

VALIDAÇÃO DE SISTEMA DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM AMBIENTES INTERNOS COM IOT

Kelly Ferreira Moraes¹, Raquel Valentim Santos², Osmar Dias Junior³, Ederson Cichaczewski⁴

¹Centro Universitário Internacional Uninter, Goiânia, Goiás, Brasil (kestudosf@gmail.com)

²Centro Universitário Internacional Uninter, Goiânia, Goiás, Brasil (raquelvalentimsantos@gmail.com)

³Centro Universitário Internacional Uninter, Curitiba, Paraná, Brasil (osmar.d@uninter.com)

⁴Centro Universitário Internacional Uninter, Curitiba, Paraná, Brasil (ederson.c@uninter.com)

Resumo: Este trabalho apresenta um sistema de monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos com microcontrolador ESP32, sensor Bosch BME680, biblioteca Bosch Software Environmental Cluster (BSEC) e registro em Google Planilhas. Descrevem-se o problema ambiental, os dados analisados, a comunicação pelo Protocolo de Transferência de Hipertexto Seguro (HTTPS) e a proposta de página web. Os resultados indicam viabilidade técnica preliminar.

Palavras-chave: qualidade do ar; ambientes internos; Internet das Coisas.

INTRODUÇÃO

A qualidade do ar em ambientes internos tornou-se um tema de interesse técnico, educacional e sanitário porque envolve ventilação, conforto ambiental, exposição a poluentes e tomada de decisão em espaços ocupados. Em salas de aula, laboratórios, residências e ambientes de trabalho, a composição do ar resulta da combinação entre fontes internas, ar externo, comportamento dos ocupantes, umidade relativa, temperatura, materiais de construção, produtos de limpeza e taxa de renovação do ar. Por essa razão, o monitoramento contínuo pode auxiliar na identificação de tendências, eventos de piora e oportunidades de intervenção.

A literatura indica que muitos poluentes internos têm origem no próprio edifício ou nas atividades nele realizadas. Produtos de limpeza, tintas, solventes, materiais de acabamento, mobiliário, aerossóis e rotinas de manutenção podem liberar compostos orgânicos voláteis (COV; do inglês volatile organic compounds, VOCs). Fontes de combustão, por sua vez, podem contribuir com dióxido de carbono, monóxido de carbono e material particulado. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, do inglês United States Environmental Protection Agency) descreve os COV como compostos liberados na forma de gases a partir de sólidos ou líquidos e destaca que suas concentrações podem ser mais elevadas em ambientes internos do que externos, dependendo das fontes presentes e da ventilação (EPA, 2025a; EPA, 2025b).

Os efeitos associados à má qualidade do ar em ambientes internos abrangem desconforto, irritação de olhos, nariz e garganta, cefaleia, tontura, fadiga e agravamento de doenças respiratórias ou cardiovasculares em situações específicas de exposição. A interpretação desses efeitos, entretanto, exige cautela. Sensores de baixo custo são úteis para indicar tendências, eventos e variações relativas, mas não substituem métodos laboratoriais, amostragem normatizada ou equipamentos de referência. Ainda assim, instrumentos acessíveis favorecem estudos

científicos, a coleta exploratória de dados e o desenvolvimento de sistemas de alerta e visualização.

Outro ponto importante é a ventilação. A American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) reconhece as normas 62.1 e 62.2 como referências para projeto de ventilação e qualidade do ar aceitável, estabelecendo taxas mínimas de renovação e outras medidas voltadas à redução de efeitos adversos aos ocupantes (ASHRAE, 2025). Em ambientes educacionais e residenciais, a concentração de dióxido de carbono é frequentemente usada como indicador indireto de ocupação e renovação de ar. Entretanto, dióxido de carbono em níveis usuais de salas de aula não deve ser confundido com monóxido de carbono, e valores elevados de dióxido de carbono são mais bem interpretados como indicio de ventilação insuficiente para o número de pessoas presentes (NCCEH, 2010).

