

32^a SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

ARQUITETURA INTEGRADA MCC E IA
GENERATIVA PARA MANUTENÇÃO
PRESCRITIVA DE LOCOMOTIVAS
FERROVIÁRIAS: UM CASO APLICADO AO
SUBSISTEMA DE TURBOALIMENTAÇÃO

Autor: Paulo Balaca



Sumário

FUNDAMENTAÇÃO

- Contexto: a lacuna entre diagnóstico e ação
- Revisão sistemática da literatura

ARQUITETURA TÉCNICA

- Integração de Conceitos
- Arquitetura Railway 4.0: do gateway aos dashboards

CASO DE APLICAÇÃO

- sobrealimentação de locomotivas
- Fluxo prescritivo: Da anomalia à OS auditável

GOVERNANÇA E RESULTADOS

- Conformidade RAMS (EN 50126 / EN 50129)
- Resultados empíricos e redução de MTTR

CONCLUSÃO

- Contribuições à gestão de ativos ferroviários
- Roadmap para validação em frota real

A lacuna entre o diagnóstico e a ação eleva a latência decisória em ativos críticos

O Gargalo da Manutenção Analítica

“Prever a falha não significa necessariamente saber qual ação executar.”

A telemetria embarcada e a inteligência analítica de fato reduziram as falhas não programadas na ferrovia. Contudo, o grande desafio continua sendo converter prognósticos em instruções de reparo imediatas e padronizadas.

Limitações da Manutenção Preditiva Tradicional

- **Fragmentação Operacional**

Alertas surgem em dashboards de monitoramento, mas o embasamento técnico continua disperso em FMEAs e manuais.

- **Latência Decisória Crítica**

O intervalo de tempo entre a emissão do alerta e a abertura efetiva da Ordem de Serviço (OS) amplia o risco operacional.

- **Variabilidade de Interpretação**

Especialistas diferentes interpretam os mesmos sintomas de degradação e alarmes de formas inconsistentes.

- **Rastreabilidade Indisponível**

A conexão causal direta entre a evidência física da telemetria e a ação recomendada raramente é auditável.

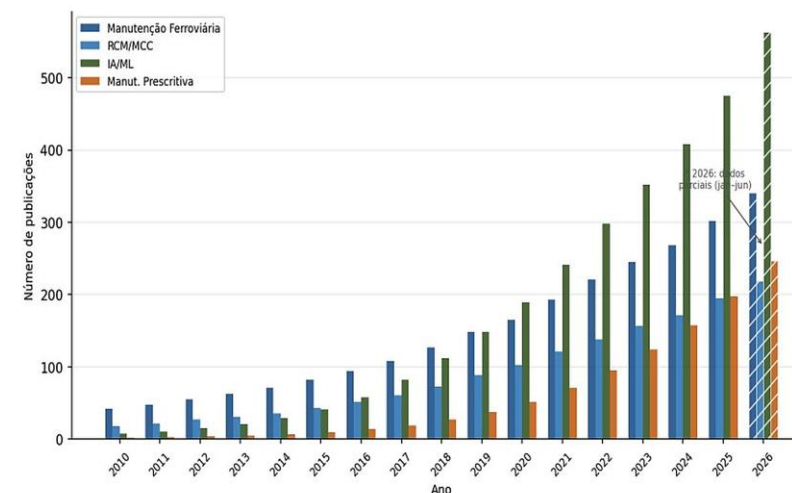
Revisão de 295 estudos revela baixa integração entre confiabilidade e inteligência artificial

295

DOCUMENTOS CIENTÍFICOS

Análise sistemática abrangendo o período de 1997 a 2026 nas bases globais Scopus e Web of Science, mapeando a evolução da manutenção preditiva à prescritiva.

CRESCIMENTO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA (2010–2026)



Fonte: Elaboração própria, nas bases Scopus e WoS (2026).

01. Predominância Preditiva

Maioria das publicações foca em prognóstico, sem propor ações concretas.

02. Desconexão IA e MCC

Baixíssima articulação entre confiabilidade estruturada e IA Generativa.

