

AUTOMAÇÃO DE SEGURANÇA EM LABORATÓRIOS INDUSTRIAIS: IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO DE GASES BASEADO EM SENSORES

Amanda Markus¹, Coorientadora: Aline Machado Zancanaro², Orientador: Julian Cezar Giacomini³

¹Discente do Superior em Tecnologia em Automação Industrial, Panambi – RS, Brasil

²Docente coorientadora, Panambi – RS, Brasil

³Docente orientador, Panambi – RS, Brasil

e-mail: amanda.markus1995@gmail.com, aline.machado@iffarroupilha.edu.br, julian.giacomini@iffarroupilha.edu.br

Resumo – O monitoramento de gases em laboratórios industriais constitui uma prática essencial para garantir a segurança ocupacional, a preservação ambiental e a integridade das operações. Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver e validar um protótipo integrado de monitoramento em tempo real para sensores de CO e CO₂, avaliando sua precisão, confiabilidade e capacidade de emitir alertas automáticos para melhorar a segurança em laboratórios industriais. Especificamente, investiga-se como tecnologias de automação contribuem para a redução de riscos em ambientes laboratoriais; projeta-se e implementa-se um protótipo de monitoramento com sensores (por exemplo, MQ-135 para CO₂ e MQ-7 para CO) integrado a plataformas de controle como ESP32 ou Raspberry Pi; desenvolve-se um sistema de coleta e visualização de dados em tempo real; e propõem-se melhorias que incorporem conceitos da Indústria 4.0, incluindo Internet das Coisas (IoT), Big Data e inteligência artificial. Sistemas de monitoramento baseados em sensores eletrônicos detectam em tempo real concentrações críticas, permitindo emissão imediata de alertas visuais e sonoros e acionamento automático de ventilação e contenção. Além da prevenção de incidentes, esses sistemas registram e analisam dados históricos, subsidiando a gestão de riscos e o cumprimento de normas regulamentadoras. A arquitetura proposta, com armazenamento em JSON e interface web, viabiliza integração com plataformas IoT e monitoramento remoto, configurando-se como alternativa viável para aplicações industriais que demandam confiabilidade, escalabilidade e baixo custo.

Palavras-Chave – Laboratórios industriais, Monitoramento de gases, Segurança ocupacional, Sensores.

AUTOMATION OF SAFETY IN INDUSTRIAL LABORATORIES: IMPLEMENTATION OF A SENSOR-BASED GAS MONITORING SYSTEM

Abstract – Gas monitoring in industrial laboratories is an essential practice for ensuring occupational safety, environmental preservation, and operational integrity. The general objective of this work is to develop and validate an integrated real-time monitoring prototype for CO and CO₂ sensors, evaluating its accuracy, reliability, and ability to issue automatic alerts to enhance safety in

industrial laboratories. Specifically, the study investigates how automation technologies contribute to risk reduction in laboratory environments; designs and implements a monitoring prototype using sensors (e.g., MQ-135 for CO₂ and MQ-7 for CO) integrated with control platforms such as ESP32 or Raspberry Pi; develops a real-time data collection and visualization system; and proposes improvements incorporating Industry 4.0 concepts, including the Internet of Things (IoT), Big Data, and artificial intelligence. Electronic sensor-based monitoring systems detect critical concentrations in real time, enabling the immediate issuance of visual and audible alerts and the automatic activation of ventilation and containment measures. Beyond incident prevention, these systems record and analyze historical data, supporting risk management and compliance with regulatory standards. The proposed architecture, featuring JSON storage and a web interface, enables integration with IoT platforms and remote monitoring, representing a viable alternative for industrial applications that require reliability, scalability, and low cost.

Keywords – Gas monitoring, Industrial laboratories, Occupational safety, Sensors.

NOMENCLATURA

A	Ampère
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
IoT	Internet of Things
NH ₃	Amônia
ppm	Parte por milhão
SO ₂	Dióxido de Enxofre
V	Volts

I. INTRODUÇÃO

A automação tem se consolidado como um dos principais pilares da Indústria 4.0, promovendo transformações profundas em diversos setores produtivos e na área de pesquisa. Nos laboratórios industriais, ambientes caracterizados pela manipulação de substâncias químicas e gases potencialmente perigosos, a aplicação de tecnologias de automação assume papel estratégico. Isso porque, além de aumentar a precisão dos processos, ela reduz significativamente a exposição direta dos profissionais a

riscos, contribuindo para a segurança ocupacional e a confiabilidade das análises realizadas.

Tradicionalmente, existem vários procedimentos laboratoriais que exigem intervenção humana de forma direta, o que, embora garanta uma certa forma flexibilidade, também eleva a probabilidade de falhas operacionais e de acidentes com colaboradores. Nesse sentido, a automação surge como uma alternativa para mitigar falhas humanas, além de otimizar os recursos já existentes e acelerar as tarefas repetitivas, assegurando uma forma de padronização e maior confiabilidade nos resultados obtidos. Com a integração de sensores inteligentes e dispositivos embarcados em conjunto com plataformas de monitoramento em tempo real, possibilita-se não apenas o controle contínuo das condições ambientais no local, mas também a antecipação de falhas, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade e prevenção de riscos.

Outro aspecto relevante é a convergência entre automação e tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (mais conhecido como *IoT*), Big Data e inteligência artificial, que têm ampliado o horizonte de possibilidades de monitoramento avançado, com a coleta massiva de dados e as análises preditivas em tempo real. Essas inovações reforçam o papel dos laboratórios industriais como espaços não apenas de pesquisa, mas também de aplicação de soluções tecnológicas que impactam diretamente na indústria, além da saúde e o meio ambiente no dia a dia das pessoas.

O objetivo geral do trabalho é desenvolver e validar um protótipo integrado de monitoramento em tempo real para sensores de CO e CO₂, avaliando sua precisão, confiabilidade e capacidade de emitir alertas automáticos para melhorar a segurança em laboratórios industriais. Os objetivos específicos incluem investigar como as tecnologias de automação contribuem para a redução de riscos em ambientes laboratoriais; projetar e implementar um protótipo de monitoramento com sensores, como o MQ-135 usado para detecção de CO₂ e MQ-7 para CO, integrado a plataformas de controle como ESP32 ou Raspberry Pi; desenvolver um sistema de coleta e visualização de dados em tempo real para acompanhamento das condições do ambiente laboratorial; propor melhorias que integrem o monitoramento com conceitos da Indústria 4.0, incluindo Internet das Coisas (*IoT*), Big Data e inteligência artificial.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico para procedimentos técnicos no monitoramento de gases e automação laboratorial envolve a revisão de literatura, junto de estudos de caso, desenvolvimento de protótipos e testes de validação, além de estratégias de integração de tecnologias como *IoT* no projeto. Diversos estudos abordam os aspectos, destacando a importância de uma base sólida de conceitos e metodologias para garantir a eficácia e acurácia dos sistemas implementados.

A revisão de artigos, normas técnicas e das pesquisas, como apresentado pela referência [1], evidencia uma necessidade de fundamentar o desenvolvimento de ferramentas da automação voltadas ao monitoramento de

gases, incluindo a inferência de variáveis de difícil medição, além da manutenção de modelos de inferência e detecção de falhas. De acordo com a referência [2], reforça a importância de sensores eletrônicos de baixo custo como MQ-4 (utilizado para gás natural e metano) [3], MQ-7 (utilizado para monóxido de carbono) e MQ-135 (utilizado para medir amônia, óxido nítrico, álcool, benzeno, dióxido de carbono e fumaça) [4], são utilizados para detectar gases e são essenciais na automação laboratorial e industrial a fim de evitar acidentes de trabalho. A modelagem matemática constitui elemento fundamental neste contexto, fornecendo a base teórica para a conversão de sinais elétricos dos sensores em concentrações de gases. Neste âmbito, a equação de Nernst [5] desempenha papel central na calibração de sensores eletroquímicos de CO₂, como o MG-811, permitindo a relação entre o potencial elétrico medida e a concentração do gás detectada.