Nesse contexto, sensores ambientais integrados, microcontroladores com conexão por rede local sem fio (Wi-Fi) e serviços em nuvem permitem construir protótipos de monitoramento com custo moderado e rápida replicação. Soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT, do inglês Internet of Things) podem registrar temperatura, umidade, gases, material particulado e outros indicadores, além de disponibilizar painéis e bases históricas para análise (Wall et al., 2021; Othman et al., 2024; Peixe e Marques, 2024). O presente trabalho situa-se nessa linha de desenvolvimento, com escopo inicial voltado à prototipagem em nível educacional e experimental com microcontrolador ESP32, sensor Bosch BME680 e armazenamento em Google Planilhas.

O objetivo geral é apresentar a versão preliminar do projeto, abordando sobre a concepção e a validação de um sistema de monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos. Os objetivos específicos são: descrever o problema da qualidade do ar interno; caracterizar o sensor ambiental BME680 com base no seu *datasheet* (folha de dados) e no uso da biblioteca Bosch Software Environmental Cluster (BSEC); definir os dados a serem publicados pelo sistema; relatar a experiência inicial de conexão entre

o ESP32 e o Google Planilhas; e apresentar a proposta de página de internet do sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização geral da proposta

O trabalho foi estruturado como pesquisa aplicada, incluindo prototipagem rápida, com foco em implementar um processo básico de aquisição, transmissão, armazenamento e visualização de dados ambientais. A arquitetura proposta contempla o sensor BME680 conectado ao ESP32 pelo barramento *Inter-Integrated Circuit* (I2C), o processamento local dos dados brutos, o envio dos registros por comunicação serial, o uso de valores separados por vírgula (CSV, do inglês *Comma-Separated Values*) e o envio por requisições realizadas com o Protocolo de Transferência de Hipertexto Seguro (HTTPS, do inglês *HyperText Transfer Protocol Secure*). O armazenamento de dados foi previsto em planilha eletrônica, com visualização posterior em página web.

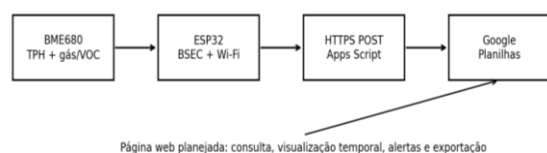


Figura 1. Arquitetura lógica proposta para o monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos. Fonte: os autores.

Sensor BME680 e biblioteca Bosch Software Environmental Cluster (BSEC)

O sensor empregado no projeto é o Bosch BME680, um sensor ambiental digital integrado. Segundo o datasheet, o dispositivo combina medições de gás, umidade relativa, pressão atmosférica e temperatura em um único encapsulamento compacto. O componente é apresentado pelo fabricante como um sensor ambiental 4 em 1, adequado a aplicações como qualidade do ar em ambientes internos, dispositivos móveis, dispositivos vestíveis e automação, com dimensões reduzidas e baixo consumo (Bosch Sensortec, 2024a).

A parte de gás do BME680 é baseada em tecnologia de óxido metálico aquecido (MOX, do inglês metal oxide). O processo de medição envolve aquecimento da placa sensível, exposição ao ar e obtenção de uma resistência elétrica associada ao gás. Essa resistência varia conforme a presença de compostos redutores, incluindo COV, e sofre influência da umidade e da temperatura. Por esse motivo, a leitura de gás deve ser compreendida como indicador indireto e qualitativo de mudanças no ambiente, e não como identificação seletiva de uma substância específica.

O datasheet recomenda o uso do BME680 em conjunto com a biblioteca Bosch Software Environmental Cluster (BSEC), responsável por

processamento de sinais, compensação e geração de saídas virtuais. A BSEC calcula indicadores como temperatura compensada, umidade compensada, resistência de gás compensada, índice de qualidade do ar (IAQ, do inglês *Indoor Air Quality*), índice de qualidade do ar estático, equivalente de dióxido de carbono (eCO₂), equivalente de compostos orgânicos voláteis da respiração (bVOC, do inglês *breath Volatile Organic Compounds*) e status de acurácia (Bosch Sensortec, 2024a; Bosch Sensortec, 2024b).

