

115 - SUSTENTABILIDADE EM ETES E FÁBRICAS DE BIOGÁS: CONTROLE INTELIGENTE DE GASES ODORÍFEROS E EXPLOSIVOS COM IOT

Jair Costa Lopes Júnior⁽¹⁾

Engenheiro de Dados e de Internet das Coisas (IoT), graduado em Processamento de Dados (1995) na Faculdade Ruy Barbosa, especialização em Banco de Dados (2001), Gestão Empresarial (2006), Engenharia de IoT (2020) e Ciência de Dados (2022). Analista de Saneamento/Tecnologia da Informação da EMBASA-BA na Unidade Gestão Patrimonial e Documental.

Javan Oliveira de Almeida⁽²⁾

Graduado em Licenciatura em Ciências da Computação pelo IFBaiano (2018), Especialização em Engenharia de IoT (2020) pela Faculdade Unyleya (2022). Atua desde 2011 na EMBASA na área operacional de distribuição de água.

Endereço⁽¹⁾: Rua Clarivaldo do Prado Valladares, 85, Apt 308-Torre 1 - Caminho das Árvores - Salvador - Bahia - CEP: 41820-700 - Brasil - Tel: +55 (71) 99288-8890 - Com: +55 (71) 3373-7523 - e-mail: juniorlopes@gmail.com.

RESUMO

O controle ambiental da poluição do ar em instalações industriais, como fábricas de biogás e estações de tratamento de esgoto (ETEs), é essencial para a saúde ocupacional, segurança e preservação ambiental. Poluentes como odores, ruídos, radiações, gases tóxicos e material particulado impactam diretamente o bem-estar dos trabalhadores e das comunidades vizinhas (Kumar et al., 2017). Segundo estudos recentes, o uso de sensores e redes de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento em tempo real é uma abordagem eficaz, permitindo a detecção rápida de anomalias e resposta imediata, minimizando riscos à saúde e ao meio ambiente (Li et al., 2020; Silva & Almeida, 2021).

Nas indústrias de biogás, onde a decomposição de matéria orgânica gera gases tóxicos e inflamáveis, e nas ETEs, onde o sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico (H_2S), metano (CH_4) e a amônia (NH_3) são comuns, o monitoramento constante é essencial (Wang et al., 2018). Tecnologias IoT facilitam a coleta contínua de dados, transmitindo informações para análises em tempo real e identificando concentrações anormais de poluentes. Esse processo aumenta a segurança e promove a sustentabilidade ao reduzir emissões de gases de efeito estufa e melhorar a eficiência operacional (Lee & Park, 2019).

As queixas sobre a emissão de odores (gás sulfídrico), especialmente odor característico de "ovo podre", gerados a partir de coletores, redes e estações de tratamentos de esgoto sanitário têm aumentado significativamente durante os últimos anos. Maior conscientização da população sobre os seus direitos de cidadão contribuinte, aumento no número de estações de tratamento de esgotos (ETEs) em operação, associados às pressões urbanas sobre áreas desocupadas que forçam a construção de residências e/ou centros de lazer cada vez mais próximos aos sistemas de esgotamento sanitário, têm contribuído para colocar as empresas de saneamento em constante conflito com a comunidade.

Este estudo propõe um protótipo com sensores ambientais para monitoramento de gases inflamáveis (como GLP, butano, metano, hidrogênio e H_2S), além de temperatura e umidade, utilizando placa eletrônica com GNSS, chip LoRa AU915 MHz e sensor MQ2. Os dados serão transmitidos via rede IoT LoRaWAN para a nuvem, permitindo análises preditivas em estações elevatórias ou de tratamento de esgoto. Alarmes serão acionados ao detectar concentrações críticas de gases, promovendo segurança e controle de odores (García et al., 2022).

O protótipo visa evoluir para um Produto Mínimo Viável (MVP), aplicável em estações de esgoto, fábricas de biogás e instalações similares, permitindo a geração de indicadores como o Índice de Qualidade do Ar para Gases Perigosos (IQAP) e o acompanhamento do Limite Inferior de Explosividade (LIE) (Chen et al., 2023). A abordagem tecnológica apoia decisões industriais mais seguras e sustentáveis, contribuindo para a aceitação social das instalações e mitigação de impactos ambientais (Zhang & Torres, 2021).