Sensores eletroquímicos como o MG-811 operam baseados em princípios de potencial de célula eletroquímica, onde a equação de Nernst descreve a dependência do potencial elétrico com a concentração do gás. A relação é expressa por:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{[Gás]}{[Gás]_{referência}}\right) \quad (1)$$

onde:

E - representa o potencial da célula;

E^0 - o potencial padrão;

R - a constante dos gases,;

T - a temperatura absoluta;

n - o número de elétrons transferidos;

F - a constante de Faraday.

Esta fundamentação teórica permitiu a implementação de algoritmos de conversão tensão-ppm nos microcontroladores, garantindo medições acuradas de CO₂.

De acordo com a referência [6], a aplicação prática de sensores e microcontroladores como ESP32 ou Raspberry Pi possibilita criar sistemas de monitoramento contínuo e em tempo real, integrando a coleta, transmissão e visualização de dados para o usuário. Estudos de caso, como o mencionado pela referência [7], demonstra que a adaptação de sistemas para monitoramento de parâmetros físicos e gases poluentes em ambientes industriais, contribui para o controle ambiental.

A implementação de sistemas automatizados para controle de acesso baseado em sensores e a utilização de plataformas *IoT* para monitoramento em tempo real são casos típicos de pesquisa aplicada, pois são desenvolvimentos práticos que atendem às demandas do setor segundo referência [7]. A configuração de sistemas *IoT* para coleta, transmissão e visualização de dados em tempo real é fundamental na automação laboratorial moderna. Segundo referência [2], essa integração facilita o gerenciamento remoto, análise de tendências ambientais e controle preventivo, ampliando a eficiência operacional.

A validação do sistema envolve testes em diferentes condições ambientais, aferindo precisão e confiabilidade dos sensores e algoritmos de inferência, como discutido por [8] em estudos sobre caracterização de sensores eletroquímicos

para análises ambientais. A incorporação de modelos matemáticos baseados na equação de Nernst é essencial para garantir a confiabilidade das inferências, permitindo compensação térmica e calibração precisa dos sensores eletroquímicos. A análise dos dados permite discutir os benefícios da automação na redução de riscos ambientais e na melhora da qualidade do ar em laboratórios industriais.

A automação é um componente central da Indústria 4.0, impulsionando a digitalização e interconexão dos processos produtivos, incluindo laboratórios industriais ([9]). Sistemas de Gerenciamento de Informações Laboratoriais (LIMS, do inglês *Laboratory Information Management System*) integrados a tecnologias como inteligência artificial, big data e *IoT* promovem automação avançada, garantindo maior eficiência operacional, rastreabilidade e precisão nas análises ([9]).

Sensores eletrônicos de baixo custo, como o MQ-135, são amplamente utilizados para detectar gases tóxicos e poluentes, incluindo amônia, dióxido de carbono e fumaça, sendo cruciais em sistemas automatizados de monitoramento ambiental e segurança em laboratórios e indústrias ([10]; [11]). Esses sensores, quando integrados a microcontroladores como ESP32, possibilitam sistemas de coleta, transmissão e visualização de dados em tempo real, com conectividade Wi-Fi e protocolos *IoT* facilitando o monitoramento remoto e a análise preditiva.

A convergência desses recursos com a *IoT* possibilita monitoramento contínuo das condições ambientais e controle preventivo, o que é essencial para a segurança ocupacional e a sustentabilidade, ao reduzir exposições a riscos e antecipar falhas ([12]; [13]). A validação dos sistemas automatizados, incluindo aferição da precisão dos sensores e algoritmos de inferência, é uma etapa crítica para assegurar a confiabilidade das medições e conformidade com normas técnicas ([14]; [15]). A integração de modelos matemáticos fundamentados na equação de Nernst complementa estas etapas de validação, oferecendo base teórica robusta para a calibração e compensação de variáveis ambientais nos sensores eletroquímicos de CO₂.

III. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa é fundamental para orientar o processo investigativo e garantir a validade dos resultados obtidos. Conforme a referência [16], os tipos de pesquisa se diferenciam pela natureza dos objetivos e dos métodos empregados, sendo adequados a diferentes fases e propósitos da pesquisa aplicada na área de segurança e automação em laboratórios industriais.

A pesquisa aplicada visa a resolução de problemas práticos específicos, ligados diretamente a contextos reais de aplicação. Nesse sentido, ela é essencial na área de segurança e automação em laboratórios industriais, pois busca soluções para melhorar a eficiência, precisão e segurança dos processos laboratoriais (referência [17]; referência [16]). Por exemplo, a implantação de sistemas automatizados para controle de acesso baseado em sensores e a utilização de plataformas *IoT* para o monitoramento em tempo real são casos típicos de pesquisa aplicada, pois são

desenvolvimentos práticos que atendem às demandas do setor (referência [18]).

A modalidade experimental é caracterizada pela manipulação de variáveis em ambientes controlados para observar seus efeitos sobre o objeto de estudo da referência [16]. No contexto da automação laboratorial, esta metodologia é usada quando se constrói um protótipo do sistema automatizado, testando suas funcionalidades sob condições específicas do laboratório, assegurando a confiabilidade dos resultados antes da aplicação definitiva.

A pesquisa exploratória tem papel inicial na delimitação do problema e levantamento de informações relevantes para direcionar os estudos subsequentes. Essa etapa inclui a revisão bibliográfica sobre automação, sensores, e Internet das Coisas (*IoT*) aplicada a laboratórios, permitindo o entendimento do estado da arte e identificação de lacunas (referência [19]). Essa fase é imprescindível para embasar teoricamente o desenvolvimento do protótipo e das soluções tecnológicas.

A pesquisa descritiva foi adotada para analisar e descrever dados coletados no experimento do projeto, evidenciando características e padrões sem manipulação das variáveis. Ela auxilia na interpretação dos resultados obtidos pelo protótipo automatizado, detalhando seu desempenho, vantagens e limitações da referência [16]. A análise descritiva garante que os resultados sejam compreendidos dentro do contexto específico dos laboratórios industriais.

Com base na metodologia de pesquisa adotada neste projeto explicada acima segue uma abordagem aplicada de natureza experimental, organizada em etapas sequenciais e objetivas para o desenvolvimento de um protótipo de monitoramento de gases para laboratórios industriais, que foi aplicada conforme a Figura 1.

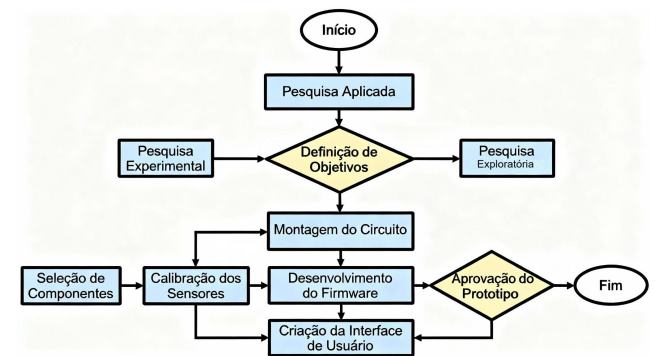


Fig. 1. Fluxograma da metodologia. (Fonte: Autor).

A primeira etapa consistiu na seleção criteriosa dos componentes eletrônicos adequados às necessidades do projeto. O microcontrolador ESP32 foi escolhido pela sua capacidade de gerar Wi-Fi, processamento, além de seu baixo consumo energético e compatibilidade com a plataforma Arduino IDE. Para a detecção de CO₂, foi selecionado o sensor MQ-135, que é um sensor de qualidade de ar (faixa de detecção muda conforme o gás) e conta com uma saída analógica. Para o monitoramento de monóxido de carbono (CO), foi utilizado o sensor MQ-7, capaz de detectar concentrações entre 20 a 2.000 ppm, operando com tensão de 5V e saída analógica e digital.

