

MONITORAMENTO AMBIENTAL: QUALIDADE DO AR EM ÁREAS URBANAS COM SENSORES QUÍMICOS

Murielle Ferreira da Silva
Leonardo Santos Andrade

Resumo: A poluição atmosférica, especialmente aquela decorrente de áreas urbanas, representa um sério risco à saúde humana. Os principais poluentes incluem materiais particulados, óxidos de nitrogênio, ozônio, inaláveis de menor tamanho (MP_{10} e $MP_{2,5}$), entre outros. O monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas é fundamental para identificar fontes de poluição, avaliar a eficácia de políticas de controle e proteger a saúde pública, pois eles são capazes de atingir diretamente o sistema respiratório, afetando significativamente seu funcionamento. Nesse sentido, o monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas torna-se fundamental para a identificação de possíveis agentes contaminantes. Assim, esse trabalho tem como objetivo descrever e discutir os principais resultados do desenvolvimento de um sistema de monitoramento de qualidade do ar em áreas urbanas utilizando sensores químicos para detectar gases e partículas no ar, que oferecem vantagens como a detecção em tempo real, baixo custo e fácil manutenção. O estudo traz dados precisos e confiáveis sobre a qualidade do ar em áreas urbanas, essenciais para diagnosticar o grau de poluição e subsidiar ações de monitoramento e políticas públicas de controle da poluição. A relevância ambiental desta pesquisa reside na importância de monitorar a qualidade do ar para proteger a saúde pública, e promover a utilização de sensores químicos como ferramenta eficaz para mitigar os impactos da poluição atmosférica.

Palavras-chave: Monitoramento ambiental; Qualidade do ar; Sensores químicos; Poluição atmosférica; Áreas urbanas.

INTRODUÇÃO

Aspectos Gerais

A poluição atmosférica é um problema ambiental grave que afeta a saúde humana e o meio ambiente em todo o mundo. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS, WHO, 2018), as áreas urbanas são particularmente vulneráveis à poluição do ar devido à concentração de atividades industriais, veículos e outras fontes de emissão de poluentes. Dessa forma, o monitoramento da qualidade do ar é fundamental para identificar os principais agentes contaminantes e desenvolver estratégias eficazes para mitigar os impactos da poluição. Segundo a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018), milhões de mortes prematuras estão associadas à exposição prolongada a poluentes como dióxido de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃) e material particulado (MP_{2,5}).

O uso de sensores químicos, portanto, representa um avanço significativo na vigilância ambiental e na prevenção de riscos à saúde humana, sendo uma alternativa promissora às estações tradicionais de monitoramento, que são mais caras e complexas.

A poluição do ar urbano representa uma ameaça significativa à saúde pública e ao meio ambiente, sobretudo em áreas densamente povoadas onde há grande concentração de veículos, indústrias e outras fontes emissoras. Para enfrentar este problema, o uso de Sensores de Baixo Custo (low-cost sensors, LCS) para monitoramento ambiental tem ganhado destaque, oferecendo a possibilidade de medição mais distribuída e acessível da qualidade do ar (Bagkis et al., 2025; Sai et al., 2019).

Diversas cidades europeias monitoram a poluição atmosférica. Essa iniciativa demonstrou que redes comunitárias com sensores acessíveis podem complementar estações de monitoramento oficiais, expandindo a cobertura espacial do monitoramento.

Portanto, a adoção de redes de sensores de baixo custo, integradas a IoT (Internet das Coisas) e IA (Inteligência Artificial), representa um avanço relevante na vigilância da qualidade do ar — podendo ampliar a cobertura, reduzir os custos do monitoramento e oferecer dados em tempo real, essenciais para ações de saúde pública e meio ambiente. Entretanto, esse avanço depende de boas práticas de

calibração, análise cuidadosa de dados e validação cruzada com métodos convencionais.

Nos últimos anos, a combinação entre sensores químicos/eletrônicos, IoT, IA e técnicas de Machine Learning (ML) tem se mostrado uma tendência promissora. Isso permite não apenas a coleta de dados em tempo real sobre poluentes, mas também a calibração automática dos sensores, detecção de anomalias e previsão de concentrações de poluentes, o que pode contribuir para alertas antecipados e políticas de prevenção à saúde.

