas da legislação ambiental (CONAMA N° 506/2024) [9] para o cálculo do IQAr.

Os próximos passos serão a implementação física da plataforma em Morro da Fumaça, SC, seguida pela realização de testes de campo e validação contínua dos dados, identificando padrões diários, semanais e potenciais correlações com atividades industriais ou eventos específicos. Espera-se que o sistema implementado forneça dados valiosos e de acesso público para a comunidade, pesquisadores e gestores públicos, auxiliando na tomada de decisões e na proteção da saúde da população local.

Os trabalhos futuros incluem a evolução do protótipo e a expansão de sua capacidade de medição. A análise de autonomia energética indicou que, para instalações fixas, o desempenho do *gateway* será otimizado ao ser conectado diretamente à rede elétrica, dado seu modo de operação sempre ativo. Melhorias de *hardware* estão planejadas, como a adição de um conector USB externo para permitir a recarga da bateria sem a necessidade de abrir o invólucro à prova d'água. Além disso, busca-se a substituição do sensor de material particulado por um modelo de maior confiabilidade e a adição de novos sensores para cobrir mais parâmetros de qualidade do ar definidos pela CONAMA, aumentando a abrangência do sistema.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. L. Ullo and G. R. Sinha, "Advances in Smart Environment Monitoring Systems Using IoT and Sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 11, p. 3113, May 2020.
- [2] B. P. F. Braga Jr. et al., "O meio atmosférico," em *Introdução à engenharia ambiental*, 2. ed., São Paulo: Pearson, 2002.
- [3] L. Hoinaski et al., *Avaliação do impacto das emissões veiculares, queimadas, industriais e naturais na qualidade do ar em Santa Catarina: ano base 2021*. Florianópolis: LCQAR, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/245667>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- [4] V. F. Camara, H. M. Lisboa, L. Hoinaski e P. C. David, "Levantamento das emissões atmosféricas da indústria da cerâmica vermelha no sul do estado de Santa Catarina, Brasil," *Cerâmica*, São Paulo, v. 61, n. 358, p. 213–218, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/jce/a/QyvDGHbbqjMpQrJ686THbmg/>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- [5] IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, "Morro da Fumaça," em *Cidades e Estados*. Rio de Janeiro: IBGE, [2025]. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/morro-da-fumaca.html>. Acesso em: 15 dez. 2025.
- [6] IQAir, 2024 *IQAir World Air Quality Report*. Acessado em: 29 mar. 2025. [Online]. Disponível: <https://www.iqair.com/us/newsroom/waqr-2024-pr>
- [7] Ministério da Saúde (Brasil), *Queimadas*. Acessado em: 6 mai. 2025. [Online]. Disponível: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/q/queimadas>
- [8] Biblioteca Virtual em Saúde (Ministério da Saúde, Brasil), *Lançamento da Política Nacional de Qualidade do Ar...* 27 jun. 2024. Acessado em: 27 mar. 2025.
- [9] Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (Brasil), "Resolução CONAMA N° 506, de 5 de julho de 2024," *Diário Oficial da União*, 9 jul. 2024, Seção 1, p. 133.
- [10] Nações Unidas Brasil, *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. Acessado em: 28 mar. 2025. [Online]. Disponível: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>
- [11] N. F. Souza, H. M. Lisboa, e E. O. Nosse, "A qualidade do ar em Morro da Fumaça e seus efeitos sobre a saúde da população," TCC (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

- [12] Morro da Fumaça Notícias, "Com drone, Fundação do Meio Ambiente identifica queimadas em Morro da Fumaça,"2020. Acessado em: 21 abr. 2025.
- [13] R. Buyya and A. V. Dastjerdi (Orgs.), *Internet of things: principles and paradigms*. Sydney: Elsevier, 2016.
- [14] A. McEwen and H. Cassimally, *Designing the internet of things*. Chichester, England: Wiley, 2014.
- [15] McKinsey & Company, *The Internet of Things: Catching up to an accelerating opportunity*. 2021.
- [16] Semtech, *LoRa® and LoRaWAN®*. 2024. [Online]. Disponível: <https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>
- [17] *Develop and Operate Your LoRaWAN IoT Nodes Ready-to-use devices and self-built Arduino nodes in the "The Things Network"*. Aachen: Elektor, 2022.
- [18] E. Spaho, A. Biberaj, and A. Tahiraga, "LoRaWAN for an IoT-based environmental monitoring application in Tirana city,"*Pollack Periodica*, vol. 16, no. 2, pp. 92-97, Jun. 2021.
- [19] S. Ganvir et al., "Efficient Environmental Monitoring through LoRa-WAN IoT Solutions,"*IJIREICE*, vol. 11, no. 4, Apr. 2023.
- [20] S. Sobhi et al., "Mobility of LoRaWAN Gateways for Efficient Environmental Monitoring in Pristine Sites,"*Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1698, Feb. 2023.
- [21] E. González et al., "LoRa Sensor Network Development for Air Quality Monitoring or Detecting Gas Leakage Events,"*Sensors*, vol. 20, no. 21, p. 6225, Oct. 2020.
- [22] D. Wu and J. Liebeherr, "A Low-Cost Low-Power LoRa Mesh Network for Large-Scale Environmental Sensing,"*IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 19, pp. 16700-16714, Oct. 2023.
- [23] J. M. Sole et al., "Implementation of a LoRa Mesh Library,"*IEEE Access*, vol. 10, pp. 113158-113171, 2022.
- [24] Radioenge, *Modulo LoRaMESH - Manual de Utilização*. 2025. Acessado em: 17 jun. 2025.
- [25] Congresso Nacional (Brasil), *LEI Nº 6.938, DE 31 DE AGOSTO DE 1981*. 1981.
- [26] Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (Brasil), *Orientação Técnica: Índice de Qualidade do Ar*. Janeiro de 2025.
- [27] Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA), *Rede de monitoramento*. Acessado em: 20 mai. 2025.
- [28] J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [29] DFRobot, *Gravity: Gas Sensor Calibrated (I2C & UART) (SKU: SEN0465 to SEN0476)*. Acessado em: 1 jul. 2025.
- [30] DFRobot, *Air Quality Monitor - PM 2.5, Temperature and Humidity Sensor (SKU: SEN0233)*. Acessado em: 1 jul. 2025.
- [31] V. N. Wolter, "Roteamento Lora Mesh,"*Radioenge Fórum*, 6 abr. 2021. Acessado em: 17 jun. 2025.
- [32] M. Nandi, "Com recursos do Governo do Estado, estrutura pioneira no Brasil para monitoramento e previsão de eventos climáticos é montada em Santa Catarina,"*Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC)*, 30 mai. 2025. Acessado em: 9 nov. 2025.
- [33] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, and W. M. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things,"*Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, Sep. 2016.