É essencial destacar que o eCO₂ fornecido pela BSEC não corresponde a uma medição direta de dióxido de carbono. O fabricante descreve esse valor como estimativa derivada de correlações entre COV e dióxido de carbono no ar exalado humano. Assim, esse dado deve ser tratado como indicador inferido, útil para análise exploratória e observação de tendências, mas insuficiente para substituir um sensor dedicado por infravermelho não dispersivo (NDIR, do inglês *nondispersive infrared*) quando a variável de interesse for a concentração real de dióxido de carbono.

O IAQ da BSEC é apresentado em escala de 0 a 500, na qual valores menores representam ar relativamente mais limpo e valores maiores indicam piora da qualidade relativa do ar. O status de acurácia varia de 0 a 3 e indica o grau de confiança do algoritmo naquele momento. Na prática experimental, é esperado que o sensor passe por período de estabilização e adaptação ao ambiente antes de produzir estimativas mais confiáveis. Essa característica foi observada nos testes preliminares do projeto, nos quais o status de acurácia evoluiu gradualmente até atingir nível 3 após período de operação e exposição a variações perceptíveis de COV.

Definição dos dados publicados

A publicação dos dados foi definida para atender simultaneamente a três necessidades: leitura humana imediata durante a depuração, armazenamento tabular para análise posterior e possibilidade de integração com painéis web. Assim, optou-se por uma estrutura de campos estável, passível de transporte em CSV. A Tabela 1 apresenta a proposta inicial de dicionário de dados.

Tabela 1. Dicionário de dados proposto para publicação dos registros ambientais.

Campo	Unidade/formato	Origem	Finalidade
timestamp	ISO 8601 ou dd/mm/aaaa hh:mm:ss	ESP32/Protocolo de Tempo de Rede (NTP) ou Apps Script	Ordenação temporal e auditoria do registro
device_id	endereço de Controle de Acesso ao Meio (MAC) ou identificado	ESP32	Rastrear o nó de medição



Campo	Unidade/formato	Origem	Finalidade
	lógico		
local	texto	configuração	Identificar sala, laboratório ou ambiente
temperatura	graus Celsius	BME680/BSEC	Conforto térmico e compensação
umidade_relativa	porcentagem	BME680/BSEC	Conforto, mofo e influência na leitura de gás
pressão	hectopascal	BME680/BSEC	Variável ambiental auxiliar
resistencia_gas	ohm	BME680/BSEC	Indicador bruto ou compensação de variação de gases
indice_qualidade_ar (IAQ)	0 a 500	BSEC	Indicador relativo de qualidade do ar
acuracia_indice_qualidade_ar	0 a 3	BSEC	Confiabilidade do IAQ
indice_qualidade_ar_estatico	0 a 500	BSEC	Indicador para instalação estacionária
dioxido_carbono_equivalente (eCO ₂)	partes por milhão	BSEC	Estimativa inferida; não mede dióxido de carbono diretamente
compostos_organicos_volateis_respiracao_equivalente (bVOC)	partes por milhão	BSEC	Estimativa de COV equivalente
Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (RSSI)	dBm	ESP32/Wi-Fi	Qualidade de comunicação
tempo_atividade	segundos	ESP32	Diagnóstico de reinicializações

Para a fase de depuração local, o formato CSV é conveniente porque pode ser impresso diretamente no monitor serial, copiado para planilhas e lido por rotinas simples. Um exemplo de cabeçalho publicado seria: “timestamp;device_id;local;temperatura;umidade_relativa;pressão;resistencia_gas;indice_qualidade_ar;acuracia_indice_qualidade_ar;indice_qualidade_ar_estatico;dioxido_carbono_equivalente;compostos_organicos_volateis_respiracao_equivalente;indicador_sinal_recebido;tempo_atividade”.