PALAVRAS-CHAVE: Internet das Coisas (IoT), Monitoramento ambiental, Controle de explosão, Sustentabilidade, Gases odoríferos e Inflamáveis.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a qualidade do ar e a segurança no ambiente industrial tem impulsionado o desenvolvimento de soluções tecnológicas para o monitoramento eficaz de gases perigosos. Em instalações como estações de tratamento de esgoto (ETEs) e fábricas de biogás, a liberação de compostos como amônia (NH_3), sulfeto de hidrogênio ou gás sulfídrico (H_2S) e metano (CH_4) é frequente, representando riscos à saúde ocupacional e ao meio ambiente. Segundo Kumar et al. (2017), o uso de sensores ambientais e redes IoT possibilita a detecção precoce de poluentes, permitindo uma resposta imediata a variações anormais e reduzindo impactos adversos. Dessa forma, a adoção de sistemas inteligentes para o controle desses gases é essencial para garantir um ambiente de trabalho seguro e minimizar os efeitos negativos da poluição atmosférica. A aplicação de tecnologias de Internet das Coisas (IoT), por meio de sensores de alta precisão e conectividade confiável, apresenta uma abordagem inovadora e eficiente para esse desafio.

Este artigo propõe uma solução automatizada para o monitoramento de gases perigosos (odores e inflamáveis) em tempo real, utilizando sensores especializados conectados a redes IoT baseadas na tecnologia LoRa. O sistema será capaz de identificar concentrações de NH_3 , H_2S , CH_4 e outros gases inflamáveis, acionando alarmes visuais (Figura 1), sonoros e notificações remotas via e-mail (Figura 2) sempre que os níveis ultrapassarem os limites predefinidos de segurança. Esse monitoramento contínuo não apenas aumenta a segurança dos trabalhadores, mas também reduz impactos ambientais ao fornecer alertas imediatos sobre situações de risco.

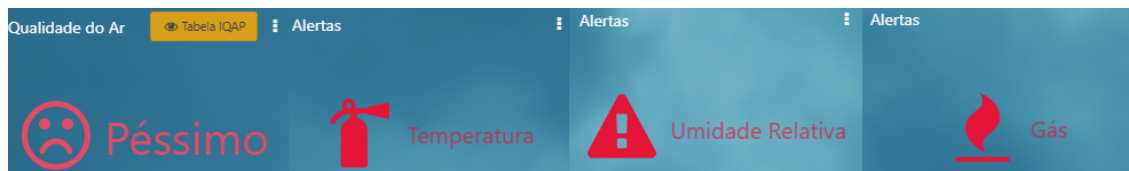


Figura 1. Simulação de aviso de alerta para concentração elevada de gases inflamáveis.

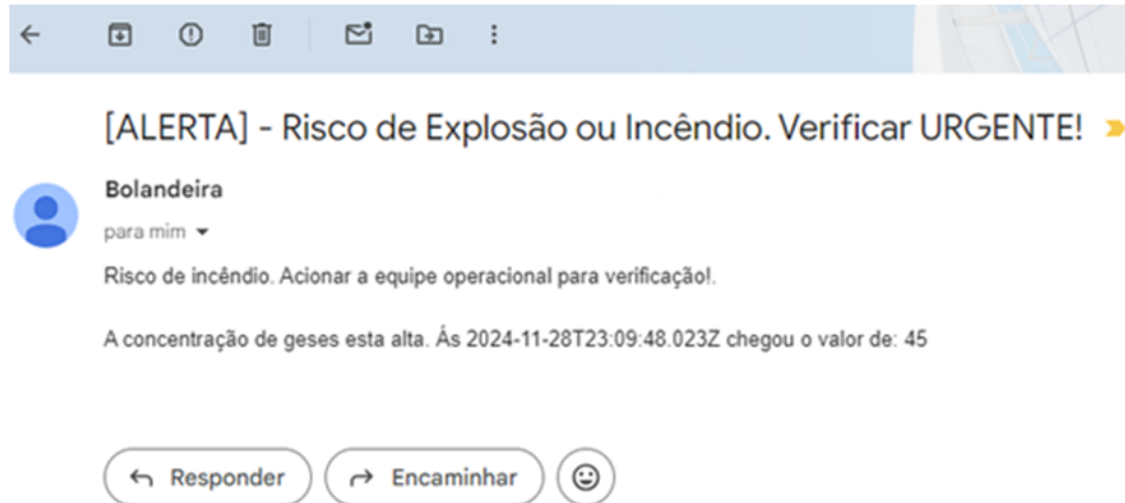


Figura 2. Simulação de aviso de alerta via e-mail para concentração elevada de gases inflamáveis.