03. Subuso de Fontes OEM

Documentação técnica de fabricantes pouco explorada nas decisões.

04. Ausência de Normas RAMS

Raro alinhamento com normas formais como a EN 50126.

Unindo a lógica de confiabilidade do MCC à inteligência de síntese da IA Generativa

Conceito MCC / RCM

Garante a lógica estruturada de confiabilidade, priorizando tarefas críticas e identificando as funções do sistema.

Análise FMEA / FMECA

Estrutura as relações de causa e efeito, catalogando os modos de falha, sintomas físicos e sua severidade severa.

Modelagem IA Analítica

Processa séries temporais de sensores de campo para prognóstico da integridade do ativo e cálculo de RUL.

Motor de RAG

Recupera com precisão cirúrgica as seções pertinentes do fabricante original (OEM) e as planilhas FMEA de referência.

Modelos LLM

Sintetiza de forma clara e contextualizada o racional de reparo e redige as instruções de trabalho formais.

Módulo XAI

Provê explicabilidade e rastreabilidade absoluta, evidenciando as fontes técnicas que fundamentam cada recomendação.

DA MANUTENÇÃO PREDITIVA À MANUTENÇÃO PRESCRITIVA
"A Inteligência Artificial recomenda e contextualiza. O Especialista valida e aprova.
O sistema registra de forma imutável para auditorias de segurança."

