

Manutenção Inteligente por Meio da Fusão de Dados: Uma Metodologia para Análise de Criticidade em Sistemas Industriais

Cleiton Ferreira dos Santos, Eduardo de Freitas Rocha Loures e Eduardo Alves Portela Santos

Na manufatura moderna, a gestão da manutenção deixou de ser uma atividade de suporte para se tornar um fator estratégico de excelência operacional. À medida que os sistemas produtivos evoluem sob os princípios da Indústria 4.0, cresce a pressão sobre as empresas para equilibrar desempenho, segurança e custo em tempo real. As ferramentas tradicionais de avaliação de risco, baseadas em critérios fixos e no julgamento de especialistas, enfrentam dificuldades para lidar com ambientes industriais ricos em dados e em constante transformação.

Nesse contexto, uma metodologia inteligente — denominada DTMAid-PM2A (*Digital Twin for Maintenance*

Aid Based on Process Mining and Multicriteria Analysis) — propõe integrar métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM) e técnicas de mineração de processos para apoiar a priorização da manutenção e a análise de criticidade. Ao combinar dados quantitativos do chão de fábrica com a experiência qualitativa de operadores e técnicos, a metodologia busca identificar elementos críticos, otimizar recursos e aprimorar a qualidade das decisões de manutenção.

O DESAFIO: CONECTAR EXPERIÊNCIA HUMANA E INTELIGÊNCIA DE DADOS

A gestão da manutenção envolve decisões complexas e

cheias de *tradeoffs*. Os gestores precisam determinar quais ativos demandam atenção imediata, quais falhas apresentam maior risco e como distribuir recursos limitados para maximizar confiabilidade e desempenho. Contudo, essas decisões são frequentemente tomadas com base em informações incompletas ou conflitantes.

Modelos tradicionais tendem a depender apenas de dados históricos ou exclusivamente da experiência dos operadores, criando lacunas significativas. Dados isolados carecem de contexto e podem mascarar nuances operacionais, enquanto o julgamento humano, sem suporte analítico, pode ignorar padrões sutis capturados por sensores

e registros de processo. Em ambientes produtivos complexos, essa desconexão pode levar a má priorização, paradas não planejadas e ciclos de manutenção ineficientes.

Com a ascensão dos gêmeos digitais e da manufatura inteligente, as decisões de manutenção precisam ser dinâmicas e contextuais. O foco não está apenas em detectar falhas, mas em compreender seus impactos no ecossistema produtivo. Para isso, torna-se essencial

A metodologia combina duas disciplinas complementares: a mineração de processos, responsável por extrair padrões e indicadores quantitativos a partir dos logs de eventos industriais, e a tomada de decisão multicritério, que estrutura os julgamentos humanos diante de critérios conflitantes. No modelo proposto, métodos como AHP (*Analytic Hierarchy Process*) e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*)

DA INFORMAÇÃO À AÇÃO: COMO O MODELO É IMPLEMENTADO

A implementação do DT Maid-PM2A segue uma lógica de três etapas interconectadas. A primeira consiste na seleção e ponderação de indicadores, definindo métricas que representem o comportamento do equipamento, o desempenho do processo, o impacto econômico e os fatores de riscos. Em seguida, a mineração de processos

A solução proposta não está em coletar mais dados, mas em integrar conhecimento quantitativo e qualitativo de forma estruturada.

dispor de sistemas de apoio à decisão capazes de integrar dados heterogêneos, avaliar múltiplos critérios de desempenho e evoluir conforme as mudanças das condições operacionais, características que a metodologia DT Maid-PM2A procura efetivar.

A METODOLOGIA: UNINDO MINERAÇÃO DE PROCESSOS E DECISÃO MULTICRITÉRIO

A solução proposta não está em coletar mais dados, mas em integrar conhecimento quantitativo e qualitativo de forma estruturada. Os dados objetivos (extraídos diretamente dos registros de eventos dos processos) revelam o comportamento real dos equipamentos, enquanto o conhecimento dos especialistas fornece o contexto necessário para interpretar tais informações e transformá-las em ação.

são utilizados em sequência para ponderar critérios, comparar alternativas e produzir um ranking de risco e criticidade robusto, compreensível e adaptável.

Dessa integração emerge um sistema de apoio à decisão equilibrado, capaz de assegurar que tanto as percepções qualitativas quanto as evidências quantitativas contribuam efetivamente para a priorização final.

transforma registros operacionais em conhecimento acionável, revelando gargalos, frequências de atividades e dados temporais. Por fim, a análise de risco e criticidade, baseada nos métodos multicritério, classifica os ativos conforme seu grau de vulnerabilidade.