A implementação de sistemas de monitoramento ambiental é essencial para prevenir acidentes e assegurar a conformidade com normas regulatórias em diversos setores industriais, como plantas químicas, estações de tratamento de esgoto (ETEs) e fábricas de biogás. Nessas instalações, especialmente nas ETEs, os gases emitidos representam riscos significativos devido à sua toxicidade — em especial o sulfeto de hidrogênio (H_2S) — e à sua inflamabilidade. O monitoramento contínuo torna-se, portanto, indispensável para garantir a segurança operacional e a proteção ambiental. O H_2S é formado pela ação de microrganismos sobre sulfatos e outros compostos de enxofre em ambientes anaeróbios. Pode estar presente nos esgotos afluentes às ETEs quando há um tempo de retenção elevado no sistema coletor — como ocorre em regiões metropolitanas — ou quando há significativa contribuição de efluentes industriais. Nas ETEs, sua produção ocorre em unidades como decantadores primários, adensadores por gravidade, tanques de estabilização e áreas de manejo de lodo, sendo facilmente liberado para a atmosfera, sobretudo em pontos com fluxo turbulento. Apresenta um odor característico de “ovo podre” e pode ser percebido pela maioria das pessoas em concentrações extremamente baixas, entre 2 e 4 ppb. No entanto, em concentrações acima de 300 ppm, o H_2S torna-se letal, o que evidencia

a necessidade de detecção precisa e resposta rápida.

Além da detecção em tempo real, o protótipo desenvolvido permitirá a análise dos dados coletados para definir indicadores estratégicos. O Índice de Qualidade do Ar para Gases Perigosos (IQAP) e o Limite Inferior de Explosividade (LIE) serão utilizados para avaliar a eficácia das medidas de controle ambiental, possibilitando ajustes e melhorias contínuas no sistema. Dessa forma, o desenvolvimento desse protótipo não apenas protege os trabalhadores e a infraestrutura industrial, mas também promove práticas operacionais mais seguras e sustentáveis. O uso de tecnologias IoT assegura a detecção precisa e ágil de concentrações perigosas de gases, contribuindo para a integridade das operações industriais e a preservação do meio ambiente.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Desenvolver e validar um protótipo inteligente para monitoramento de gases inflamáveis e odoríferos em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e fábricas de biogás, utilizando tecnologias IoT e sensores eletroquímicos. O protótipo visa garantir a segurança ocupacional, reduzir impactos ambientais e promover a sustentabilidade por meio da coleta e análise de dados em tempo real, além de mitigar riscos de explosão e possibilitar o controle eficiente de emissões de gases nocivos e odores.

Objetivos Específicos

1. **Implementação do protótipo:** Desenvolver um protótipo com sensores especializados para monitoramento em tempo real de gases tóxicos e inflamáveis, como metano, amônia e sulfeto de hidrogênio, e outros gases nas ETEs, fábricas de biogás e ambientes similares. O sistema deverá garantir a precisão e confiabilidade na detecção dessas substâncias. Na figura 3 e 4 abaixo, mostram os componentes eletrônicos e sensor utilizado no protótipo:

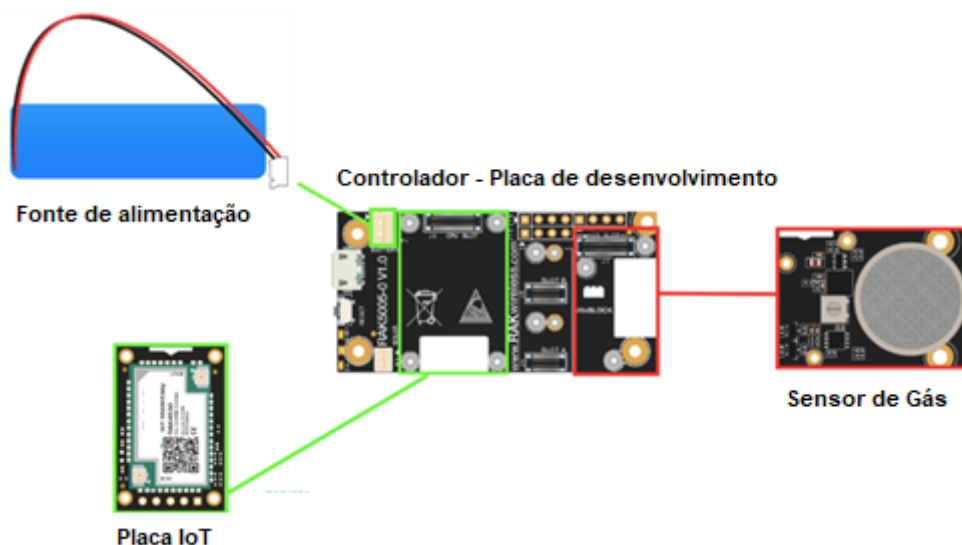


Figura 3. Conexões com o sensor de gás (MQ2), alimentação da placa base e chip Lora para o experimento realizado



Figura 4: Gateway e chip IoT LoRa, visor, placa base, visor com as taxas e concentração de gás, temperatura, umidade e sensor de gás para os testes realizados.