A segunda etapa envolveu uma montagem física do circuito. Inicialmente, conectou-se um USB para o ESP32 a partir de um notebook. O sensor MQ-135 foi conectado aos pinos analógicos do ESP32 (GPI034) para leitura dos valores de concentração de CO₂. Toda a montagem foi realizada utilizando jumpers para as conexões. Enquanto o sensor MQ-7 foi conectado aos pinos analógicos do ESP32 (GPI035) para leitura dos valores de concentração de CO. Para a alimentação dos sensores utilizou-se a saída 5V do ESP32 conectada aos pinos VCC de cada sensor.

A terceira etapa dedicou-se à calibração rigorosa dos sensores em ambiente aberto. Para o sensor MQ-7 e MQ-135, o procedimento iniciou-se com o aquecimento do sensor por no mínimo 3 minutos inicialmente para teste chegando até 2 horas (idealmente 24 horas para leituras estáveis) em ambiente externo com boa ventilação. Após o período de aquecimento, realizou-se a leitura de referência em ar fresco (aproximadamente 600 ppm de CO₂ no primeiro teste) para obter a tensão de ponto zero.

A quarta etapa consistiu no desenvolvimento do firmware utilizando linguagem C/C++ na IDE do Arduino. O código foi estruturado para realizar leitura contínua dos sensores MQ-7 e MQ-135 através das portas analógicas, aplicando as equações de calibração obtidas na etapa anterior para converter tensão em concentração (ppm). Implementou-se a rotina de armazenamento de dados em formato JSON na memória do ESP32 para histórico de medições. Foi programado um webserver local no ESP32 para transmissão de dados em tempo real via Wi-Fi, permitindo acesso remoto às leituras.

Durante a quinta etapa focou-se na criação da interface de usuário utilizando HTML, CSS e JavaScript. A página web foi projetada para exibir em tempo real as leituras dos sensores recebidos do ESP32, incluindo gráficos históricos dos dados armazenados em JSON. A interface foi otimizada para acesso tanto em desktops quanto em dispositivos móveis, permitindo monitoramento remoto contínuo. Integrou-se funcionalidade de *dashboard* com indicadores visuais do status do sistema e alertas em tempo real.

A sexta etapa compreendeu a realização de testes experimentais do protótipo em ambiente controlado, utilizando uma caixa de acrílico com dimensões de 15 × 15 × 15 cm. Os ensaios tiveram como objetivo avaliar a capacidade do sistema em realizar leituras e monitoramento em tempo real diante da exposição a diferentes processos de combustão. Para isso, foram conduzidos experimentos envolvendo a queima de graveto, magnésio e álcool etílico, possibilitando a análise do comportamento do protótipo frente à geração de gases e variações ambientais decorrentes de cada reação. Este ambiente fechado e estável permite observar e compreender com precisão o funcionamento do sistema sob condições controladas em testes e o que precisa ser melhorado para melhorar a precisão.

Na sétima etapa do desenvolvimento do protótipo, o sensor MQ-135 foi substituído pelo sensor eletroquímico MG-811 com o objetivo de aumentar a sensibilidade e a confiabilidade na detecção de dióxido de carbono (CO₂). Considerando que a resposta do MG-811 é dependente das condições ambientais, foi integrado ao sistema o sensor DHT11 para medição concomitante de temperatura e

umidade relativa do ar, permitindo a aplicação de um procedimento de compensação das leituras de CO₂. Em termos práticos, o processo de compensação consiste em registrar simultaneamente a tensão de saída do MG-811 e os valores de temperatura e umidade fornecidos pelo DHT11, e então aplicar ao sinal bruto um modelo de correção implementado no firmware. Esse modelo pode assumir forma analítica (por exemplo, correções lineares ou polinomiais ajustadas aos coeficientes obtidos em calibração) ou tabelas de compensação interpoladas geradas empiricamente. Usou-se uma curva de calibração do sensor em condições controladas, medindo respostas do MG-811 frente a concentrações de referência de CO₂ em pelo menos três níveis (baixa, média e alta) e repetindo essas medições para diferentes combinações de temperatura e umidade. A partir desses dados, ajustaram-se os parâmetros do modelo de compensação (ou constrói-se uma matriz de correção) que permita reduzir desvios sistemáticos causados por variações ambientais. Esse procedimento assegura maior estabilidade, reprodutibilidade e comparabilidade das medições do MG-811 em condições ambientais que podem variar.

Em seguida, com base no modelo adotado realizou-se o processo de calibração do sensor MG-811, compreendendo testes de medição em ambiente aberto para determinação da tensão de referência correspondente à concentração atmosférica de aproximadamente 400 ppm de CO₂. A calibração fundamentou-se na equação de Nernst com base no *datasheet* do MG-811, conforme implementado no firmware desenvolvido em linguagem C para a plataforma Arduino/ESP32. O procedimento de calibração utilizou os seguintes parâmetros fundamentais, conforme a tabela 1:

TABELA I
Parâmetros de Calibração e Constantes Utilizadas no Cálculo da Concentração de CO₂

Parâmetro	Valor	Descrição
V_CLEAN_AIR	0,51 V	Tensão em ar limpo
EMF_CLEAN_AIR	0,320 V	Potencial em ar limpo (~320 mV em 400 ppm)
REF_PPM	400,0 ppm	Concentração de referência
GAIN	$V_CLEAN_AIR/EMF_CLEAN_AIR$	Fator de ganho do sistema

NERNST_S LOPE	$0,0296 \times GAIN$	Inclinação da equação de Nernst
------------------	----------------------	---------------------------------------

A conversão da tensão lida para concentração em ppm considerou o ajuste térmico do slope pela temperatura, conforme a relação:

$$slope = 0,0296 \times \frac{T_k}{301,15} \times GAIN \quad (2)$$

onde:

T_k - representa a temperatura em Kelvin (base de referência: $28^\circ\text{C} = 301,15 \text{ K}$);

$GAIN$ - fator de ganho do sistema.

A concentração de CO_2 foi calculada mediante a expressão:

$$ppm = REF_PPM \times 10^{decades} \quad (3)$$

sendo que:

$$decades = \frac{V_{medida} - V_{CLEAN_AIR}}{slope} \quad (4)$$

Após a definição deste parâmetro de calibração, o protótipo foi redesenhado: aumentou-se o volume da câmara de ensaio para $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$ e substituiu-se o material da caixa por vidro, a fim de proporcionar melhor visibilidade e maior resistência térmica.

Posteriormente, foram conduzidos novos experimentos utilizando diferentes reações químicas e processos de combustão, incluindo a queima de magnésio, a combustão de etanol e a reação entre vinagre (quantidade de 10 ml) e bicarbonato de sódio (quantidade de uma colher de chá cheia) para analisar uma reação de longa duração. Estes testes permitiram avaliar o comportamento do sistema diante de diferentes perfis de emissão de CO_2 , bem como analisar a sensibilidade, a resposta temporal e a reprodutibilidade das medições, além de identificar limitações e oportunidades de melhoria no projeto.

Esta metodologia estruturada em etapas sequenciais garante rigor científico no desenvolvimento do protótipo, desde a concepção até a validação, estabelecendo uma base sólida para implementação futura em laboratórios industriais de maior escala.

IV. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

Inicialmente procedeu-se à montagem da parte eletrônica do protótipo. Uma fonte de alimentação alimentou o sistema composto pelo microcontrolador ESP32 e pelos sensores. No primeiro protótipo utilizaram-se os sensores MQ-7 e MQ-135, conectados aos pinos analógicos do ESP32 para aquisição das leituras. Ressalta-se que o MQ-135 responde a variações em vários poluentes e compostos orgânicos (incluindo sinais correlacionados ao CO_2), mas não fornece uma medição específica de CO_2 sem calibração e

compensações; o MQ-7 é específico para monóxido de carbono (CO) e requer aquecimento cíclico para leituras adequadas.

A programação do ESP32 foi realizada em C/C++ no ambiente Arduino IDE. O firmware foi desenvolvido para realizar a leitura periódica dos sensores, armazenar os dados em formato JSON na memória do dispositivo e disponibilizá-los via servidor web embarcado. A interface de usuário foi implementada com HTML, CSS e JavaScript, permitindo visualização em tempo real das leituras e do histórico de dados enviados pelo ESP32. A comunicação entre o navegador e o ESP32 foi implementada por meio de requisições HTTP assíncronas (AJAX); recomenda-se considerar WebSocket ou MQTT para maior eficiência em aplicações com alta taxa de atualização. A figura 2 mostra o conceito das requisições de leitura do sistema.