O resultado é um ranking dinâmico de criticidade, que permite identificar quais ativos exigem manutenção

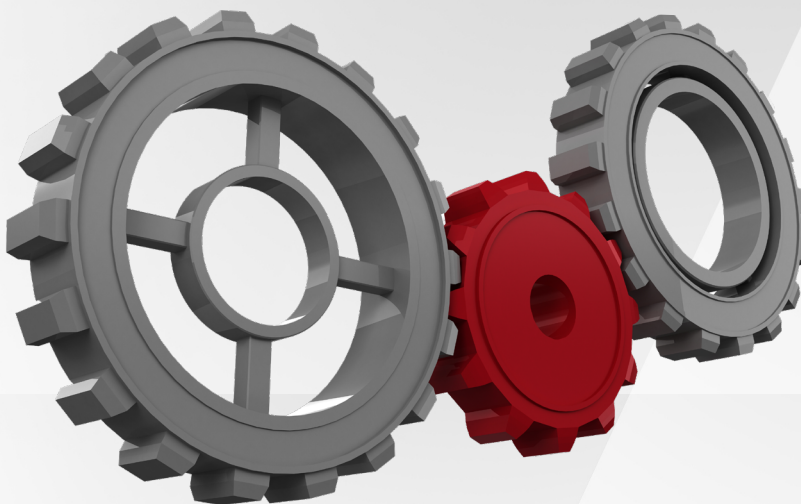


Image by creativeart on Freepik

imediate e como ajustes em indicadores ou pesos podem alterar as prioridades. Essa característica adaptativa torna o modelo especialmente útil em ambientes voláteis, nos quais mudanças tecnológicas ou produtivas são frequentes.

RESULTADOS E PERSPECTIVAS: RUMO À MANUTENÇÃO INTELIGENTE

Os benefícios da metodologia são amplos. Ao basear as

tecnológicas, regulatórias ou estratégicas da organização.

Para gestores industriais, isso se traduz em melhor alocação de recursos, redução de custos e aumento da disponibilidade dos equipamentos. Integrado a plataformas de gêmeo digital, o modelo também abre espaço para simulações e análises preditivas em tempo real, aproximando-se de um ecossistema de manutenção autônoma.

No horizonte da Indústria 5.0, que enfatiza a colabora-

Embora o estudo tenha sido desenvolvido para o contexto da manutenção industrial, seus princípios podem ser aplicados a diversos setores, como saúde, gestão da qualidade, planejamento da produção, logística, operações, energia e aeroespacial. Qualquer domínio que enfrente decisões multicritério sob incerteza pode se beneficiar dessa abordagem, ajustando indicadores e fontes de dados ao seu próprio ambiente.

Em síntese, a metodologia

A metodologia DT Maid-PM2A representa um avanço significativo na direção da manutenção inteligente e centrada em dados.

decisões em evidências concretas, a priorização de ativos torna-se mais precisa e menos sujeita a vieses individuais. O equilíbrio entre análise quantitativa e julgamento humano garante decisões mais justificáveis e transparentes. Além disso, a capacidade de ajustar pesos e indicadores conforme o contexto confere flexibilidade e adaptabilidade, permitindo que o modelo evolua junto com as mudanças

ção cognitiva entre humanos e máquinas, a metodologia DT Maid-PM2A se encaixa como ferramenta estratégica: os sistemas analíticos oferecem apoio à decisão baseado em dados, enquanto o especialista mantém o controle e a capacidade de julgamento. Assim, o operador não é substituído, mas potencializado, atuando com maior precisão e confiança diante de situações complexas.

DT Maid-PM2A representa um avanço significativo na direção da manutenção inteligente e centrada em dados. Ao combinar mineração de processos, decisão multicritério e conhecimento humano, ela estabelece uma ponte sólida entre o dado e a ação, fortalecendo o papel da manutenção na era digital.



Image by awesomecontent on Freepik

PESQUISADORES



Cleiton Ferreira dos Santos

Doutor em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS) pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Possui experiência em tomada de decisão multicritério, mineração de processos, aprendizado de máquina e manutenção industrial, com interesse em sistemas de apoio à decisão, transformação digital, Indústria 4.0 e 5.0 e gêmeos digitais.



Eduardo de Freitas Rocha Loures

Professor titular na Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR) e na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Atua nas áreas de sistemas de apoio à decisão, manutenção industrial, interoperabilidade empresarial, transformação digital, Indústria 4.0 e 5.0, sistemas ciberfísicos e gêmeos digitais



Eduardo Alves Portela Santos

Professor da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e atua nas áreas de mineração de processos, apoio à decisão em manutenção, interoperabilidade e transformação digital. Desenvolve pesquisas em sistemas industriais e de saúde aplicando análise de dados e técnicas de monitoramento preditivo.

Contato: eduardo.loures@pucpr.br

Referência

- Santos, C.F.; Loures, E.F.R.; Santos, E.A.P. (2025). A Smart Framework to Perform a Criticality Analysis in Industrial Maintenance Using Combined MCDM Methods and Process Mining Techniques. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 136, pp. 3971-3987. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13193-8>