INTEGRAÇÃO DE CONCEITOS

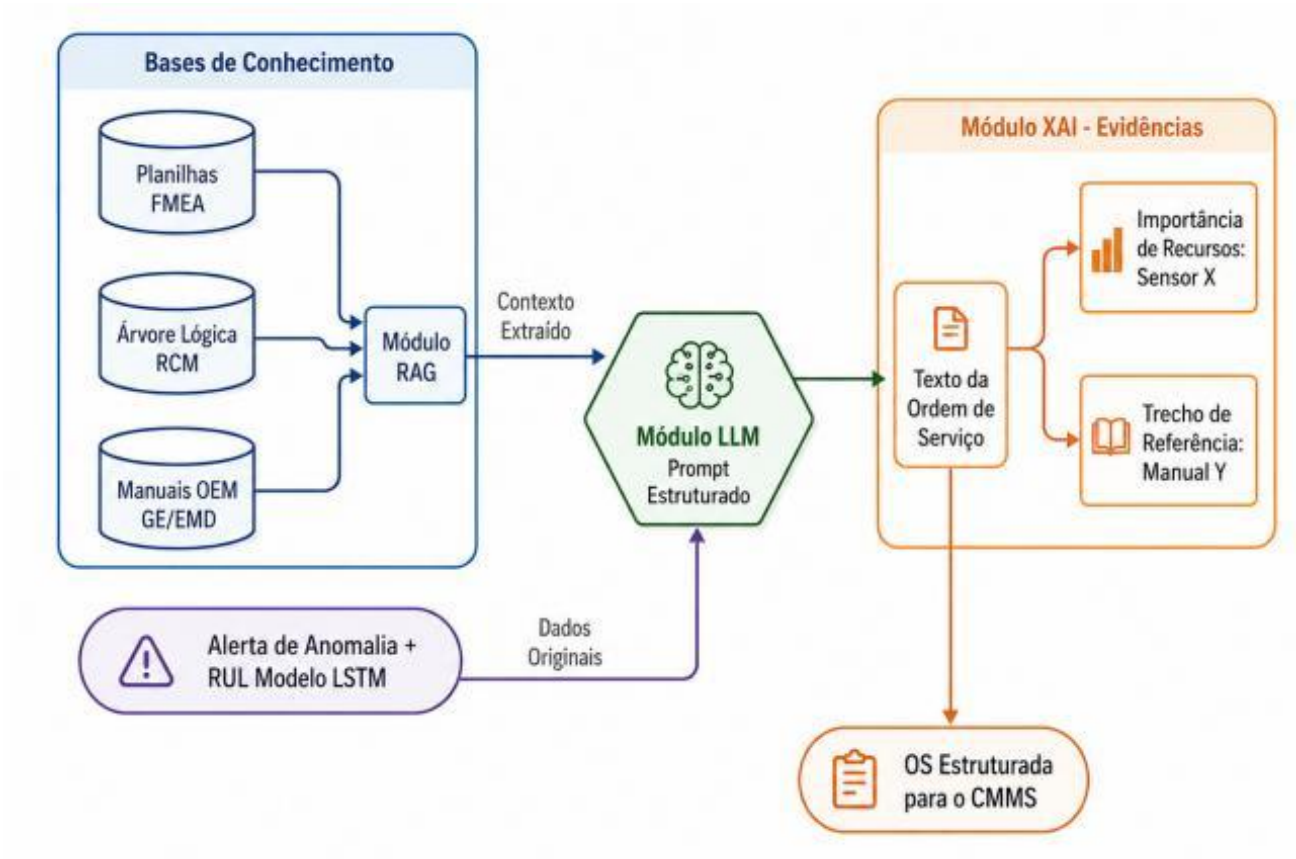


Figura 3 — Integração entre MCC, IA analítica, RAG, LLMs e XAI. Fonte: elaborado pelos autores, 2026.