A definição explícita dos campos evita ambiguidades de interpretação. Por exemplo, a coluna

dioxido_carbono_equivalente deve manter no próprio nome a condição de estimativa, impedindo que o leitor confunda o valor com medição direta de dióxido de carbono. De forma semelhante, a acurácia do índice de qualidade do ar deve ser registrada junto ao IAQ, pois leituras com acurácia baixa não devem fundamentar conclusões sobre o ambiente.

Validação com o Google Planilhas

A primeira experiência de armazenamento utilizou Google Planilhas como repositório tabular, por ser uma ferramenta acessível, de baixo custo e adequada à fase exploratória. A estratégia consistiu em criar uma planilha com cabeçalhos compatíveis com o dicionário de dados e publicar um script do Google Apps Script como aplicação web. A documentação oficial informa que aplicações web em Apps Script podem responder a requisições por meio das funções doGet(e) e doPost(e), retornando HtmlOutput ou TextOutput, e que os parâmetros chegam ao script pelo objeto de evento e (Google, 2026a).

No lado da planilha, o método appendRow(rowContents) da classe Sheet permite inserir uma nova linha ao final da região de dados existente. Esse método foi adotado para registrar cada pacote recebido do ESP32 como uma nova observação temporal (Google, 2026b). O fluxo experimental foi organizado da seguinte forma: o ESP32 coleta e formata os dados; realiza uma requisição HTTPS para o Localizador Uniforme de Recursos (URL, do inglês *Uniform Resource Locator*) da implantação do Apps Script; o Apps Script valida token e payload; a rotina grava os campos na planilha; e o servidor retorna texto ou JSON de confirmação.

Durante a primeira integração, observou-se que a planilha era atualizada, mas o ESP32 recebia retorno do Protocolo de Transferência de Hipertexto (HTTP, do inglês *HyperText Transfer Protocol*) com código 400 e conteúdo em Linguagem de Marcação de Hipertexto (HTML, do inglês *HyperText Markup Language*). Esse comportamento indicou que a escrita na planilha não era o único critério de sucesso: também era necessário padronizar a resposta da aplicação web, conferir a URL de implantação, revisar o método usado, ajustar o conteúdo do payload e garantir que o firmware tratasse redirecionamentos ou respostas do serviço de forma robusta. Posteriormente, também foi avaliado um caminho de leitura por página HTML usando JSON with Padding (JSONP), que falhou inicialmente com mensagem de erro de carregamento, reforçando a necessidade de validar implantação, token e função doGet(e).

Essa etapa não constituiu validação metrológica do sensor, mas comprovou a viabilidade funcional do registro em planilha. O ganho didático foi relevante porque tornou visível a diferença entre aquisição local, transmissão HTTP ou HTTPS, processamento



no serviço intermediário e persistência dos dados. Além disso, evidenciou que sistemas de IoT simples dependem de tratamento de exceções, padronização de payload, sincronização de tempo e mensagens de diagnóstico legíveis.

Projeto da página de internet

Uma página de internet foi concebida como interface web para transformar a planilha ou uma API intermediária em visualização compreensível aos usuários. O projeto prevê tela com dashboards de medição atual, histórico de leituras, indicação de acurácia do IAQ, mensagens de alerta, logs de comunicação e exportação dos dados. A página web realiza conexão com o hardware ESP32, permitindo acompanhar informações transmitidas pela porta de comunicação serial emulada via USB, com destaque para a área de log que registra a leitura dos dados do sensor continuamente.

A página web permite evolução incremental: primeiro, visualização local dos dados seriais; segundo, consulta à planilha por Apps Script; terceiro, publicação de uma API de leitura em JSON; quarto, construção de painel responsivo; e quinto, integração com alertas ou automações. Essa abordagem mantém o sistema executável em etapas, reduzindo a dependência de infraestrutura paga durante a fase de desenvolvimento.