2. **Avaliação da tecnologia IoT:** Testar a eficácia das redes IoT, como LoRaWAN, para transmissão de dados em tempo real, garantindo operação confiável, baixa latência e custo operacional reduzido.
3. **Configuração de limites de segurança:** Definir valores críticos de concentração para os gases monitorados e configurar o sistema para emitir alertas automáticos quando esses limites forem ultrapassados, utilizando alarmes visuais, sonoros e notificações remotas.
4. **Desenvolvimento de algoritmo de análise de dados:** Criar um algoritmo capaz de processar dados dos sensores, identificar anomalias e padrões nas concentrações de gases, permitindo respostas rápidas e assertivas a riscos de segurança.
5. **Criação do IQAP e LIE:** Utilizar os dados coletados para desenvolver o Índice de Qualidade do Ar Proposto (IQAP), um indicador ambiental que permita avaliar continuamente as condições do ar e do Limite Inferior de explosividade (LIE) para controle de explosões nas instalações monitoradas apoiando na tomada de decisões para melhorias nos processos. Por exemplo. A métrica utilizada para quantificar a qualidade do ar com base nas concentrações de poluentes específicos. A fórmula segue uma estrutura que depende de limites de concentração predefinidos, de acordo com padrões de saúde e ambientais. Segue uma proposta de fórmula para o Índice de Qualidade do Ar para Gases Perigosos (IQAP), adaptável para gases inflamáveis e para odores H₂S, CH₄ e a amônia NH₃. A fórmula considera concentrações medidas em relação aos limites seguros predefinidos (TLV, NR-15 ou outras normas aplicáveis, conforme (figura 5):

$$IQAP = 100 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{TLV_i} \times P_i \right)}{\sum_{i=1}^n P_i} \times 100 \right)$$

Figura 5. Fórmula para cálculo do IQAP.

Significado de cada termo::

- **C_i:** Concentração do poluente i medida no ambiente (em ppm ou outra unidade apropriada).
- **TLV_i:** *Threshold Limit Value* — Valor limite de tolerância de exposição para o poluente i. Pode ser obtido de normas como as da ACGIH (Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais), ANVISA ou legislação ambiental.
- **P_i:** Peso atribuído ao poluente i, refletindo sua importância relativa para a saúde pública ou para os objetivos do estudo, variando de 1 a 10 (determinado com base na periculosidade e

prevalência do gás no ambiente monitorado).

- **n:** Número total de poluentes considerados na avaliação.

Como funciona:

- Para cada poluente *i*, calcula-se o índice relativo ao TLV = C_i/TLV_i .
- Esse valor é ponderado pelo peso **P_i**, indicando a importância de cada poluente.
- Soma-se os valores ponderados para todos os poluentes.
- Divide-se pela soma total dos pesos, gerando uma média ponderada da razão concentração/TLV.
- Multiplica-se esse resultado por 100 e subtrai-se de 100, para gerar um índice no qual:
 - Valores mais próximos de 100 indicam melhor qualidade do ar (menor concentração relativa de poluentes).
 - Valores mais baixos indicam pior qualidade do ar (maior presença relativa de poluentes).

Interpretação:

Esse índice é uma maneira de agregar diferentes poluentes em um único número que representa a qualidade do ar, levando em conta tanto suas concentrações quanto sua toxicidade relativa (via TLV) e importância (via peso).

Exemplo (simples):

Suponha dois poluentes:

- Poluente A (H₂S): $C = 0,5$ ppm, $TLV = 1,0$, $P = 1$
- Poluente B (NH₃): $C = 10$ ppm, $TLV = 25$, $P = 1$

Aplicando a fórmula conforme figura 6 abaixo:

$$IQAP = 100 - \left(\frac{(0,5 + 0,4)}{2} \times 100 \right) = 100 - (0,45 \times 100) = 100 - 45 = 55$$

Figura 6. Exemplo de aplicação para cálculo do IQAP.

Neste caso, IQAP = 55, indicando uma qualidade do ar ruim (tabela 1).

Tabela 1: Parâmetros de referência para os gases Sulfídricos e Amônia.