MCC/RCM

lógica de confiabilidade e priorização de tarefas

FMEA/FMECA

modos, efeitos e severidade das falhas

IA analítica

prognóstico: probabilidade de falha e RUL

RAG

recuperação de evidências técnicas relevantes

LLM

síntese da recomendação e da instrução de trabalho

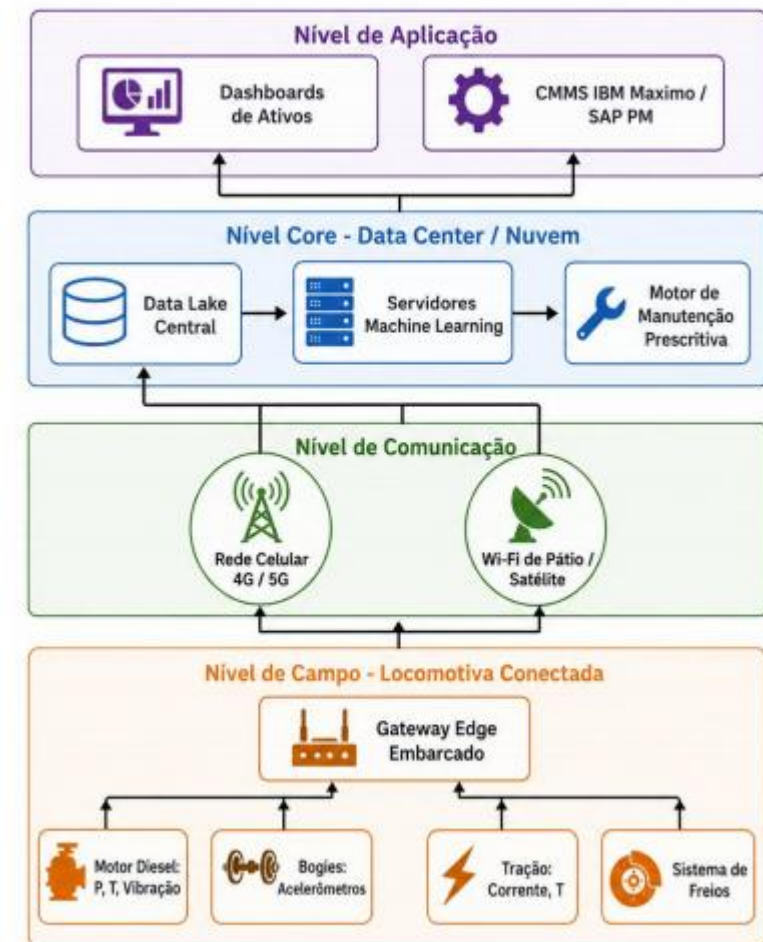
XAI

explicabilidade e rastreabilidade da decisão

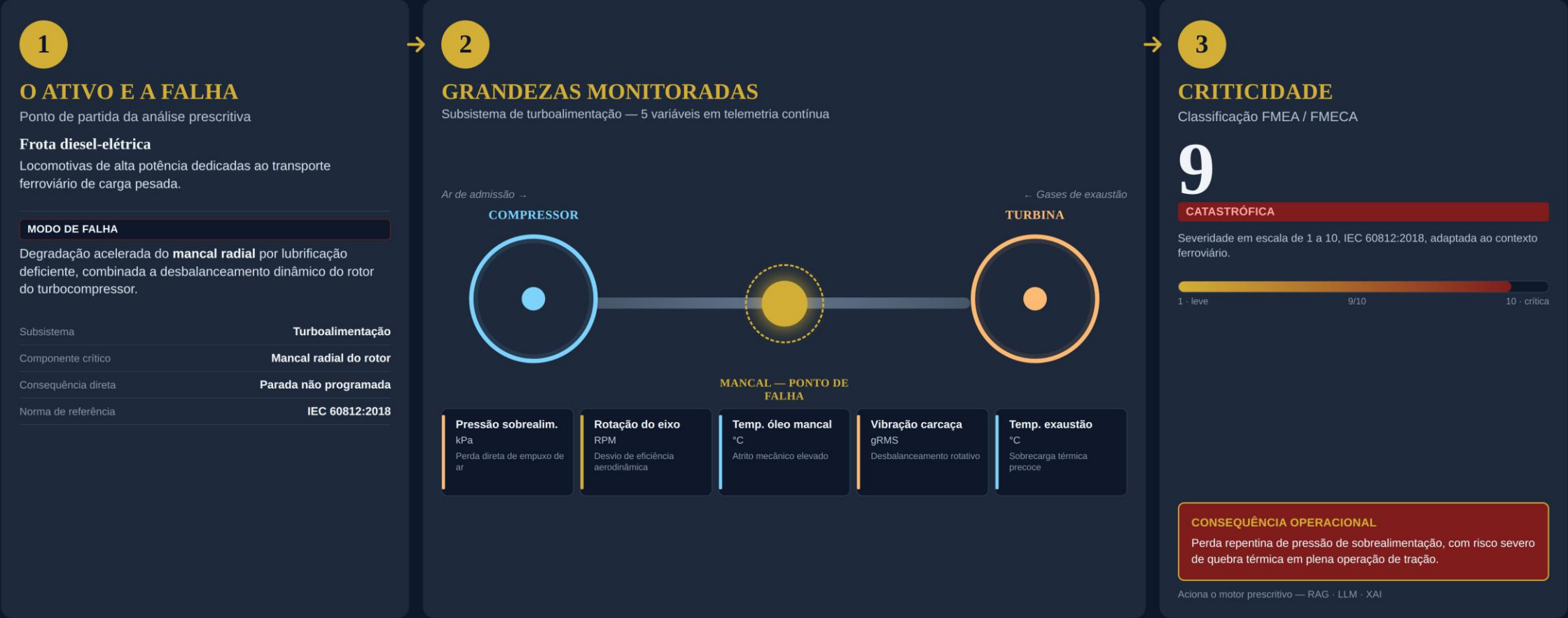
Arquitetura Railway 4.0 estruturada do gateway embarcado aos dashboards de ativos

- 1 NÍVEL DE APLICAÇÃO | Sistemas Corporativos de Gestão**
Portais de Dashboards de Ativos & Módulos CMMS (IBM Maximo / SAP PM) de ponta.
- 2 NÍVEL CORE - NUVEM / SERVIDORES | Data Center & Motores de IA**
Data Lake Centralizado, Servidores de Machine Learning e Motor de Manutenção Prescritiva.
- 3 NÍVEL DE COMUNICAÇÃO | Redes de Conectividade**
Transmissão robusta via Rede Celular 4G/5G, Wi-Fi de pátio ferroviário e contingência por Satélite.
- 4 NÍVEL DE CAMPO | Locomotiva Conectada & Edge**
Gateway Edge Embarcado + Sensores IoT (Motor: P, T, Vibração; Truques: Aceleração; Tração; Freios)

Figura 2 - Arquitetura Railway 4.0 aplicada à locomotiva.



