

Tecnologia Sustentável para Monitoramento da Qualidade do Ar: Desenvolvimento de uma Estação de Baixo Custo para Microclimas Urbanos

*Fernando Silva Ferreira¹, Pedro Henrique Santos Souza Duarte¹, Fernando Santos Cortes Jr¹
e Marcelo Alves Guimarães¹*

¹Laboratório de Sistemas Inteligentes e Conectividade (LabSICo)

Departamento de Ciências e Tecnologias (DCT)

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB)

Jequié, Bahia - Brasil

{202110854, 202210095, 202420526, maguimaraes}@uesb.edu.br

Resumo—A poluição do ar é uma crise global com sérios impactos na saúde pública e no meio ambiente, associada a milhões de mortes prematuras anuais. No Brasil, a escassez de estações de monitoramento, especialmente em cidades médias e afastadas, agrava a desigualdade na vigilância ambiental. Nesse contexto, Jequié (BA), com seu relevo acidentado e urbanização desordenada, ilustra essa carência, apresentando microclimas que dificultam a dispersão de poluentes. Este trabalho propõe o desenvolvimento e validação de uma estação de baixo custo, baseada em Internet das Coisas (IoT), para monitorar a qualidade do ar em microclimas urbanos. A comunicação emprega tecnologia LoRa com módulo SX1280. A pesquisa, de natureza aplicada e abordagem quantitativa, avançou em duas versões: inicialmente, a 1ª (Protótipo em Bancada) validou sensores e algoritmos em ambiente controlado; em seguida, a 2ª (Estação Externa) validou o sistema completo de comunicação LoRa/Gateway com TV Box, coletando dados ambientais por 25 horas no LabSICo/UESB. Sensores como MQ-135, MQ-9, PMS3003, MQ-131, DHT22 e BMP180 foram utilizados. Por fim, os resultados comprovam a robustez da arquitetura e fornecem um perfil microclimático detalhado dos poluentes. O estudo visa democratizar o acesso a informações ambientais e subsidiar políticas públicas.

Index Terms—IoT ambiental, Microclimas urbanos, Poluentes atmosféricos, Qualidade do ar, Sensores de baixo custo.

I. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos mais graves imperativos sanitários e ambientais. A Organização Mundial da Saúde [1] estima que a má qualidade do ar esteja implicada em, aproximadamente, sete milhões de mortes prematuras anuais. A exposição contínua a aerodispersóides, como partículas finas (PM_{2.5}), está associada ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares [2].

No panorama nacional, a distribuição das estações de monitoramento da qualidade do ar é marcadamente desigual, o que evidencia significativas disparidades regionais. Em particular, regiões geográficas como o Norte e o Nordeste do Brasil apresentam uma carência crítica desses sistemas de vigilância.

Este trabalho recebeu apoio da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), através do Centro de Ciência e Tecnologia em Energia e Sustentabilidade (CETENS), e da Receita Federal, pela doação dos dispositivos TV Box.

Tal disparidade compromete severamente a capacidade de formulação de políticas públicas baseadas em evidências e a eficácia da vigilância ambiental [3], [4].

Neste contexto, o município de Jequié, na Bahia, emerge como um estudo de caso. A localidade não possui um sistema de monitoramento oficial e, além disso, apresenta um relevo acidentado que favorece condições microclimáticas desfavoráveis à dispersão eficiente de poluentes. Consequentemente, a população local está sujeita a uma exposição agravada aos riscos para a saúde [5], [6].

Embora a ampliação da cobertura do monitoramento seja crucial, a adoção de tecnologias de menor custo e maior capilaridade para atender áreas urbanas periféricas e regiões não assistidas, especialmente fora do eixo Sudeste, encontra barreiras técnicas, operacionais e financeiras [4], [7]. Dessa forma, torna-se evidente a necessidade de desenvolver alternativas sustentáveis e adaptadas às condições microclimáticas locais, capazes de gerar dados confiáveis e apoiar estratégias de saúde pública e gestão ambiental.