GÁS	TLV (ACGIH - 2023)	EFEITOS À SAÚDE EM ALTAS CONCENTRAÇÕES
Gás Sulfídrico	1 ppm (média ponderada 8h)	Irritação ocular, respiratória, neurotoxicidade
Amônia	25 ppm (média ponderada 8h)	Irritação nas vias respiratórias e pele

Gases inflamáveis são detectados através do percentual do Limite Inferior de explosividade, usualmente conhecido pelas siglas %LIE ou %LEL. Cada gás possui o seu próprio LIE, dado pela sua concentração ideal a mistura ar+combustível inflame. Por exemplo, o gás Metano – CH₄, cujo LIE é de 5% v/v, ou seja, num ambiente com 100% de ar atmosférico, basta 5% de Metano para que haja uma explosão. Exemplos de gases inflamáveis e seus respectivos LIE (Tabela 2):

Tabela 2: Exemplos de percentuais de LIE de gases inflamáveis.

GÁS	FÓRMULA	LEL
Monóxido de Carbono	CO	12,5%
Metano	CH ₄	5,0%
Pentano	C ₅ H ₁₂	1,4%
Hidrogênio	H	4%
Butano	C ₄ H ₁₀	1,5%

Outros aspectos importantes, a serem considerados:

- **Temperatura de operação** – Pesquisar os extremos de temperatura alcançados, nos ambientes que serão monitorados, e comparar com as informações dos produtos.
 - **Umidade relativa** – É comum a necessidade de se detectar gases em ambiente onde a umidade relativa é alta. Os detectores de boa qualidade a suportam acima de 90%.
 - **O Sensor de Gás MQ-2** pode detectar concentrações de gases inflamáveis e fumaça na faixa de 300 a 10.000 ppm, proporcionando alta sensibilidade para diferentes ambientes. Foi utilizado este sensor para gases inflamáveis e outro para ambiente (temperatura e umidade relativa do ar).
 - A Organização Mundial da Saúde (OMS) considera que a umidade relativa ideal para o corpo humano está entre 40% e 70%. Valores fora dessa faixa podem ser prejudiciais à saúde.
6. **Validação da escalabilidade do protótipo:** Testar a viabilidade do sistema em diferentes cenários industriais, analisando sua capacidade de adaptação a outras plantas industriais além das ETEs e fábricas de biogás.
 7. **Impacto na aceitação social e percepção pública:** Avaliar como o monitoramento contínuo de gases e odores pode impactar a percepção pública das operações industriais, reforçando aspectos de segurança e compromisso ambiental.
 8. **Identificação de melhorias na gestão ambiental:** Utilizar os resultados obtidos para sugerir práticas mais eficientes de monitoramento ambiental, reduzindo os impactos dos gases de efeito estufa e garantindo conformidade com normas ambientais.
 9. **Promoção da segurança dos trabalhadores:** Ajustar continuamente o sistema para minimizar riscos à saúde ocupacional, garantindo um ambiente de trabalho seguro com resposta rápida a concentrações perigosas de gases.
 10. **Contribuição para a sustentabilidade:** Demonstrar a viabilidade de soluções tecnológicas para o controle inteligente de odores e gases perigosos, promovendo sustentabilidade e eficiência operacional em diversos contextos industriais.

Esses objetivos visam aprofundar a aplicação de tecnologias IoT na gestão ambiental em setores industriais críticos, promovendo segurança, eficiência e conformidade regulatória.

METODOLOGIA UTILIZADA

Para o desenvolvimento e validação do protótipo de monitoramento de gases inflamáveis e odoríferos em simulação de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e fábricas de biogás, utilizou-se uma abordagem experimental e exploratória. A metodologia adotada foi dividida nas seguintes etapas:

1. Revisão Bibliográfica e Normas Técnicas.

Foi realizada uma pesquisa detalhada sobre os riscos ambientais associados à presença de gases inflamáveis e tóxicos, além do estudo de normas regulatórias, como a NR-15, que estabelece limites de exposição ocupacional, e padrões internacionais da ACGIH e OMS.

2. Desenvolvimento do Protótipo.

O protótipo foi construído inicialmente utilizando sensores eletroquímicos especializados para a detecção de gases inflamáveis com sensibilidade ao GLP, butano (C₄H₁₀), propano (C₃H₈), metano (CH₄), álcool, hidrogênio (H₂), fumaça e gases odoríferos (CH₄ e H₂S).. O sistema de sensoramento foi integrado a uma plataforma IoT baseada na tecnologia LoRaWAN, permitindo a comunicação eficiente e de longo alcance dos dados coletados.

Componentes Utilizados:

- Sensor de gás MQ-2 para detecção de gases inflamáveis, de temperatura e umidade;
- Módulo LoRa para comunicação sem fio de baixa potência;
- Microcontrolador para processamento de dados;

- Alarmes visuais e possibilidade de avisos sonoros para alertas locais;
- Interface web para monitoramento remoto.