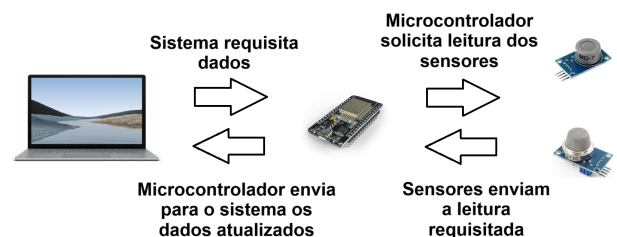


Fig. 2. Fluxograma de dados do primeiro protótipo. (Fonte: Autor.)

O primeiro protótipo foi testado em um ambiente controlado composto por uma caixa acrílica de dimensões $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$. Os ensaios seguiram um protocolo em duas fases: medições em ambiente aberto para coleta de linha de base, seguidas de testes em ambiente fechado para avaliar a evolução das concentrações sob condições restritas. Os materiais combustíveis usados nos testes foram papéis, gravetos, magnésio e etanol (álcool etílico); para cada experimento registrou-se a massa/volume do material, tempo de ignição e tempo de medição, a fim de garantir reprodutibilidade. As leituras iniciais permitiram avaliar o comportamento qualitativo dos sensores e a estabilidade da comunicação via web.

No segundo protótipo, projetado com maior volume de contenção, substituiu-se a caixa acrílica por uma câmara de vidro com dimensões $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}$. Nessa versão, o MQ-135 foi substituído pelo sensor MG-811, mais específico para detecção de dióxido de carbono, e adicionou-se um sensor DHT11 para monitoramento de temperatura e umidade relativa do ar. A escolha do MG-811 e do DHT11 visou melhorar a especificidade das medições de CO_2 e permitir correções por temperatura/umidade, fatores que afetam a resposta dos sensores eletroquímicos/óxido metálico.

Para garantir precisão e permitir comparação quantitativa, para garantir precisão e permitir comparação quantitativa, o sensor MG-811 foi calibrado antes dos ensaios. Um procedimento básico inclui: calibração em ar ambiente (para obter a resposta em 400 ppm como referência atmosférica) e, quando possível, comparação com um analisador de CO_2 de referência para ajustar a curva característica do sensor (tensão de saída vs concentração de CO_2) [22]. Também foram registrados a temperatura e a umidade com o sensor DHT11 e aplicar compensações se necessário.

Documentou-se a taxa de amostragem, o tempo de aquecimento do sensor e o formato do JSON (timestamp, identificação do sensor, leitura bruta, leitura calibrada), para assegurar reprodutibilidade dos resultados.

Temperature and Humidity Dependency :

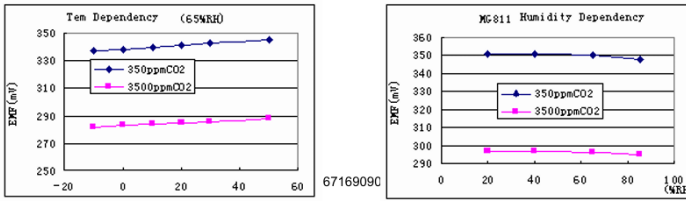


Fig. 3. Gráfico de resposta do sensor MG-811 a temperatura e umidade (Fonte: referência [22]).

Os testes do segundo protótipo seguiram o mesmo procedimento experimental que a versão inicial (fase de linha de base em ambiente aberto seguida de ensaios na câmara fechada com os mesmos materiais), com a vantagem de

medições de forma mais acuradas e maior resolução temporal e espacial das concentrações de CO_2 . A estrutura em vidro proporciona melhor observação direta dos fenômenos de combustão e facilita a instalação de acessórios complementares (por exemplo, sensores térmicos), aumentando a confiabilidade dos dados coletados e a robustez da comunicação web para monitoramento remoto.

Em suma, as etapas principais do desenvolvimento incluem: montagem elétrica com ESP32 e sensores (MQ-7 no primeiro protótipo e no segundo, MQ-135 substituído por MG-811 no segundo, com a adição do sensor DHT11), programação em C/C++ no Arduino IDE para a aquisição e publicação de dados em JSON via servidor web, e ensaios controlados em câmaras fechadas de diferentes materiais e dimensões, acompanhados de procedimentos de calibração e controle de variáveis para assegurar reprodutibilidade e precisão.

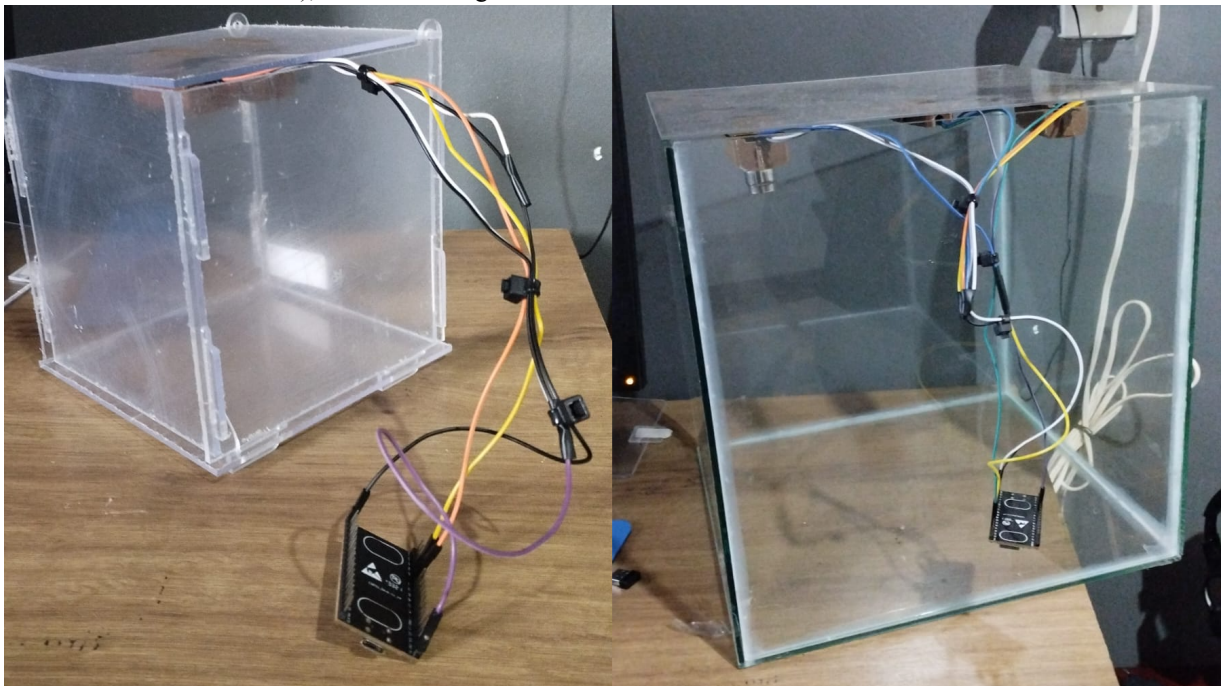


Fig. 4. Protótipos desenvolvidos durante o projeto: à esquerda, a versão inicial; à direita, a versão aprimorada . (Fonte: Autor)

V. ANÁLISES E DISCUSSÕES

O protótipo para detecção de CO e CO_2 em laboratório industrial foi desenvolvido com o microcontrolador ESP32, escolhido por sua conectividade Wi-Fi integrada (capaz de criar *Access Point*), processamento rápido e baixo consumo — características adequadas para monitoramento em tempo real. Inicialmente, para detecção de CO_2 , foi utilizado o sensor MQ-135, com faixa de 350–10.000 ppm, saída analógica de 0–2 V e compensação de temperatura integrada ([22], [23]). Para CO, foi empregado o sensor MQ-7, com faixa de 20–2.000 ppm, que utiliza óxido de alumínio em sua estrutura, típico de sensores capacitivos para medição de gases.