O desenvolvimento do sistema está metodologicamente dividido em duas etapas de validação. Inicialmente, será construído um protótipo em bancada (*1ª Versão*), utilizando um Arduino Nano em lógica de baixo consumo energético (*low-power*) e um array de sensores. Subsequentemente, na segunda fase (*2ª Versão*), o sistema será integrado em uma caixa protetora para uso externo. Nesta etapa, o módulo LoRa será ativado para a transmissão dos dados coletados para um gateway central, implementado com um TV Box configurado para receber e interpretar os dados, e enviá-los por requisições HTTP para um servidor remoto de armazenamento, localizado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Software (CPDS) da UESB, campus Jequié.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa se enquadra como de natureza aplicada, dado seu foco na resolução de um desafio prático: o desenvolvimento e validação de uma estação de monitoramento da qualidade do ar de baixo custo para microclimas urbanos em

regiões semiárida. A metodologia adotada é predominantemente quantitativa, baseada na mensuração objetiva de dados abióticos relacionados à qualidade do ar e variáveis meteorológicas, possibilitando uma análise estatística descritiva. Elementos qualitativos são integrados para a caracterização do contexto urbano e ambiental de Jequié (BA), onde a estação será instalada, no campus da UESB.

A população de estudo é composta pelos dados ambientais coletados de forma contínua. A instrumentação de baixo custo inclui um array de sensores para gases e material particulado: MQ-135 (gases nocivos), MQ-9 (CO, CH₄, GLP), MQ-131 (O₃), PMS3003 (MP 1.0, MP 2.5, MP 10), DHT22 (temperatura/umidade) e BMP180 (pressão/altitude).

A frequência de amostragem dos dados segue especificações técnicas para garantir a fidedignidade da coleta. A calibração do array de sensores, especialmente para a série MQ, é realizada periodicamente e fundamentada em metodologias meteorológicas rastreáveis, utilizando a biblioteca MQSensorsLib [8] como base para a obtenção dos parâmetros de referência. A análise dos dados utiliza estatística descritiva (cálculo de médias, desvios padrão e frequências) e a avaliação da qualidade do ar é assegurada pela comparação direta dos níveis de concentração dos poluentes com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 [9], referencial normativo para os padrões nacionais.

No que concerne à infraestrutura de comunicação e processamento, o gateway, elemento central para a recepção e o armazenamento dos dados coletados, foi estrategicamente instalado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Software (CPDS) da UESB. Priorizando uma solução de baixo custo e alta eficiência energética, optou-se pela implementação física do gateway utilizando um dispositivo TV Box reconfigurado, permitindo que o equipamento operasse como um servidor local de processamento de borda (Edge Computing). Este arranjo arquitetural é responsável por receber os pacotes de dados brutos transmitidos via tecnologia LoRa (Módulo SX1280) e, após o processamento inicial por software dedicado, imediatamente encaminhá-los para um servidor remoto que se encarrega do armazenamento final seguro e da disponibilização organizada das informações.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Protótipo em bancada (1ª Versão)

A primeira versão do sistema de monitoramento ambiental foi desenvolvida como um protótipo em bancada para validar a instrumentação e os algoritmos de aquisição de dados. O sistema foi montado em uma *protoboard* e utilizou um microcontrolador Arduino Nano configurado para operar em **lógica de baixo consumo energético** (*low power*).

A instrumentação embarcada incluiu um *array* abrangente de sensores: MQ-135, MQ-9, MQ-131, PMS3003, DHT22 e BMP180.

Os dados coletados eram visualizados e armazenados em tempo real através de uma conexão serial com um *notebook*. O desenvolvimento dos algoritmos na IDE Arduino focou em garantir a **precisão, estabilidade e confiabilidade** das

medições, sendo os testes iniciais realizados em ambiente interno controlado para estabelecer a linha de base de performance do *hardware*.

B. Estação de Monitoramento Externa com Comunicação LoRa (2ª Versão)

A segunda versão do sistema marcou a transição do protótipo em bancada para a operação em ambiente externo, focada na autonomia e na validação da comunicação de longo alcance.

O *hardware* de sensoriamento, já validado (Seção A), foi instalado em uma caixa de proteção adaptada e resistente a intempéries. Esta etapa permitiu a avaliação inicial da robustez e durabilidade do sistema em condições climáticas reais.

O principal resultado alcançado foi o sucesso na implementação da comunicação sem fio LoRa. Um módulo LoRa foi incorporado, eliminando a dependência de conexão física e estabelecendo uma comunicação eficiente para a transmissão de dados. A validação ocorreu com o envio contínuo das medições do sensor para um *gateway* localizado no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Software (CPDS/UESB), campus Jequié, como apresentado na Figura 1.