Requisitos funcionais e critérios de interpretação

A metodologia para validação empírica consiste na realização de testes verificando: aumento de ocupação por modificação nos indicadores de eCO₂ e IAQ; abertura de janelas pela redução da persistência de eventos de COV; se produtos de limpeza produzem picos detectáveis no sensor; e variações de umidade se interferem na resistência de gás. As ferramentas definidas para avaliar os resultados dos testes consistem em séries temporais, comparação entre médias, análise de eventos e correlação entre variáveis ambientais.

Como requisitos não funcionais, a solução deve ter baixo custo de implantação, permitir manutenção por estudantes e professores, utilizar bibliotecas amplamente disponíveis, funcionar em rede Wi-Fi convencional e manter documentação suficiente para reprodução. Em termos de privacidade, os dados ambientais não devem identificar pessoas; porém, a associação entre local, horário e ocupação pode revelar padrões de uso do ambiente. Desta forma, qualquer disponibilização pública dos dados deve anonimizar a localização da sala específica, horários e metadados de rede, como dados sensíveis.

Os critérios de interpretação priorizam tendência temporal, comparação entre períodos e detecção de eventos. Leituras isoladas podem induzir ao erro, pois o sensor BME680 sofre influência de umidade, temperatura, histórico de operação, aquecimento do

elemento sensível e calibração de fundo. Por essa razão, a página web prevê a apresentação de gráficos de evolução, médias móveis, marcação de eventos e sinalização de acurácia. Alertas automáticos consideram permanência em faixa por determinado intervalo, e não apenas pico instantâneo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados preliminares obtidos permitiram caracterizar a viabilidade técnica do sistema. O sensor BME680 foi conectado ao ESP32, os valores ambientais foram lidos e exibidos no monitor serial, e as saídas virtuais da biblioteca BSEC foram interpretadas com atenção especial ao IAQ, à acurácia do IAQ, ao eCO₂ e ao bVOC. A observação do período de aquecimento e estabilização foi coerente com a necessidade de adaptação do algoritmo ao ambiente e ao histórico de medições.

Durante os testes, foi observada leitura inicial de eCO₂ em torno de 600 partes por milhão (ppm) e depois vai estabilizando até uma leitura mais realista do ambiente. Como referência, um ar fresco tem aproximadamente 400 ppm, e um ar ruim tem aproximadamente 2000 ppm ou mais. Para aplicações em que a concentração de dióxido de carbono seja usada como indicador quantitativo de ventilação, recomenda-se incluir um sensor NDIR dedicado ou realizar uma comparação com um equipamento de referência. No presente protótipo, a informação de eCO₂ foi mantida por seu potencial indicativo, desde que acompanhada da ressalva metodológica.

Outro resultado importante foi a resposta do sistema a compostos voláteis perceptíveis no ambiente. Em um dos testes, a exposição a resíduo de fluxo de soldagem, com odor semelhante a solvente, provocou elevação significativa dos indicadores relacionados à qualidade do ar. Após a retirada do material, os valores tenderam a se modificar conforme o ambiente ainda permanecia odorífero. Esse comportamento sugere sensibilidade do conjunto BME680/BSEC a eventos de emissão de COV, o que é coerente com a aplicação pretendida do sensor. Contudo, o teste foi qualitativo e não permite determinar concentração, espécie química ou risco toxicológico.

A experiência também reforçou a importância de registrar a umidade relativa e a temperatura juntamente com os indicadores de gás. Sensores MOX podem apresentar respostas influenciadas por condições ambientais e histórico de operação. Consequentemente, análises de IAQ sem temperatura e umidade perdem contexto. Wall et al. (2021), em estudo com o sensor BME680 e IoT, também observaram uma relação entre umidade e qualidade do ar em cenários domésticos, o que reforça a necessidade de interpretar os dados como uma série temporal multivariada.