Inicialmente, o foco foi calibrar o sensor em um espaço aberto, permitindo testes gerais antes de expandir para ambientes controlados. O processo de calibração envolveu a exposição do sensor a concentrações conhecidas de CO_2 (exemplo: 400 ppm no ar fresco como referência principal [22]), ajustando parâmetros de leitura para garantir maior precisão nas medições mesmo em pequenas variações do gás. Durante a fase, foi implementado um *webservice* simples no ESP32 para envio dos dados de concentração de CO_2 a um servidor ou *dashboard* com gráfico, possibilitando a visualização e registro em tempo real, essencial para monitoramento contínuo ([24], [20]).

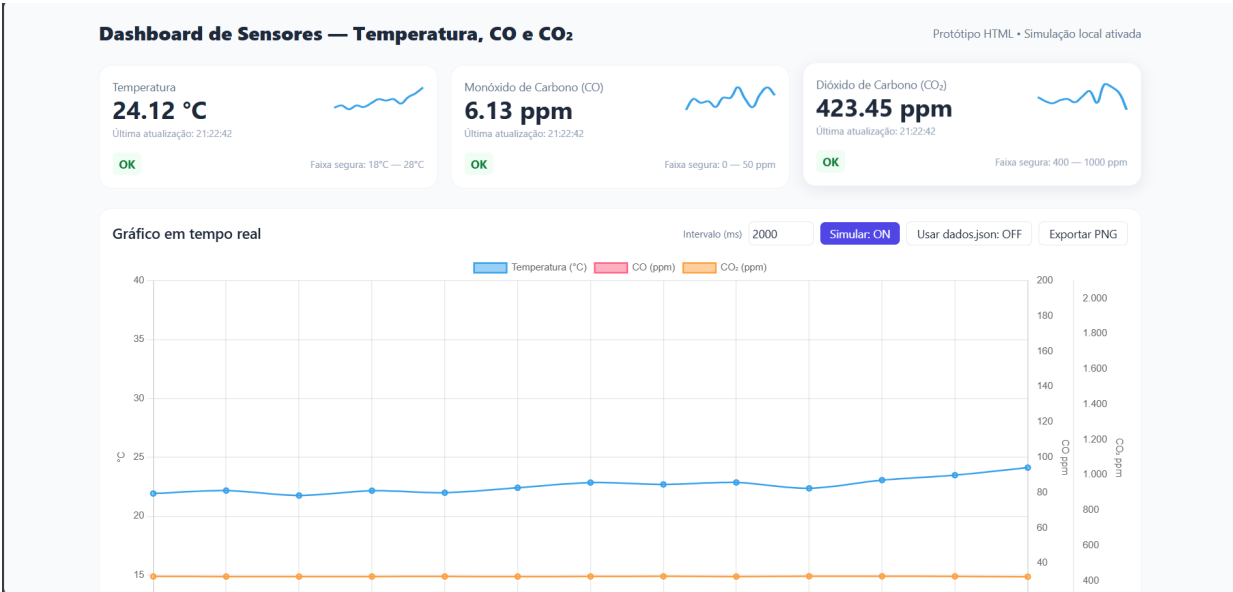


Fig. 5. Interface do sistema para usuário do primeiro protótipo (Ambiente aberto). (Fonte: Autor).

Os primeiros testes permitiram identificar tempo de resposta do sensor conforme a Figura 5, depois reduzir os ruídos e validar a precisão do sistema, criando uma base sólida inicial para implementação em laboratórios industriais maiores. Esse protótipo inicial serviu como referência para o desenvolvimento inicial de soluções escaláveis de monitoramento de CO₂, combinando *hardware* acessível, conectividade em nuvem e métodos rigorosos de calibração para garantir segurança e eficiência na detecção de gases em ambientes críticos ([22]; [23]; [21]). Os testes realizados com produtos tiveram o tempo de duração enquanto o produto existia ou tinha oxigênio suficiente, enquanto na tabela 2 mostra os valores que obtiveram-se nas leitura iniciais do primeiro protótipo.

Ambiente fechado (protótipo recém fechado)	1,3 V	800 - 860	—
Magnésio (Fica estável de acordo com ambiente)	—	—	Uma colher de chá
Etanol	+2.0V	+2.000	aprox. 2 tampas do produto

TABELA 2
Medições de CO₂ em Diferentes Materiais e Ambientes - MQ-135

Parâmetro	Valor	PPM	QTD
Ambiente aberto (jardim, Fig. 5)	0,7 V	380 - 460	—
Sala (Fig. 6)	1,6 V	1000 - 1100	—
Papel	1,0 V	700 - 750	papel (10x10cm)

Na fase subsequente, o protótipo foi aprimorado pela substituição do MQ-135 pelo sensor MG-811 para detecção de CO₂, e pela integração do sensor de temperatura e umidade DHT11 por sua sensibilidade à temperatura e umidade do ambiente. O MG-811, um sensor eletroquímico/semicondutor com saída analógica, apresenta sensibilidade significativa às condições térmicas e à umidade; por isso a equação de Nernst utilizada para converter potencial elétrico em concentração de CO₂ foi ajustada para incluir compensação por temperatura e umidade. A placa do sensor MG-811 possui um circuito integrado de amplificação e filtragem do sinal (ganho configurável e filtro passa-baixas de 1 Hz), fornecendo ao ADC do ESP32 um sinal mais estável e com menor influência de ruídos de alta frequência. A Figura 6 que mostra a interface inicial do segundo protótipo.

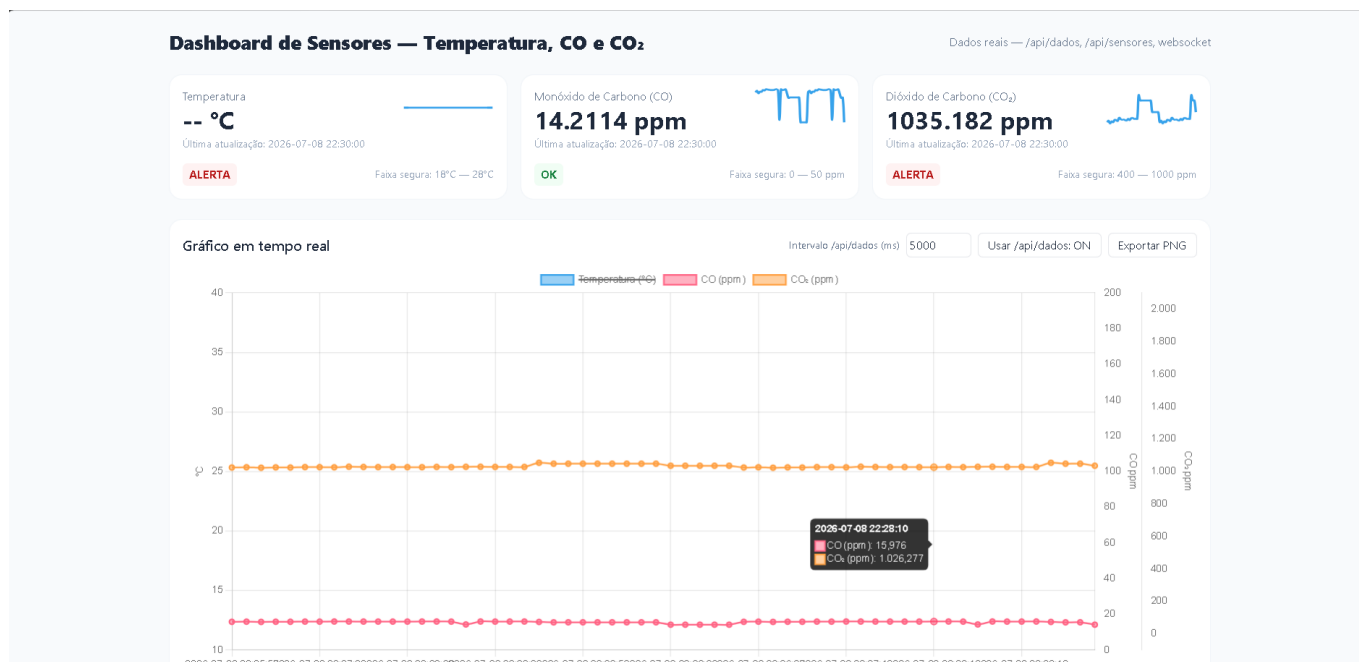


Fig. 6. Interface do sistema para usuário do segundo protótipo. (Fonte: Autor).