Aplicação prática valida a arquitetura em falha de sobrealimentação de locomotivas



Fluxo prescritivo do subsistema de turboalimentação: do sensor à ação corretiva



O fluxo inteligente traduz anomalias de vibração em ordens de serviço auditáveis

O Princípio Operacional

“A Inteligência Artificial recomenda de forma detalhada.

O Engenheiro Especialista valida de forma soberana.”

Ao automatizar a pesquisa regulatória e contextualizar os alarmes de campo, a arquitetura reduz o tempo gasto na consolidação manual de informações de confiabilidade e agiliza a abertura da OS.

[1] Detecção e Envio prioritário — Borda identifica desvios de vibração carcaça e envia pacote rápido.

[2] Análise Preditiva — Modelo LSTM em nuvem estima probabilidade de falha >90% e RUL de 100h.

[3] Prescrição Inteligente — Motor RAG consulta FMEA/manuais OEM, LLM redige o plano e XAI justifica.

[4] Geração CMMS — Abertura automática de OS no IBM Maximo / SAP em modo 'Pendente de Validação'.

[5] Auditoria e Fechamento — Engenheiro ferroviário aprova, repara e retroalimenta os modelos.

A IA apoia a decisão sob rígida governança das normas EN 50126 e EN 50129

Supervisão Obrigatória **Human-in-the-Loop**

A IA atua exclusivamente como suporte de decisão. A validação do especialista humano é imperativa antes do disparo da ordem de serviço. Por não acionar sistemas de controle automáticos, a certificação SIL formal não é mandatória no escopo atual.

Rastreabilidade XAI **Evidência de Decisão**

Cada prescrição gerada acompanha a trilha analítica exata que a motivou. O engenheiro revisor rastreia de forma transparente o dado da telemetria (sensor) até o parágrafo exato do manual OEM e a linha da planilha FMEA correspondente.

Conformidade RAMS **Confiabilidade & Segurança**

Alinhamento com as normas ferroviárias fundamentais:

- EN 50126 (Ciclo RAMS)
- EN 50128 (Software de sinalização)
- EN 50129 (Conformidade de segurança)

Garantindo um fluxo auditável e de baixo risco.

PRINCÍPIO GERAL DE GOVERNANÇA

"A Inteligência Artificial recomenda e contextualiza. O Especialista valida e aprova. O sistema registra de forma imutável para auditorias de segurança."

Protocolo empírico comprova eficácia técnica e redução projetada no MTTR

87%

F1-SCORE ANALÍTICO

Alcançado na validação retrospectiva baseada em 8 cenários utilizando os datasets de referência NASA C-MAPSS FD001 e MetroPT-3 como proxies operacionais robustos.

4,10/5,0

AVALIAÇÃO LIKERT

Pontuação obtida na avaliação cega e independente de usabilidade técnica realizada por uma banca qualificada de 5 engenheiros especialistas seniores de ferrovias.

-99,7%*

LATÊNCIA DE DIAGNÓSTICO

Redução de tempo projetada do alerta na borda até a ordem de serviço contextualizada estruturada, servindo como base para projeção metodológica do MTTR.

**Nota de Rigor Científico e Tecnológico (TRL 3):*

Estes indicadores iniciais foram obtidos em bancada e ambientes de simulação (TRL 3). Os expressivos ganhos em MTBF, MTTR e disponibilidade geral representam projeções metodológicas formais e de simulação, ainda pendentes de validação contínua em frota comercial real de locomotivas ferroviárias.

Um marco na digitalização ferroviária: cinco contribuições à gestão de ativos

Avanço Científico e Operacional

Ao cruzar a precisão analítica com a flexibilidade interpretativa da Inteligência Artificial Generativa, esta arquitetura estabelece novos padrões para a manutenção de alta tecnologia.

