

GERADOR DE VAPOR COMPACTO PARA DETERMINAÇÃO DE MERCÚRIO EM ANÁLISES AMBIENTAIS¹

Letícia Souza Lima², Clara Carvalho Costa³, Keven Magalhães Santos⁴, Valfredo Azevedo
Lemos⁵, Uneliton Neves Silva⁶

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema compacto e de baixo custo para a geração e transporte de vapor de mercúrio, aplicado em técnicas analíticas baseadas em vapor frio. O dispositivo foi projetado em escala microlítica, empregando volumes reduzidos de amostra e reagente, favorecendo a economia de insumos, a segurança operacional e a diminuição da geração de resíduos. O sistema integra uma minibomba peristáltica para a adição controlada do redutor, uma bomba de ar para transporte do vapor e um mecanismo de agitação magnética miniaturizado, todos controlados por um microcontrolador Arduino. Os resultados indicaram desempenho satisfatório, com boa reprodutibilidade, precisão e portabilidade, além de simplicidade construtiva e baixo custo. Assim, o dispositivo apresenta potencial para análises ambientais, alimentares e biomédicas, atendendo à demanda por tecnologias acessíveis, seguras e sustentáveis.

PALAVRAS-CHAVE: Análise ambiental, Arduino, Mercúrio, Miniaturização, Vapor frio.

¹Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

² Bolsista de Iniciação Científica, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Laboratório de Química Analítica, Campus de Jequié, 45206-190, Jequié, Bahia. E-mail: limasouzaleticia18@gmail.com.

³ Bolsista de Iniciação Científica, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Laboratório de Química Analítica, Campus de Jequié, 45206-190, Jequié, Bahia. E-mail: claracostabr16@gmail.com.

⁴ Bolsista de Iniciação Científica, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Laboratório de Química Analítica, Campus de Jequié, 45206-190, Jequié, Bahia. E-mail: kevensantos1912@gmail.com.

⁵ Orientador, Professor Doutor, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Laboratório de Química Analítica, Campus de Jequié, 45206-190, Jequié, Bahia. E-mail: vlemos@uesb.edu.br.

⁶ Coorientador, Mestre, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Laboratório de Química Analítica, Campus de Jequié, 45206-190, Jequié, Bahia. E-mail: 2022m0123@uesb.edu.br.

COMPACT VAPOR GENERATOR FOR MERCURY DETERMINATION IN ENVIRONMENTAL ANALYSES¹

ABSTRACT

This work describes the development of a compact and low-cost system for mercury vapor generation and transportation, applied to cold vapor-based analytical techniques. The device was designed at a microliter scale, using small sample and reagent volumes, promoting reagent economy, operational safety, and reduced waste generation. The system integrates a peristaltic pump for controlled reductant addition, an air pump for vapor transportation, and a miniaturized magnetic stirring mechanism, all controlled by an Arduino microcontroller. The results demonstrated satisfactory performance, with good reproducibility, precision, and portability, as well as constructive simplicity and low cost. Therefore, the device shows potential for environmental, food, and biomedical analyses, meeting the demand for accessible, safe, and sustainable technologies.

KEYWORDS: Arduino, Cold vapor, Environmental analysis, Mercury, Miniaturization.

¹National Council for Scientific and Technological Development (CNPq).

² Undergraduate Research Scholar, State University of Southwestern Bahia, Analytical Chemistry Laboratory, Jequié Campus, 45206-190, Jequié, Bahia, Brazil. E-mail: limasouzaleticia18@gmail.com.

³ Undergraduate Research Scholar, State University of Southwestern Bahia, Analytical Chemistry Laboratory, Jequié Campus, 45206-190, Jequié, Bahia, Brazil. E-mail: claracostabr16@gmail.com.

⁴ Undergraduate Research Scholar, State University of Southwestern Bahia, Analytical Chemistry Laboratory, Jequié Campus, 45206-190, Jequié, Bahia, Brazil. E-mail: kevensantos1912@gmail.com.

⁵ Advisor, Ph.D., State University of Southwestern Bahia, Analytical Chemistry Laboratory, Jequié Campus, 45206-190, Jequié, Bahia, Brazil. E-mail: vlemos@uesb.edu.br.

⁶ Co-advisor, M.Sc., State University of Southwestern Bahia, Analytical Chemistry Laboratory, Jequié Campus, 45206-190, Jequié, Bahia, Brazil. E-mail: 2022m0123@uesb.edu.br.

