

Arquitetura de Monitoramento de Qualidade de Ar baseada no LoraWAN e FIWARE em um Campus Universitário

Nandson Cunha¹, Alife Moraes¹, Noedson Silva², Manoel Malon²,
Warley Junior¹, Elton Alves², Leslye Eras², João Victor², Aline Oliveira¹

¹Faculdade de Sistemas de Informação
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, PA - Brasil

²Faculdade de Engenharia da Computação
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, PA - Brasil

{nandsoncunha, alife.silva, erroso, malloncosta, wmvj}@unifesspa.edu.br

Abstract. *Air pollution harms human health and damages natural ecosystems, contributing to respiratory and cardiovascular diseases, as well as being a significant cause of climate change. In environments with high human traffic, such as university campuses, an architectural solution utilizing low-cost Internet of Things (IoT) devices can be helpful in identifying and classifying pollutants. This work presents an architecture for monitoring air pollutants and managing IoT devices and communication gateways. The FIWARE middleware was integrated into the proposed architecture through the development of an integration proxy to handle data processing and persistent storage. Furthermore, proof-of-concept tests were conducted, and the results are promising, indicating that the solution can capture a large volume of data even in closed environments.*

Resumo. *A poluição do ar prejudica a saúde humana e danifica os ecossistemas naturais, contribuindo para doenças respiratórias e cardiovasculares, além de ser uma causa importante das mudanças climáticas. Em ambientes com grande fluxo de pessoas, como os campus universitários, uma solução arquitetural que faz uso de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) de baixo custo, pode ser útil na identificação e classificação de poluentes. Neste trabalho, é apresentada uma arquitetura para monitoramento de poluentes atmosféricos e gerenciamento de dispositivos de IoT e gateways de comunicação. O middleware FIWARE foi integrado à arquitetura proposta por meio do desenvolvimento de um proxy de integração para lidar com o tratamento dos dados coletados e armazenamento persistente. Ademais, testes foram realizados como prova de conceito, e os resultados são promissores indicando que a solução consegue captar grande volume de dados mesmo em ambientes fechados.*

1. Introdução

O conceito de *Smart Campus* é originado na *Smart City*, podendo ser interpretado como uma cidade em menor escala, enfrentando diversos problemas e desafios que uma cidade enfrenta diariamente, porém, normalmente em escala menor [Meraz et al. 2020]. Questões como segurança, transporte, qualidade de vida, uso consciente de energia e de recursos naturais são abordados dentro do *Smart Campus*. Desta forma, estas soluções são projetadas com o objetivo de fornecer serviços automatizados e inteligentes para a

comunidade através do uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) e de Internet das Coisas [Cavus et al. 2022].

No contexto da qualidade de vida e do meio ambiente, a qualidade do ar refere-se à condição do ar na atmosfera e é um fator importante do ambiente urbano, com possível impacto na saúde pública e ao meio ambiente, especialmente onde as pessoas utilizam ativamente o espaço público para eventos do dia a dia, mobilidade, lazer e recreação. Estima-se que no Brasil a degradação da qualidade do ar atmosférico possa causar aproximadamente 20 mil óbitos/ano, valor cinco vezes maior ao de morte causado pelo tabagismo ambiental/passivo, e 10,7 mil mortes/ano resultante da poluição do ar em ambientes internos. Gases tais como Dióxido de Carbono (CO₂) e Metano provenientes de fatores antropogênicos, ou fatores determinantes, são extremamente prejudiciais a saúde humana e influenciam diretamente as alterações na temperatura mundial [Marques Torres et al. 2020].

Em resposta aos problemas mencionados anteriormente, este trabalho apresenta uma arquitetura de monitoramento da qualidade do ar que mostra a quantidade de substâncias nocivas presentes no ar e sua medição, indicando o quão limpo ou prejudicial é para o ser humano e para o meio ambiente. A solução proposta é composta por dispositivos de IoT (*Internet of Things*) de baixo custo para sensoriamento de poluentes do ar, protocolo LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) de longo alcance de cobertura e baixo consumo de energia, para a comunicação entre os dispositivos e infraestrutura do gateway e plataforma de middleware FIWARE [Cirillo et al. 2019], para gerenciamento da troca de mensagens entre os dispositivos de IoT e a infraestrutura de nuvem.