Por exemplo, sensores de baixo custo acoplados a algoritmos de Machine Learning conseguiram prever índices de qualidade do ar com precisão satisfatória (citar referências), o que reforça o potencial dessas tecnologias para monitoramento ambiental contínuo e descentralizado. Nesse sentido, a literatura aponta desafios importantes entre eles, a variabilidade entre sensores, necessidade de calibração periódica, sensibilidade a interferências ambientais e a importância de combinar múltiplas fontes de dados (estações tradicionais + sensores comunitários) para garantir confiabilidade.

Nesse sentido, a literatura aponta desafios importantes: a precisão e a consistência dos dados nem sempre se igualam à dos equipamentos de referência. Variações ambientais (temperatura, umidade, interferências de gases) e a variabilidade entre unidades do mesmo modelo podem reduzir a confiabilidade dos resultados.

Por isso, muitos trabalhos defendem a utilização dos sensores de baixo custo como ferramentas complementares — não substitutas — aos sistemas tradicionais de monitoramento, principalmente em contextos de escassez de infraestrutura.

METODOLOGIA E OBJETIVO

A construção deste trabalho foi sustentada por meio de uma pesquisa bibliográfica de caráter exploratório e qualitativo, com foco na análise de estudos recentes sobre o uso de sensores químicos no monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas.

A metodologia adotada visa reunir, analisar e discutir dados técnicos e científicos que subsidiam a compreensão sobre os avanços, aplicações e limitações desses dispositivos no contexto ambiental.

A seleção das fontes foi realizada por meio de bases de dados acadêmicas, como Scopus, ScienceDirect, PubMed, IEEE Xplore e Google Scholar, considerando publicações entre os anos de 2017 e 2025. Os critérios de inclusão envolveram artigos com acesso ao conteúdo completo, revisões sistemáticas, estudos de caso e pesquisas aplicadas diretamente à temática da poluição atmosférica e sensores químicos.

Foram utilizadas palavras-chave como: "air quality monitoring", "chemical sensors", "urban pollution", "environmental monitoring", "IoT and air sensors", tanto em português quanto em inglês, com o objetivo de ampliar a abrangência e profundidade da pesquisa.

Após a seleção e leitura crítica dos artigos, as informações foram organizadas de modo a destacar os principais tipos de sensores químicos utilizados, suas características, desafios técnicos, implicações para a saúde pública e perspectivas futuras.

Portanto, este trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento de sistemas de monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas utilizando sensores químicos. A técnica analítica empregada permite a detecção em tempo real de gases e partículas no ar, fornecendo dados precisos e confiáveis sobre a qualidade do ar. Nesse sentido, o objetivo deste estudo é descrever e avaliar a eficácia de sensores químicos já existentes para o monitoramento da qualidade do ar em áreas urbanas e contribuir para a proteção da saúde pública e do meio ambiente.

INTEGRAÇÃO DE SENSORES + IOT + MACHINE LEARNING/IA

Nos últimos anos, a combinação de sensores de baixo custo com tecnologias digitais, como a IoT, redes sem fio (WSN) e ML tem sido um caminho promissor para superar limitações dos LCS e melhorar a qualidade dos dados. Essa integração permite:

- Coleta de dados em tempo real e remota, com envio automático via rede para servidores ou nuvem;
- Processamento e calibração em tempo real ou periódico, para ajustar medições de acordo com variáveis ambientais ou falhas conhecidas;

- Previsão de padrões de poluição e alertas antecipados, com uso de técnicas de IA para analisar séries temporais e relacionar dados históricos com condições ambientais.

Portanto, esse tipo de sistema (sensores + IoT + ML/IA) tem potencial de tornar o monitoramento mais barato, mais frequente e mais acessível, especialmente em cidades com recursos limitados, e democratizar o acesso à informação sobre qualidade do ar.