INTRODUÇÃO

O mercúrio é um metal altamente tóxico, capaz de se acumular em organismos vivos e causar sérios danos à saúde, como distúrbios neurológicos, renais e hepáticos (CLARKSON; MAGOS, 2006). Sua determinação em amostras ambientais, alimentares e biológicas é essencial para o monitoramento da poluição (TAYLOR; KALMAN; CLARKSON, 2019). A técnica de geração de vapor frio (CV), associada à espectrometria (CV-AAS, CV-AFS), é bastante utilizada por sua sensibilidade e seletividade (HATCH; OTT, 1968; EPA, 1994), mas apresenta desvantagens como alto consumo de reagentes, geração de resíduos e custos elevados (NEMI, 2025).

A miniaturização e automação de sistemas surgem como alternativas promissoras. O uso de microcontroladores, como o Arduino, possibilita reduzir custos e controlar dispositivos como bombas peristálticas (CATAÑO et al., 2023; PARK et al., 2024). Além disso, equipamentos miniaturizados viabilizam análises portáteis em campo com desempenho comparável aos de bancada (LV et al., 2022). Assim, este trabalho buscou desenvolver um sistema compacto, de baixo custo e programável para geração de vapor de mercúrio, unindo portabilidade, simplicidade e eficiência (SOUZA; LIMA; PEREIRA, 2021).

MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema foi composto por três módulos: frasco reacional (~1 mL), conjunto de bombeamento/transporte e agitação magnética miniaturizada. A minibomba peristáltica realizou a adição controlada do redutor e a bomba de ar levou o vapor ao detector. O Arduino controlou tempos, volumes e fluxo, garantindo repetibilidade dos ensaios. As soluções foram preparadas a partir de padrões de mercúrio e reagentes P.A., utilizando SnCl_2 em meio ácido como redutor, preparado diariamente. A detecção foi feita por CV-AAS, com o dispositivo acoplado ao equipamento. Ensaios em triplicata avaliaram a reprodutibilidade, e os parâmetros operacionais foram comparados ao método EPA 245.1 para verificar o desempenho frente a protocolos convencionais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema compacto foi eficiente na geração e transporte de vapor de mercúrio, reduzindo significativamente o consumo de amostra (~500 μL) e de redutor (<1 mL), o que diminui custos e resíduos tóxicos. A automação via Arduino possibilitou controle preciso das etapas experimentais, resultando em sinais reprodutíveis no CV-AAS, com baixa dispersão em ensaios triplicados.

A portabilidade se destacou como vantagem frente aos sistemas convencionais, permitindo uso em campo e fácil manutenção com peças acessíveis. Em termos analíticos, o dispositivo apresentou limites de detecção compatíveis com a literatura, demonstrando confiabilidade e potencial de aplicação prática em diferentes matrizes. Assim, o estudo reforça que a miniaturização e automação favorecem tanto a sustentabilidade quanto a inovação em química analítica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema compacto desenvolvido apresentou resultados iniciais promissores, confirmando a viabilidade da proposta. A redução no consumo de amostras e reagentes, a menor geração de resíduos e o controle eletrônico preciso são diferenciais que tornam o dispositivo aplicável a diferentes contextos de análise. Embora em fase de aprimoramento, o equipamento possui potencial para uso em análises ambientais, alimentares e biomédicas, contribuindo para a disseminação de tecnologias acessíveis, sustentáveis e portáteis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CATAÑO, J. A. et al. **A user-centric 3D-printed modular peristaltic pump for microfluidics.** *Micromachines*, v. 14, p. 1035, 2023.
2. CLARKSON, T. W.; MAGOS, L. **The toxicology of mercury and its chemical compounds.** *Critical Reviews in Toxicology*, v. 36, n. 8, p. 609–662, 2006.
3. EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Method 245.1: Determination of mercury in water by cold vapor atomic absorption spectrometry.** Rev. 3.0. 1994.
4. HATCH, W. R.; OTT, W. L. **Determination of submicrogram quantities of mercury by atomic absorption spectrophotometry.** *Analytical Chemistry*, v. 40, n. 14, p. 2085-2087, 1968.
5. LV, Z. et al. **Portable and miniature mercury analyzer using direct analysis approach.** *Analytica Chimica Acta*, v. 1239, p. 340846, 2022.
6. NEMI – NATIONAL ENVIRONMENTAL METHODS INDEX. **EPA-NERL: 245.1 Mercury by CVAA – Method Summary.** 2025.
7. PARK, W. et al. **Microscale flow control and droplet generation using low-cost Arduino-based pneumatic control system.** *Biosensors*, v. 14, n. 10, p. 469, 2024.
8. SOUZA, M. V.; LIMA, J. F.; PEREIRA, E. **Miniaturized systems for mercury determination: advances and perspectives.** *Microchemical Journal*, v. 168, p. 106451, 2021.
9. TAYLOR, A.; KALMAN, D. A.; CLARKSON, T. W. **Mercury in human health.** *Environmental Toxicology and Chemistry*, v. 38, n. 8, p. 1583–1595, 2019.