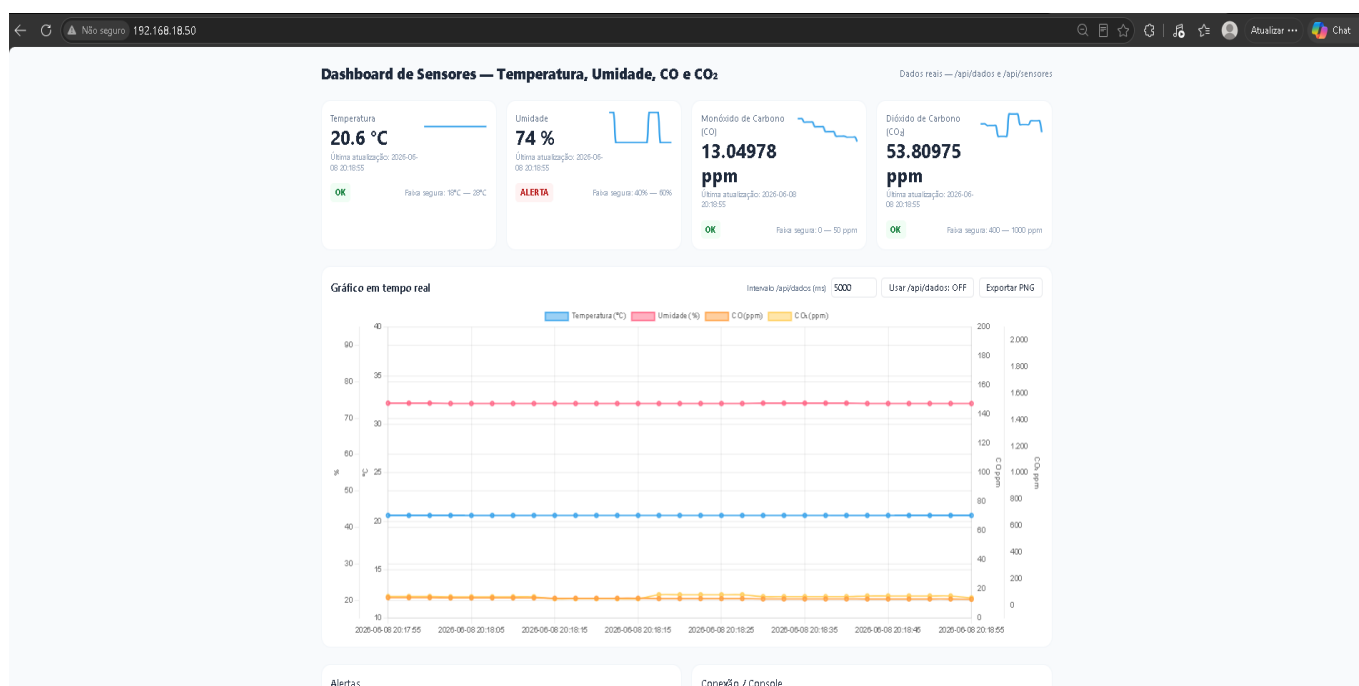


Fig. 7. Interface do sistema completa para usuário do segundo protótipo. (Fonte: Autor).

Conforme apresentado na Figura 7 (figura acima), observa-se o conjunto de dados coletados durante um intervalo de tempo. Nesta tela o usuário pode visualizar de forma contínua as leituras dos sensores de forma completa.

Os dados de temperatura (°C) e umidade relativa (%) coletados pelo DHT11 foram aplicados em duas etapas de processamento: (1) correção do parâmetro slope da equação de Nernst, ajustando a constante de inclinação segundo a relação empírica obtida em calibração controlada; e (2) aplicação de um algoritmo de compensação multivariável que corrige a tensão medida com base em regressão linear múltipla treinada com

conjuntos de dados obtidos em ar de referência sob diferentes condições ambientais. Para reduzir ruído e flutuações transitórias, implementou-se uma média móvel exponencial com constante de tempo de 30 s e um filtro de mediana sobre janelas de 5 leituras consecutivas; esses filtros preservaram a resposta a mudanças reais de concentração enquanto atenuaram picos espúrios.

Os testes experimentais foram realizados dentro da câmara de ensaio de 30 × 30 × 30 cm, com registro sistemático do sensor de temperatura (variando entre 20 - 30°C) e umidade relativa (entre 40 - 80%). Para cada combinação de temperatura/umidade foram feitos pelo

menos cinco ensaios repetidos com gás-padrão de CO₂ (400 ppm, 1000 ppm e 2000 ppm) e com fontes de combustão (etanol, magnésio), medindo-se tempo de resposta, tempo de recuperação e variabilidade entre repetições.

Como resultado, a configuração híbrida (MG-811 + DHT11 + condicionamento de sinal + filtros + compensação) apresentou os dados apresentados na Tabela 3. Ressalta-se que a precisão declarada considera incertezas associadas ao sensor de referência e às condições de calibração; recomenda-se recalibração periódica (por exemplo, mensal para uso contínuo) para mitigar a deriva temporal do sensor. A arquitetura de software mantém armazenamento de séries temporais em JSON, expõe leituras via webserver no ESP32 e permite o encaminhamento de dados a plataformas IoT (MQTT ou HTTP) para análise em nuvem e integração com sistemas de controle industrial [25], [26].

TABELA 3
Medições de CO₂ em Diferentes Materiais e Ambientes - MG-811

Parâmetro	Valor	PPM	QTD
Ambiente aberto (jardim, Fig. 8)	0,51 V	380 - 460	—

Sala (Fig. 9)	0,53 V	800 - 1000	—
Papel	0,52 V	700 - 750	Meia página de jornal
Ambiente fechado (protótipo recém fechado, Fig. 10)	0,51 V	400 - 550	—
Magnésio (Fica estável de acordo com ambiente)	—	—	Uma colher de chá
Etanol (álcool etílico)	+2.0V	+10.000	aprox. 2 tampas do produto