Quanto à comunicação com Google Planilhas, a atualização da planilha confirmou que a cadeia formada por ESP32, HTTPS, Apps Script e planilha é funcional. Contudo, o retorno do código HTTP 400 recebido pelo microcontrolador demonstrou que a necessidade de otimizações no ciclo de comunicação. Como um sistema de monitoramento contínuo, objetiva-se alcançar o atendimento completo de critérios de sucesso de forma cumulativa, incluindo: aquisição válida, timestamp consistente, transmissão sem perda, escrita confirmada, resposta interpretável e mecanismo de repetição em caso de falha.

A escolha do Google Planilhas como primeira base de dados mostrou-se adequada para prototipagem, principalmente pela facilidade de inspeção visual e exportação.

A página web foi planejada de forma estratégica, pois a utilidade social do monitoramento depende da capacidade de transformar números em informação útil. Um IAQ de 180, por exemplo, pode não ser intuitivo para usuários não especialistas; por outro lado, uma interface que mostre tendência temporal, faixa de qualidade, acurácia e recomendação de ventilação pode facilitar a tomada de decisão. Estudos sobre monitoramento interno com IoT indicam que a visualização dos dados pode aumentar a consciência dos ocupantes e favorecer mudanças de comportamento (Kureshi et al., 2023).

O uso de sensores de baixo custo deve ser acompanhado de critérios de qualidade. Peixe e Marques (2024) destacam que sistemas de IoT para monitoramento interno possuem diferenças quanto a sensores, microcontroladores, armazenamento e visualização, sendo necessário considerar limitações de calibração, confiabilidade e manutenção. No mesmo sentido, Pietraru et al. (2024) discutem sensores MOX de COV como alternativas de baixo custo para monitoramento, mas seu uso exige compreensão dos princípios de operação, resposta cruzada e aplicação adequada.

Do ponto de vista acadêmico, o protótipo desenvolvido demonstrou permitir a articulação entre física, química ambiental, eletrônica, redes, programação embarcada, computação em nuvem e análise de dados. É possível visualizar a diferença entre dado bruto e dado processado, compreender limitações de sensores, comparar comunicação serial e HTTPS, aprender sobre API e discutir ética na publicação de dados ambientais. Esse aspecto é relevante, visto que projetos de IoT aplicados a problemas reais tendem a aumentar o engajamento e a contextualização da aprendizagem.

Plano de implantação futura

A Tabela 2 apresenta uma compilação do estado atual dos módulos do sistema e suas possibilidades de avanços e melhorias.

Tabela 2. Síntese do estado de implementação do sistema.

Módulo	Estado atual	Próximo avanço
Aquisição BME680	Leituras obtidas no ESP32 e exibidas localmente	Registrar protocolo de estabilização e amostragem
Biblioteca BSEC	Saídas IAQ, acurácia, eCO ₂ e bVOC interpretadas	Salvar estado de calibração e validar com testes repetidos
Publicação serial/CSV	Formato útil para depuração	Padronizar cabeçalhos e documentação de campos
Google Planilhas	Planilha atualizada por Apps Script	Corrigir resposta HTTP e registrar logs de falha
Página web	Concebida e testada parcialmente em visualização local	Implementar painel com leitura JSON/JSONP ou API
Validação científica	Observações qualitativas preliminares	Comparar com instrumentos de referência

Em melhorias futuras, a mesma informação que no estágio atual está em CSV pode ser serializada como JSON (*JavaScript Object Notation*) para facilitar integração com Interface de Programação de Aplicações (API, do inglês *Application Programming Interface*), em *payload* do protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) ou banco de dados.

A evolução para MQTT é especialmente compatível com a arquitetura. O ESP32 pode publicar leituras em tópico dedicado e um serviço intermediário pode armazenar os dados em planilha, banco de dados temporal ou painel web. Essa alternativa separa aquisição e persistência, reduzindo dependência direta do Apps Script. Contudo, para a fase inicial, o uso de HTTPS e Google Planilhas mostrou-se vantajoso por sua simplicidade, transparência e facilidade de conferência manual.

