



Evento: XVI Seminário de Inovação e Tecnologia

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE CALIBRAÇÃO PARA SENSOR PIEZORESISTIVO DE CO₂ POR MANUFATURA ADITIVA¹

Jardel Matheus Volk², Luiz Antonio Rasia³

¹ Projeto de pesquisa desenvolvido na Unijuí.

² Estudante do curso Engenharia Mecânica, bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Tecnológica da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - PIBITI/UNIJUÍ.

³ Professor orientador do projeto Modelagem, Caracterização de Materiais, Desenvolvimento e Prototipagem de Dispositivos Eletromecânicos para a Indústria, Saúde e Bioengenharias, Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo.

INTRODUÇÃO

O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais gases relacionados ao fenômeno do aquecimento global e à poluição atmosférica em ambientes urbanos e industriais. Em concentrações elevadas, representa risco à saúde humana e animal, tornando essencial o monitoramento de seus níveis de ar. Nesse contexto, o desenvolvimento de sensores de baixo custo, simples e eficientes para a detecção de CO₂ surge como alternativa viável frente aos dispositivos comerciais convencionais que, frequentemente, apresentam custo elevado e complexidade de operação.

O presente trabalho insere-se no projeto de pesquisa desenvolvido junto ao GPMaD – Grupo de Pesquisa em Materiais e Dispositivos da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ). O projeto geral visa o desenvolvimento e a calibração de sensores piezoresistivos com substratos poliméricos e filmes de grafite, capazes de atuar na medida de umidade, temperatura e gases, com aplicações nas áreas médica, ambiental e de transporte, segundo as metodologias consolidadas pelo GPMaD e documentadas em artigos do PPGMMC – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática Computacional da Unijuí.

O objetivo específico deste trabalho consiste no projeto, em CAD SOLIDWORKS®, de um sistema de calibração para o sensor piezoresistivo de CO₂ com substrato de celulose e filme de grafite, bem como, na montagem prática dos componentes e na preparação do aparato para a posterior calibração do sensor. O trabalho dialoga com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da agenda 2030 da ONU, em especial o ODS 13 (Ação



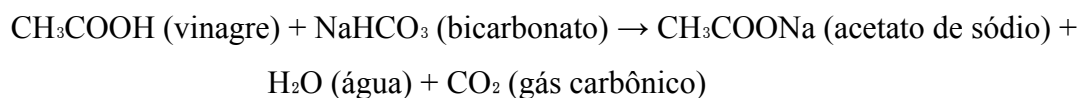
Contra a Mudança Global do Clima) e o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), dado o potencial de monitoramento ambiental dos sensores desenvolvidos pelo grupo de acordo com ANDRADES (2024), GABBi et al. (2019), KOTZ et al. (2019), RASIA et al. (2018) e RASIA et al. (2012).

METODOLOGIA

O desenvolvimento do sistema de calibração foi estruturado em duas etapas. A primeira, de setembro de 2025 a janeiro de 2026, concentrou-se no estudo teórico e revisão bibliográfica sobre sensores piezoresistivos e CO₂, bem como, no projeto da base em CAD. A segunda etapa, de janeiro a julho de 2026, compreendeu a impressão da base por manufatura aditiva, a montagem do circuito pneumático e os primeiros testes de funcionamento do sistema.

A base de calibração foi modelada no SOLIDWORKS®, buscando compacidade e economia de material. O modelo prevê espaços para duas garrafas PET de 200 mL, passagem de mangueiras e fixação da placa microcontroladora. O arquivo foi fatiado no software Cura e impresso em polímero por uma impressora 3D FDM de manufatura aditiva.

O princípio de operação do sistema baseia-se num circuito pneumático simples conforme sugere SOLOMONS et al. (2018): Garrafa 1 (geração de CO₂) → Garrafa 2 (armazenamento) → Seringa 2 (sensores). O CO₂ é produzido pela reação entre ácido acético (vinagre) e bicarbonato de sódio, conforme a equação química:



O vinagre é injetado na Garrafa 1 por meio de uma seringa; o CO₂ gerado percorre tubos de poliuretano (PU) até a Garrafa 2 e segue para a Seringa 2, onde se encontram os sensores. Uma válvula de escape de pressão garante a segurança do sistema. A vedação dos componentes foi realizada com fita PTFE e conexões pneumáticas de engate rápido. Para monitoramento das condições do ensaio, foram integrados o sensor de pressão e temperatura BMP280 e a placa microcontroladora ESP32, que substituíram os manômetros analógicos do laboratório, insuficientemente sensíveis para as pressões envolvidas da ordem de hPa.