As principais contribuições deste artigo são as seguintes:

- Protótipo composto por microcontrolador ESP32 com antena Lora, e sensores dos principais poluentes atmosféricos;
- Arquitetura que integra sensores de baixo custo, tecnologia de alto alcance, e plataforma de gerenciamento de recursos;
- Proxy de integração que permite o tratamento dos dados advindos do gateway para serem processados pelo middleware FIWARE;
- Banco de dados histórico com dados relacionados a qualidade do ar em ambiente interno e externo no campus universitário.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: Os trabalhos relacionados são discutidos na seção 2. Na seção 3 é apresentado a nossa arquitetura proposta. A seção 4 apresenta nossa prova de conceitos. Finalmente, a seção 5 conclui o artigo e aponta direções futuras que podem ser consideradas.

2. Trabalhos Relacionados

Esta seção tem como objetivo apresentar os trabalhos relacionados à proposta. Tais trabalhos serviram de contribuição para identificar os problemas e os requisitos mais genéricos. Estes trabalhos enfatizam as principais características que se mostram relevantes para monitoramento da qualidade do ar através de dispositivos de IoT.

Em [Naik et al. 2023] é proposto um sistema de monitoramento de poluentes atmosféricos em indústrias, beiras de estradas e cruzamentos, com o objetivo de identificar níveis de qualidade do ar e estabelecer planos de ação em casos de alto níveis de

contaminação quando detectados. O sistema utiliza múltiplos sensores que podem captar diferentes tipos de poluentes e gases, cujo os dados são visualizados através de um aplicativo móvel e também em dashboard web.

A pesquisa do autor [Kortoçi et al. 2022] apresenta o monitoramento da exposição à poluição do ar em ambiente externo e interno usando sensores portáteis de baixo custo. Os pesquisadores mostraram que esses dispositivos fornecem informações detalhadas para identificar possíveis fontes de poluição, que permite a criação de planos de ação direcionados. Os pesquisadores também reconhecem limitações e desafios associados ao uso desses sensores com problemas nos conectores e usabilidade, enfatizando a necessidade de interpretação cuidadosa dos dados obtidos.

O trabalho de [Jabbar et al. 2022] propõe o AQMS (*Air Quality Monitoring System*) que se baseia em dispositivos de IoT de baixo custo com tecnologia de comunicação LoRaWAN para coletar diversos parâmetros da qualidade do ar. Estes dados são armazenados em infraestrutura de nuvem e que podem ser acessados publicamente através de aplicativo móvel ou web.

Por fim, nas propostas de [Irawan et al. 2021] e [Mashuri 2021], os autores desenvolveram sistemas de monitoramento da qualidade do ar através de tecnologias de IoT, tais como Arduíno, Raspberry Pi e ESP32. Dados de temperatura, umidade, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) são processados e enviados em tempo real através de conexão Wi-Fi para servidores web visando o acompanhamento por parte dos usuários interessados.

2.1. Análise Comparativa

Todos os trabalhos anteriormente mencionados foram analisados e comparados com a arquitetura proposta. O resultado é apresentado na Tabela 1 a seguir, levando em consideração as seguintes características:

- Parâmetros de qualidade do ar (C1): refere-se aos poluentes atmosféricos monitorados, bem como dados de temperatura e umidade.
- Tecnologia de sensores e de comunicação (C2): refere-se quais tecnologias de IoT foram utilizados, tal como microcontroladores, sensores e interfaces de comunicação de curta e longa distância.
- Validação da proposta em ambiente interno e externo (C3): define se a solução fez avaliação de monitoramento da qualidade do ar em ambiente interno e externo.
- Plataforma de middleware (C4): define se a solução faz uso de middleware para orquestração, interoperabilidade, integração ou transparência no tratamento dos dados.