A página de internet deve assumir papel de mediação entre dado técnico e ação prática. Uma proposta de interface com melhorias inclui: cartão de leitura atual, gráfico de IAQ com nível de acurácia, gráfico de temperatura e umidade, indicação textual de ventilação sugerida, histórico de eventos, botão para exportar CSV e área de diagnóstico. Para evitar alarmismos, a interface apresentará mensagens como "indicador em elevação", "aguardar estabilização do sensor" ou "verificar ventilação", em vez de classificações absolutas de risco à saúde.

O protótipo desenvolvido demonstrou a viabilidade da solução proposta. Para uso operacional, contudo, será necessário avaliar disponibilidade, manutenção, calibração periódica, proteção do hardware, gabinete, alimentação elétrica e estabilidade do serviço em nuvem.

A implantação futura pode ser organizada em quatro ciclos. No primeiro ciclo, o foco deve ser a robustez do firmware: sincronização pelo Protocolo de Tempo de Rede (NTP, do inglês *Network Time Protocol*), reconexão Wi-Fi, tratamento de falha HTTPS, salvamento do estado da biblioteca BSEC, watchdog e armazenamento local temporário quando a rede estiver indisponível. No segundo ciclo, o foco deve ser a qualidade dos dados: revisão do dicionário,



definição de frequência de amostragem, identificação de ambientes e criação de rotinas de limpeza de dados. No terceiro ciclo, deve-se priorizar a visualização: API de leitura, painel responsivo, gráficos e mensagens de interpretação. No quarto ciclo, a validação com sensores de referência e publicação de resultados comparativos.

CONCLUSÃO

O estágio preliminar do sistema relatado demonstrou que é tecnicamente viável construir uma solução de monitoramento da qualidade do ar em ambientes internos com ESP32, sensor BME680, biblioteca BSEC e Google Planilhas. O protótipo já permite aquisição local, interpretação de indicadores ambientais, publicação em formato tabular e armazenamento preliminar em planilha, constituindo base funcional para evolução em direção a um painel web mais robusto.

A caracterização do sensor BME680 mostrou que o sensor é apropriado para monitoramento exploratório de temperatura, umidade, pressão e variações associadas a COV, mas também evidenciou limitações importantes. Os dados de IAQ, eCO₂ e bVOC dependem da biblioteca BSEC, do histórico de operação e da acurácia momentânea. Portanto, esses dados devem ser interpretados como indicadores relativos e não como medições laboratoriais ou normativas de poluentes específicos.

A experiência com Google Planilhas foi bem-sucedida quanto à gravação dos dados, mas revelou a necessidade de aprimorar a resposta HTTP e o tratamento de erro no ESP32.

Como trabalhos futuros, pretende-se implementar um painel responsivo, salvar e restaurar o estado de calibração da biblioteca BSEC, incluir um sensor NDIR para comparação com o eCO₂, realizar campanhas de medição em salas reais, aplicar estatística descritiva e análise de eventos, avaliar limites de uso do Google Planilhas e publicar uma documentação aberta do hardware, firmware e modelo de dados. Com esses avanços, o sistema poderá apoiar atividades acadêmicas, pesquisas científicas e ações de conscientização sobre qualidade do ar em ambientes internos.

Além dos componentes físicos e lógicos, os requisitos funcionais mínimos permitem orientar a próxima implementação. O sistema deve registrar leituras com timestamp, preservar o identificador do dispositivo, indicar o status de acurácia, disponibilizar logs de erro, evitar duplicidade de registros após falhas de comunicação e permitir exportação dos dados em formato aberto. Também deve separar claramente dados medidos diretamente, como temperatura, umidade, pressão e resistência de gás, de dados estimados por algoritmo, como IAQ, eCO₂ e bVOC.

