

DESENVOLVIMENTO DE SENSOR ELETROQUÍMICO PARA PREVENÇÃO DE CORROSÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO - Projeto de Pesquisa

MAGDA DIAS GONÇALVES RIOS¹; FERNANDO LUIS DE ALMEIDA²

¹Fatec de Osasco Prefeito Hirant Sanazar - Coordenadoria de Tecnologia Manutenção Industrial

²Fatec de Itaquera Professor Miguel Reale - Coordenadoria de Tecnologia Automação Industrial
magda.rios@fatec.sp.gov.br

Development of an Electrochemical Sensor for Prevention in Cooling Systems – Research Project

Eixo Tecnológico: *Controle e Processos Industriais*

Resumo

Este projeto de pesquisa tem como objetivo principal adaptar um sensor eletroquímico para aplicação em sistemas de refrigeração, com foco em sua utilização em um protótipo de sistema de resfriamento. A proposta se justifica pela necessidade de prevenir a corrosão em sistemas industriais e laboratoriais, considerando que falhas associadas à presença de íons agressivos, como o cloreto, podem comprometer a integridade dos componentes metálicos e elevar os custos operacionais. Sensores eletroquímicos aplicados a sistemas hídricos são ferramentas eficazes para antecipar processos corrosivos e otimizar a manutenção preventiva. A metodologia envolve uma etapa inicial de revisão bibliográfica, seguida pela capacitação no uso de técnicas eletroanalíticas. Em seguida, serão realizados testes com soluções padrão e simulações em laboratório, visando à adaptação do sensor para o protótipo da torre de resfriamento. Após essa fase, serão conduzidos testes em campo, a fim de avaliar a sensibilidade e a estabilidade do sensor em condições reais de operação. O projeto será conduzido com a participação de docentes e estudantes da FATEC, promovendo a integração entre ensino, pesquisa aplicada e extensão tecnológica. Espera-se validar a eficiência do sensor para detecção em tempo real de íons corrosivos e criar subsídios para sua futura aplicação em sistemas industriais de maior porte.

Palavras-chave: *Sensor eletroquímico, sistemas de refrigeração, prevenção de corrosão.*

Abstract

This research project aims to adapt an electrochemical sensor for application in cooling systems, focusing on its use in a prototype of a cooling tower. The proposal is justified by the need to prevent corrosion in industrial and laboratory systems, considering that failures associated with the presence of aggressive ions, such as chloride, can compromise the integrity of metallic components and increase operational costs. Electrochemical sensors applied to water systems are effective tools for anticipating corrosive processes and optimizing preventive maintenance. The methodology includes an initial bibliographic review, followed by the training of scholarship students in the use of electroanalytical techniques. Next, tests with standard solutions and laboratory simulations will be carried out to adapt the sensor to the prototype. After this phase, field tests will be conducted to evaluate the sensor's sensitivity and stability under real operating conditions. The project will be conducted with the participation of faculty and students from FATEC, promoting the integration of teaching, applied research, and technological extension. The goal is to validate the efficiency of the sensor for real-time detection of corrosive ions and to provide a foundation for its future application in larger industrial systems.

Key-words: *Electrochemical sensor, cooling systems, corrosion prevention.*

1. Introdução

A corrosão em torres de resfriamento é um desafio recorrente enfrentado por diversos setores industriais, sendo responsável por perdas estruturais, aumento do consumo energético e redução da vida útil de componentes metálicos. A presença de íons agressivos, como cloreto (Cl^-), amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), é um dos principais fatores que aceleram os processos

corrosivos em sistemas de resfriamento de água. Entre os impactos mais críticos estão a formação de incrustações, vazamentos, falhas mecânicas e paradas não programadas.

Estudos de caso revelam que fabricantes industriais podem registrar perdas anuais superiores a US\$ 250.000 devido à corrosão não monitorada [2], enquanto instituições acadêmicas já enfrentaram substituições completas de tubulações após falhas decorrentes de corrosão por cloreto de amônio. Métodos tradicionais de controle da qualidade da água, como coletas pontuais e análises laboratoriais, não são capazes de fornecer dados em tempo real, limitando a eficácia de ações preventivas. [3] demonstraram, em testes anteriores, a viabilidade da aplicação de sensores eletroquímicos para detecção de íons cloreto em amostras de sistemas de resfriamento, com resultados promissores quanto à sensibilidade e estabilidade da resposta.

Além disso, [2] destacam os sensores com impressão molecular como ferramentas inovadoras no monitoramento contínuo da qualidade da água. Diante disso, este projeto propõe a adaptação de um sensor eletroquímico previamente desenvolvido para um protótipo didático de torre de resfriamento, com o objetivo de monitorar, em tempo real, íons corrosivos. Também se pretende estender os testes para sistemas reais de resfriamento em campo industrial, promovendo a integração entre ensino técnico, pesquisa aplicada e desenvolvimento tecnológico

2. Materiais e métodos

2.1. Materiais

Os materiais e reagentes que serão utilizados neste estudo foram selecionados com base nos protocolos de preparação e funcionalização de sensores eletroquímicos, conforme descrito na literatura especializada. Para os procedimentos de limpeza química dos eletrodos, será utilizado ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 98%, diluído a $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, com o objetivo de realizar a limpeza física das superfícies metálicas. A lavagem final será feita com água deionizada (DI), e a secagem ocorrerá sob fluxo de gás nitrogênio (N_2). Nos procedimentos de limpeza eletroquímica e funcionalização do sensor [4], serão empregados ácido nítrico (HNO_3) $0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) $0,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, com a finalidade de remover impurezas orgânicas e ativar a superfície eletroquímica. A deposição de cloreto será realizada em meio de KCl $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, enquanto as medições eletroquímicas serão conduzidas em solução de KNO_3 $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, escolhida por sua estabilidade e baixa interferência. Os polímeros 1,2-diaminobenzeno ($\text{C}_6\text{H}_8\text{N}_2$) e Anilina, serão utilizados na formação da camada seletiva sobre o eletrodo de trabalho, por apresentar boa condutividade e propriedades de dopagem.