Como podemos observar na Tabela 1, de acordo com a característica C1, fica evidente que a arquitetura proposta concentra maior quantidade de poluentes atmosféricos o que influencia na precisão do cálculo do Índice da Qualidade do Ar (IQA_r) e diversidade de informações a depender do contexto de aplicação. Na característica C2, as propostas de [Naik et al. 2023], [Irawan et al. 2021] e [Mashuri 2021] limitaram-se por adotarem tecnologia de comunicação WiFi o que conseqüentemente abrange uma faixa de cobertura menor e maior consumo energético no envio dos dados dos sensores para um

servidor web. Similar a esta proposta, o trabalho de [Jabbar et al. 2022] adotou a tecnologia LoRaWAN, que possibilita a comunicação a longas distâncias com baixo consumo de energia e capacidade para atingir áreas remotas e de difícil acesso.

Tabela 1. Tabela comparativa dos trabalhos relacionados com a proposta.

Solução	C1	C2	C3	C4
[Naik et al. 2023]	CO ₂ , SO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , CO, C ₃ H ₈ e Gas	ESP32 e WiFi	✗	✗
[Kortoçi et al. 2022]	Temperatura Umidade CO, NO ₂ e O ₃	BMD-340 e Bluetooth	✓	✗
[Jabbar et al. 2022]	Temperatura Umidade NO ₂ , SO ₂ , CO ₂ , CO e PM _{2.5}	Arduino LoRa shield LoRaWAN	✗	✗
[Irawan et al. 2021]	Temperatura Umidade CO, CO ₂ e Álcool	Arduíno Raspberry Pi WiFi	✗	✗
[Mashuri 2021]	Temperatura Umidade CO, CO ₂ , LPG CH ₄ e Butano	Arduíno ESP32 WiFi	✗	✗
Este Trabalho	Temperatura Umidade CO, CO ₂ , CH ₄ C ₃ H ₈ , O ₃ , NH ₃ C ₆ H ₆ , Fumaça, Acetona Álcool	ESP32 LoraWAN	✓	✓

Por fim, de acordo com as características C3 e C4, podemos destacar a arquitetura desta proposta como a única que é validada tanto em ambientes fechados/abertos e ao mesmo tempo faz uso de plataforma de middleware para coletar, processar e gerenciar dados em tempo real dos sensores e gateways.

3. Solução de Monitoramento

3.1. Arquitetura Proposta

De acordo com a Figura 1, a arquitetura esta dividida em três camadas: sensores, gateways e plataforma de nuvem.

Na primeira camada física composta por microcontrolador e sensores de poluentes atmosféricos, é constituída por uma placa Lora ESP32 com suporte a LoRaWAN, para comunicação de longo alcance e baixo consumo energético. A esta placa, estão acoplados quatro sensores que coletam diferentes poluentes atmosféricos, temperatura e umidade: MQ9, MQ131, MQ135 e DHT11.

Na segunda camada física, reside o gateway Dragino DLOS8N controlado pelo ChirpStack que é uma ferramenta de código aberto em que se pode construir e gerenciar redes baseadas em tecnologias LoRaWAN de forma simplificada. O ChirpStack trabalha junto com o Gateway para conexão com o ESP32. Essa conexão ocorre com o *ChirpStack Gateway Bridge* que é responsável por integrar o gateway LoRaWAN ao ChirpStack. Nele é possível criar e gerenciar os perfis dos microcontroladores permitindo a configuração personalizada e segura dos dispositivos, com uma interface web amigável, através de chaves que ele gera a conexão com o dispositivo. O *MQTT Broker* atua como uma ponte entre o *Chirpstack Gateway Bridge* e o *Chirpstack Gateway*. Essa ponte facilita a troca fluida de mensagens e dados entre o gateway LoRaWAN e o servidor ChirpStack.