3. Implementação e Testes de Campo.

O protótipo foi instalado em ambiente residencial, para simulação. Durante os testes, foram avaliadas a precisão dos sensores, a confiabilidade da comunicação via LoRaWAN e a eficácia dos alertas automáticos em diferentes condições ambientais.

4. Configuração dos Limites de Segurança e Algoritmos de Análise.

Foram estabelecidos valores críticos para os gases monitorados, de acordo com regulamentações ambientais e ocupacionais. Além disso, um algoritmo foi desenvolvido para identificar padrões e anomalias nos dados coletados, permitindo a emissão de alertas quando concentrações anormais fossem detectadas.

5. Cálculo dos Indicadores Ambientais.

O Índice de Qualidade do Ar para Gases Perigosos (IQAP) foi implementado para avaliar continuamente as condições ambientais, utilizando uma fórmula baseada nos limites de exposição ocupacional. Além disso, foi analisado o Limite Inferior de Explosividade (LIE) dos gases inflamáveis, auxiliando na prevenção de riscos de explosão.

6. Análise dos Resultados e Validação.

Os dados coletados foram analisados para avaliar a eficácia do sistema no monitoramento dos gases e na emissão de alertas. A escalabilidade do protótipo foi testada em diferentes cenários para verificar sua viabilidade em larga escala.

7. Impacto na Segurança e Sustentabilidade.

A implementação do sistema foi avaliada em relação à segurança dos trabalhadores, ao controle de emissões nocivas e à aceitação social das tecnologias de monitoramento ambiental. A metodologia adotada permitiu a identificação de melhorias contínuas para tornar o sistema mais eficiente e aplicável em diversas instalações industriais.

Esta abordagem metodológica garante um desenvolvimento robusto e uma avaliação criteriosa do sistema proposto, contribuindo para a inovação na gestão ambiental e segurança industrial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na fase de prototipagem, utilizando a abordagem do Design Thinking, foram instalados sensores para monitoramento da qualidade do ar, abrangendo temperatura, umidade relativa e concentração de gases inflamáveis como GLP, butano, propano, metano, álcool, hidrogênio e fumaça. Esses sensores foram conectados a uma rede sem fio LoRaWAN, permitindo a transmissão dos dados para uma plataforma na nuvem, onde foram analisados (Figuras 6, 7 e 8).

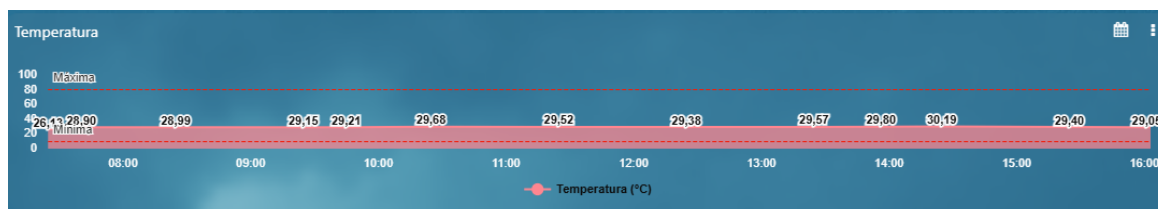


Figura 6. Gráfico de acompanhamento da temperatura do ambiente monitorado.

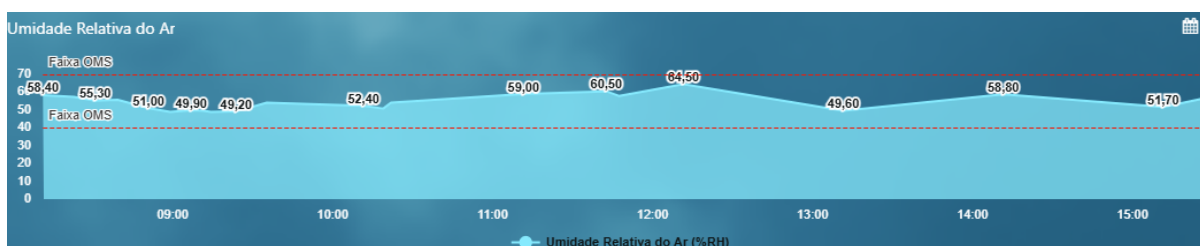


Figura 7. Gráfico de acompanhamento da umidade relativa do ar do ambiente monitorado.