Os materiais utilizados no sistema foram: base polimérica impressa por manufatura aditiva; duas garrafas PET 200 mL; fita PTFE (veda rosca); tubos de poliuretano de diversos diâmetros; conexões pneumáticas de engate rápido (retos, em T, redutores e válvula de escape); duas seringas com êmbolo; vinagre (CH_3COOH); bicarbonato de sódio (NaHCO_3); sensor BMP280; placa ESP32; jumpers; sensor piezoresistivo de CO_2 com substrato de celulose e filme de grafite (GPMaD); e balança de precisão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal resultado obtido até o presente momento é o sistema de calibração montado e operacionalmente estruturado, com todos os componentes físicos presentes, à exceção do acabamento final e da integração definitiva com o sensor piezoresistivo. O projeto da base em software foi concluído em dezembro de 2025, resultando em um modelo compacto com cortes para economia de material, bases para as garrafas e trilho para a placa microcontroladora. A impressão, realizada em junho de 2026, gerou uma base sólida em polímero, com geometria condizente com o projeto CAD, embora com ajustes dimensionais introduzidos durante a impressão no campus Panambi.

A montagem do circuito pneumático, com tubos PU, conexões de engate rápido e seringas, foi realizada com sucesso. A reação química entre vinagre e bicarbonato de sódio foi testada e confirmada funcional: a combinação de 5 mL de vinagre e 1,5 g de bicarbonato gerou produção visível de gás e pressão mensurável no sistema, sem vazamentos perceptíveis com a vedação em fita PTFE. Quantidades superiores foram avaliadas visualmente, também sem evidência de vazamentos.

A substituição dos manômetros analógicos pelo sensor digital BMP280, integrado à placa ESP32, representa um aprimoramento técnico relevante. O BMP280 opera com resolução de 0,01 hPa e permite leitura simultânea de temperatura, fornecendo dados complementares para a caracterização das condições do ensaio. O sistema microcontrolado também abre possibilidade de registro automatizado dos dados ao longo do tempo, ampliando a rastreabilidade do processo de calibração.



Embora resultados quantitativos de calibração não tenham sido obtidos nesta etapa, em virtude de atrasos na impressão da base e na entrega dos componentes eletrônicos, os desenvolvimentos realizados mostram a viabilidade técnica do aparato proposto e consolidam a infraestrutura necessária para os ensaios. A abordagem de baixo custo, com componentes reutilizáveis e estrutura em manufatura aditiva, mostra-se coerente com trabalhos anteriores do GPMaD na área de sensores piezoresistivos

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de calibração de baixo custo para sensores piezoresistivos de CO₂, com base impressa por manufatura aditiva e geração de gás via reação química entre vinagre e bicarbonato de sódio. Os principais avanços obtidos incluem: a modelagem completa da base em CAD, sua fabricação por impressão 3D, a montagem do circuito pneumático e a validação qualitativa da reação geradora de CO₂.

A integração dos componentes microcontrolados (BMP280 e ESP32) amplia a capacidade de monitoramento do sistema, tornando-o mais preciso e adequado para os ensaios de calibração. Ainda que a coleta de dados com o sensor piezoresistivo não tenha sido concluída nesta etapa, o aparato encontra-se praticamente completo e pronto para os experimentos, previstos para a segunda metade de 2026.

Como etapas futuras, prevê-se a integração definitiva do sensor BMP280 e do sensor piezoresistivo de CO₂, a realização dos ensaios de calibração, o acabamento final da base e a escrita e submissão de um novo artigo científico com os resultados consolidados.

Palavras-chave: Sensor piezoresistivo. Dióxido de carbono. Manufatura aditiva. Calibração. Grafite.

AGRADECIMENTOS



Agradeço à UNIJUÍ pelo financiamento por meio do PIBITI/UNIJUÍ, e ao orientador Prof. Dr. Luiz Antonio Rasia pela condução e apoio constantes ao longo do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADES, Carlos Eduardo; RASIA, Luiz Antônio; SCHWERTNER, Lucas. **Development of environmentally friendly sensor devices to monitor humidity.** Revista Caderno Pedagógico, Curitiba, v. 21, n. 10, p. 1–21, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n10-170.
- GABBI, R.; RASIA, L. A.; MULLER, D. C. M.; SILVA, J. A. G.; REIMBOLD, M. M. P. **Practical Approach Design Piezoresistive Pressure Sensor in Circular Diaphragm.** Journal of Materials Science and Engineering (A&B), v. 9, p. 85–91, 2019.
- KOTZ, D. A.; ANDRADES, C. E.; ROLIM, C. S.; RASIA, L. A.; VALDIERO, A. C. **Paper Substrates Tensile Testing Using Graphite Piezoresistors for Extraction of the Experimental Young Module.** SODEBRÁS, v. 14, p. 53–56, 2019. ISSN 1809-3957. DOI: 10.29367/issn.1809-3957.14.2019.158.53.
- RASIA, L. A.; ANDRADES, C. E.; HECK, T. G.; RASIA, J. **Approach Pencil-on-Paper to Flexible Piezoresistive Respiration Sensor.** In: Communications in Computer and Information Science. 1. ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2021. p. 290–298.
- RASIA, L. A.; PEDRALI, P. C.; VALDIERO, A. C. **Characterization of Piezoresistive Sensors of Graphite on Paper Substrate.** Proceedings of the LACCEI International Multiconference for Engineering, Education and Technology, v. 1, p. 1–6, 2018. ISSN 2414-639. DOI: 10.18687/LACCEI2018.1.1.327.
- SOLOMONS, T. W. Graham; FRYHLE, Craig B.; SNYDER, Scott A. **Química orgânica.** 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.