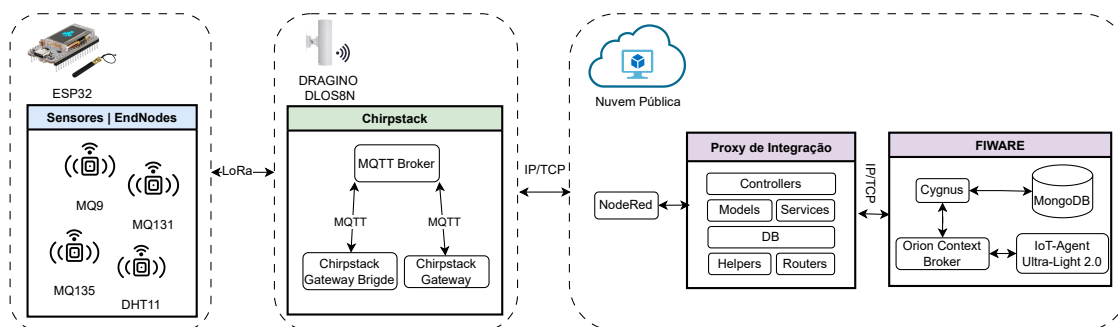


Figura 1. Arquitetura proposta.

Na terceira camada de software consta o módulo de *proxy de integração*, desenvolvido pelos autores, que atua como um intermediário entre o NodeRed e FIWARE. Este módulo é composto pelos seguintes componentes: (1) *controllers*, para controlar os dispositivos IoT para criar e exibir salas, sensores, agentes e enviar os dados dos sensores para o banco e FIWARE; (2) *models*, define a estrutura dos dados da aplicação e relacionamento, sensores e salas; (3) *services*, trata das requisições feitas para o FIWARE, para a criação e gerenciamento das salas e dispositivos; (4) *DB*, usado para estabelecer conexão com o banco de dados IBM Cloud através da biblioteca Cloudant; (5) *helpers*, possui funções utilitárias que são frequentemente usados em partes do código, por exemplo, calcular IQAr, decodificar os dados dos sensores de base64 para *string*, capturar a data e hora que foram enviados; e (6) *routers*, para definição das rotas para as solicitações dos microcontroladores via HTTP.

O módulo correspondente ao FIWARE é basicamente composto pelo: (1) *Orion Context Broker*, um componente central do FIWARE, por gerenciar os contextos e entidades em tempo real. Ele que cria as entidades dos dispositivos e salas, bem como permite que aplicativos enviem, atualizem, consultem e assinem informações contextuais; (2) *IoT-Agent Ultra-Light 2.0*, é o protocolo de comunicação do Orion com Cygnus e o MongoDB; (3) *Cygnus*, é o agente de persistência do *Orion Context Broker*, este recebe as atualizações de contexto do Orion e transfere os dados para o banco de dados como o

MongoDB; e (4) *MongoDB*, é onde ficam as informações dos locais onde os dispositivos ficam alocados e as informações e contextos dos dispositivos, além dos próprios dados enviados pelos sensores.

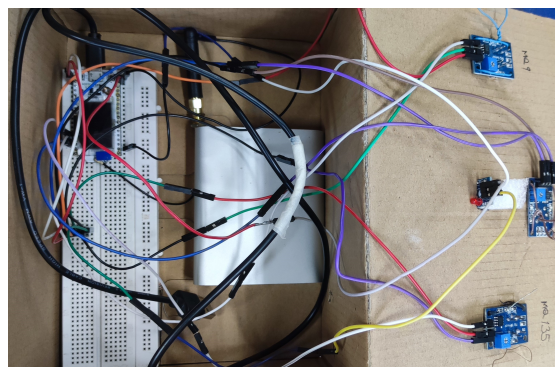
3.2. Dispositivos de IoT

No desenvolvimento do protótipo, utilizamos sensores para a coleta de dados dos poluentes para a classificação da qualidade do ar e as condições ambientais. Os sensores MQ9, MQ131, MQ135 permitiram a coleta dos gases poluentes e o DHT11 foi usado para obter informações mais detalhadas das variáveis do ambiente, tal como temperatura e umidade. A Figura 2c) ilustra cada sensor físico listado a seguir:

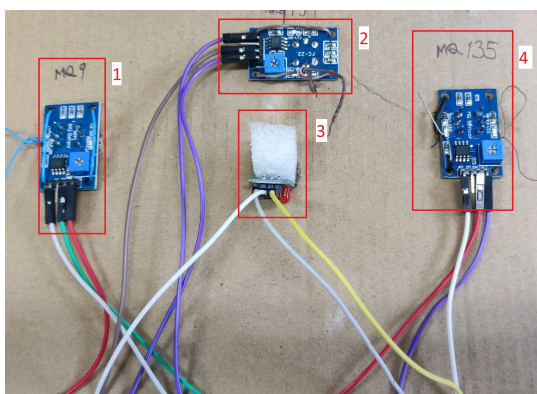
- Sensor MQ9 (número 1 na figura) é empregado para detectar concentrações de Monóxido de Carbono (CO), Gás Metano (CH₄) e Propano (C₃H₈);
- Sensor MQ131 (número 2 na figura) monitora e detecta a presença do componente atmosférico Ozônio (O₃);
- Sensor MQ135 (número 4 na figura) utilizado para monitorar a presença de CO, Amônia (NH₃), Benzeno (C₆H₆), Fumaça (FMC), Acetona e Álcool;
- Sensor DHT11 (número 3 na figura) é empregado para medir a temperatura e umidade.



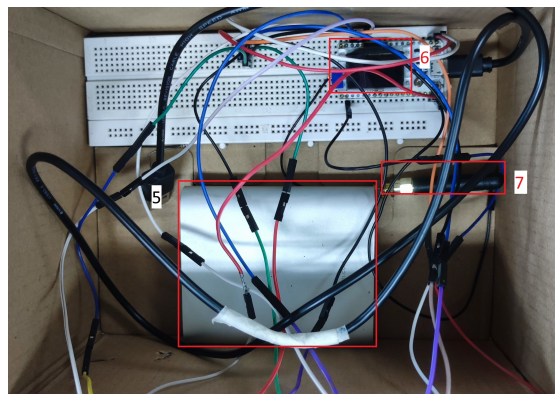
(a) Gateway Dragino DLOS8N



(b) Protótipo Completo



(c) Sensores de Poluidores Atmosféricos



(d) Microcontrolador e Bateria

Figura 2. Gateway com LoraWan e Protótipo com ESP32 e Sensores.

Além dos sensores, de acordo com a Figura 2d, o protótipo é composto pelo microcontrolador ESP32 (número 6 na figura), Powerbank de 10500 mAh (número 5 na figura) e antena Lora (número 7 na figura). O ESP32 é uma placa de desenvolvimento que integra os sensores por meio de bibliotecas, e permite a comunicação com o gateway via LoRaWAN, possibilitando a transmissão eficiente de dados em baixa frequência. A Figura 2b exibe o protótipo completo para melhor entendimento.

Por fim, na Figura 2a é apresentado uma visão geral do gateway Dragino DLOS8N que é totalmente compatível com o protocolo LoRaWAN e vem com uma antena externa que ajuda a melhorar a cobertura e o alcance da rede LoRa. Já a LoRaWAN é uma rede com modulação própria de sinal e protocolo aberto patrocinado pela *LoRa Alliance* com o objetivo de implementar o funcionamento da rede LoRa [Jouhari et al. 2023].

4. Prova de Conceitos

O local definido para avaliação da proposta é uma unidade universitária onde reside o Instituto de Geociências e Engenharias (IGE). Esta unidade é composta por diversos laboratórios dos cursos de engenharias. Assim, foram selecionados cinco locais para medição: (1) *Galpão de laboratórios* (nomeado como *galpão*), é uma área ampla que acomoda salas de professores, técnicos e diversos laboratórios para cada curso; (2) corredor do prédio do bloco 1 (nomeado como *corredor 1*) é uma área aberta que permite a circulação de alunos que entram e saem das salas de aula. (3) corredor do prédio do bloco 2 (nomeado como *corredor 2*) é também uma área aberta similar ao corredor 1; (4) *Laboratório de engenharia química* (nomeado como *laboratório 1*) é um espaço fechado de pouca metragem e está dentro do galpão; e (5) *Laboratório de hidro e eletrometalurgia* (nomeado como *laboratório 2*) é também um espaço fechado de pouca metragem e está dentro do prédio do bloco 2.