LIMITAÇÕES, DESAFIOS E NECESSIDADE DE CALIBRAÇÃO

Apesar de possuir muitos atrativos, a adoção de LCS em escala exige cuidado. As principais limitações relatadas incluem variabilidade entre unidades, sensibilidade à umidade e temperatura, interferência de outros poluentes, necessidade de manutenção periódica e recalibração, baixa robustez em longo prazo e incerteza dos dados sem validação com métodos oficiais.

Por isso, muitos pesquisadores defendem que uma rede de sensores precisa ser bem planejada, o seja, mesclar sensores de baixo custo com estações de referência, realizar calibração periódica, aplicar algoritmos de correção, monitorar metadados ambientais e, se possível, usar múltiplos sensores para o mesmo parâmetro (multi-sensor) para aumentar a confiabilidade.

A integração de sensores em rede também apresenta desafios, como a necessidade de padronização dos dados, sincronização de leituras e tratamento de falhas ou ruídos nos sinais. Há também questões relacionadas à manutenção, reposição de dispositivos e descarte adequado.

Superar essas limitações depende tanto do desenvolvimento de materiais mais seletivos e resistentes, quanto da aplicação de técnicas de correção por software, como o uso de algoritmos de aprendizado de máquina para compensar desvios e melhorar a confiabilidade dos dados coletados em campo.

AVANÇOS RECENTES E TENDÊNCIAS

O uso de LCS para monitorar a poluição atmosférica tem se ampliado nas últimas décadas como alternativa mais acessível e distribuída aos sistemas

tradicionais de medição, que são caros e escassos (Brienza et al., 2015). Esses sensores permitem “preencher lacunas espaciais” nas redes de monitoramento, ampliando a densidade de pontos de medição em áreas urbanas.

Apesar se serem alternativas mais simples, os LCS têm se mostrado promissores se bem calibrados e combinados adequadamente. Por exemplo, sensores de baixo custo podem detectar concentrações de partículas ($PM_{2,5}$, PM_{10}) e gases poluentes em tempo real, o que torna possível a vigilância contínua da qualidade do ar e a identificação de picos de poluição.

Nos últimos anos, revisões sistemáticas e estudos de caso demonstraram que os sistemas baseados em LCS e IoT se tornaram mais precisos, graças aos avanços em tecnologia de sensores, algoritmos de calibração automática e redes de dados (Malleswari et al., 2002).

Além disso, há uma crescente adoção de abordagens participativas e comunitárias, as quais envolvem cidadãos voluntários no monitoramento, o que amplia a densidade de pontos de medição e permite uma vigilância mais democrática da qualidade do ar.

Em linhas gerais, a combinação de sensores de baixo custo, IoT e análise de dados emerge como uma das soluções mais viáveis e promissoras para monitorar a poluição em áreas urbanas, especialmente em cidades que não dispõem de estações tradicionais, desde que com rigor metodológico, calibração e validação de dados.

A poluição do ar em áreas urbanas representa um dos principais riscos ambientais à saúde pública. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 2018), a exposição contínua a poluentes atmosféricos está diretamente relacionada ao aumento de doenças respiratórias e cardiovasculares, especialmente em regiões densamente povoadas.

É importante ressaltar que também é possível integrar os sensores químicos com outras tecnologias. Essas integrações permitem desenvolver sistemas inteligentes capazes de realizar previsões e apoiar ações de controle ambiental.

Além disso, a visualização desses dados por meio de dashboards digitais (painéis visuais interativos) facilita a tomada de decisões por parte de gestores públicos e órgãos ambientais. Essa energia tecnológica amplia significativamente o potencial de aplicação dos sensores químicos em contextos urbanos, industriais e agrícolas.

IMPLICAÇÕES PARA A SAÚDE PÚBLICA E A GESTÃO AMBIENTAL

O monitoramento da qualidade do ar desempenha um papel essencial na proteção da saúde pública e na gestão ambiental. A exposição prolongada a poluentes atmosféricos, como material particulado (MP_{2,5} e MP₁₀), ozônio (O₃), dióxido de nitrogênio (NO₂) e monóxido de carbono (CO), está diretamente relacionada ao aumento da incidência de doenças respiratórias, cardiovasculares e até neurológicas (WHO, 2018).