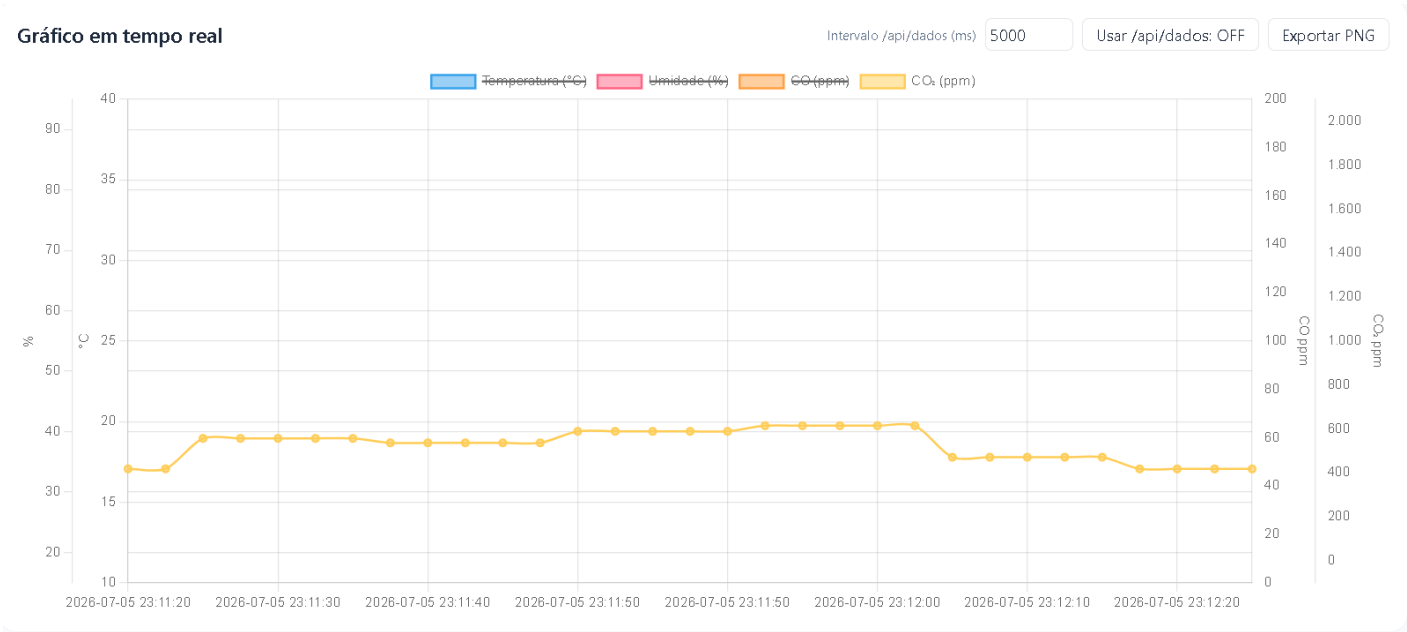


Fig. 8. Teste de ambiente aberto com MG-811. (Fonte: Autor).

Conforme apresentado na Figura 8, pode-se observar-se o conjunto de dados coletados durante um intervalo aproximado de 2 minutos. O principal objetivo desse ensaio foi realizar a calibração do sensor MG-811

em um ambiente inicialmente fresco, ou seja, por exemplo um jardim, permitindo avaliar o comportamento e a estabilidade das leituras em condições controladas.

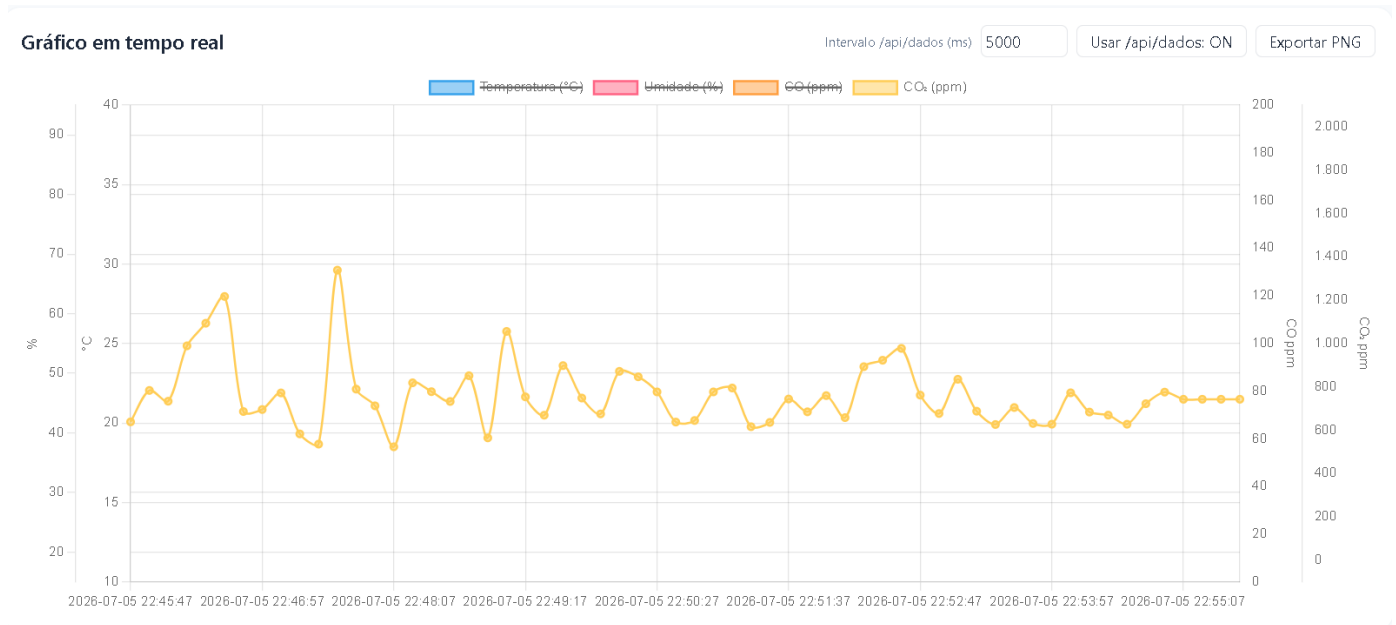


Fig. 9. Teste em sala com MG-811. (Fonte: Autor).

Conforme apresentado na Figura 9, observa-se o conjunto de dados coletados durante um intervalo aproximado de 10 minutos. O principal objetivo desse ensaio foi realizar a calibração do sensor MG-811 em um

ambiente interno residencial, permitindo avaliar o comportamento e a estabilidade das leituras em condições controladas.

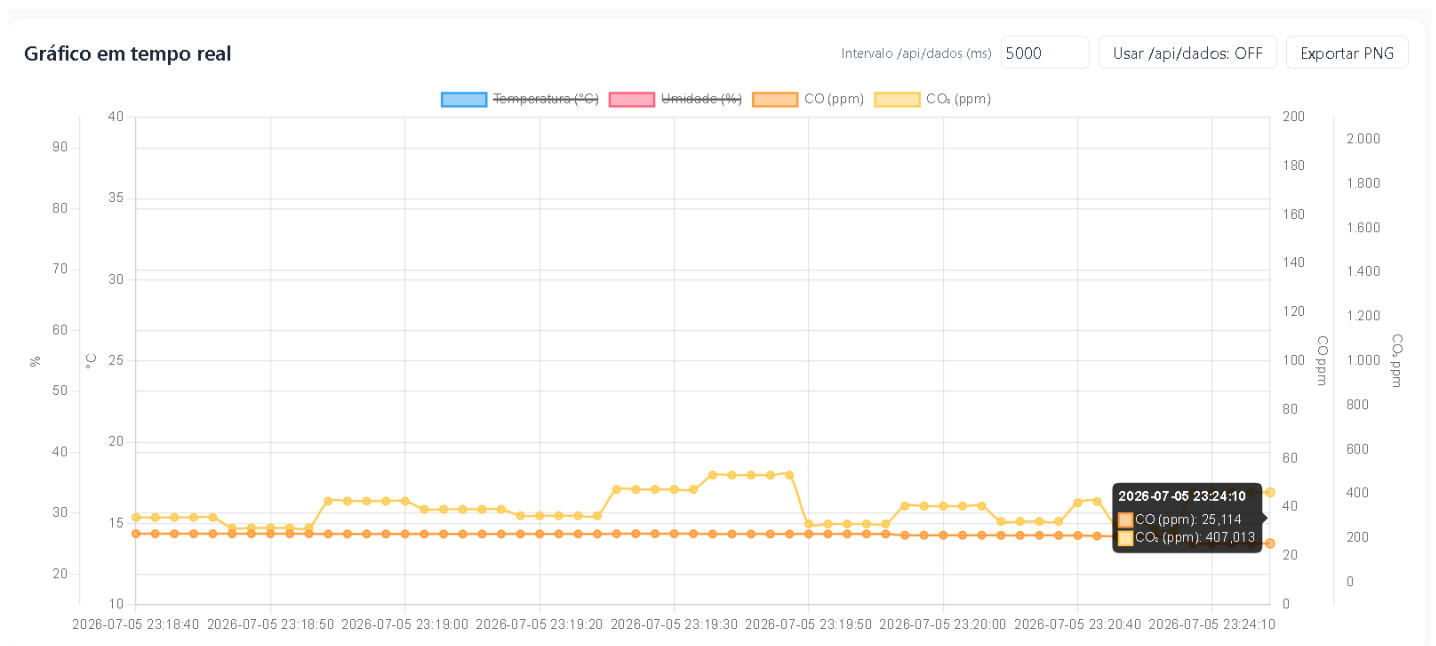


Fig. 10. Teste com protótipo fechado por cinco minutos MG-811. (Fonte: Autor)

Conforme apresentado na Figura 10, observa-se o conjunto de dados coletados durante um intervalo aproximado de 5 minutos. O ensaio teve como principal objetivo realizar a calibração do sensor MG-811 em um ambiente fechado com dimensões de $30 \times 30 \times 30$ cm, permitindo analisar seu comportamento e a estabilidade das leituras sob condições controladas.