O período da coleta foram 2 (dois) dias em cada local, totalizando 10 (dez) dias de medições. O horário do monitoramento foi das 9h às 17h, durante o qual foram coletados dados de todos os 4 (quatro) sensores. A Tabela 2, faz um resumo do cenário de avaliação e equipamentos físicos utilizados.

Tabela 2. Configuração do ambiente das medições

Ambiente	Interno	Laboratorio 1, Laboratório 2 e Galpão
	Externo	Corredor 1 e Corredor 2
Poluentes	CO, CO ₂ , O ₃ , CH ₄ , Acetona e IQAr	
Frequência de envio	a cada 2 minutos	
Duração	8 horas	
Nuvem Pública	VM com Debian 20.04, 4GB RAM, 500GB disco	
Microcontrolador	ESP32-D0WDQ6, 4MB Flash, LoRa 863 a 928 MHz	
Gateway	400Mhz ar9331, 64 MB RAM, 16MB Flash, LoRaWAN Wireless	

4.1. Análise dos Resultados

Conforme ilustrado na Figura 3a para o poluente de monóxido de carbono (CO), é possível observar que o maior nível captado foi no segundo dia de teste no Galpão com valores próximos a 25 ppm, que foi obtido como *outlier*. A maior variação foi no Laboratório 2

(no gráfico, rotulado como Lab 2) no primeiro dia de teste, com os valores ficando entre 1 e 23 ppm. No caso da Figura 3b, podemos notar que o sensor MQ135 foi essencial para registrar as variações nos níveis de dióxido de carbono (CO₂), possibilitando uma compreensão mais detalhada do ambiente. Assim, o local com maior concentração durante o monitoramento da qualidade do ar foi no Laboratório 2, onde o nível de CO₂ chega a 200 ppm. Outros locais com valores expressivos são o Laboratório 1 e o Galpão, sendo que os valores no galpão são *outliers*, com o nível chegando a 220 ppm.