Uma implantação futura pode migrar para banco de dados temporal, como Firebase, InfluxDB, Supabase ou API própria, mantendo a planilha como ferramenta de validação.

Do ponto de vista científico, a próxima etapa deve transformar observações preliminares em protocolo experimental. Isso implica definir ambientes de teste, tempo de estabilização, frequência de amostragem, critérios de exclusão, replicações, eventos controlados de COV, comparação com instrumento de referência, avaliação de incerteza e análise estatística. Sem esse avanço, o sistema permanece como prova de conceito; com esse avanço, pode se tornar plataforma de pesquisa aplicada para avaliação da qualidade do ar em ambientes internos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao departamento de Pesquisa do Centro Universitário Internacional UNINTER pelos recursos disponibilizados e a todos que contribuíram direta ou indiretamente para esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2025: Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality. Peachtree Corners: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2025.
- BOSCH SENSORTec. BME680: Low power gas, pressure, temperature & humidity sensor. Datasheet BST-BME680-DS001-09, Revision 1.9. Reutlingen: Bosch Sensortec, 2024a.
- BOSCH SENSORTec. BME680 Software (BSEC): Bosch Sensortec Environmental Cluster. 2024b. Disponível em: <https://www.bosch-sensortec.com/en/software-tools/software/bme680-software-bsec/>. Acesso em: 29 abr. 2026.
- EPA. Indoor Air Quality. United States Environmental Protection Agency, 2025a. Disponível em: <https://www.epa.gov/report-environment/indoor-air-quality>. Acesso em: 29 abr. 2026.
- EPA. Technical Overview of Volatile Organic Compounds. United States Environmental Protection Agency, 2025b. Disponível em: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>. Acesso em: 29 abr. 2026.
- EPA. Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality. United States Environmental Protection Agency, 2025c. Disponível em: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality>. Acesso em: 29 abr. 2026.
- GOOGLE. Web Apps. Apps Script. Google for Developers, 2026a. Disponível em: <https://developers.google.com/apps-script/guides/web>. Acesso em: 29 abr. 2026.
- GOOGLE. Class Sheet: appendRow(rowContents). Apps Script. Google for Developers, 2026b. Disponível em: <https://developers.google.com/apps-script/reference/spreadsheet/sheet>. Acesso em: 29 abr. 2026.



- KURESHI, R. R.; THAKKER, D.; MISHRA, B. K.; BARNES, J. From Raising Awareness to a Behavioural Change: A Case Study of Indoor Air Quality Improvement Using IoT and COM-B Model. *Sensors*, v. 23, n. 7, 3613, 2023. DOI: 10.3390/s23073613.
- NCCEH. Carbon Dioxide in Indoor Air. National Collaborating Centre for Environmental Health, 2010. Disponível em: <https://ncceh.ca/content/carbon-dioxide-indoor-air>. Acesso em: 29 abr. 2026.
- OTHMAN, H.; AZARI, R.; GUIMARÃES, T. Low-Cost IoT-based Indoor Air Quality Monitoring. *Technology|Architecture + Design*, v. 8, n. 2, p. 250-270, 2024. DOI: 10.1080/24751448.2024.2405403.
- PEIXE, J.; MARQUES, G. Low-cost IoT-enabled indoor air quality monitoring systems: A systematic review. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, v. 16, n. 2, p. 167-180, 2024. DOI: 10.3233/AIS-220577.
- PIETRARU, R. N.; NICOLAE, M.; MOCANU, S.; MEREZEANU, D.-M. Easy-to-Use MOX-Based VOC Sensors for Efficient Indoor Air Quality Monitoring. *Sensors*, v. 24, n. 8, 2501, 2024. DOI: 10.3390/s24082501.
- WALL, D.; MCCULLAGH, P.; CLELAND, I.; BOND, R. R. Development of an Internet of Things Solution to Monitor and Analyse Indoor Air Quality. *Internet of Things*, v. 14, 100392, 2021. DOI: 10.1016/j.iot.2021.100392.