VI. CONCLUSÕES

O protótipo desenvolvido para a detecção de CO_2 e CO demonstrou ser uma solução eficaz e prática, sendo combinado com o ESP32 em conjunto com os sensores MQ-135 e MQ-7 para monitoramento em tempo real em

laboratórios industriais. A calibração passou por testes iniciais em ambiente controlado, os quais permitiram assegurar a confiabilidade inicial das medições, além de estabelecer uma plataforma robusta para visualização dos dados por meio de um *webservice* integrado.

A proposta de adicionar outros sensores e um sistema de alertas multicamadas reforça o compromisso com a segurança, ampliando a capacidade de detecção e possibilitando respostas automáticas que minimizem riscos às pessoas. Assim, o projeto não só oferece uma ferramenta acessível e escalável para o controle da qualidade do ar, mas também tem potencial para contribuir para a prevenção de acidentes, podendo contribuir para ambientes laboratoriais mais seguros e eficientes.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, professor Julian Cezar Giacomini, pela valiosa orientação, incentivo e apoio durante todo o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. Sua experiência e dedicação foram fundamentais para que este estudo alcançasse sua qualidade e profundidade.

À coorientadora, química Aline Machado Zancanaro, registro meu especial reconhecimento pelo auxílio técnico na parte de análise química, contribuindo decisivamente para o rigor científico e precisão dos resultados apresentados. Sua colaboração foi imprescindível para o sucesso desta pesquisa.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste trabalho, deixo meu agradecimento sincero e gratidão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PARRETE, A. P. et al. Ferramentas de automação e machine learning para operação segura e ecoeficiente de combustão. 2019. Disponível em: <http://www.tpqb.eq.ufjf.br/download/ferramentas-de-automacao-e-machine-learning-para-operacao-segura-e-ecoeiciente-de-combustao.pdf>. Acesso em: 20 de outubro de 2025.
- [2] Oliveira, F. C. 2023. Elaboração de um sistema de monitoramento composto por sensores e componentes eletrônicos por meio da plataforma Arduino para acompanhamento de características específicas do biogás, Universidade Federal do Tocantins. Disponível em: <https://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/6148/1/FINAL%20Felipe%20Calixta%20Oliveira%20-%20Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>
- [3] UsinaInfo. Sensor MQ-7 Detector de Monóxido de Carbono CO₂. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/index.php?controller=attachment&id_attachment=142. Acesso em: 02 de novembro de 2025.
- [4] UsinaInfo. Sensor MQ-135 Detector de Gases. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/index.php?controller=attachment&id_attachment=151. Acesso em: 02 de novembro de 2025.
- [5] NERNST, W. Über die Anwendung der Thermodynamik auf die Elektrochemie. *Annalen der Physik und Chemie*, v. 23, p. 357–372, 1888.
- [6] SARJERÃO, Borade Samar; PRAKASARAO, Amara. A low cost smart pollution measurement system using REST API and ESP32. In: 2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT). IEEE, 2018. p. 1-5.
- [7] MACHADO, Christopher; BUENO, Felipe; RAUBER, Natan; CARDOSO, Luciano. Sistema para Monitoramento de Parâmetros Físicos e Químicos de Corpos D'Água. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE SOFTWARE LIVRE E TECNOLOGIAS ABERTAS (LATINOWARE), 17., 2020, Online. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2020. p. 117-125. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/18618/18448>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [8] SILVA, J. R. et al. Fabricação e caracterização de sensores eletroquímicos de baixo custo para análises ambientais. Londrina: Universidade Federal do Paraná, 2021. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/items/ed121b22-9c01-4473-8667-d5d120a70f94>. Acesso em: 10 jun. 2026.
- [9] INDÚSTRIA 4.0. Os laboratórios de controle de qualidade na indústria 4.0. Indústria 4.0, 2025. Disponível em: <https://www.industria40.ind.br/artigo/24804-o-futuro-laboratorios-controle-qualidade-era-industria-40>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- [10] AUTOCOREROBÓTICA. Sensor de Gás MQ-135. Fortaleza, 2025. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/sensor-de-gas-mq-135>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- [11] VIDA DE SILÍCIO, Portal. Sensor de Gás MQ-135 com Arduino. 2018. Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/sensor-de-gas-mq-135/>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- [12] TALKSCIENCE. O futuro da automação laboratorial: tendências e inovações. 2025. Disponível em: <https://www.talkscience.com.br/quimica-analitica/o-futuro-da-automacao-laboratorial-tendencias-e-inovacoes>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- [13] LABORATÓRIO GOES. Tecnologias que estão transformando o setor laboratorial. 2024. Disponível em: <https://laboratoriogoes.com.br/glossario/tecnologias-transformando-setor-laboratorial/>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- [14] MANUEL, P. P. *Desenvolvimento tecnológico e indústria petrolífera brasileira: as redes e estratégias do sistema produtivo submarino*. 2020. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Economia, Rio de Janeiro, 2020.. Disponível em:

- <https://www.ie.ufjf.br/images/IE/PPED/Teses/2020/TSE%20MANUEL%20PPED.pdf>.
- [15] VALIDAÇÃO HVAC E CONTROLE AMBIENTAL. 2025. Disponível em: <https://fivevalidation.com/pt-br/validacao-de-hvac-e-controle-ambiental/>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- [16] Gil, A. C. (2017). Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. Atlas.
- [17] Gerhardt, T. E., & Silveira, D. J. (2009). Métodos de Pesquisa. Atlas.
- [18] ROSÁRIO, A. T.; DIAS, J. C. How Industry 4.0 and Sensors Can Leverage Product Design: Opportunities and Challenges. *Sensors*, v. 23, n. 3, p. 1165, 2023. DOI: 10.3390/s23031165.
- [19] Costa Silva, A. da. (2024). Classificação Metodológica das Pesquisas Científicas. *Anais CONPEPE*.
- [20] LIMA, Marcelo. Protótipo de Estação para Monitoramento do Ambiente com ESP32. 2025. Dissertação (Mestrado em Gestão e Monitoramento Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/46626/1/Prot%C3%B3tipoEsta%C3%A7%C3%A3oMonitoramento.pdf>. Acesso em: 2 nov. 2025.
- [21] WJ Componentes. ESP32 na Indústria: Eficiência com Dados em Tempo Real. 2025. Disponível em: <https://www.wjcomponentes.com.br/esp32-na-industria>. Acesso em: 02 de novembro de 2025.
- [22] UsinaInfo. Sensor MG-811 Detector de Dióxido de Carbono CO2. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-gas-arduino/sensor-mg811-detector-de-dioxido-de-carbono-co2-5981.html>. Acesso em: 02 de novembro de 2025.
- [23] Smartkits. Sensor de Dióxido de Carbono CO2 MG811. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/sensor-de-dioxido-de-carbono-co2-mg811>. Acesso em: 01 de novembro de 2025.
- [24] Reddit. Calibrar MG-811 (sensor de CO2). 2020. Disponível em: https://www.reddit.com/r/arduino/comments/huoz4y/calibrate_mg811co2_sensor. Acesso em: 02 de novembro de 2025.
- [25] PAL, S. et al. Protocol-Based and Hybrid Access Control for the IoT. *Sensors*, v. 21, n. 10, 2021. Disponível em: PubMed Central (NCBI). Acesso em: 11 nov. 2025.
- [26] SILVA, J. de P. et al. Monitoramento eletrônico de gases poluentes. In: *Anais do INIC-2024*. 2024.