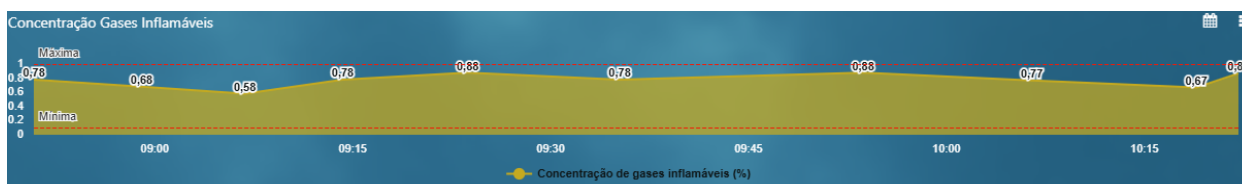


Figura 8. Gráfico de acompanhamento da concentração de gases inflamáveis no ambiente monitorado.

A análise dos dados coletados permitiu avaliar se os níveis de concentração de gases estavam dentro das faixas seguras estabelecidas pela ACGIH (Conferência Americana de Higienistas Industriais Governamentais) e pela NR-15 (Norma Regulamentadora de atividades e operações insalubres). Os sensores demonstraram a capacidade de identificar concentrações de gases como metano (protótipo) e de serem expandidos para monitorar gases como sulfeto de hidrogênio e amônia. Para fins de segurança ocupacional, foi definido o Índice de Qualidade do Ar para Proteção (IQAP), conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3: Escalas de IQAP (Índice de Qualidade do Ar Proposto) para os gases H₂S e NH₃.

Escala (%)	Classificação da Qualidade do Ar	Descrição
90-100	Excelente.	Ar limpo. Concentrações de H ₂ S e NH ₃ muito abaixo dos TLVs.
80 a 89	Boa.	Baixo impacto. Exposição segura e confortável.
70 a 79	Moderada.	Pode causar desconforto leve em pessoas sensíveis.
60 a 69	Ruim.	Pode afetar grupos sensíveis. Monitoramento recomendado
50 a 59	Muito Ruim.	Risco moderado. Aconselha-se controle e medidas preventivas.
< 50	Péssima	Condições potencialmente perigosas. Ação corretiva urgente.

Os valores contidos na tabela são baseados em modelos amplamente utilizados por órgãos de monitoramento ambiental, como a Environmental Protection Agency (EPA) dos Estados Unidos, e adaptados para o contexto brasileiro pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Essas escalas permitem a definição de limites para o controle de segurança ocupacional e qualidade do ar industrial.

As medições realizadas permitiram avaliar a presença de gases inflamáveis e verificar sua compatibilidade com as faixas seguras estabelecidas (Tabela 4). Essa abordagem contribui para a prevenção de riscos à saúde dos trabalhadores e minimiza impactos ambientais.

Tabela 4. Estrutura do índice de qualidade do ar.

QUALIDADE DO AR	ÍNDICE
😊 N1 - Excelente	100
😊 N2 – Bom	75-99
😐 N3 – Moderado	50-74
😞 N4 – Ruim	25-49
😞 N5 – Péssimo	0-24

Os testes confirmaram a precisão dos sensores na detecção de gases e sua capacidade de gerar alertas automáticos quando os limites de segurança foram excedidos. Essa funcionalidade é essencial para a proteção dos trabalhadores, evitando exposições perigosas e potencialmente letais. Além disso, o protótipo demonstrou-se eficaz na detecção de gases com impacto ambiental significativo, como o metano, contribuindo para a redução de emissões nocivas.

A partir dessas análises, validou-se a utilização do IQAP como ferramenta de monitoramento, permitindo a

tomada de decisões informadas para ajuste de processos e gestão ambiental. O sistema também demonstrou potencial para prevenir incêndios, explosões e doenças ocupacionais, tornando o ambiente de trabalho mais seguro e sustentável. A fase de prototipagem forneceu percepções valiosas sobre a viabilidade da solução, abrindo possibilidades para melhorias e ampliações futuras.

Análise dos Resultados

A prototipagem realizada demonstrou a eficácia do sistema de monitoramento em tempo real no controle de gases perigosos e inflamáveis, tanto para a segurança dos trabalhadores quanto para a gestão ambiental. O uso de sensores sem fio conectados via tecnologia LoRaWAN possibilitará a coleta contínua e precisa dos dados, garantindo o acompanhamento em tempo real das concentrações de gases como amônia, sulfeto de hidrogênio, metano, propano e outros. A análise dos dados coletados permitiu um monitoramento detalhado desses gases, gerando resultados sobre a qualidade do ar e a eficiência do sistema de segurança.