Figura 1. Estação de monitoramento externa (2ª Versão) instalada em caixa de proteção.

Esta fase comprovou a confiabilidade da transmissão de dados a longas distâncias, confirmando que o sistema de baixo custo é capaz de operar de forma autônoma e fornecer um fluxo contínuo de dados ambientais em tempo real.

C. Gateway com TV Box: Recepção e Processamento de Dados

A implementação do gateway utilizando uma TV Box, configurada como servidor local, representou uma solução de baixo custo e alta eficiência para a recepção e o pré-processamento dos dados transmitidos pela estação de monitoramento. O receptor LoRa, conectado à TV Box via porta serial, captura os pacotes enviados pela estação remota, que opera com o módulo SX1280.

Na TV Box, um script em Node.js foi desenvolvido para monitorar continuamente a porta serial, realizar a interpretação

dos dados brutos e convertê-los em um formato JSON estruturado, contendo todas as variáveis ambientais monitoradas.

Após o processamento, os dados são automaticamente enviados para um servidor remoto por meio de requisições HTTP, assegurando que as informações estejam disponíveis em tempo real para consulta pública e análise. Essa arquitetura permitiu que a TV Box atuasse como um nó de edge computing, conferindo autonomia ao sistema e reduzindo a necessidade de infraestrutura de rede dedicada. Durante os testes, a solução mostrou-se estável, com baixo consumo energético e capaz de operar continuamente, validando a viabilidade do uso de dispositivos de consumo reconfigurados em aplicações de IoT ambiental.

D. Processos de Calibração

A garantia da acurácia e da fidedignidade dos dados ambientais gerados pelo sistema é sustentada por procedimentos de calibração rigorosos e específicos para cada componente de sensoriamento. Para os sensores de óxido metálico semicondutor (MQ-131, MQ-135 e MQ-9), o processo é centralizado na determinação da resistência de referência (R_0) em ambiente de ar limpo. Esta metodologia inicia-se com uma fase obrigatória de burn-in, um período de estabilização contínua de 48 horas, essencial para estabilizar as propriedades eletroquímicas do elemento sensível. Na sequência, a biblioteca MQSensorsLib foi empregada para calcular o valor médio de R_0 a partir de múltiplas amostras ($N = 100$), sendo a concentração final dos gases em partes por milhão (ppm) quantificada com base na razão R_s/R_0 . Ademais, para mitigar a interferência ambiental, o sistema integra dados do sensor DHT22 para aplicar um fator de correção (cFactor), compensando o impacto da temperatura e umidade na sensibilidade do semicondutor.

Em contraste, o sensor de material particulado PMS3003, que opera por dispersão de luz a laser, requer um protocolo operacional distinto para a integridade dos dados, sem a calibração baseada em R_0 . O sensor é configurado para o modo passivo (`pms.passiveMode()`), solicitando a medição sob demanda (`pms.requestRead()`), sendo essencial a observação de um período de pré-aquecimento e a manutenção constante para evitar a contaminação do sistema óptico. Por fim, a validação metrológica do sistema como um todo é um processo contínuo que inclui a manutenção periódica para combater a deriva natural dos sensores. A acurácia em campo é confirmada por meio da comparação cruzada dos dados calibrados com os resultados provenientes de instrumentos de referência de nível metrológico, como os analisadores de monitoramento oficiais, realizados em ambiente de teste controlado.

E. Modelo arquitetural

A arquitetura do Sistema de Monitoramento de Qualidade do Ar foi concebida em um modelo distribuído, visando a modularidade e a robustez dos dados para análises subsequentes. O sistema é composto por quatro módulos interconectados que atuam de forma coordenada. O fluxo de dados inicia-se na camada física de sensoriamento, avança para a comunicação de longo alcance e culmina no armazenamento em uma base

de dados centralizada. O sistema é dividido nos seguintes módulos funcionais:

Módulo de Sensoriamento: Utiliza um Arduino Nano com sensores de baixo custo (gases, material particulado, temperatura e umidade) para coletar dados ambientais. Os dados brutos são pré-processados antes da transmissão.