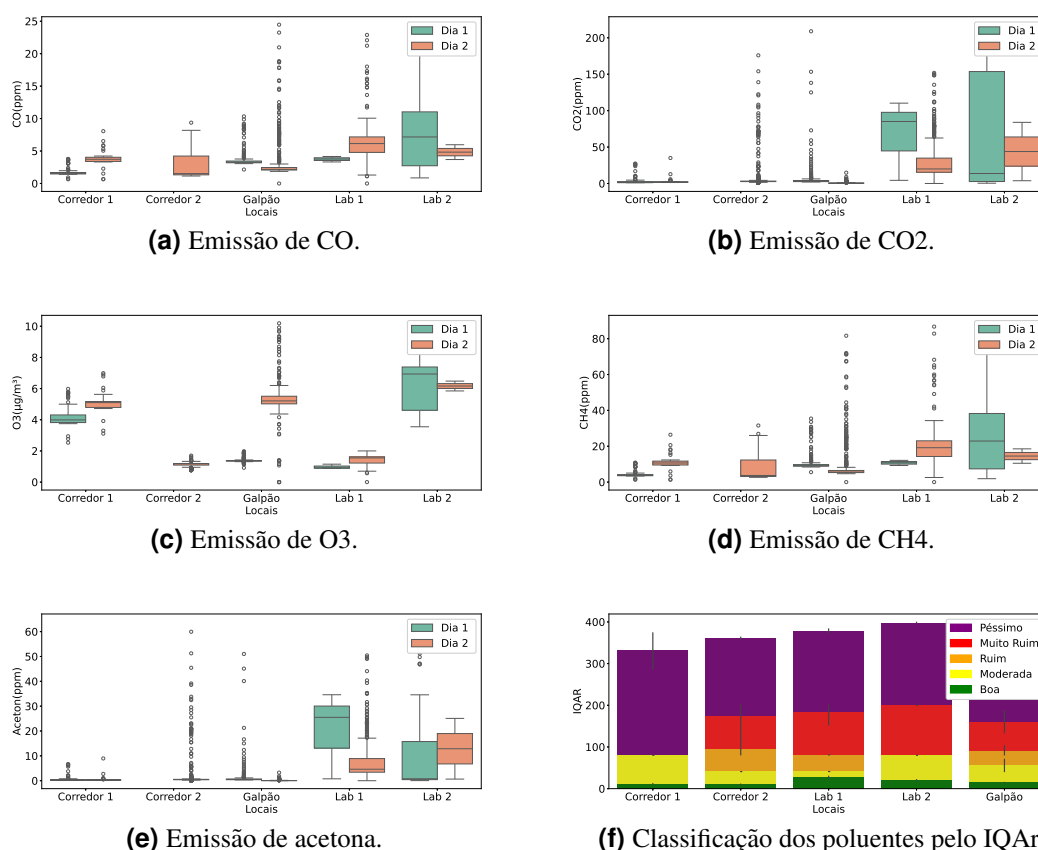


Figura 3. Resultados dos Poluentes Atmosféricos no Campus Universitário

Para o ozônio (O₃), cujo os resultados são apresentados na Figura 3c, as emissões não foram altas. Os níveis maiores foram registrados no Galpão no segundo dia chegando, a 10 µg/m³, o que mostra não ser um número expressivo. Pode notar-se que há uma alta variabilidade no Laboratório 2, onde os níveis ficam entre 3 e 9 µg/m³. As menores variabilidades foram registradas no primeiro dia no Galpão, no segundo dia no Corredor 2 e no Laboratório 1 (no gráfico, rotulado como Lab 1), com níveis bem perto de 2 µg/m³. O sensor MQ131 foi responsável pelo monitoramento do O₃, evidenciando uma baixa dispersão no Laboratório 1 no primeiro dia e no Corredor 1 no segundo dia. Essa observação sugere a inatividade desses locais durante os períodos de monitoramento, resultando em uma menor produção ou exposição ao gás O₃.

Considerando a Figura 3d que apresenta os resultados para o gás metano (CH₄), podemos ver que no segundo dia houve maior variabilidade no Laboratório 1 e primeiro

dia no Laboratório 2, chegando a mais de 80 ppm nos dois dias testados. No Corredor 2 e no Galpão apresentam menor dispersão, logo as caixas do gráfico são mais baixas e menores, e a maior densidade dos valores ficando abaixo de 20 ppm. Os *outliers* no Galpão (os pontos acima das linhas), podem indicar erros de medição ou valores atípicos que merecem atenção especial. Ao analisarmos os dados representados na Figura 3e, é possível perceber que os níveis de Acetona variam consideravelmente entre os diferentes locais. O nível alcançou 60 ppm no segundo dia de teste no Corredor 2 que é uma área aberta. Podemos ver também principalmente nos laboratórios onde teve a maior variabilidade de concentração ficando entre 1 e 30 ppm, onde os níveis aumentam ligeiramente, devido aos experimentos feitos nos laboratórios.

Por fim, na Figura 3f é ilustrado o volume de emissões correspondentes ao IQAr e possíveis efeitos à saúde em que para o cálculo foram considerados os poluentes de O₃ e CO [Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima 2024]. Podemos observar que a qualidade do ar é classificada como péssima em praticamente todos os locais monitorados (IQAr acima de 200), com alguns dias com qualidade moderada (IQAr entre 41 e 80). Os maiores índices foram registrados nos Laboratórios, mas em todos os locais tiveram muitos índices péssimos acima de 300.

Com base na análise dos resultados das medições apresentadas, é possível notar que a qualidade do ar varia significativamente entre os diferentes locais monitorados. Alguns dados apresentando níveis mais altos de concentração e eminente risco a saúde humana e ao meio ambiente. É possível observar que os maiores níveis foram obtidos nos laboratórios (espaço pequeno e fechado), em que essas variações têm o potencial de afetar negativamente a saúde dos alunos e professores que utilizam esses ambientes, com consequências negativas que podem desde problemas respiratórios, irritações nos olhos e agravamento de doenças cardiovasculares em pessoas sensíveis. Não menos importante, os resultados do IQAr revelam o quão péssimo é a qualidade do ar neste ambiente que pode afetar plantas, animais e microrganismos, alterando seus habitats naturais e reduzindo a diversidade biológica. Portanto, é crucial implementar medidas eficazes para controlar e mitigar a poluição do ar nestes ambientes.