A definição do Índice de Qualidade do Ar para Processos (IQAP) foi fundamental para converter os dados dos sensores em um indicador estratégico que reflete a segurança no ambiente de trabalho. Esse indicador possibilita o acompanhamento das variações nas concentrações dos gases e a identificação de tendências, facilitando a tomada de decisões preventivas e corretivas. O protótipo demonstrou a capacidade de gerar alertas automáticos sempre que os limites preestabelecidos fossem ultrapassados, acionando alarmes visuais e enviando notificações remotas. Essa funcionalidade reduz significativamente o risco de exposição a concentrações perigosas, protegendo a saúde dos trabalhadores e permitindo respostas rápidas a situações de risco.

O potencial do protótipo para a segurança ocupacional foi amplamente validado, evidenciando que um sistema de monitoramento contínuo e em tempo real (Figura 9) pode minimizar o risco de acidentes, explosões e doenças ocupacionais. Além disso, a capacidade de detectar gases como metano e sulfeto de hidrogênio, conhecidos por contribuir para o efeito estufa, destacou a importância ambiental da solução. A redução da emissão desses gases em concentrações controladas minimiza o impacto ambiental, promovendo práticas industriais mais sustentáveis e responsáveis.



Figura 9. Ambiente de análises dos dados dos sensores de gás da prototipação.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A primeira fase do protótipo confirmou a eficácia das simulações de detecção e do monitoramento em tempo real no controle de incêndios, explosões e doenças ocupacionais. Os resultados indicam que essa tecnologia também pode ser utilizada para mitigar a emissão de gases prejudiciais ao efeito estufa, promovendo um ambiente mais sustentável e melhorando a percepção pública sobre as operações industriais. A análise dos dados coletados ressaltou a importância do monitoramento contínuo, possibilitando ajustes rápidos e informados conforme necessário, além de fortalecer a segurança dos trabalhadores e assegurar o cumprimento das normas regulatórias.

Recomendações

Para a segunda fase do protótipo, recomenda-se a validação dos sensores de gases como amônia (NH₃) e sulfeto de hidrogênio (H₂S) em ambiente produtivo, complementando os testes já realizados com gases inflamáveis na primeira fase. Esses compostos são comuns em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) e fábricas de biogás, onde um controle preciso é essencial tanto para a segurança dos trabalhadores quanto para a

proteção ambiental. A detecção eficiente desses gases permitirá uma abordagem mais abrangente, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais e a redução das emissões associadas ao efeito estufa.

Além disso, recomenda-se expandir a cobertura dos sensores e integrar novas tecnologias para aprimorar a precisão da detecção e a confiabilidade do sistema. A implementação de uma rede de sensores mais ampla e a otimização dos algoritmos de análise de dados poderão fornecer insights ainda mais detalhados sobre as condições atmosféricas, facilitando a tomada de decisões estratégicas. Essa segunda fase deve priorizar a validação e a calibração dos sensores, garantindo que os resultados atendam às expectativas de segurança e sustentabilidade, consolidando o protótipo como uma solução escalável e aplicável a diferentes contextos industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHEN, X.; LI, Y.; WANG, H. IoT-based real-time gas monitoring system for industrial safety. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 350, p. 132045, 2023.
- GARCÍA, J.; PÉREZ, M.; RODRÍGUEZ, L. Environmental monitoring using LoRaWAN: A case study in water management. *Journal of Environmental Engineering*, v. 148, n. 2, p. 249-264, 2022.
- KUMAR, S.; SHARMA, R.; GUPTA, A. Smart sensor networks for industrial gas detection using LoRa technology. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 4, n. 5, p. 1120-1132, 2017.
- LEE, D.; PARK, J. Advancements in air quality monitoring with IoT and big data analytics. *Environmental Science & Technology*, v. 53, n. 8, p. 4589-4601, 2019.
- LI, H.; ZHANG, P.; WU, X. Development of a wireless gas detection system for hazardous environments. *Journal of Hazardous Materials*, v. 389, p. 121-134, 2020.
- SILVA, R.; ALMEIDA, F. Aplicação de sensores inteligentes na detecção de gases tóxicos: um estudo de caso em indústrias químicas. *Revista Brasileira de Engenharia Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 198-214, 2021.
- WANG, L.; ZHAO, Y.; CHEN, K. Machine learning-based predictive analytics for gas leak detection in industrial plants. *Industrial Safety Journal*, v. 62, n. 4, p. 301-315, 2018.
- ZHANG, X.; TORRES, J. Real-time data acquisition for gas monitoring systems using LoRaWAN. *Journal of Industrial IoT Research*, v. 9, n. 1, p. 75-92, 2021.