Módulo Transmissor LoRa: Recebe os dados pré-processados, os empacota (utilizando outro Arduino Nano) e os envia por meio da tecnologia LoRa. Isso assegura comunicação robusta em longas distâncias com baixo consumo de energia.

Módulo Receptor LoRa: Captura os pacotes de dados LoRa, os decodifica e os transfere para uma porta serial, garantindo a integridade da informação antes de sua transferência final.

Módulo de Base de Dados: Um software dedicado captura a mensagem da porta serial, executa o parsing (análise e conversão) para o formato JSON e armazena os dados em um banco de dados centralizado. Este repositório final suporta análises, visualização pública e aplicações de pesquisa/gestão.

F. Dados abióticos coletados

A análise das variáveis abióticas coletadas ao longo do período de monitoramento é crucial para a compreensão da dinâmica microclimática e da qualidade do ar no local de estudo, fornecendo a base contextual para a interpretação dos demais resultados da pesquisa. A **Figura 2** apresenta a variação temporal da Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$), Umidade Relativa do Ar (%) e Índice de Calor em relação à hora do dia. A análise dos dados revela um padrão diário esperado, caracterizado por uma relação inversa entre a temperatura e a umidade ao longo do ciclo de medição.

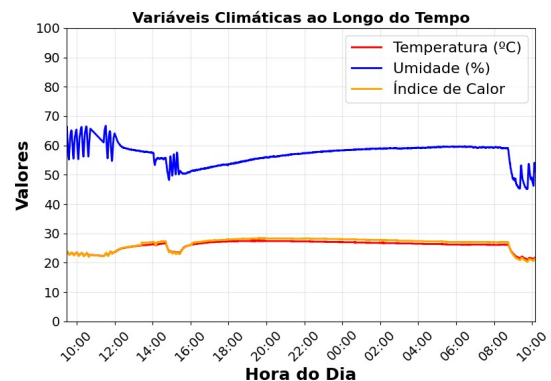


Figura 2. Variação temporal da Temperatura e Umidade Relativa do Ar.

Em termos de extremos, a Umidade Relativa do Ar (UR) (linha azul) iniciou a coleta com valores elevados, oscilando entre 65% e 70%, e atingiu seu ponto mínimo por volta das 15:00, na faixa de 50%. Posteriormente, a UR demonstrou uma recuperação gradual, estabilizando-se durante o período noturno em torno de 58% a 60%. Em contraste, a Temperatura do Ar (linha vermelha) e o Índice de Calor (linha amarela) apresentaram tendências quase idênticas e correlacionadas, com valores mínimos registrados no início da coleta, próximos

a 23°C. O pico máximo para ambas as variáveis ocorreu no período da tarde, atingindo aproximadamente 28°C por volta das 15:00.

Por sua vez, a **Figura 3** ilustra a variação da concentração de diferentes Gases Poluentes e de Efeito Estufa (O_3 , NH_3 , GLP, CH_4 e CO), medidas pelos sensores MQ-135 e MQ-9, ao longo da hora do dia. A análise destaca uma variação expressiva nas concentrações de CO e, em menor grau, NH_3 e CH_4 , particularmente durante o período noturno e início da manhã.

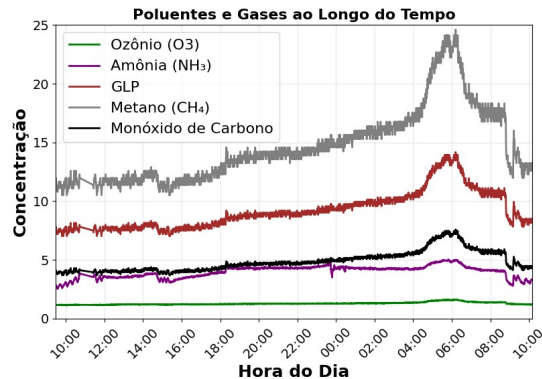


Figura 3. Variação da concentração de Gases Poluentes (MQ-135 e MQ-9) ao longo do tempo.