Para a execução dos experimentos, serão utilizados os seguintes equipamentos:

- Analisador eletroquímico AutoLab PGSTAT302N, que será empregado para aquisição e análise dos sinais eletroquímicos;
- Hotplate Velp, modelo ARE, que será utilizado para aquecimento controlado das soluções;
- Multímetro digital Minipa, modelo ET2042C, para medições auxiliares de voltagem e corrente;
- Agitador eletromagnético Basi, modelo C-3 Cell, que será utilizado para homogeneização das soluções durante os ensaios;
- Computador com software Nova 2.1, que será utilizado para controle do potenciostato e análise dos dados experimentais.

2.2. Metodologia

A metodologia adotada neste projeto baseia-se nos procedimentos descritos por [1] com foco na aplicação de sensores modificados para detecção de íons em sistemas de resfriamento. Primeiramente, será realizada uma revisão bibliográfica. Em seguida, alguns dos participantes do projeto serão capacitados em práticas de eletroquímica e montagem de sensores conforme apresentado por Silva na Fig. 1.[5]. Serão utilizados eletrodos sobre pastilha de alumina, com modificação quando necessário. As análises serão feitas por voltametria cíclica e cronoamperometria com soluções-padrão. Após validação em bancada, os sensores serão integrados a um protótipo de uma torre de resfriamento.

Fig. 1 – Esquema de um protótipo de um eletrodo com conexão de cabos e trilhas



Fonte: Silva (2019)

3. Resultados e Discussão

Até o momento, os dados obtidos são preliminares, mas indicam que sensores eletroquímicos modificados com polímeros condutores, como o 1,2 diaminobenzeno e a anilina, apresentam resposta adequada para detecção de íons nitrato e cloreto em solução padrão [1]. Técnicas como voltametria cíclica e cronoamperometria devem permitir a avaliação da sensibilidade, seletividade e estabilidade dos sensores, com base na metodologia proposta por [1] e [3].

Durante o desenvolvimento do protótipo, os resultados serão apresentados de forma gráfica e comparados com dados da literatura técnica, destacando as vantagens do uso de sensores eletroquímicos, como resposta rápida, baixo custo e possibilidade de monitoramento contínuo [3]. Espera-se também obter micrografias dos sensores antes e depois da exposição às amostras, com escala métrica adequada, para analisar possíveis alterações na superfície ativa.

A discussão futura será baseada em parâmetros como limite de detecção, tempo de resposta e estabilidade operacional, e buscará demonstrar o potencial do sensor para uso prático em sistemas reais de resfriamento industrial.

4. Considerações finais

O projeto de pesquisa proposto visa contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias aplicadas ao monitoramento da corrosão em sistemas de resfriamento, por meio da adaptação de sensores eletroquímicos sensíveis e seletivos. Espera-se que, ao final do estudo, os sensores desenvolvidos apresentem desempenho satisfatório tanto em bancada quanto em protótipo didático, validando sua aplicabilidade futura em sistemas industriais reais. Além do

Anais da VIII Mostra de Docentes em RJI

avanço tecnológico, o projeto também tem impacto na formação prática de estudantes dos cursos superiores de tecnologia, promovendo a integração entre ensino, pesquisa e inovação. A construção e os testes do protótipo permitirão a disseminação do conhecimento técnico-científico em contextos educacionais, além de estimular soluções sustentáveis e de baixo custo para problemas industriais relacionados à corrosão.

5. Referências

- [1] ALMEIDA, F. L. Desenvolvimento de sensores eletroquímicos utilizando polímeros condutores para aplicações ambientais. 2014. **Tese** (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- [2] MUKENDI, K. A. et al. An in-depth review of molecularly imprinted electrochemical sensors as an innovative analytical tool in water quality monitoring: architecture, principles, fabrication, and applications. **Micromachines, Basel**, v. 16, n. 3, p. 1–26, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-666X/16/3/251>. Acesso em: 8 abr. 2025
- [3] SANTI, I. M. O.; ALMEIDA, F. L.; RIOS, M. D. G.; SILVA, E. C. B. Determinação de íons cloreto utilizando sensores eletroquímicos em amostras de resfriamento. **In: CONBRAVA – Congresso Brasileiro de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação, Aquecimento e Tratamento do Ar**, 16., 2019, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABRAVA, 2019.
- [4] ALMEIDA, F. L.; SANTOS-FILHO, S. G. Ativação da superfície de eletrodos de ouro utilizando condicionamento eletroquímico. In: **Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro)**, 2013, São Paulo. *Anais...* São Paulo: IEEE, 2013. DOI: 10.1109/SBMicro.2013.6676168. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/261505735>. Acesso em: 11 abr. 2025
- [5] SILVA, Edson Catulo Bento da. Determinação eletroquímica de íons cloreto em águas de resfriamento. 2019. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Tecnologia em Refrigeração, Ventilação, Aquecimento e Ar-condicionado) – Faculdade de Tecnologia de Itaquera Professor Miguel Reale, Centro Paula Souza, São Paulo, 2019.