Ela resolve o histórico gargalo em que prognósticos corretos eram travados por fluxos administrativos fragmentados e burocracia técnica.

Científica — Integração inédita da lógica rigorosa do MCC (FMEA/FMECA) com Inteligência Artificial Generativa.

Metodológica — Protocolo de validação de 4 vias (retrospectiva, prototipação RAG, Likert e tabela de evidências).

Tecnológica — Motor de recomendação imune a alucinações (XAI ancorado em RAG estruturado sobre manuais OEM).

Operacional — Redução massiva da latência decisória ferroviária e eliminação de inconsistências humanas.

Gestão de Ativos — Base estruturada para otimização contínua de RAMS, com forte reflexo projetado em MTBF/MTTR.

Caminho traçado para validação em frota real e certificação regulatória

Agenda Futura Estabelecida

- **Piloto Controlado em Frota**

Implementação de um teste de campo com 20 a 30 locomotivas comerciais por 6 meses para obter dados empíricos em frota real.

- **Expansão do Corpus RAG**

Inclusão sistemática de novas planilhas FMEA de outros subsistemas e manuais OEM de diferentes marcas de locomotiva.

- **Fine-Tuning de LLMs**

Ajuste fino de modelos de linguagem usando bancos de relatórios reais de histórico de ordens de serviço da ferrovia.

- **Certificação EN 50128**

Busca pela homologação e certificação formal de software sob as diretrizes de segurança de sistemas ferroviários EN 50128.

CONCLUSÃO

“A Inteligência Artificial não substitui o especialista humano, ela o amplia.”

Esta arquitetura viabiliza um salto qualitativo rumo à manutenção inteligente de classe mundial, unindo o rigor analítico das teorias de confiabilidade de ativos com a agilidade e contextualização oferecidas pela Inteligência Artificial Generativa.

Referências selecionadas

- MOUBRAY, J. Reliability-Centered Maintenance. 2. ed. New York: Industrial Press, 1997.
- IEC 60812:2018 — Failure modes and effects analysis (FMEA/FMECA). Geneva: IEC, 2018.
- CENELEC. EN 50126-1:2017; EN 50128:2011; EN 50129:2018. Brussels: CENELEC.
- LEWIS, P. et al. Retrieval-Augmented Generation for knowledge-intensive NLP tasks. NeurIPS, v.33, 2020.
- UMILIACCHI, P. et al. Railway 4.0: digitalisation and data-driven maintenance in the railway sector. Transp. Res. Procedia, v.14, 2016.
- VASWANI, A. et al. Attention is all you need. NeurIPS, v.30, 2017.
- GUIDOTTI, R. et al. A survey of methods for explaining black box models. ACM Comput. Surv., v.51, n.5, 2018.
- LUNDBERG, S.; LEE, S. A unified approach to interpreting model predictions. NeurIPS, v.30, 2017.
- SAXENA, A. et al. Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation (NASA C-MAPSS). IEEE, 2008.
- VELOSO, B. et al. MetroPT: a benchmark dataset for predictive maintenance. Scientific Data, v.9, 2022.
- JARDINE, A.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing CBM. Mech. Syst. Signal Process., v.20, 2006.
- OUYANG, L. et al. Training language models to follow instructions with human feedback. NeurIPS, v.35, 2022.
- CARVALHO, T. P. et al. A systematic literature review of ML methods applied to predictive maintenance. Comput. Ind. Eng., v.137, 2019.
- ISO 14224:2016 — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Geneva: ISO, 2016.

32^a SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA



32ª Semana de Tecnologia Metroferroviária · Categoria 3 · 13º Prêmio ANPTrilhos-TIC
Paulo Balaca

Obrigado!

Paulo Balaca

E-mail: paulo.balaca@usp.br



13ª Edição
Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP **TRILHOS**
Associação Nacional dos Transportadores
de Passageiros sobre Trilhos

TIC **TRENS**

 **AEAMESP**
ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS E ARQUITETOS DE METRÔ