5. Conclusão e Direções Futuras

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de monitoramento de qualidade do ar em tempo real em diferentes ambientes internos e externos dentro de um campus universitário. Isso visa apontar e classificar os níveis de poluentes no ar de forma eficiente, utilizando dispositivos IoT de baixo custo. A solução proposta emprega o protocolo LoRaWAN para comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, garantindo maior eficiência no processo. Além disso, a utilização de tecnologias de armazenamento e análise em nuvem, que permite o processamento eficaz dos dados coletados, contribui para uma gestão mais precisa e rápida da qualidade do ar no ambiente do campus universitário. O resultado alcançado foi a criação de um proxy de integração que envolve a plataforma FIWARE, gerenciado pelo *Orion Context Broker*, permitindo a visualização e análise dos dados de qualidade do ar em tempo real, enquanto os dados classificados do IQAr são enviados para o banco de dados no IBM Cloud por meio do serviço *Cloudant*, assim é possível notar que a solução é viável em termos de implementação.

Para trabalhos futuros, é importante priorizar a calibração adequada dos senso-

res. Sugere-se também explorar a integração com algoritmos de inteligência artificial e aprendizagem de máquina para identificar padrões e classificação dos dados obtidos pelos sensores, já que um dos resultados deste projeto foi a construção de um banco de dados consistente, e com um modelo adequado fazer previsões de possíveis cenários para avaliação detalhada da qualidade do ar e tomada de decisões estratégicas.

Referências

- [Cavus et al. 2022] Cavus, N., Mrwebi, S. E., Ibrahim, I., Modupeola, T., and Reeves, A. Y. (2022). Internet of Things and Its Applications to Smart Campus: A Systematic Literature Review. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 16(23):17–35.
- [Cirillo et al. 2019] Cirillo, F., Solmaz, G., Berz, E. L., Bauer, M., Cheng, B., and Kovacs, E. (2019). A Standard-Based Open Source IoT Platform: FIWARE. *IEEE Internet of Things Magazine*, 2(3):12–18.
- [Irawan et al. 2021] Irawan, Y., Wahyuni, R., Muhardi, M., Fonda, H., Hamzah, M. L., and Muzawi, R. (2021). Real Time System Monitoring and Analysis-Based Internet of Things (IoT) Technology in Measuring Outdoor Air Quality. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 15(10):224–240.
- [Jabbar et al. 2022] Jabbar, W. A., Subramaniam, T., Ong, A. E., Shu’ib, M. I., Wu, W., and de Oliveira, M. A. (2022). LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring. *Internet of Things (Netherlands)*, 19.
- [Jouhari et al. 2023] Jouhari, M., Saeed, N., Alouini, M.-S., and Amhoud, E. M. (2023). A Survey on Scalable LoRaWAN for Massive IoT: Recent Advances, Potentials, and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(3):1841–1876.
- [Kortoçi et al. 2022] Kortoçi, P., Motlagh, N. H., Zaidan, M. A., Fung, P. L., Varjonen, S., Rebeiro-Hargrave, A., Niemi, J. V., Nurmi, P., Hussein, T., Petäjä, T., Kulmala, M., and Tarkoma, S. (2022). Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors. *Smart Health*, 23.
- [Marques Torres et al. 2020] Marques Torres, L., Di Paula da Silva Pinheiro, C., Dias Azevedo, S., Rick Soares Rodrigues, P., and Prissila Reis Sandim, D. (2020). Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente. *Naturae*, 2(1):23–33.
- [Mashuri 2021] Mashuri, A. A. (2021). Air Quality Monitoring and Decision Support System Using IoT. *JAICT*, 6(1):33.
- [Meraz et al. 2020] Meraz, M. S., Gutierrez, M. G. J., and Juarez, I. M. (2020). Air Quality Monitoring in a Smart Campus. In *2020 IEEE International Smart Cities Conference, ISC2 2020*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- [Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima 2024] Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2024). Qualidade do ar.
- [Naik et al. 2023] Naik, U. U., Salgaokar, S. R., and Jambhale, S. (2023). Iot Based Air Pollution Monitoring System. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*, 9:2395–566.