

## **ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA UTILIZANDO REDES NEURAIAS NA ÁREA DE PETRÓLEO E GÁS**

Davi Gonçalves Nascimento (PIBIC/CNPq);  
Pedro Henrique Carvalho Novaes (Petrobras/SIGITEC);  
Victor Flavio Andrade Araujo (Orientador);  
Carlos Gustavo Pereira Moraes (Orientador)  
davi.gnascimento@souunit.com.br;

Universidade Tiradentes/Ciência da Computação/Aracaju/SE.

**1.00.00.00-3 - Ciências Exatas e da Terra; 1.03.00.00-7 - Ciência da Computação**

### **RESUMO**

As condições de extração de petróleo e gás no pré-sal brasileiro favorecem a formação de estruturas alotrópicas de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e corrosão nas tubulações devido ao alto índice de  $\text{CO}_2$ , íons de cálcio e salinidade (Gabielli et al., 1997; Angelo, 2023). É conhecido que através da espectroscopia de impedância eletroquímica pode-se extrair informações sobre a formação dessas estruturas, principalmente nesse contexto, aragonita e calcita. A distinção entre esses polimorfos é crítica, pois eles apresentam assinaturas eletroquímicas distintas que refletem diferentes morfologias e propriedades de adesão às estruturas de aço carbono (Marin-Cruz et al., 2004). Novas ferramentas para a análise desses dados surgiram, sendo essas implementando redes neurais artificiais para a classificação dos espectros coletados, conseguindo ser mais eficiente e confiável quanto a velocidade do processamento e escalabilidade (Doonyapisut et al., 2023), principalmente comparado às técnicas tradicionais, que consistem de uma análise realizada por um experiente eletroquímico para comparar os espectros com os circuitos equivalentes relacionados, sendo essa última muito subjetiva e dependente do nível técnico e capacidade do profissional, que pode levar a diagnósticos errados ou manutenções inadequadas (Macdonald, 1987; Wang et al., 2021). O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e aplicar modelos de inteligência artificial (Redes Neurais Convolucionais - CNNs e Redes Neurais Informadas com Física - PINNs) para a identificação, classificação e quantificação das incrustações de  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de cálcio) em tubulações na área de petróleo e gás. PINNs são uma nova classe de aproximadores de função universal que são treinados para solucionar tarefas de aprendizado supervisionado enquanto respeitam quaisquer leis da física dadas por equações diferenciais parciais não lineares (PDEs). Ao incorporar as leis físicas que governam a dinâmica de um sistema (que, neste caso, seriam as equações que definem o circuito equivalente associada a cada estrutura química), as PINNs utilizam esse conhecimento prévio como um agente de regularização. Essa codificação da física restringe o espaço de soluções e amplifica o conteúdo informacional dos dados, permitindo que o modelo generalize bem e seja eficiente em dados, mesmo com poucos exemplos de treinamento (Raissi et al., 2019). Em essência, as PINNs enriquecem o deep learning com a capacidade preditiva da física matemática, permitindo a regressão precisa de parâmetros eletroquímicos como resistências ( $R_s$ ,  $R_t$ ), capacitâncias ( $Q$ ), e o coeficiente de Warburg ( $\sigma$ ). Este uso combinado de CNNs e PINNs promete uma ferramenta rápida, não enviesada e escalável para identificar as formas de  $\text{CaCO}_3$  (aragonita, calcita) e aproximar o estado de incrustação nas tubulações.

**PALAVRAS-CHAVE:** Espectroscopia de impedância, Redes Neurais, Petróleo e Gás

## ABSTRACT

The extraction conditions for oil and gas in the Brazilian pre-salt favor the formation of calcium carbonate  $\text{CaCO}_3$  allotropic structures and corrosion in tubings due to high levels of  $\text{CO}_2$ , calcium ions, and salinity (Gabrielli et al., 1997; Angelo, 2023). It is known that electrochemical impedance spectroscopy (EIS) can be used to extract information about the formation of these structures, particularly aragonite and calcite in this context. The distinction between these polymorphs is critical, as they exhibit distinct electrochemical signatures that reflect different morphologies and adhesion properties to carbon steel structures (Marín-Cruz et al., 2004). New tools for the analysis of this data have emerged, implementing artificial neural networks for the classification of collected spectra, achieving greater efficiency and reliability in terms of processing speed and scalability (Doonyapisut et al., 2023). This is especially true when compared to traditional techniques, which consist of an analysis performed by an experienced electrochemist to compare the spectra with related equivalent circuits. The latter approach is highly subjective and dependent on the technical level and capacity of the professional, which can lead to incorrect diagnoses or inadequate maintenance (Macdonald, 1987; Wang et al., 2021).

The main objective of this work is to develop and apply artificial intelligence models (Convolutional Neural Networks - CNNs and Physics-Informed Neural Networks - PINNs) for the identification, classification, and quantification of  $\text{CaCO}_3$  (calcium carbonate) scaling in oil and gas pipelines. PINNs are a new class of universal function approximators that are trained to solve supervised learning tasks while respecting any given physical laws defined by non-linear partial differential equations (PDEs). By incorporating the physical laws governing the system's dynamics (which, in this case, would be the equations defining the equivalent circuit associated with each chemical structure), PINNs utilize this prior knowledge as a regularization agent. This encoding of physics constrains the solution space and amplifies the informational content of the data, allowing the model to generalize well and be data-efficient, even with few training examples (Raissi et al., 2019). In essence, PINNs enrich deep learning with the predictive capability of mathematical physics, enabling the precise regression of electrochemical parameters such as resistances ( $R_s$ ,  $R_1$ ), capacitances ( $Q$ ), and the Warburg coefficient ( $\sigma$ ). This combined use of CNNs and PINNs promises a fast, unbiased, and scalable tool for identifying the forms of  $\text{CaCO}_3$  (aragonite, calcite) and approximating the scaling status in the pipelines.

**KEYWORDS:** Electrochemical Impedance Spectroscopy, Neural Networks, Oil and gas

### REFERÊNCIAS/REFERENCES:

GABRIELLI, C. et al. Study of calcium carbonate scales by electrochemical impedance spectroscopy. **Electrochimica Acta**, v. 42, n. 8, p. 1207-1218, 1997

MARIN-CRUZ, J. et al. Characterization of different allotropic forms of calcium carbonate scales on carbon steel by electrochemical impedance spectroscopy. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 34, p. 337-343, 2004.

DOONYAPISUT, D. et al. Analysis of Electrochemical Impedance Data: Use of Deep Neural Networks. **Advanced Intelligent Systems**, 2023.

MACDONALD, J. R. Impedance Spectroscopy and its use in analyzing the steady-state AC response of solid and liquid electrolytes. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 223, p. 25-50, 1987.

RAISSI, M.; PERDIKARIS, P.; KARNIADAKIS, G. E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. **Journal of Computational Physics**, v. 378, p. 686-707, 2019.