Além dos impactos diretos à saúde, a poluição do ar gera custos econômicos significativos, afetando diretamente o sistema público de saúde e a produtividade da população.

Diante desse cenário, sistemas de monitoramento eficientes tornam-se indispensáveis para subsidiar políticas públicas de controle ambiental, orientar medidas preventivas e minimizar os danos à saúde e à economia. Segundo Karnati (2023), os dados coletados por sensores químicos possibilitam diagnósticos mais precisos da qualidade do ar em tempo real, favorecendo uma gestão ambiental mais ágil e eficaz.

Além disso, os resultados obtidos por essas tecnologias podem servir como base para campanhas educativas, intervenções urbanas, e avaliações de impacto ambiental, promovendo maior conscientização da população sobre os riscos da poluição atmosférica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, os sensores químicos têm passado por avanços significativos, especialmente com a integração de tecnologias como a IA, redes neurais e a IoT.

A tendência é que, com o avanço da tecnologia, sensores mais baratos e energeticamente eficientes se tornem comuns, inclusive em iniciativas comunitárias e projetos de cidades inteligentes.

A combinação dessas tecnologias também permite a criação de sistemas preditivos que utilizam big data para antecipar picos de poluição e sugerir ações preventivas. Essa capacidade representa um grande passo na gestão ambiental urbana, contribuindo para políticas públicas mais eficazes e para a conscientização da população.

Por se tratar de uma tecnologia já inserida no cotidiano de centros urbanos principalmente, o avanço e aperfeiçoamento dos sensores possibilitam mais informações úteis podendo ser utilizados para diversos fins nos mais variáveis contextos.

Para o futuro, espera-se a miniaturização ainda maior dos sensores, o aumento da autonomia energética por meio de sistemas auto alimentados (como células solares ou colheita de energia ambiental), e o aprimoramento de algoritmos preditivos que possibilitem não apenas o diagnóstico da qualidade do ar, mas também a previsão de eventos críticos. Essas perspectivas reforçam o papel dos sensores químicos ambientais e proteção à saúde humana.

Em síntese, este trabalho demonstrou que os sensores químicos são ferramentas valiosas para o monitoramento da qualidade do ar, permitindo a detecção precoce de poluentes e contribuindo diretamente para a promoção da saúde pública.

Sua aplicação se mostra especialmente relevante em áreas urbanas, onde a densidade populacional e a concentração de fontes poluidoras elevam os riscos de exposição a contaminantes atmosféricos.

Dessa forma, os resultados deste estudo reforçam a importância de investir no desenvolvimento e aprimoramento dessas tecnologias, como estratégia eficaz para melhorar a qualidade do ar nas cidades e proteger a saúde da população.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Leonardo Santos Andrade pela orientação valiosa e apoio durante a realização deste trabalho. Sua expertise e conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço também ao meu marido, Leandro Costa da Silva pelo apoio incondicional e incentivo constante. Sua compreensão e paciência foram essenciais para que eu pudesse concluir este trabalho.

REFERÊNCIAS

- WHO. (2018). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241511353>
- Bagkis, E. et al. (2025). Evolving trends in application of low-cost air quality sensors. [Nature article about LCS networks and challenges]. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41612-025-01216-4>
- Brienza, S.; Galli, A.; Anastasi, G.; Bruschi, P. (2015). uSense: a low-cost cooperative air quality monitoring system for urban areas. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/6/12242>
- Sai, K. B. K. et al. (2019). Low Cost IoT Based Air Quality Monitoring Setup Using Arduino and MQ Series Sensors With Dataset Analysis. ICRTAC 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339543962_Low_Cost_IoT_Based_Air_Quality_Monitoring_Setup_Using_Arduino_and_MQ_Series_Sensors_With_Dataset_Analysis
- Karnati, H. (2023). IoT-based air quality monitoring system with machine learning for accurate and real-time data analysis. arXiv preprint arXiv:2307.00580. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2307.00580>
- Malleswari, S. et al. (2022). Air pollution monitoring systems using IoT devices: Review. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221478532104966X>