

WIRESSENSE: ANÁLISE DE CAUSA RAIZ EM ROMPIMENTOS DE FIO ESMALTADO POR ABORDAGEM MULTIFATORIAL COMBINANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E ESTATÍSTICA INDUSTRIAL

Vitor Melchiorretto¹, Mauricio Aronne Pillon², Tathiana Duarte Amarante³, Dhyonatan Santos de Freitas⁴

^{1,2} Universidade do Estado de Santa Catarina — UDESC

^{3,4} Centro Universitário SENAI Santa Catarina — UniSENAI/SC

1. Introdução

A esmaltação de fios de cobre e alumínio compõe a cadeia produtiva de motores elétricos e eletrodomésticos. Rompimentos do fio durante a passagem pelo forno geram refugo de material, paradas de linha e custos operacionais associados. A determinação da causa raiz desses eventos envolve duas hipóteses concorrentes e empiricamente correlacionadas: defeito de matéria-prima (MP) e falha de equipamento (EQ). Abordagens isoladas, baseadas apenas em estatística histórica de lotes ou apenas em detecção de anomalia em sensores, produzem diagnósticos ambíguos quando os sinais físicos das duas causas se sobrepõem [1]. Este trabalho apresenta o WireSense, pipeline de análise multifatorial que combina estatística não paramétrica e aprendizado de máquina não supervisionado em uma tabela de decisão entre MP e EQ.

2. Método

A arquitetura é composta por uma Base de curadoria de eventos e dois Pilares investigativos independentes, integrados por uma matriz de decisão. O Pilar MP computa, para cada lote, a taxa de rompimento relativa à taxa de referência histórica do material [2], consolidada por média ponderada das horas de exposição quando o lote operou em múltiplos materiais, e transformada em percentil empírico que define faixas de risco. Um indicador adicional de cruzamento mensura a propagação do mesmo lote entre máquinas distintas, associado à hipótese de contaminação difusa por matéria-prima. O Pilar EQ treina um modelo Isolation Forest [3] por máquina, aplicado a janelas temporais anteriores ao rompimento sobre um conjunto de sensores de processo selecionados por critério de cobertura. O escore de anomalia é mapeado a percentis e categorizado em faixas operacionais. A Integração aplica os sinais dos dois pilares à matriz de decisão, produzindo um diagnóstico final entre matéria-prima, equipamento ou inspeção. Uma das regras da matriz reforça a hipótese de matéria-prima quando o lote rompe em equipamentos sem anomalia operacional concomitante, separando as duas hipóteses na decisão final.

3. Discussão

A complementaridade entre os dois pilares investigativos sustenta o desenho da abordagem. Cada componente, isoladamente, apresenta limitações conhecidas. O Pilar MP, ao consolidar a taxa relativa por média ponderada de exposição em lotes que operam em múltiplos materiais, está sujeito à diluição do sinal estatístico quando o rompimento se concentra em um subconjunto restrito de máquinas ou materiais, comportamento previsível em métricas de razão de taxas aplicadas a populações heterogêneas [2]. O Pilar EQ, por sua vez, é vulnerável ao efeito material-induced machine anomaly: matéria-prima fora de especificação pode induzir estresse mecânico ou térmico ao equipamento momentos antes da quebra, elevando o escore de anomalia operacional e conduzindo, na análise isolada do sensor, a uma atribuição equivocada à máquina [1]. A Integração foi desenhada como contrapeso a essas limitações. A Integração reforça a hipótese de matéria-prima quando a estatística do lote é diluída pela agregação e o equipamento não sustenta evidência de falha; reciprocamente, a categoria de inspeção isola eventos em que ambos os pilares se manifestam simultaneamente, remetendo o caso à inspeção humana. A tabela de decisão funciona como registro rastreável da decisão diagnóstica, compatível com requisitos de

qualidade industrial [4]. A validação empírica do método encontra-se em curso em parceria industrial, com resultados a serem reportados em trabalho subsequente.

4. Resultados Esperados e Trabalhos Futuros

Espera-se que a aplicação sistemática da abordagem contribua em duas frentes complementares. No plano operacional, a separação automatizada entre causas associadas a matéria-prima e a equipamento tende a reduzir o esforço de investigação manual de eventos individuais, concentrando a inspeção humana nos casos efetivamente ambíguos remetidos à categoria de inspeção. No plano analítico, a manutenção de um registro estruturado das decisões diagnósticas viabiliza estudos retrospectivos de tendência por fornecedor, por material e por máquina, dando suporte a ações de gestão da qualidade que dependem de séries históricas consolidadas. A própria estrutura da matriz de decisão permanece extensível, permitindo a incorporação de pilares investigativos adicionais à medida que novas fontes de evidência se tornem disponíveis no processo industrial. Os trabalhos futuros contemplam a quantificação do desempenho diagnóstico em casos validados externamente, a caracterização sistemática do efeito material-induced machine anomaly e a generalização da abordagem para outras etapas críticas da cadeia produtiva.

4. Referências

- [1] M. A. Belay, S. S. Blakseth, A. Rasheed and P. Salvo Rossi, *Sensors*, 23, 2844, (2023).
- [2] G. Zhu, Y. Wen, K. Cao, S. He and T. Wang, *Front. Public Health*, 12, 1377685, (2024).
- [3] C. Li, L. Guo, H. Gao and Y. Li, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 70, 1-12, (2021).
- [4] K. Peng, K. Zhang, B. You, J. Dong and Z. Wang, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 63, 2615-2624, (2016).

Agradecimentos

Os autores agradecem à WEG pela parceria, pelo financiamento deste estudo, pelo fornecimento dos dados industriais e pelo acesso ao contexto operacional que viabilizaram a pesquisa, bem como ao Centro Universitário SENAI Santa Catarina (UniSENAI/SC) e à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) pelo suporte institucional.