O Metano (CH_4) - (linha cinza) foi o poluente mais abundante e com maior amplitude de variação. Sua concentração iniciou em torno de 11 a 12 e demonstrou um aumento gradual e constante, característico de um acúmulo noturno, culminando no pico máximo entre 05:00 e 06:00, onde atingiu um valor superior a 24. Após este pico matinal, uma queda acentuada na concentração é observada, indicando o início da dispersão atmosférica. O Monóxido de Carbono (CO) - (linha preta) e o GLP - (linha bordô) seguiram um padrão temporal similar ao CO, embora em níveis de concentração mais baixos, atingindo seus picos no mesmo intervalo de 05:00 a 06:00. O CH_4 atingiu o valor máximo de cerca de 7, enquanto o NH_3 alcançou aproximadamente 14. Por outro lado, o Ozônio (O_3 - linha verde) e a Amônia (NH_3 - linha roxa) apresentaram variações mínimas, mantendo-se em concentrações baixas e relativamente estáveis durante todo o período, o que sugere uma baixa atividade fotoquímica no local ou a ausência de grandes fontes de seus precursores.

IV. TRABALHOS RELACIONADOS

Para contextualizar a arquitetura proposta, a pesquisa de Pataki e Oliveira [10] apresentou um protótipo de monitoramento para o agronegócio, cuja arquitetura utiliza um ESP32 com Wi-Fi para transmitir dados de temperatura e umidade a um servidor web (Python/Flask). O presente estudo difere substancialmente ao focar em microclimas urbanos e ao implementar uma solução de *edge computing* de baixo custo. Esta pesquisa emprega a tecnologia LoRa (SX1280) para comunicação de longo alcance e reconfigura um dispositivo TV Box para atuar como *gateway* de recepção e processamento.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho demonstrou a viabilidade do desenvolvimento de uma estação de monitoramento da qualidade do ar de baixo custo, baseada em Internet das Coisas (IoT), como solução para ampliar a cobertura de vigilância ambiental em microclimas urbanos, especialmente em regiões com carência de infraestrutura, como Jequié-BA. O sistema, construído em duas versões evolutivas, combinou sensores de gás e material particulado com comunicação LoRa de longo alcance, validando sua operação contínua em ambiente externo. A utilização da TV Box não apenas provou ser uma solução de alta eficiência e baixo custo para o pré-processamento e encaminhamento de dados, mas também estabeleceu um precedente para o uso sustentável de eletrônicos de consumo em aplicações científicas e de vigilância ambiental. Os resultados obtidos evidenciam robustez, confiabilidade e potencial para integração em arquiteturas de cidades inteligentes, contribuindo para a democratização do acesso a informações ambientais e subsidiando ações e políticas públicas voltadas à saúde e ao planejamento urbano.

REFERÊNCIAS

- [1] ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE, "Air pollution," WHO, Geneva, 2021. [Online]. Available: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1. Accessed on: May 16, 2025.
- [2] R. D. Brook *et al.*, "Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American Heart Association," *Circulation*, vol. 121, no. 21, pp. 2331–2378, Jun. 2010.
- [3] INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, "Brasil precisa de no mínimo mais 46 estações de monitoramento da qualidade do ar," IEMA, São Paulo, 2024. [Online]. Available: <https://energiaambiente.org.br/brasil-precisa-de-no-minimo-mais-46-estacoes-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-aponta-estudo-do-iema-20240227>. Accessed on: May 16, 2025.
- [4] CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, "Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2022," CETESB, São Paulo, 2022. [Online]. Available: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>. Accessed on: May 16, 2025.
- [5] INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, "Mapa de estações meteorológicas," INMET, Brasília, 2025. [Online]. Available: <https://mapas.inmet.gov.br/>. Accessed on: July 8, 2025.
- [6] R. C. Santos, "Eventos pluviométricos extremos e seus impactos na cidade de Jequié – BA," M.S. thesis, Univ. Est. Sudoeste da Bahia, Jequié, 2021.
- [7] N. Castell *et al.*, "Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?," *Environ. Int.*, vol. 99, pp. 293–302, 2017.
- [8] CALIFA URQUIZA, M. A.; CONTRERAS CONTRERAS, G.; CARRILLO AMADO, Y. R. MQSensorsLib: Arduino Library. Versão 1.0.3. Zenodo, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3384301>. Acesso em: 23 set. 2025.
- [9] BRASIL, Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre os padrões de qualidade do ar. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2018.
- [10] A. H. Pataki e M. M. de Oliveira, "ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR," *Caderno Progressus*, vol. 1, no. 1, pp. 6–20, 2021.